



Les glaciers tropicaux andins : remarquables laboratoires naturels

Nouvelle station météorologique
automatique "glacier" (à 200 m)
et le glacier Zongo du Huayna
Potosí, Bolivie, Cordillère Royale.
Photo Bernard Pouyaud.

**La "Pyramide" (6 000 m),
sommets mythiques des
andinistes, dominant
le glacier Artesonraju.
Pérou, Cordillère
Blanche.**

.....

La grande sensibilité des glaciers aux évolutions climatiques est connue depuis longtemps et les importantes variations séculaires des glaciers des zones tempérées ont été très tôt décrites⁽¹⁾. Elles ont notamment permis la mise en évidence du Petit Age de Glace en Europe et en Amérique du Nord. Les glaciers tropicaux, par contre, plus difficilement accessibles, étaient beaucoup moins bien connus. Quelques travaux récents ont montré leur extrême sensibilité à des changements climatiques intervenant à l'échelle de quelques décennies seulement. Ce sont donc d'extraordinaires marqueurs de ces changements. Depuis 1991, l'Orstom a entrepris, avec ses partenaires boliviens, péruviens et équatoriens, la mise en place d'un réseau d'observations glaciologiques.

(1) Emmanuel Le Roy Ladurie. "Histoire du climat depuis l'an mil"
Flammarion Paris, 1967



**Vue plongeante,
depuis le glacier
Artesonraju (5 200 m),
sur la laguna
Artesonraju (4 600 m).
Pérou, Cordillère
Blanche.**



Photo Bernard Puygast

La zone tropicale andine d'altitude se révèle a priori comme un remarquable laboratoire naturel, permettant de suivre les évolutions climatiques générales :

- à court terme, la variabilité climatique de l'aire andine tropicale, marquée par des événements singuliers majeurs comme les phénomènes ENSO (El Niño Southern Oscillation), peut être caractérisée, à l'échelle annuelle, par le comportement de ces glaciers : les épisodes ENSO se traduisent, en altitude, par une hausse des températures moyennes et une baisse des précipitations qui agissent toutes deux négativement sur le bilan des glaciers, déclenchant ou accélérant leur recul,

- à moyen terme, l'augmentation prévue de la température atmosphérique et océanique de la ceinture tropicale devrait se traduire par une augmentation de l'évaporation et de l'humidité relative, accompagnée d'une activation des transferts de chaleur, dont la conséquence devrait être la généralisation du recul glaciaire, déjà bien observé lors des phénomènes ENSO.

Ce processus est sans doute déjà amorcé, si l'on se fonde sur l'exceptionnelle rapidité de la déglaciation observée en haute montagne tropicale, partout dans le monde, depuis le début des années 80.

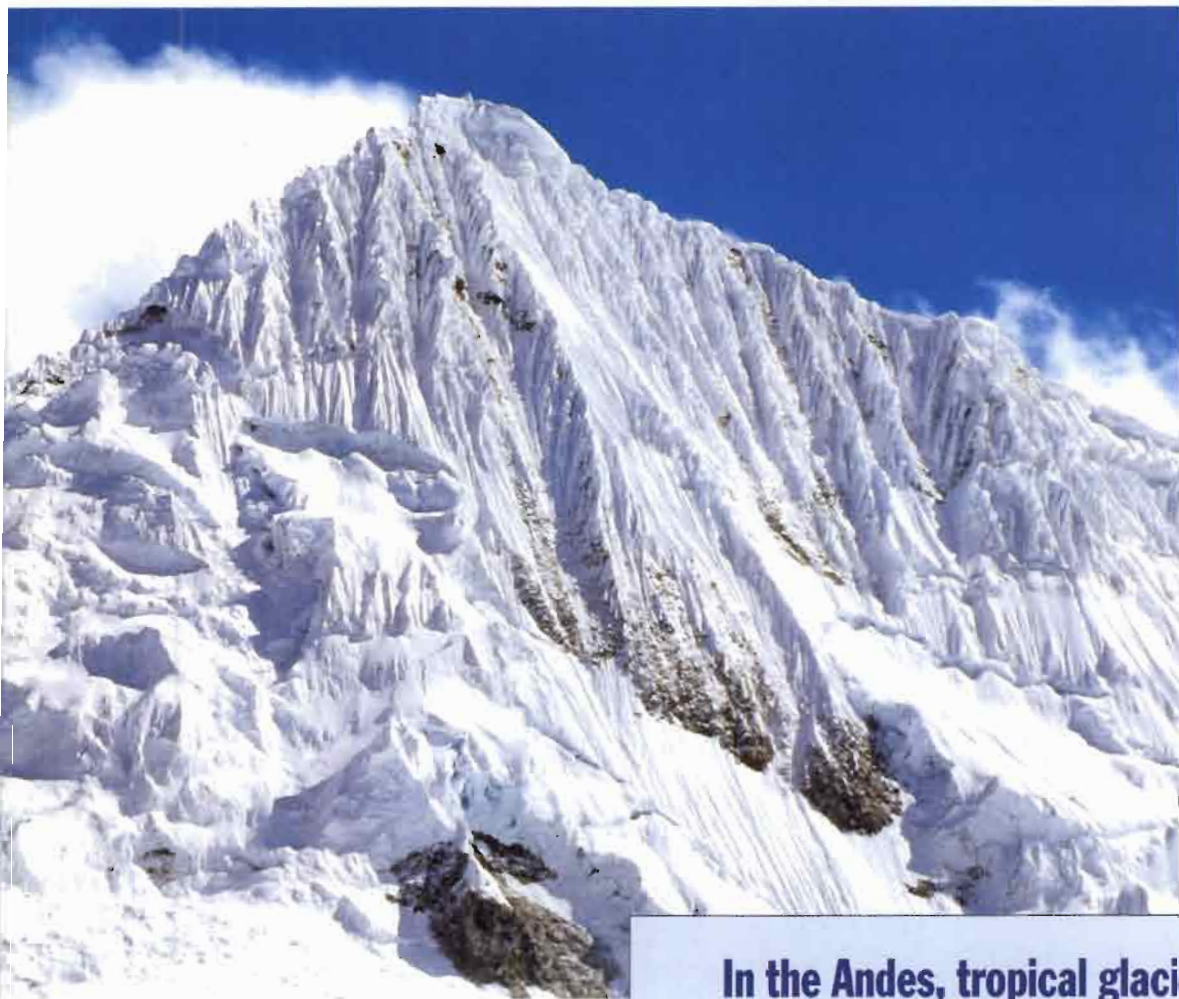


Photo Bernard Frençois.

Forage avec le "SIPRE" à 5 500 m sur le glacier Artesonraju. Pérou, Cordillère Blanche.

Mais les glaciers tropicaux andins ont, de plus, une importance économique considérable. Ce sont leurs eaux de fonte qui alimentent en eau potable et industrielle les principales capitales (La Paz, Quito, Lima) et quelques grandes villes andines. Ils fournissent une grande part de l'électricité consommée par les pays andins. L'eau d'irrigation, indispensable surtout sur la façade pacifique particulièrement aride, est le plus souvent d'origine glaciaire. Les glaciers jouent actuellement le rôle de gigantesques réservoirs, tamponnant la variabilité climatique intra et inter-annuelle.

Enfin, les glaciers tropicaux andins font courir des risques considérables aux populations voisines : risques d'avalanches glaciaires, induites ou non par des tremblements de terre ou des éruptions volcaniques et surtout vidanges catastrophiques des très nombreux lacs naturels glaciaires des Andes. Depuis 50 ans, ce sont plusieurs dizaines de milliers de morts qui sont, en Bolivie, en Equateur, et surtout en Colombie et au Pérou, directement imputables aux glaciers andins tropicaux.

Depuis au moins deux décennies, les glaciers tropicaux andins sont dans une intense phase de retrait qui va en s'accéléralant. Les réserves d'eau qu'ils constituent n'apparaissent déjà plus comme des ressources

In the Andes, tropical glaciers tell tales of climate change

Glaciers are extremely sensitive to climate change, and glacier ice stores a precious record of past change. However, tropical glaciers have been studied far less than those in the temperate zone, and southern hemisphere glaciers far less than those in the north. The glaciers of the Andes were therefore ripe for study and, as they are scattered roughly along a north-south axis, they can also give a useful latitudinal range of data.

Since 1991, Orstom has been working with Bolivian, Peruvian and Ecuadorian scientists to set up and run a network of glaciological monitoring stations in the Andes.

The standard instrument array measures accumulation and ablation, flow rates downstream of the glaciers (hydrologic balance), rainfall and snowfall, surface velocity, fluctuations in the position of the glacier snout, and monthly readings of the main weather parameters. Existing data have also been brought into play, including some records that go back over more than a century.

The short-term trends examined concern the periodic impact of ENSO (El Niño / Southern Oscillation) which,

at altitude, results in higher temperatures, lower precipitation and glacier retreat.

As regards medium-term trends, global warming should mean increased evaporation, increased relative humidity, more active heat transfer, and, again, glacier retreat.

As to long-term patterns, deep ice cores should give clues to climate change over the past 15-20,000 years.

The findings so far confirm that these glaciers have been shrinking fast for at least twenty years now and that this trend is accelerating. Inevitably, this implies drastic environmental changes, greatly increased runoff and considerable danger to the valley populations from meltwater floods. The need for regional, inter-state management of the Andean water resources will become all the more pressing as the smaller glaciers disappear and the overall water store shrinks.

The Andean monitoring network is an important part of the global climate watch, but it cannot continue without additional financial and human resources - more than the existing partners can provide.



Photo Bernard Pivroux

Le front du glacier Zongo et sa laguna. Bolivie, Cordillère Blanche.

.....

renouvelables, au moins en ce qui concerne les plus petits d'entre eux. Leur disparition, ou leur rapide diminution, s'accompagnerait, à coup sûr, de modifications drastiques de l'environnement. Les risques sur les populations s'accroîtraient considérablement, compte tenu de la nature instable des formations glaciaires dominant parfois de plusieurs milliers de mètres les vallées fertiles et peuplées. Ne jouant plus leur rôle de stockage des précipitations, ils ne réguleraient plus les écoulements, et il faudrait, pour disposer encore de ressources en eau permanentes et pallier leur disparition, construire de grands barrages de régulation pour toutes les utilisations de l'eau, avec d'autres risques associés pour les populations et l'environnement.

Il est donc particulièrement important, aux plans économique et scientifique de suivre le comportement des glaciers andins tropicaux, afin de prévoir leur devenir à moyen terme. Si rien, bien sûr, ne peut être fait pour leur conservation, au moins peut-on tenter de prévoir leur disparition ou leur réduction, pour engager à temps la construction des infrastructures qui, à terme, leur suppléeront.

LE RÉSEAU DE SURVEILLANCE DES GLACIERS TROPICAUX ANDINS

Depuis 1991, avec ses partenaires boliviens, péruviens et équatoriens, l'Orstom a entrepris la mise en place d'un réseau d'observations glaciologiques.

En Bolivie, deux premiers glaciers ont été choisis en Cordillère Royale (16° Sud. cf. carte p. 16), les glaciers de Zongo (6 000 m) et de Chacaltaya (5 400 m) et étudiés en partenariat avec la "Compania Boliviana de Energía Eléctrica" d'une part, la "Universidad Mayor San Andrés" et le "Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología" d'autre part. Ils ont été rapidement équipés d'un dispositif permanent permettant d'estimer le bilan de masse (balises implantées dans les zones d'accumulation et d'ablation*) et le bilan hydrologique (stations de mesure des débits liquides écoulés à l'aval du glacier et réseau de pluviographes et pluviomètres/nivomètres totalisateurs). La vitesse superficielle du glacier et les oscillations de son front sont suivies annuellement par des mesures topographiques au sol. De plus, les principaux paramètres météorologiques sont enregistrés ou

relevés selon une périodicité mensuelle sur ou à proximité des glaciers. Ce dispositif constitue le "dispositif standard" d'observation, permettant d'établir les bilans indispensables, glaciaires et hydrologiques.

Au Pérou, les bilans, dans la zone d'ablation, des glaciers de Yanamarey et Uruashraju en Cordillère Blanche sont mesurés depuis 1977 en continu par la "Oficina de Recursos Hídricos" de Huaraz. Leurs fronts et leurs vitesses superficielles sont surveillés deux fois par an et les données climatiques sont relevées à moins de dix kilomètres. L'Orstom réoriente et complète depuis 1994 le système de mesure, notamment par l'installation de stations hydrologiques au débouché des glaciers, pour permettre d'estimer leurs bilans hydrologiques.

En Équateur, le Glacier Antisana est en cours d'équipement, depuis juin 1994 pour le bilan glaciologique, avec un suivi des mouvements des fronts et d'un réseau de balises, et depuis mars 1996 pour le bilan hydrologique. Un autre glacier sur le Cotopaxi a été

équipé pour les bilans de masse et les oscillations du front en février 1995. Un inventaire des sources documentaires permettant de dater et de quantifier le recul de ces glaciers depuis plus d'un siècle, particulièrement rapide dans ce pays, vient également d'être entrepris.

Les premiers résultats obtenus avec ce "dispositif standard" dans les trois pays mettent en évidence un recul général et accéléré de tous les glaciers étudiés. Pour comprendre et modéliser le fonctionnement des appareils glaciaires, il est rapidement apparu nécessaire d'établir un bilan énergétique de la surface des glaciers. Pour cela, il convient de mesurer les profils de température de l'air et de la glace, d'humidité de l'air, des vitesses du vent, ainsi que les rayonnements net, global et réfléchi. La spatialisation de ces mesures ponctuelles à l'échelle du glacier autorisait alors la construction d'un modèle physique de fonctionnement du glacier, seule méthode permettant une prévision de l'ablation et des débits de fonte. Ce travail fait l'objet d'une thèse.

Pour en savoir plus

Franco B. Ribstein P.

Saravia R. and Tiriau E.

1995. Monthly balance

and water discharge of

an inter-tropical glacier :

Zongo Glacier, Cordillera

real, Bolivia, 16°S.

Journal of Glaciology,

41, 137, 61-67.

Ribstein P. Tiriau E.

Franco B. and

Saravia R. 1995.

Tropical climate and gla-

acier hydrology : a case

study in Bolivia. Journal

of Hydrology, 165 : 127-

133.

Ames A. y Franco B.

1995. Cordillera Blanca,

Perú. Glaciares en la

Historia. Bulletin de

l'Institut Français

d'Etudes Andines, juillet

1995.

Franco B. et Ribstein P.

1995. Glaciares et évolu-

tion climatique dans les

Andes boliviennes.

Glacier de Zongo et

Glacier de Chacaltaya,

Cordillère Royale, 16 °S.

Bulletin de l'Institut

Français d'Etudes

Andines, juillet 1995.

Casassa G., Franco B.

and Ribstein P. (sous

presse). Glaciares in

South America. In Into

the second century of

world glacier monito-

ring - prospects and

strategies. W. Haeberli

(éd.), WGMS, UNESCO,

Studies and Report in

Hydrology n° , pp. 139-

161.

Franco B. and

Ribstein P. (sous

presse). Glacier evolu-

tion in the Tropical

Andes. Consequences

on global warming and

climatic variability on the

behaviour of glaciers in

Bolivia, Peru and

Ecuador. In 2do

Simposio Internacional

Desarrollo Sostenible de

Ecosistemas de

Montaña: manejo de

áreas frágiles en los

Andes, 2-14 avril 1995,

Huarina (Bolivie), Actes

édités par M. Liberman,

La Paz (Bolivie), 10 p.

Franco B. Ribstein P.

Semiond H. y Oficina

de Recursos Hídricos.

1995. Balances glaciares

y clima en Bolivia y Perú.

Impacto de los eventos

ENSO. In : Aguas,

Glaciares y Cambios

Climáticos en los Andes

Tropicales, seminario

internacional, 13-16 de

Junio 1995, La Paz

(Bolivie), Actes édités

par P. Ribstein et B.

Franco, ORSTOM-

UMSA-SENAMHI-CONA-

PHI, La Paz (Bolivie),

Bulletin de l'Institut

Français d'Etudes

Andines, 1996.

Pouyaud B. Franco B.

y Ribstein P. 1995. La

red de monitoreo glacio-

hidrológico de ORSTOM

y de sus contrapartes en

Bolivia, Perú y Ecuador:

una herramienta para el

estudio del recalenta-

miento global y de sus

consecuencias en los

Trópicos. In Aguas,

Glaciares y Cambios

Climáticos en los Andes

Tropicales, seminario

internacional, 13-16 de

Junio 1995, La Paz

(Bolivie), Actes édités

par P. Ribstein et B.

Franco, ORSTOM-

UMSA-SENAMHI-CONA-

PHI, La Paz (Bolivie),

Bulletin de l'Institut

Français d'Etudes

Andines, 1996.

Ribstein P. Franco B.

Rigaudière P. et

Saravia R. 1995 :

Variabilité climatique et

modélisation hydrolo-

gique du Glacier Zongo,

Bolivie. In Aguas,

Glaciares y Cambios

Climáticos en los Andes

Tropicales, seminario

internacional, 13-16 de

Junio 1995, La Paz

(Bolivie), Actes édités

par P. Ribstein et B.

Franco, ORSTOM-

UMSA-SENAMHI-CONA-

PHI, La Paz (Bolivie),

Bulletin de l'Institut

Français d'Etudes

Andines, 1996.

Rigaudière P.

Ribstein P. Franco B.

Pouyaud B. et Saravia

R. 1995 : Mesures

météorologiques,

hydrologiques et glacio-

logiques sur le Glacier

Zongo. Année hydrolo-

gique 1993 - 1994.

Rapport n° 43, ORSTOM,

La Paz (Bolivie), 69 p.

Rigaudière P.

Ribstein P. Franco B.

Pouyaud B. et Saravia

R. 1995. Un modèle

hydrologique du Glacier

Zongo. Rapport n° 44,

ORSTOM, La Paz

(Bolivie), 90 p.

Wagnon P. Ribstein P.

Franco B. Pouyaud B.

et Valdivieso H., 1995 :

Mesures météorolo-

giques, hydrologiques et

glaciologiques sur le

glacier Zongo. Année

hydrologique 1994 -

1995. Rapport n° 49,

ORSTOM, La Paz

(Bolivie), 82 p.



Photo Bernard Pouyaud

Mise en place de balises glaciologiques à la sonde à vapeur (5 200 m) et le glacier Zongo du Huayna Potosi. Bolivie, Cordillère Royale.

Collecte d'eau. Source du rio Linzor (4 500m). Chili, deuxième Région.

.....



Photo Bernard Poyzeux

Limnigraphe et section de contrôle du rio Zapaleri (4 700 m). Chili, deuxième Région.

Photo Bernard Poyzeux

Une station climatologique automatique est implantée à 5 200 m d'altitude sur le glacier Zongo en Bolivie depuis 1993. Elle mesure tous les paramètres cités, et complète les deux stations climatologiques sommaires installées depuis 1991, l'une au pied du glacier à 4 800 m, l'autre sur une moraine latérale à 5 200 m. Une autre station automatique climatologique a été installée en avril 1996 à 5 500 m, au-dessus de la ligne d'équilibre du glacier dans la zone d'accumulation.

Au Chili, en marge d'un programme sur les ressources en eau de la deuxième région chilienne, conduit depuis 1991 avec l'Université Catholique du Nord d'Antofagasta, deux thèses sont en cours, portant, l'une sur la dynamique actuelle des eaux souterraines et de leur alimentation par les précipitations neigeuses d'altitude, l'autre, sur la dynamique hydrogéologique des salars*. Pour ce faire, une station climatologique automatique a été installée à Quisquiro (4 300 m), ainsi que des équipements hydrologiques sur le cours du fleuve Zapaleri.

LES PREMIERS RÉSULTATS DU PROGRAMME

De nombreux résultats sont d'ores et déjà acquis et publiés dans des revues internationales, ou restitués lors du Séminaire "Eaux, glaciers et changements climatiques dans les Andes tropicales" qui a rassemblé à La Paz, en juin 1995, plus de 120 scientifiques venus de 22 pays. Le recul généralisé de tous les glaciers andins est confirmé en Bolivie, au Pérou et en Equateur, recul accéléré depuis le début des années 1980 et qui peut conduire, à terme, à la disparition rapide des plus petits d'entre eux au cours des prochaines décennies, avec toutes les conséquences prévisibles en termes de ressources en eau, de baisse des potentiels hydroélectriques et de risques pour les populations.

En Bolivie, l'équipement en place permet d'établir, sur les dernières années, des bilans glaciologiques fins au cours des dernières années des glaciers Zongo et Chacaltaya. Les différentes positions des fronts sont accessibles et datables depuis cinquante ans. Pour le glacier Zongo, les archives hydrologiques de la "Compania boliviana de energía eléctrica" ont permis de reconstituer le bilan du glacier pour les deux dernières décennies, faisant apparaître l'influence des événements ENSO. L'abondance des mesures climatologiques de toute nature est à l'origine d'un modèle physique prometteur, du fonctionnement du glacier, qui sera amélioré en intégrant les données des dernières campagnes de mesures. Les résultats répondent aux normes mondiales et sont à présent régulièrement publiés par le World Glacier Monitoring Service.

Au Pérou, un recul accéléré depuis 1980 de tous les glaciers de la Cordillère Blanche est particulièrement évident. Les nouvelles installations, notamment hydrologiques, qui viennent d'être mises en place, permettront de préciser les bilans.

En Equateur, l'affectation toute récente, grâce à la collaboration de l'IFEA (Institut Français d'Etudes Andines), d'un coopérant et la signature d'une convention avec nos principaux partenaires devraient permettre au programme de prendre toute son ampleur, d'autant qu'un inventaire des sources documentaires permettant de dater et de quantifier le recul de ces glaciers depuis plus d'un siècle vient aussi d'être entrepris.

Enfin, un certain nombre de forages, dans les plus hautes calottes sommitales des glaciers de ces trois pays ont déjà fourni d'intéressantes informations, par les analyses isotopiques des carottes de neige prélevées, sur l'abondance des précipitations des dernières décennies et également mis en évidence l'influence des événements ENSO. En juin et juillet 1997, un forage d'une centaine de mètres sur le sommet du volcan Sajama (6 545 m) en Bolivie, réalisé en collaboration avec l'équipe nord américaine de L.G. Thompson, devrait permettre de reconstituer les variations climatiques sur 15 à 20 000 ans, complétant les résultats obtenus par cette même équipe sur la calotte glaciaire de Quelccaya et sur le Huascarán au Pérou.

Au Chili, outre un inventaire des différentes sortes de sources et de leurs dynamiques, les investigations entreprises ont mis en évidence l'existence, ignorée à ce jour, de nombreux "glaciers rocheux**"



Laguna Licancabur (5 900 m) au sommet du volcan Licancabur. Frontière Bolivie Chili.

Los glaciares tropicales de los Andes y los cambios climáticos

Los glaciares son muy sensibles ante los cambios climáticos. El hielo glaciar guarda una historia inestimable de los antiguos cambios. Sin embargo, los glaciares tropicales y los del hemisferio sur han sido poco estudiados en comparación con los de las zonas templadas y los del norte. Por eso, los glaciares andinos se prestan para ser estudiados y puesto que están dispersos a lo largo de un eje norte/sur, también proporcionan datos latitudinales útiles.

Desde 1991, Orstom trabaja con científicos bolivianos, peruanos y ecuatorianos en la instalación de una red de estaciones de monitoreo glaciológico en los Andes. Los dispositivos estándares con los que cuentan miden la acumulación y el desgaste, el flujo río abajo de los glaciares (el balance hidrológico), las precipitaciones de lluvia y nieve, la velocidad superficial, las fluctuaciones de la boca del glaciar y permiten la lectura mensual de los principales parámetros meteorológicos.

Las tendencias a corto plazo examinadas comprenden el impacto ENSO (El Niño/Southern oscillations), que, a cierta altitud, provoca altas temperaturas, pre-

cipitaciones bajas y un retroceso de los glaciares. A medio plazo, el calentamiento de la Tierra puede traducirse en un aumento de la evaporación y de la humedad relativa, en una transferencia de calor más activa y en el retroceso de los glaciares. A largo plazo, los casquetes de los glaciares pueden arrojar pistas sobre los cambios climáticos en los pasados 15 a 20 mil años.

Hasta ahora los descubrimientos confirman que dichos glaciares se han reducido rápidamente en sólo veinte años y que el fenómeno se acelera. Esto implica cambios medioambientales drásticos, un enorme aumento en las afluencias y un grave peligro de inundaciones para las poblaciones del valle. Por eso la gestión regional e interestatal de los recursos hídricos andinos es urgente, ya que los glaciares más pequeños desaparecen y los depósitos de agua están disminuyendo.

La red de monitoreo andina desempeña un papel importante en la observación del clima terrestre, sin embargo necesita mayores recursos financieros y humanos para continuar su labor - más de los que sus socios le brindan actualmente.



Laboratoire de cartographie appliquée - Bondy

Position des glaciers étudiés par l'Orstom en Amérique latine



Photo: Bernard Pouyau

Station météorologique automatique "glacier" (5 200 m) et le glacier Zongo du Huayna Potosi. Bolivie, Cordillère Royale.

Pluviomètre totalisateur (5 000 m) et le glacier Zongo du Huayna Potosi. Bolivie, Cordillère Royale.

qui doivent constituer une des rares dynamiques de l'eau encore actives dans ce contexte désertique. Ces glaciers rocheux sont des témoins des dernières périodes froides (il y a 10 à 12 000 ans), peut-être rajunés lors du Petit Age de Glace, et sont à ce titre le "maillon glaciaire manquant" entre les glaciers du volcan Sajama (18° Sud) et les névés du volcan Ojos del Salado (26° Sud). Ils éclairent sous un jour nouveau les fonctionnements hydrologiques actuels des espaces désertiques du nord chilien.

L'AVENIR DU PROGRAMME

Au cours des deux dernières années, le programme "Neiges et glaciers tropicaux" est devenu un programme régional concernant la quasi totalité des Andes tropicales, mêlant des aspects de recherches de pointe à des caractères appliqués. Le montage d'un réseau d'observation sur le climat, basé

Glossaire

ablation : perte de masse du glacier sous forme de fonte ou d'évaporation.
glacier rocheux : mélange de glace et de débris rocheux en mou-

vement à la façon d'un glacier.
salar : lac salé où l'eau évaporée n'a laissé qu'une croûte de sel en surface.

sur les glaciers tropicaux, présente un grand intérêt pour la connaissance du climat mondial. Il viendrait pallier un manque de connaissances au niveau des Tropiques et de tout l'hémisphère Sud, tout en assurant le nécessaire couplage entre les deux hémisphères. L'orientation nord-sud de la chaîne andine permet, en effet, une appréhension méridienne des variations du climat et d'anomalies climatiques reconnues pour leur importance à l'échelle régionale et mondiale (événements ENSO).

La permanence de l'Orstom en Amérique du Sud et ses liens avec des partenaires régionaux et les meilleures équipes mondiales de glaciologie, est une garantie du suivi d'un réseau d'observation du climat sur le long terme.

Le programme a également mis en évidence la nécessaire approche régionale de l'inventaire et de la gestion des ressources en eau entre les différents pays andins. La confrontation, par exemple, de ressources en eau prouvées dans le Sud-Lipez bolivien et des besoins considérables de la deuxième région chilienne toute proche montre la piste d'une gestion transnationale de ces ressources, que l'Orstom pourrait favoriser par ses recherches et ses capacités de formation auprès des différents partenaires concernés, auxquels ce réseau sera à terme transféré.

Bernard Pouyau, Bernard Franco et Pierre Ribstein

Département "Eaux continentales" UR "Mécanisme du cycle de l'eau en interaction avec le climat et l'environnement : concepts et modélisations"

Carlos Diaz Escobar
 Directeur du SENAMHI
Freddy Camacho
 Directeur IHH-UMSA



Photo: Bernard Pouyau

Pouyaud Bernard, Francou Bernard, Ribstein Pierre, Diaz
Escobar C., Camacho F.

Les glaciers tropicaux andins : remarquables laboratoires
naturels

ORSTOM Actualités, 1996, (50), p. 9-16. ISSN 0758-833X