



Bulletin de l'Institut français d'études andines

ISSN: 0303-7495

secretariat@ifea.org.pe

Institut Français d'Études Andines

Organismo Internacional

Pouyaud, Bernard; Francou, Bernard; Ribstein, Pierre; Wagnon, Patrick; Berton, Philippe  
Programa "nieves y glaciares tropicales" (NGT): resultados (1991-1996) obtenidos en Bolivia  
Bulletin de l'Institut français d'études andines, vol. 27, núm. 3, 1998  
Institut Français d'Études Andines  
Lima, Organismo Internacional

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=12627305>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica  
Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal  
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

## **PROGRAMA “NIEVES Y GLACIARES TROPICALES” (NGT): RESULTADOS (1991-1996) OBTENIDOS EN BOLIVIA**

*Bernard POUYAUD\*, Bernard FRANCOU\*, Pierre RIBSTEIN\*\*,  
Patrick WAGNON\*\*\*, Philippe BERTON\**

### **Resumen**

Desde 1991, con sus contrapartes COBEE, IHH y SENAMHI, el ORSTOM ha equipado progresivamente 2 glaciares de la Cordillera Real de Bolivia, los glaciares de Chacaltaya y Zongo. Este equipo ha permitido realizar los balances glaciológicos de los 2 glaciares y los balances hidrológico y energético del glaciar Zongo. Los principales resultados, glaciológico, hidrológico y energético, son proporcionados en esta comunicación. Se realizó un primer modelo físico del funcionamiento del glaciar Zongo, con primeros resultados que permiten comenzar un modelo más elaborado capaz de ser generalizado a otros glaciares. Extracciones de testigos de nieve y hielo a gran altura confirmaron la posibilidad de aprovechar estos verdaderos archivos climatológicos.

**Palabras claves:** *Glaciar, trópicos, Andes, cambio climático, recursos hídricos, Bolivia.*

### **PROGRAMME “NEIGES ET GLACIERS TROPICAUX” (NGT): RÉSULTATS (1991-1996) OBTENUS EN BOLIVIE**

### **Résumé**

Depuis 1991, avec ses partenaires la COBEE, l'IHH et le SENAMHI, l'ORSTOM a progressivement équipé 2 glaciers de la Cordillère Royale de Bolivie, les glaciers de Chacaltaya et Zongo. Cet équipement a permis de réaliser les bilans glaciologiques des 2 glaciers et les bilans hydrologique et énergétique du glacier Zongo. Les principaux résultats, glaciologique, hydrologique et énergétique, sont fournis dans cette communication. Un premier modèle physique du fonctionnement du glacier Zongo a été réalisé, avec des premiers résultats qui permettent d'entreprendre un modèle plus élaboré susceptible d'être généralisé à d'autres glaciers. Des carottages de neige et glace à haute altitude ont confirmé la possibilité d'exploiter ces véritables archives climatologiques.

**Mots-clés :** *Glacier, tropiques, Andes, changement climatique, ressources en eau, Bolivie.*

### **PROGRAM “SNOWS AND GLACIERS IN THE TROPICS” (NGT): PRINCIPAL RESULTS IN BOLIVIA (1991-1996)**

### **Abstract**

Since 1991, two glaciers of the Royal Cordillera of Bolivia, the glaciers of Chacaltaya and Zongo, have been equipped by ORSTOM with his partners COBEE, IHH and SENAMHI. That equipment allowed to carry out the glaciological balance of two glaciers and the hydrological and

\* IRD (ex-ORSTOM), La Paz, Bolivia.

\*\* IRD(ex-ORSTOM), Paris, France.

\*\*\* LGGE, Grenoble, France.

energetical balances of the glacier Zongo. The main glaciological, hydrological and energetical results are provided in this communication. A first physical model of the Zongo glacier's functioning has been realised. These first results allow to undertake more elaborated models, opening to be generalised to other glaciers. Drillings of snow and ice cores at high altitude confirm the possibility to exploit these real climatological archives.

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

## INTRODUCCIÓN

En 1991, la presencia simultánea en La Paz de un investigador glaciólogo y de un investigador hidrólogo permitió al departamento de Aguas Continentales (DEC) del ORSTOM lanzar en Bolivia un importante programa sobre las "Nieves y Glaciares Tropicales", que pronto fue seguido de programas hermanos en el Perú y luego en Ecuador. En esto, el ORSTOM fue enormemente ayudado por la cooperación de sus contrapartes bolivianas: la COBEE (Compañía Boliviana de Energía Eléctrica), el IHH (Instituto de Hidráulica e Hidrología) de la UMSA (Universidad Mayor de San Andrés) y el SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología). Desde sus comienzos el programa NGT Bolivia hace patente su doble ambición hidrológica y glaciológica. El glaciar del Zongo, que culmina a 6 000 m, sobre el flanco sur del Huayna Potosí (6 088 m), fue el primero en recibir una red de balizas de desplazamientos que permite hacer un balance de masa. Fue también equipado para la estimación del balance hidrológico. Luego fue el pequeño glaciar de Chacaltaya, que culmina a 5 400 m, arriba de la ciudad de La Paz, el cual fue equipado para el balance de masa. Posteriormente, a partir de 1992, progresivamente fueron instaladas estaciones meteorológicas automáticas a diversas alturas sobre el glaciar Zongo, a fin de permitir la elaboración de un balance aún más preciso del funcionamiento energético del glaciar. Las observaciones hidrológicas emprendidas en la estación río arriba del glaciar Zongo, comparadas con las observaciones hidrométricas de la COBEE permitían (Ribstein *et al.*, 1995) reconstituir los regímenes del glaciar Zongo desde 1971. Más tarde, en 1995, el dispositivo fue extendido al canal emisario del glaciar Charquini, situado frente al Huayna Potosí, con una orientación de vertiente norte, y en esta ocasión también las observaciones cruzadas del ORSTOM y de la COBEE permitieron reconstruir los regímenes de este glaciar desde 1973 (Tamayo, 1996). Cierta número de perforaciones realizadas en los casquetes glaciares de varias cumbres bolivianas (Sajama 1994, Mururata, 1995, Ancouma, 1995, Huayna Potosí, 1995) dieron prueba del buen registro de los datos isotópicos anuales y desembocaron en la perforación profunda del casquete de la cumbre del Sajama, llevada a cabo en julio de 1997 por el equipo de L. G. Thompson, con la colaboración del ORSTOM (Erard, 1996). A partir de 1997, finalmente, se realizó la extensión del modelo hidrológico del glaciar del Zongo, al conjunto del valle del río Zongo hasta la estación hidroeléctrica de Cahua (1 200 m).

Evidentemente, no es posible ofrecer en una comunicación la totalidad de los numerosos resultados obtenidos durante estos 6 años de mediciones muy densas que, en su mayoría, han sido publicadas ya sea en recepciones anuales de todos los datos de base, ya sea en tesis o artículos en el caso de síntesis específicas. Nos contentaremos, en los capítulos que siguen, con proporcionar cierta ilustración sobre los resultados obtenidos en los planos glaciológico, hidrológico y de la modelización del funcionamiento energético.

## 1. INVENTARIO DEL EQUIPO DEL GLACIAR ZONGO EN 1996

La Fig. 1 presenta el conjunto de equipos disponibles en 1996 en la cuenca de drenaje del glaciar Zongo (Berton *et al.*, 1997):

- Estación pluviométrica de la COBEE a 4 750 m (pluviómetros diario y totalizador mensual).
- Estación meteorológica a 4 750 m:
  - . Termógrafo con cinta de papel.
  - . Estación automática "MEVIS" (temperaturas seca y húmeda y humedad del aire, precipitación e intensidad, radiación solar incidente, velocidad del viento, temperaturas del suelo, evaporación).
- Estación hidrológica a 4 750 m:
  - . limnógrafo con cinta.
  - . totalizador pluviómetro bisemanal.
- Estación meteorológica automática "CAMPBELL-CR10" portátil a 5 025 m: psicrómetros ventilados a 60 y 195 cm del suelo, anemómetro-veleta a 250 cm, piranómetro y albedómetro a 110 cm del suelo.
- Estación meteorológica automática a 5 150 m:
  - . Estación automática "CAMPBELL-21X": higrómetros a 30 y 180 cm del suelo, balancémetro a 80 cm, piranómetro y albedómetro a 80 cm, veleta a 220 cm, anemómetros a 40 y 220 cm del suelo, sonda de nieve de ultrasonido, sondas termopar y platino a 30, 50, 100 y 180 cm en la nieve y el hielo.
  - . Estación automática "CAMPBELL-CR10": balancémetro a 55 cm, psicrómetros ventilados a 25 y 175 cm del suelo, sondas termopar a 20, 30, 50, 70, 100, 150 y 270 cm, sondas platino a 20, 30, 50, 70, 150 cm, en la nieve y el hielo.
- Estación meteorológica automática "CAMPBELL-CR10" portátil a 5 550 m: sonda platino de temperatura no ventilada a 200 cm del suelo, anemómetro-veleta a 250 cm, piranómetro y albedómetro a 120 cm del suelo, balancémetro a 60 cm.
- Estación meteorológica "morrena" a 5165 m: termómetro a cubierto "OMNIDATA".
- Red de pluviómetros totalizadores mensuales (morrena derecha: P1 a 5 165 m, P2 a 5 080 m; morrena izquierda: P3 a 4 945 m, río arriba estación limnimétrica: a izquierda P4 a 4 860 m, a derecha P5 a 4 855 m, Plataforma: P6 a 4750 m).

Evidentemente, las alturas por encima del suelo o las profundidades en la nieve y el hielo de los diferentes captadores evolucionan durante el año con la acumulación y la ablación. Por lo menos mensualmente se establece una crónica de los controles de frecuencia.

## 2. LOS PRINCIPALES RESULTADOS EN GLACIOLOGÍA

Para elaborar el balance glaciológico (o "balance de masa") de un glaciar, se dispone de dos tipos de mediciones según la altura y las condiciones de acumulación nevosa, que detallamos a continuación en el caso del glaciar Zongo (Francou *et al.*, 1995):

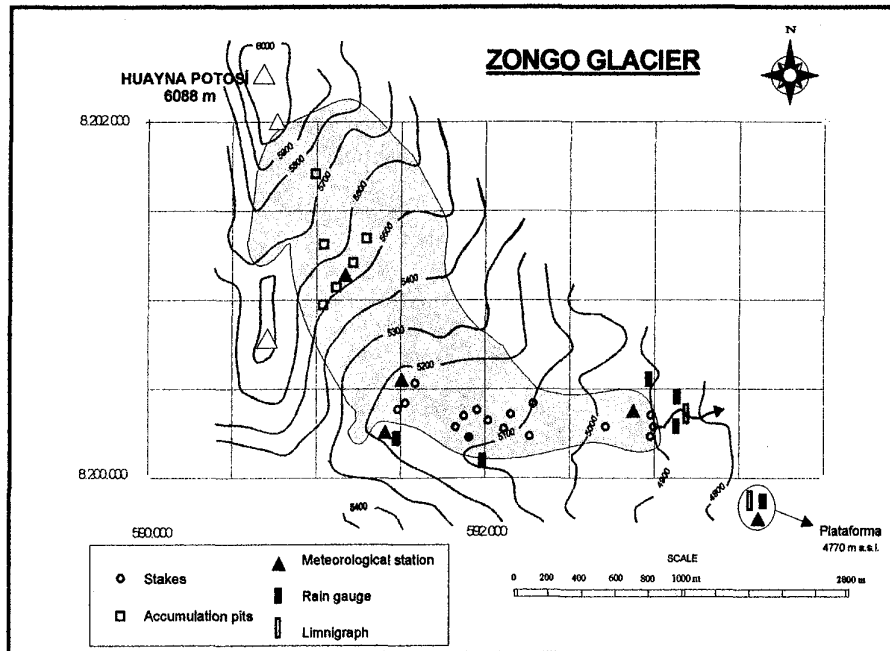
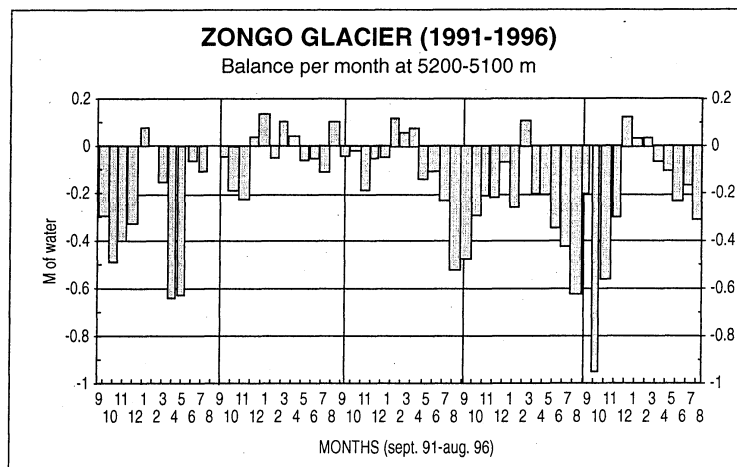


Fig. 1 - El glaciar Zongo en 1995-1996 y su red de balizas, de pozos de nieve y sus estaciones meteorológicas e hidrológica (Berton *et al.*, 1997).

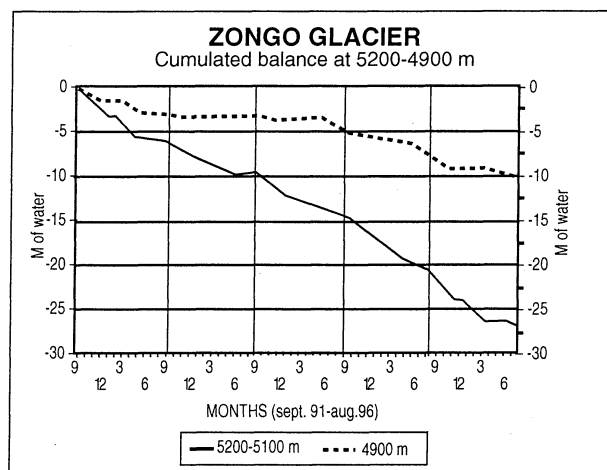
- Cuando la lectura es posible, una red de balizas de acumulación y de ablación sirve de apoyo, la cual está representada en el mapa del glaciar (Fig. 1) más o menos completo según los ciclos anuales. La utilización de esta técnica generalmente no es posible sino en la zona baja del glaciar (o zona de ablación), donde la ablación, venciendo a la acumulación, hace posible la lectura de las balizas.

- En la zona alta (o zona de acumulación), la acumulación de nieve es tal que recubre rápidamente las balizas implantadas. Entonces se evalúa la importancia de la acumulación anual a través de dos campañas de perforaciones de pozos de nieve (*accumulation pits*) y de medición densimétrica del equivalente en agua de la nieve sobre el perfil, realizadas al final de la estación de lluvias (abril 1996), luego al término del año hidrológico al finalizar la estación seca (septiembre 1996).

Para el ciclo 1995-1996 (Berton *et al.*, 1997) la red de balizas utilizada es la más completa desde el comienzo de las mediciones, ya que se empezó el ciclo en 1995 con 32 balizas en la zona de ablación repartidas, según los tramos de altura, de la siguiente manera (entre paréntesis el número de balizas utilizadas para estimar el balance a inicios de septiembre 1996): 6(5) en la planicie de la estación a 5 150 m, 18 (10) en la lengua del glaciar entre 5 150 y 5 050 m y 7 (2) hacia 4 900 m. La Fig. 2 muestra el balance de ablación mensual (septiembre 1991 a agosto 1996) para la parte alta de la zona de ablación (5 200 a 5 100 m) con un record absoluto obtenido en octubre de 1996 de cerca de un metro de ablación. La Fig. 3 muestra el balance mensual acumulado, en el mismo período, entre 5 200 y 5 100 m y a 4 900 m.



**Fig. 2 - Balance mensual del glaciar Zongo en la zona de ablación, parte alta (5 200-5 100 m) (Berton *et al.*, 1997).**



**Fig. 3 - Balance mensual acumulado en el glaciar Zongo entre 5 200 y 5 100 m y a 4 900 m (Berton *et al.*, 1997).**

En la Fig. 4 se representan los balances, en mm de equivalente-agua, de la zona de acumulación, síntesis de las observaciones de pozos de nieve en los 5 sitios de la zona superior del glaciar Zongo en abril (en claro) y en septiembre (en oscuro).

Los principales datos del balance de masa del glaciar Zongo han sido reunidos en el Cuadro 1, y corresponden a los ciclos 1991-1992 a 1995-1996 (Berton *et al.*, 1997):

**Cuadro 1 - Sumario de datos del glaciar Zongo (1991-1996) con los significados siguientes:** (1): año hidrológico, (2): bn: balance específico neto, (3): Sb: balance específico neto acumulado, (4): P: precipitación alrededor del glaciar, (5): A: ablación específica ( $A=P-bn$ ), (6): Q: flujo específico del agua (en los 2,1 km<sup>2</sup> de superficie del glaciar), ver párrafo 4 "Hidrología", (7): ELA: altitud de la línea de equilibrio, (8): AAR: porcentaje de la zona de acumulación y (9): Term.: avance o retroceso del frente del glaciar.

Año (1)	bn (2) <i>mm</i>	Sb (3) <i>mm</i>	P (4) <i>mm</i>	A (5) <i>mm</i>	Q (6) <i>mm</i>	ELA (7) <i>m.a.s.l.</i>	AAR (8) <i>%</i>	Term. (9) <i>m</i>
1991-92	-1498	-1498	920	2418	2240	5460	41	-12
1992-93	163	-1335	1060	897	1180	5100	86	+1
1993-94	-736	-2071	850	1586	1590	5300	58	-10
1994-95	-1276	-3347	850	2126	2130	5420	45	-6
1995-96	-1094	-4441	867	1961	2293	5400	50	-12

A modo de comparación, proporcionamos los mismos datos para el glaciar de Chacaltaya en el Cuadro 2 y, en las Figs. 5 y 6, las evoluciones comparadas de los balances netos específicos de los glaciares Zongo y Chacaltaya en valores anuales y acumulados.

**Cuadro 2 - Sumario de los datos del glaciar Chacaltaya (1991-1996).**

Año (1) <i>mm</i>	bn (2) <i>mm</i>	Sb (3) <i>mm</i>	P (4) <i>mm</i>	A (5) <i>m.a.s.l.</i>	ELA (7) <i>%</i>	AAR (8) <i>m</i>	Term. (9)
1991-92	-1166	-1194	-	-	5371	0	-5.0
1992-93	277	-889	-	-	5180	83	-4.7
1993-94	-1080	-1969	710	1790	5359	3	-4.6
1994-95	-1470	-3439	690	2160	5368	2	-17.6
1995-96	-1874	-5313	615	2489	5454	0	-24.4

En el glaciar Zongo, el balance neto del año 1995-1996 es netamente negativo, pero sigue siendo inferior al de 1994-1995 y sobre todo al de 1991-1992. Se observa que el período septiembre-diciembre es crucial en el valor del balance de masa anual. En cambio, en el Chacaltaya el año 1995-96 tiene el balance más negativo de la serie de observaciones. Por lo tanto, se observa para 1991-1996 una homogeneidad bastante buena entre ambos glaciares, situados alrededor de 10 kilómetros el uno del otro.

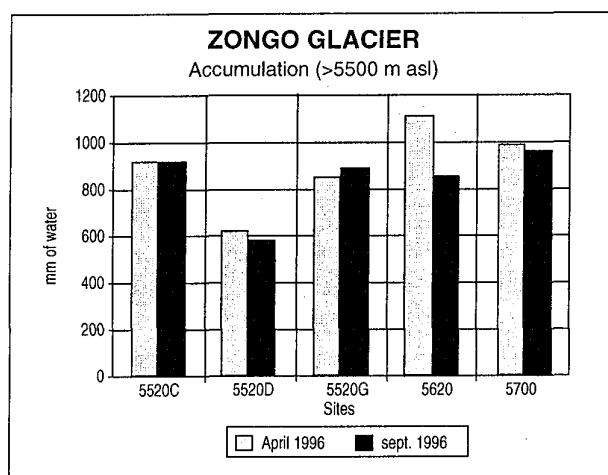
### 3. LOS PRINCIPALES RESULTADOS EN HIDROLOGÍA

#### 3. 1. La hidrología del emisario del glaciar Zongo

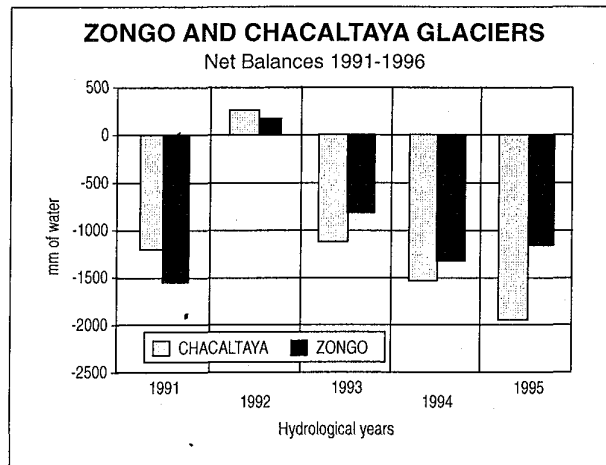
Los caudales del torrente emisario de la cuenca de drenaje del glaciar Zongo son medidos a 4 830 m por medio de una estación hidrológica con vertedero triangular instalado por la COBEE según los planos del ORSTOM. Hemos reunido en el Cuadro 3 los módulos mensuales y anuales observados desde 1991, así como los valores máximos y mínimos anuales de los caudales instantáneos con su fecha de aparición.

**Cuadro 3 - Módulos mensuales y anuales, caudales instantáneos máximo y mínimo (en l.s<sup>-1</sup>) y caudales específicos anuales (en l.s<sup>-1</sup>.km<sup>2</sup>) entre 1991 y 1996.**

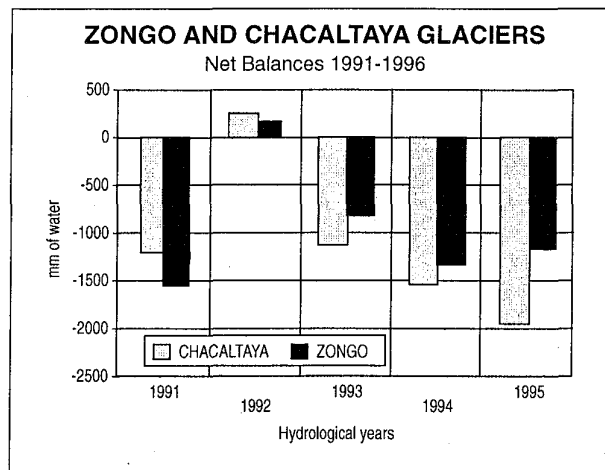
	1991-92	1992-93	1993-94	1994-95	1995-96
Septiembre	88,1	67,8	52,2	147	154
Octubre	230	152	84,9	179	387
Noviembre	274	234	187	168	350
Diciembre	342	201	295	285	281
Enero	192	114	207	242	218
Febrero	185	114	176	289	155
Marzo	243	116	126	137	156
Abril	194	66,8	81,9	134	95
Mayo	179	65,1	62,7	84	82
Junio	52,7	42,2	61,7	68	54
Julio	28,2	29,2	47,2	71	43
Agosto	32,8	31,3	132,3	130	89
<b>Módulos</b>	<b>170,1</b>	<b>102,8</b>	<b>126,2</b>	<b>161,2</b>	<b>172,0</b>
Caudales Específicos	57,3	34,6	42,5	54,3	57,9
Maxi instantáneo	929	1070	793	1050	1020
Fecha	22/12/91	20/12/92	7/12/93	6/12/96	15/11/95
Mini instantáneo	9,7	7,7	8,8	23,9	18,3
Fecha	22/08/92	17/07/93	9/09/94	19/07/95	10/08/96

**Fig. 4 - Síntesis del balance de acumulación en abril (en claro) y en septiembre (en oscuro) (Berton *et al.*, 1997)**





**Fig. 5 - Evolución de los balances netos específicos del glaciar Zongo y del glaciar Chacaltaya (Berton *et al.*, 1997).**



**Fig. 6 - Evolución de los balances netos específicos acumulados del glaciar Zongo y del glaciar Chacaltaya (Berton *et al.*, 1997).**

La variación diaria importante del caudal es evidentemente la característica principal de una cuenca de drenaje con muchos hielos. La variabilidad a escala del año depende directamente de los principales parámetros generadores de flujos: es decir sin duda alguna de las precipitaciones (al menos para la pequeña parte no glaciar de la cuenca de drenaje), pero mucho más de las temperaturas y humedad del aire y de la radiación solar incidente, que condicionan la fusión del hielo.

En estas condiciones, no es sorprendente constatar que en estación de lluvias, que es también la estación cálida, se observan módulos diarios del orden de  $200 \text{ l.s}^{-1}$  (con picos que pasan de los  $700 \text{ l.s}^{-1}$ ), pero también en los períodos de "estiaje", cuando el caudal no pasa de los  $100 \text{ l.s}^{-1}$ . Esta importante variabilidad es característica de la estación de lluvias en que las condiciones meteorológicas (temperatura, humedad, radiación) y la naturaleza de la superficie del glaciar (albedo) son rápidamente cambiantes a escala de algunos días. Además, muchos "escenarios" meteoglaciológicos contradictorios pueden conducir a caudales idénticos. Es finalmente el período en que la amplitud diaria es más grande, alcanzando los  $500 \text{ l.s}^{-1}$ .

En estación seca, que también es la estación fría, por el contrario los caudales observados son los más bajos del año, con módulos del orden de los  $50 \text{ l.s}^{-1}$  y picos del orden de los  $150 \text{ l.s}^{-1}$ . La regularidad de los caudales a escala de varios días muestra la estabilidad habitual de las condiciones meteorológicas, y la amplitud diaria es de  $50 \text{ l.s}^{-1}$  en promedio.

Confirmando lo que antecede, se observa que la temporalidad de los caudales es bastante diferente a la de las precipitaciones: en general, hasta cerca del mes de noviembre, caudales y precipitaciones evolucionan en sentido inverso, ya que el principal "motor" de los caudales sigue siendo el deshielo causado por una radiación neta fuerte y las temperaturas que se elevan; la ablación fuerte conduce a una superficie sucia del glaciar y por lo tanto un albedo muy débil. Las caídas de nieve aumentan provisionalmente el albedo y la fuerte nebulosidad que las acompaña bloquea la radiación solar incidente, importante fuente de energía utilizada normalmente por la fusión. A partir de diciembre, en cambio, las precipitaciones vuelven a ser un factor importante de las crecidas. En el conjunto del año, precipitaciones y caudales diarios son completamente descorrelacionados ( $r^2 = 0,018$ ). Se verifica que en régimen nivoglaciario las precipitaciones no pueden por sí mismas explicar el caudal y que conviene entonces asociarles otros parámetros.

El conocimiento de los caudales en la estación hidrométrica de la salida y de las precipitaciones en el glaciar y su cuenca de drenaje por medio de la red de totalizadores alrededor del glaciar, permite establecer un balance hidrológico del conjunto de la cuenca (que comprende aproximadamente  $2,1 \text{ km}^2$  de glaciar y  $0,9 \text{ km}^2$  de morrena), si se plantea la hipótesis de que la morrena restituye las precipitaciones con un coeficiente de flujo de 0,8. Entonces se puede deducir el balance de masa del glaciar (sin poner en cuenta la sublimación, que es un valor mínimo). Los resultados figuran en el Cuadro 4.

**Cuadro 4 - Balance hidrológico desde 1991.**

	Caudal ( $\text{l.s}^{-1}$ )	Precipitación anual (mm)	Aporte morrena ( $\text{l.s}^{-1}$ )	Aporte glaciar ( $\text{l.s}^{-1}$ )	Aporte glaciar (mm)	Balance de Masa (sin subli- mation) (mm)
1991-92	170	920	21	149	2237	1317
1992-93	102,7	1060	24,2	78,5	1179	119
1993-94	125,2	850	19,4	105,8	1589	739
1994-95	161,2	850	19,4	141,8	2131	1281
1995-96	172,0	867	19,7	152,3	2293	1426

Estas cifras hay que compararlas con las del cuadro 1 del balance de masa obtenido por el balance glaciar. En 1995-1996, las cifras están bastante alejadas (1 426 mm en lugar de 1 094 mm). Para encontrar este valor, suponiendo exacto el caudal anual desaguado a la salida, habría ya sea que aumentar considerablemente las precipitaciones, ya sea (con una incidencia mínima) el aporte de la morrena (éste limitado por el valor 1 del coeficiente de flujo). Pero estas cifras se explican también, por el hecho de que la ablación por sublimación no está tomado en cuenta en ese enfoque del balance de masa.

Una correlación múltiple del caudal con los parámetros “precipitaciones”, “temperatura del aire a 5 150 m (medida alta)”, “radiación neta” y “diferencia entre radiación solar incidente y reflejada ( $SW\varnothing - SW\neq$ )” da resultados interesantes. Para los años 1993-1994 y 1994-1995 se han obtenido coeficientes de correlación  $r^2$  de 0,40 y 0,56. Para 1995-1996, el coeficiente de correlación  $r^2$  es de 0,57 (361 puntos). El hecho de añadir en la correlación la radiación solar extraterrestre aporta una ganancia substancial a la correlación, ya que el coeficiente de correlación  $r^2$  pasa a 0,72, lo que prueba que la acción de este término, en la temporalidad por principio muy marcada sobre el valor de los caudales, es determinante. Pero la correlación, en la Fig. 7, presenta insuficiencias: los fuertes valores observados de los picos de octubre no son restituidos; los picos negativos reconstituídos de junio y julio corresponden a condiciones climáticas particulares de algunos días, en que se tiene una precipitación nevosa (de ahí el albedo elevado), con una temperatura diaria bastante baja ( $-4,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) y una nebulosidad nula.

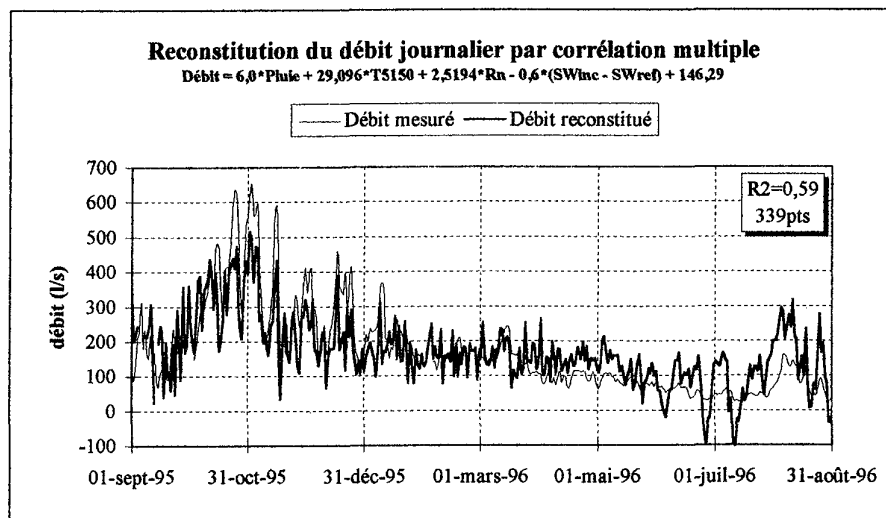


Fig. 7 - Reconstitución de los caudales a partir de una correlación con parámetros característicos (Berton *et al.*, 1997).

Únicamente un modelo físico es capaz de proporcionar mejores resultados con la toma en cuenta de la realidad física de los fenómenos en causa (cf. párrafo 5).

### 3. 2. Comparación entre los aportes de cuencas de drenaje con diferentes porcentajes de áreas con glaciares

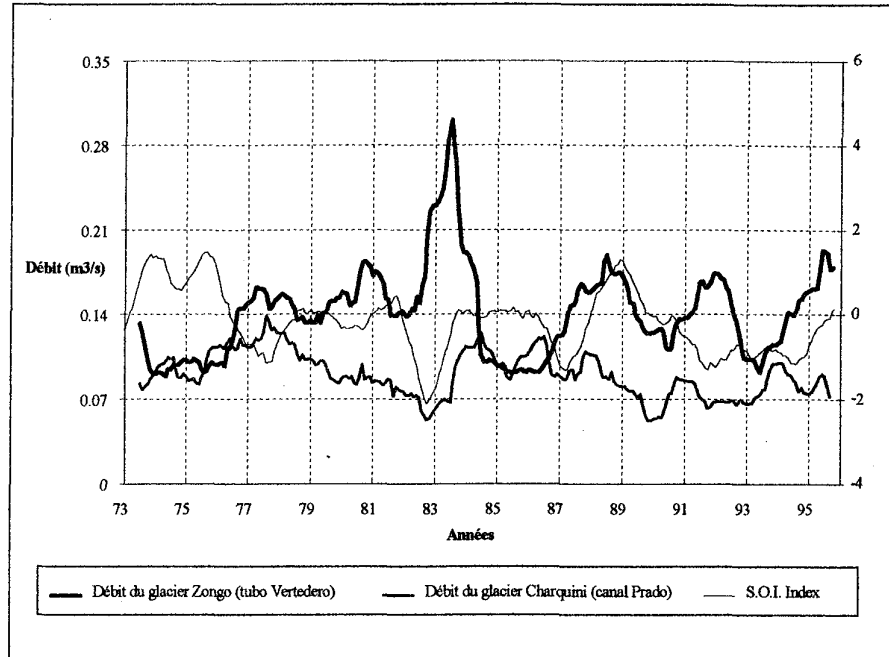
La comparación de los caudales observados en la estación hidrométrica del glaciar Zongo, con las alturas de agua observadas por la COBEE desde 1971 en el canal "Vertedero", que recoge estas aguas glaciares, ha permitido la reconstitución de los caudales medios mensuales (en l.s<sup>-1</sup>) producidos por el glaciar Zongo desde entonces (Ribstein *et al.*, 1995).

Con la misma idea, se instaló un limnógrafo en 1995 sobre el canal "Prado", que drena las aguas de una cuenca de drenaje netamente menos cubierta de hielo, la de Charquini, y lo que es más, con una orientación diferente (norte) a la de la cuenca de drenaje del glaciar Zongo (sur-sureste). La comparación de las observaciones con el limnógrafo con las antiguas observaciones hidrométricas de la COBEE ha permitido, en este caso también, reconstituir los aportes de la cuenca de drenaje Charquini por el canal Prado desde 1973 (Tamayo, 1996; Curinier, 1995). El cuadro 5 da los porcentajes de áreas con glaciares de las cuencas de los glaciares Zongo (canal Vertedero) y Charquini (canal Prado) y su evolución de mayo de 1956 a agosto de 1987.

**Cuadro 5 - Retroceso de áreas con glaciares en diferentes épocas para las cuencas de los glaciares Zongo y Charquini.**

Sub cuenca	Área Total		Áreas con glaciares							
			Mayo 56		Julio 75		Junio 83		Agosto 87	
	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%
Gl. Zongo	3,336	100	2,830	85	2,637	79	2,571	77	2,474	74
Gl. Charquini	2,988	100	1,910	64	0,454	15	0,336	11	0,313	11

El trazado, en la figura 8, de los módulos mensuales reconstituidos de los canales Vertedero y Prado de 1973 a 1996 permite hacer una comparación muy significativa entre el comportamiento hidrológico de las dos cuencas, sobre todo si se aumenta en la figura los valores del índice S.O.I. (South Oscillation Index), obtenido como la diferencia de presión existente entre Tahiti y Darwin (los valores negativos del índice caracterizan la circunstancia de fenómenos ENSO-El Niño). Para mostrar el efecto de temporalidad, todas las variables de la figura 8 corresponden a medias móviles sobre 12 meses. Las dos cuencas de drenaje estudiadas se diferencian principalmente por el porcentaje de cobertura glaciar existente en cada uno de ellos, ya que la cuenca del glaciar Zongo drenada por el tubo Vertedero comprende 74% de cobertura glaciar, contra solamente 11% en la cuenca del glaciar Charquini, drenado por el canal Prado, es decir casi 7 veces menos.



**Fig. 8 - Media móvil sobre 12 meses de caudales del glaciar Zongo (tubo Vertedero) y del glaciar Charquini (canal Prado) y del índice S.O.I. (Tamayo, 1996).**

Es evidente que en caso de ausencia de precipitaciones y de aumento de la temperatura (lo que caracteriza los eventos ENSO-El Niño, particularmente el evento "del siglo" de 1983), la parte de la fusión de nieve y de hielo en el flujo es proporcionalmente mayor para la cuenca del glaciar Zongo que para la del glaciar Charquini, lo que se verifica en 1983 en la figura 8 por caudales excepcionalmente fuertes para el Zongo y excepcionalmente débiles para Charquini. Los funcionamientos hidroglaciológicos de las dos cuencas se muestran opuestas: por un lado, las fuertes laderas de la cuenca del Charquini y sus suelos impermeables y rocosos no le permiten poder contar con el drenaje de una reserva de agua del suelo suficiente para equilibrar un déficit pluviométrico, que no compensa el deshielo del muy reducido glaciar Charquini; por otro lado, las considerables reservas de nieve y de hielo del glaciar Zongo proporcionan aguas de deshielo en abundancia. El mismo estudio (Tamayo, 1996) muestra además que desde 1973 los caudales del canal Prado indican una tendencia muy clara a la baja, tanto en lo que se refiere a los máximos y los mínimos como a los promedios (lo que traduce el agotamiento de las reservas glaciares de la cuenca: de 64% a 11% entre mayo de 1956 y agosto de 1987), mientras que los mismos parámetros para el canal Vertedero traducen una gran estabilidad (las reservas glaciares del glaciar Zongo son aún considerables).

Una correlación múltiple entre los caudales promedios mensuales procedentes de las cuencas de los glaciares Zongo y Charquini y las medias mensuales de las precipitaciones ( $P$ : mm), temperaturas ( $T$ :  $^{\circ}\text{C}$ ) y radiación extraterrestre ( $R_d$ :  $\text{W.m}^{-2}$ ) conduce a las mismas conclusiones:

Canal Prado (glaciar Charquini):  $Q_{med} = 6,90 \cdot T + 0,55 \cdot P + 0,08 \cdot R_d - 25,18$ ;  $r^2 = 0,63$ ,  $N = 244$

Tubo Vertedero (glac. Zongo):  $Q_{med} = 19,05 \cdot T + 0,89 \cdot P - 0,23 \cdot R_d - 324,05$ ;  $r^2 = 0,63$ ,  $N = 244$

Estos resultados, elegidos entre muchos otros, muestran todo el interés que reviste este tipo de estudio para definir el comportamiento futuro de los glaciares andinos y el futuro de los recursos hídricos con los que se puede contar.

#### 4. LOS RESULTADOS "ENERGÉTICOS": HACIA UNA MODELIZACIÓN FÍSICA DE LOS GLACIARES TROPICALES

Sería tedioso presentar todos los resultados obtenidos de las estaciones meteorológicas en las diversas altitudes. Vale más exponer por qué estos estudios fueron emprendidos, luego desarrollados, y lo que ya se obtuvo. En efecto, todos estos datos son elementos necesarios para la comprensión del funcionamiento del glaciar Zongo y deben *in fine* permitir el desarrollo de un modelo físico de reconstitución de los caudales a la salida del glaciar, incluyendo enfoques hidrológicos, meteorológicos y micrometeorológicos. El interés de un modelo así es triple: explicar el funcionamiento físico del glaciar (producción de agua de deshielo y transferencia a la salida), reconstituir las lagunas existentes, simular el comportamiento del glaciar según ciertos escenarios de recalentamiento y de enfriamiento o sequía.

Por lo tanto, se eligió construir un modelo sectorizado, siendo el glaciar compartido en partes de altura. Para cada tramo y para cada paso de tiempo se efectúa un balance energético cuyo resultado final es la producción de agua de deshielo. Así obtenemos para cada tramo y paso de tiempo un caudal de deshielo que enseguida debe ser conducido hasta la salida. La suma de los caudales de cada tramo será comparada (y calada) en caudales observados a la salida.

Este enfoque supone realizar la ecuación del balance energético completo en la interface "aire/nieve o hielo". Se tuvo que plantear cierta cantidad de hipótesis simplificadoras para permitir los cálculos, sabiendo que el número de estaciones meteorológicas limita el conocimiento preciso del balance energético en algunos puntos solamente, y que, por lo tanto, hay que generalizar estos datos al conjunto de las partes de los glaciares. Las principales dificultades fueron encontradas precisamente en la generalización en las diversas altitudes de los perfiles de las temperaturas "aire/nieve y hielo", del albedo, de la nebulosidad y de las radiaciones. La primera versión del modelo (Rigaudière *et al.*, 1995) se basa en una sectorización en 8 partes del glaciar, y el modelo fue calado en el período octubre 1993 a agosto 1994 y validado en los meses de septiembre y octubre 1994.

Si los primeros resultados se mostraron alentadores, rápidamente se hizo claro que el modelo, partiendo de datos de entrada meteorológicos de débil temporalidad, no podía sólo y sin "forzamiento" exterior reconstituir la fuerte temporalidad de los datos de salida que son los caudales a la salida. Asimismo, se debieron elaborar parámetros de apuntalamiento para cada parte, lo que resta mucho a las posibilidades de generalización del modelo.

Actualmente, en el marco de una tesis común entre LGGE Grenoble y ORSTOM, se implementa una versión más elaborada del modelo, que se sustentará al mismo tiempo en la recolección de datos obtenidos desde hace dos años y en nuevos enfoques conceptuales, apoyándose principalmente en una mejor definición de los perfiles de temperatura en el aire y la nieve o hielo en su interface, así como de los perfiles de viento y de humedad relativa del aire. Además la orientación y las laderas del glaciar serán tomadas en cuenta por el modelo a fin de restituir directamente la temporalidad por integración del ángulo de incidencia de la radiación solar. Pero pasada esta fase inicial de un modelo físico preciso, habrá también que saber extraer un modelo simplificado más sólidos, más susceptible de ser generalizado a otros glaciares tropicales.

## 5. CONCLUSIÓN: EL FUTURO DEL PROGRAMA NGT EN BOLIVIA

Ya hemos presentado, entre los objetivos a corto plazo, la constitución de un modelo más perfeccionado del funcionamiento del glaciar Zongo, y de modelos simplificados derivados adaptables a otros glaciares. Asimismo, están en curso publicaciones de síntesis sobre el glaciar Chacaltaya (Francou, *et al.*, en prensa). Al terminar deseamos también equipar para el balance energético a este pequeño glaciar, en rápida evolución, que debería ser el glaciar boliviano de referencia, manejado por nuestras contrapartes del IHH y del SENAMHI, al terminar los estudios más avanzados del glaciar Zongo.

Pero también tenemos como objetivo la realización de una modelización final del conjunto de los 500 km<sup>2</sup> de la cuenca del río Zongo, con un funcionamiento glaciar y nivopluvial, explotados por las instalaciones COBEE. Al integrar a la vez las partes glaciares y pluvionivales de la cuenca, este modelo será un instrumento extraordinario para comprender el futuro hidrológico de la cuenca cuando el recalentamiento global en curso haya reducido las superficies glaciares, imponiendo revisiones desgarradoras al concepto de su equipo hidroeléctrico y su modo de explotación.

Misiones realizadas en el sur Lípez boliviano (y su equivalente chileno) nos han mostrado, por otro lado, la existencia de importantes sistemas glaciares originales los glaciares rocosos cuya importancia en el funcionamiento hidrológico activo actual es ciertamente muy grande, aunque nos sepamos exactamente cifrarla. En esta vía el glaciar rocoso del costado sur del volcán Caquella será equipado en un primer tiempo con una estación meteorológica automática brasilera, teletransmitida por satélite, proporcionada por el SENAMHI, cuando sean "marcados" peñones en la superficie del glaciar para seguir su dinámica. El instrumento de la teledetección, por imágenes satelitarias o clásicas, también será empleado con este mismo fin de inventario y de comprensión de los mecanismos de la dinámica.

La perforación profunda del Sajama, que actualmente se está realizando, debería ser seguida por otras perforaciones en otras cimas bolivianas, y el ORSTOM piensa tomar una parte cada vez más activa en la interpretación de los testigos obtenidos de estas perforaciones.

Así, Bolivia, donde fue concebido el programa NGT, habrá sido la cuna del renacimiento y del desarrollo de estudios glaciológicos en los Andes tropicales.

### Referencias citadas

- BERTON, P., WAGNON, P., FRANCOU, B., POUYAUD, B. & BALDIVIESO MONTAÑO, H., 1997 - Mesures météorologiques, hydrologiques et glaciologiques sur le glacier de Zongo, année hydrologique 1995-96, 119p.; La Paz: ORSTOM, rapport de campagne.
- CURINIER, E., 1995 - Importance du recouvrement glacier sur les régimes hydrologiques : étude du bassin versant du lac Zongo, 46p.; La Paz: ORSTOM. Rapport de stage de 3ème année, Institut des Sciences de l'Ingénieur de Montpellier, février-juin 1995.
- ERARD, O., 1996 - 20 ans de données climatiques dans la stratification des glaces du sommet du Nevado Sajama (6542 m), Bolivie, 150p.; Saint Etienne: École des Mines de Saint Etienne, Rapport de stage de 3ème année.
- FRANCOU, B., RIBSTEIN, P., SARAVIA, R. & TIRIAU, E., 1995 - Monthly balance and water discharge of an inter-tropical glacier: Zongo Glacier, Cordillera Real, Bolivia, 16°S. *J. Glaciol.*, **42**(137): 61-68.
- RIBSTEIN, P., TIRIAU, E., FRANCOU, B. & SARAVIA, R. 1995 - Tropical climate and glacier hydrology: a case study in Bolivia. *J. Hydrol.*, **165**: 221-234.
- RIBSTEIN, P., FRANCOU, B., COUDRAIN-RIBSTEIN, A. & MOURGUIART, P. (ed.), 1996 - Eaux, glaciers et changements climatiques dans les Andes Tropicales. *Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines*, **24**(3), 714p.; Lima: IFEA.
- RIBSTEIN, P. & FRANCOU, B., 1994 - A 20-years reconstruction of glacie mass balance by hydrology on a intertropical glacier, the Zongo glacier, Andes of Bolivia, 16°S. A record of ENSO events. Session HS4: Snow melt and glacier runoff. Hydrology, environment and development in mountainous regions. European Geophysical Society (EGS) XIX Assembly. Grenoble. 1994/04.4.
- RIGAUDIÈRE, P., RIBSTEIN, P., FRANCOU, B., POUYAUD, B. & SARAVIA, R., 1995 - *Mesures météorologiques, hydrologiques et glaciologiques sur le glacier Zongo. Année hydrologique 1993-1994*, 69p.; La Paz (Bolivie): ORSTOM.
- RIGAUDIÈRE, P., RIBSTEIN, P., FRANCOU, B., POUYAUD, B. & SARAVIA, R., 1995 - Un modèle hydrologique du Glacier Zongo, 90p.; La Paz - Bolivie: ORSTOM, informe ORSTOM Bolivie.
- TAMAYO, W., 1996 - Influencia de los glaciares en el comportamiento hidrológico de cuencas de alta montaña, estudio de casos en Perú y Bolivia. Mémoire, Ingénieur Civil, Universidad Nacional de Ancash «Santiago Antunez de Mayolo», Huaraz, Perú, 151p.
- WAGNON, P., RIBSTEIN, P., FRANCOU, B., POUYAUD, B. & VALDIVIESO, H., 1995 - Mesures météorologiques, hydrologiques et glaciologiques sur le Glacier Zongo. Année hydrologique 1994-1995, 82p.; La Paz: ORSTOM, informe n° 49.