

Recul des glaciers dans les Andes tropicales sur les dernières décennies

Les reconstitutions effectuées dans les Andes tropicales sur les dernières décennies montrent un recul important de l'ensemble des glaciers. Le réseau d'observation mis en place depuis une décennie par l'Institut de Recherche et Développement et ses partenaires andins (voir carte) permet de mieux comprendre la relation entre le recul de glaciers et le climat ainsi que l'influence de l'ENSO (El Niño South Oscillation).

Les glaciers dans les Andes centrales sont situés en moyenne à une altitude élevée (plus de 4800 m), et sont en général tempérés en dessous de 6000 m. Bien que de petite taille (moins

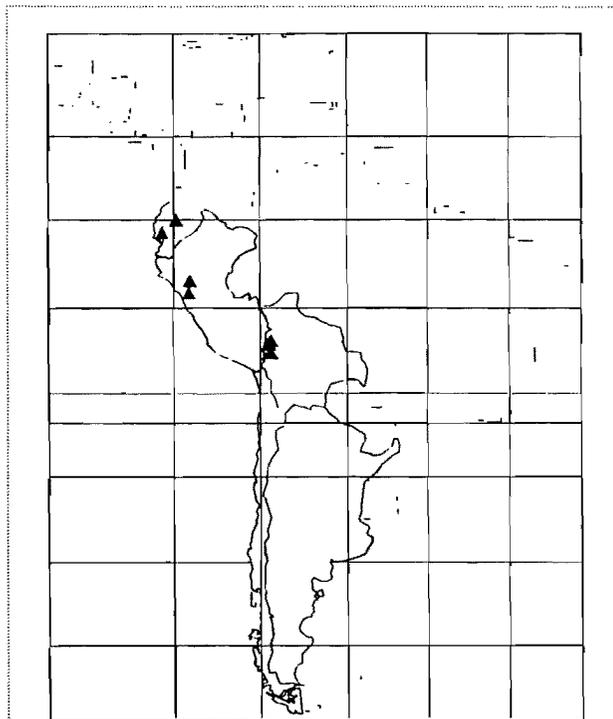


Figure 1 : Localisation des glaciers surveillés dans les Andes tropicales par l'IRD et ses partenaires. Deux de ces glaciers (Antizana et Zongo) font partie du réseau GLACIOCLIM, réseau qui comprend également des glaciers des Alpes et de l'Antarctique (ORE-Observatoire de Recherche pour l'Environnement).

Glaciers permanently observed in the central Andes by IRD and South-American partners

de 5 km²), ces glaciers jouent un rôle important dans la ressource en eau du pays, particulièrement dans les cordillères où de longues périodes de sécheresse existent (voir encarts 1 et 2). Ces glaciers qui réagissent rapidement aux variations climatiques sont particulièrement intéressants à étudier pour retracer l'évolution du climat. Nous présentons ici leur évolution sur les récentes décennies. Un réseau d'observation permanent a été installé en différents points de la chaîne des Andes, allant de l'équateur aux tropiques (16°S) (figure 1).

Glacier recession in the tropical Andes over the last decades

Several glaciers have been continuously observed since a decade in the tropical Andes of Bolivia, Peru and Ecuador by the «Institut de Recherche pour le Développement» (IRD) and its local partners. Observations indicate that glaciers have retreated dramatically since the recent decades.

Glaciers in the central Andes are situated at high altitude (more than 4800 m asl) and are mostly temperate below 6000 m asl. Despite their small size (generally less than 5 km²), their influence in the water resource is significant, particularly in the cordilleras where long dry periods exist. Their high sensitivity to climate makes them particularly suitable to document changes occurring in the low/mid troposphere at the infra- and the multi-decadal time scale as well. For analysing the link existing between glacier and climate, a permanent observation network has been installed throughout the Andean chain involving glaciers from the nearby equator (the so-called «inner tropics») to the 16°S (the «outer tropics») (figure 1). Two of these glaciers, Zongo (Bolivia) and Antizana (Ecuador), are part of the ORE (Observatoire de Recherche pour l'Environnement) GLACIOCLIM network (France), which includes other monitored glaciers in the Alps and in the Antarctica. We present a short overview of results concerning Chacaltaya (Bolivia), a typical small-sized glacier (0.05 km² in 2000) located at low elevation (5350-5150 m asl), which has been observed at month scale since 1991. Chacaltaya is representative of many glaciers of the central Andes whose recession has been particularly dramatic since the 1980s.

A strong interannual variability of mass balance

The mass balance of a glacier is the difference between the accumulation (amount of solid precipitation which incorporates the ice mass) and the ablation (melting + sublimation), which removes mass in liquid and vapour forms. Unlike mid latitude glaciers where an accumulation and an ablation season alternatively occur, ablation processes are important year round in the Tropics, with a clear maximum during the October-April summer season in Bolivia and Peru. Note that in the Tropics the summer months include also the wet season. Due to the fact that ablation and accumulation peak at the same time, any alteration of the precipitation regime provokes an enhanced response of glaciers. This explains why glaciers are very sensitive to the climate variability, particularly if a deficit of precipitation occurs when temperature of atmosphere is unusually warm.

Figure 2 shows monthly mass balance of Chacaltaya during the 10-year period 1991-2001. The seasonality is strong and portrays a period of 7 months from October to April during what mass balance is highly variable. These months account for 98 % of the year mass balance variance. During

Deux de ces glaciers Antizana (Equateur) et Zongo (Bolivie) font partie de l'ORE – (Observatoire de Recherche pour l'Environnement) GLACIOCLIM, réseau qui comprend également des glaciers des Alpes et de l'Antarctique.

the dry and cold season (May-September), the glacier is stable. As a consequence, the ablation processes active during the summer months are considered as crucial to understand the response of glacier to climate change.

Nous présentons ici les résultats relatifs au glacier Chacaltaya, situé en Bolivie, qui est un petit glacier typique glacier (0,06 km² en 2000) de basse altitude (situé entre 5360 et 5140 m) qui a été observé depuis 1991. Chacaltaya est représentatif de nombreux glaciers des Andes centrales dont le recul a été particulièrement impressionnant depuis les années 1980.

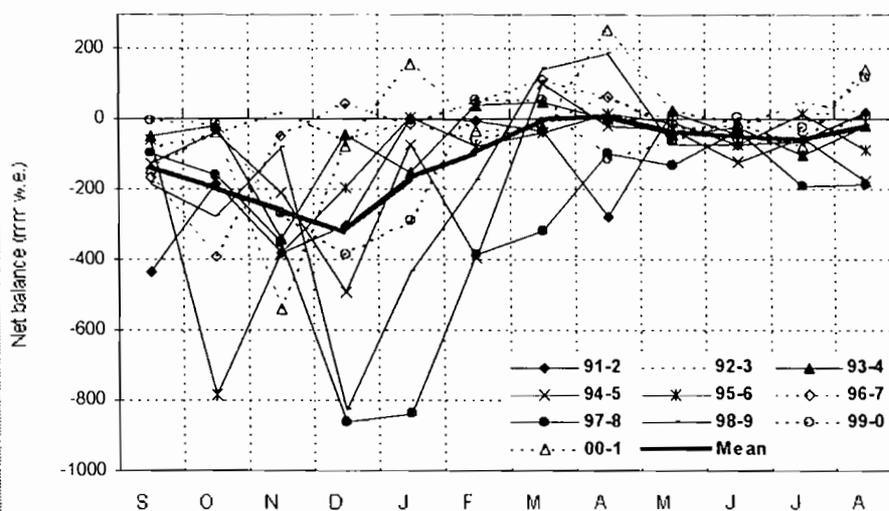


Figure 2 : Evolution du bilan de masse mensuel (en mm eau équivalent) du glacier Chacaltaya entre 1991 et 2001. Ce glacier de basse altitude (situé entre 5360 et 5140 m) est en constant recul. Son bilan moyenné sur l'année est négatif tout au cours de la décennie : ce sont les mois d'été (octobre-mars) qui contrôlent la variabilité du bilan annuel.

Chacaltaya's monthly mass balance (mm w.e.) between September and August (hydrologic year) from 1991 to 2001. Monthly means are shown by bold black line (Source : Francou et al., 2003).

Evolution d'un glacier andin au cours des saisons : une forte variabilité interannuelle

Le bilan de masse d'un glacier est la différence entre l'accumulation (chutes de neige), qui augmente la masse du glacier et l'ablation (fusion et sublimation) qui la diminue. Contrairement aux Alpes où alternent la saison d'accumulation (l'hiver) et la saison d'ablation (l'été), dans les Andes de Bolivie et du Pérou, l'ablation a lieu tout au long de l'année et devient maximale en été (octobre-avril) par suite de la forte insolation. L'été est également la saison des pluies, donc la saison où se produisent à la fois l'accumulation et l'ablation. Par conséquent, toute altération en été du régime des pluies ou des températures provoque une réponse amplifiée du glacier, d'où sa très grande sensibilité à la variabilité climatique.

Cette différence entre les saisons d'été et d'hiver est particulièrement illustrée par la figure 2 qui présente l'évolution du bilan de masse mensuel du glacier Chacaltaya entre 1991 et 2001. Son bilan moyenné sur l'année est négatif tout au cours de la décennie et ce sont les mois d'été (octobre-avril) qui contrôlent la variabilité du bilan annuel.

The role of ENSO in the interannual variability

Figure 3 (see colour pages) features the cumulative mass balance of Chacaltaya and Zongo glaciers over the 1991-2001 decade. Zongo glacier is a relatively large glacier of 2.4 km² extending from 6000 to 4850 m asl situated 20 km North of Chacaltaya. On this figure the mass bal-

ance refer only to the Zongo ablation zone (between 5150 m and 5030 m) which can be compared to the mass balance of Chacaltaya performed on the similar elevation. Evolution of Chacaltaya and Zongo at low elevation is similar, that implies a common response of both glaciers to climate at the regional scale.

It can be seen that periods of strong ablation alternate with periods during what ice loss is lesser. The former correspond to warm ENSO events (El Niño : red boxes), whereas the latter fall during La Niña (blue boxes) or neutral ENSO periods. A lag of about 6 months exists between the Sea Surface Temperature Anomaly (SSTA) in the central Pacific (Niño 3.4 region) and the glacier response in Bolivia. On the figure the Niño - Niña events are indicated taking into account this 6 months delay. Note that glaciers were in equilibrium in 1992-1993, a period included in the long 1990-1995 warm ENSO episode: this anomaly was caused by the exceptional cooling of the tropical troposphere following the Pinatubo eruption in June 1991.

Recession of glaciers during El Nino

During the El Niño events temperature in the low/mid troposphere increases by 0.2°C to 1°C and summer precipitation

Durant la saison sèche et froide (mai-septembre) le glacier reste stable.

Variabilité interannuelle : rôle de l'ENSO

La figure 3 (voir pages couleur) présente l'évolution du bilan de masse cumulé des glaciers de Chacaltaya et du Zongo sur la décennie 1991 - 2001. Le bilan cumulé représente la quantité de glace (en équivalent eau) perdue par le glacier depuis 1991. Le glacier du Zongo est un glacier relativement grand de 2,4 km² qui s'étend de 6000 à 4850 m d'altitude, situé à 20 km au nord de Chacaltaya. Sur la figure, seul est pris en compte le bilan de masse relatif à la partie supérieure de la zone d'ablation du Zongo (seule zone du glacier à être régulièrement mesurée à l'échelle mensuelle) qui, elle, est situé entre 5150 m et 5030 m. Restreindre la zone d'ablation du Zongo à seulement cette altitude permet de comparer les bilans de masses des deux glaciers à des altitudes comparables. On constate que Chacaltaya et Zongo ont des évolutions semblables, ce qui indique que ces glaciers réagissent de façon similaire à une évolution régionale du climat.

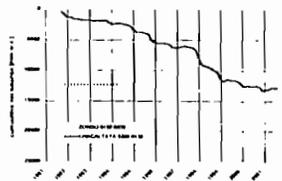


Figure 3 (voir pages couleur).
(see colour pages)

On constate également que des périodes de forte ablation alternent avec des périodes où les glaciers restent stables. Sur la figure les événements El Niño et la Niña sont indiqués en tenant compte du retard de 6 mois entre l'événement ENSO défini par l'anomalie de température de surface de la mer dans le Pacifique central (région Niño 3,4) et la réponse des glaciers boliviens. On constate que les années de forte ablation (bilan négatif) coïncident avec les périodes EL Niño, alors que les années qui présentent un bilan équilibré correspondent aux années La Niña. Une exception cependant, les années 1992-1993 affectées par l'éruption du volcan Pinatubo (juin 1991) durant lesquelles la troposphère tropicale s'est sensiblement refroidie.

Récession des glaciers durant El Niño

Pendant les années El Niño, la température atmosphérique et le régime des précipitations sont profondément perturbés. Ainsi à Chacaltaya la température a augmenté de plus de 1°C durant l'été 1997-1998 ; les précipitations, quant à elles, ont été déficitaires. Cette hausse de température est directement corrélée avec l'augmentation de la température des eaux de surface du Pacifique au large des côtes du Pérou et de l'Equateur. Durant cette période, les alizés, qui d'habitude apportent sur les Andes les précipitations venant de l'Atlantique et du bassin amazonien, sont affaiblis, entraînant une baisse et une irrégularité des précipitations sur les Andes. Durant ce El Niño exceptionnel, le glacier de Chacaltaya a subi une perte de

decreases (Vuille et al., 2000). An energy balance analysis performed on Zongo glaciers revealed that net radiation, which is modulated by albedo, is the main factor governing ablation (Wagnon et al., 1999). Albedo, in turn, is dependent upon snow cover. The precipitation deficit observed in the early wet season (DJF) in Bolivia considerably increases melting rates because bare ice is dominant below 5500 m asl and albedo is permanently at low values (Wagnon et al., 2001). On the other hand, in the inner tropics (Ecuador), the positive temperature anomaly is sufficient to displace at higher elevation (5500 m asl) the rain/snow limit, that maintain low albedo on large parts of glacier. Albedo is thus the key-factor of glacier evolution near the equator; it is directly related to temperature anomaly through a change of phase of precipitation. During the cold and wet La Niña events, the opposite situation prevails and ablation strongly decreases because a long-lasting snow blanket (higher albedo) covers a large part of the ablation zone.

A similar evolution over large distances (more than 1000 km)

The net balance measured during the last decade on the 3 glaciers (two of them are at 16°S and one (Antizana) at the equator) displays a great coherence (figure 4): a similar volume regression of ice volume. This figure also shows how the small glaciers as Chacaltaya (0.06 km²), which are reduced to an ablation zone, experience a much stronger mass deficit (more than 14 m w.e.) than the large ones which preserve wide accumulation areas (between 3 and 5 m w.e.).

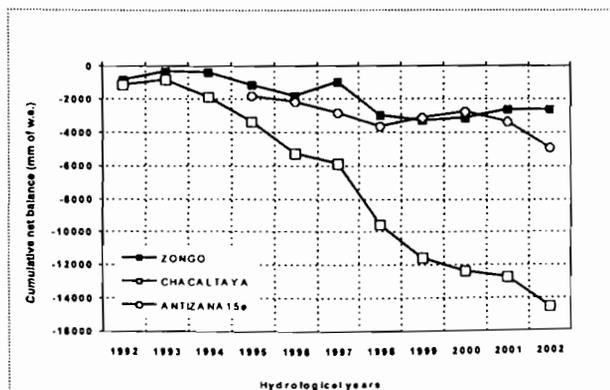


Figure 4 : Bilans cumulés sur la dernière décennie de 3 glaciers des Andes tropicales : Zongo et Chacaltaya en Bolivie, et Antizana en Equateur. On remarque une similitude dans les variations des bilans, mais un déficit beaucoup plus marqué dans le cas des glaciers de petite taille comme celui de Chacaltaya.

Specific net balance (in equivalent mm of liquid water) measured on 3 glaciers of the central Andes during the last decade. On Chacaltaya and Zongo glaciers, the hydrologic year is September-August (1992=Sept.-Aug.1991-1992), on Antizana glacier January-December.

Les glaciers andins constituent des ressources vitales pour les populations voisines.

Dans les Andes Tropicales, l'eau des glaciers est une ressource largement utilisée pour le bénéfice des populations. Tous les sites étudiés par l'IRD avec ses partenaires contribuent à ces usages.

En Equateur, les glaciers du Volcan Antizana sont captés par l'agence d'approvisionnement en eau potable de la ville de Quito (EMAP) qui compte un million et demi d'habitants. De plus, les eaux de montagne sont traditionnellement utilisées par les petits exploitants agricoles qui construisent des canaux à flanc de versant, parfois sur des distances considérables ; ce sont les acequias, dont le principe et l'exploitation sont très semblables à ceux des bisses du Valais suisse.

En Bolivie, dans la vallée du Rio Zongo, dont les glaciers et les écoulements sont étudiés depuis 1991 par l'IRD, la Compagnie Bolivienne d'Energie Electrique (COBEE) exploite les débits dont l'origine est largement glaciaire pour produire l'électricité qui alimente la capitale La Paz (1,2 millions d'habitants avec la ville jumelle d'El Alto). Un ensemble de 10 usines hydroélectriques en cascade s'étage sur une distance d'environ 50 km entre 4250 et 950 m d'altitude ; il possède une capacité totale de 175 MW. Les glaciers fournissent aussi l'approvisionnement en eau potable pour environ 90 % des habitants de La Paz et d'El Alto au travers d'un certain nombre de captages et de conduites exploitées par la société Aguas del Illimani, filiale du groupe français Suez. Enfin le glacier de Chacaltaya entre 5100 et 5400 m d'altitude, très proche de la capitale, joue un rôle touristique non négligeable, parce qu'il est facilement accessible et se trouve être le domaine skiable le plus élevé de la planète (structure d'accueil permanente et une remontée mécanique au fonctionnement épisodique).



Arteson Raju Glacier (Cordillere Blanche)

Au Pérou, le Rio Santa collecte l'ensemble des écoulements glaciaires de la Cordillère Blanche. La rivière et certains lacs de montagne (comme le lac Parón, étudié par l'IRD) sont contrôlés par la société Egenor qui exploite à la sortie de la vallée l'usine hydroélectrique de Cañon del Pato (capacité installée de 256 MW). A l'aval de cette usine, de grands travaux d'aménagement de périmètres irrigués sont en cours - en bordure de l'Océan Pacifique où la pluviométrie est très faible ; il est actuellement projeté par les autorités péruviennes de transporter l'eau du Rio Santa par canaux sur de grandes distances pour des aménagements agricoles irrigués dans le nord du pays.

Les glaciers constituent aussi des dangers pour les populations. La fonte accélérée, les chutes de séracs, les avalanches, les ruptures de verrous morainiques, souvent provoqués par les séismes fréquents dans les Andes, ont entraîné dans le passé des éboulements et des glissements de terrains catastrophiques. L'accident de Yungay qui a fait près de 20.000 victimes dans la Cordillère Blanche (Pérou) le 31 mai 1970 reste dans toutes les mémoires. Il ne faut pas négliger enfin le facteur culturel et religieux : la plupart des sommets andins sont traditionnellement vénérés par les populations qui leur font des sacrifices et organisent périodiquement des pèlerinages sur les fronts des glaciers.

The Andean glaciers are a life resource for the local population

In the Tropical Andes, water flowing from the glaciers is a resource widely used for the benefit of the population. All the sites studied by IRD and its partners are used in this sense.

In Ecuador, the glacial runoff of the Antizana Volcano is captured by the water supply agency (EMAP) of Quito, a city with 1.5 million inhabitants. The mountain waters are also traditionally used by local farmers who build canals crossing the slopes, sometimes over very large distances, in order to irrigate small mountain fields. Those canals, called acequias, are managed in a similar way to the bisses in the Swiss Alps (Valais).

In Bolivia, in the Rio Zongo Valley, where the IRD has studied glacier and river flow since 1991, the Bolivian Electro-Power Company (Cobee) captures water runoff, mainly of glacial origin, in order to produce the electricity consumed by the City of La Paz (1.2 million inhabitants with its twin city of El Alto). Ten hydropower plants are located over about 50 km, at altitudes between 4250 and 950 m asl. The total installed capacity is 175 MW. The glaciers also supply the drinking water for 90% of the inhabitants of La Paz and El Alto, via several intakes and canals managed by the Aguas del Illimani Company, a subsidiary of the French group Suez. Lastly, the Chacaltaya Glacier, at an altitude between 5150 and 5350 m asl, close to the capital, plays a non-negligible role in the country's tourism, because of its very easy accessibility and the installation of the world's highest ski resort (permanent facilities and an occasional ski lift service).

In Peru, the Rio Santa collects the runoff from the glaciers of the White Cordillera. This river and several mountain lakes (such as Lake Parón, studied by the IRD) are controlled by the Egenor Company, which manages the hydropower plant of Cañon del Pato at the outlet of the valley (installed capacity: 256 MW). Downstream, large irrigation areas are being created along the Pacific Ocean coast, where the rainfall is low. The Peruvian authorities now envisage transporting Rio Santa water through long-distance canals to supply new irrigated fields in the north of the country.

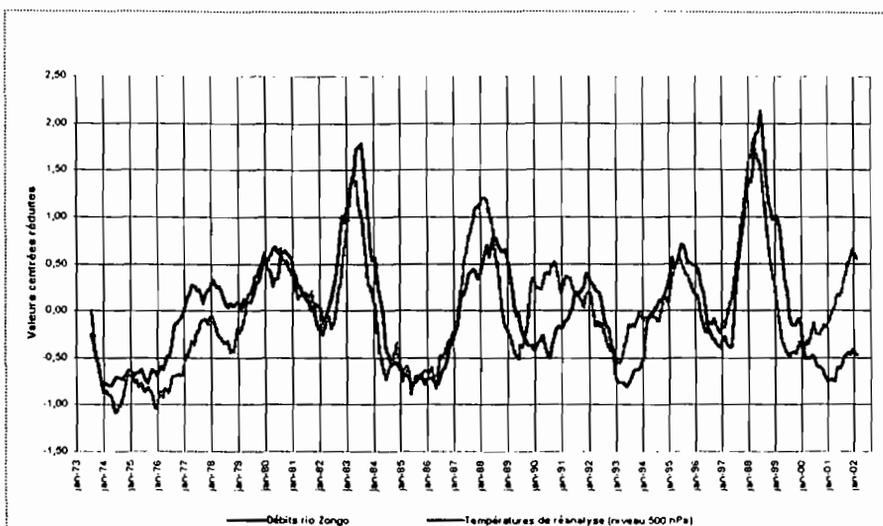
The Andean glaciers can also be dangerous for the population. Accelerated melting, ice falls, avalanches, the rupture of moraines, often due to the frequent seismic, have generated catastrophic landslides in the past. The death toll at Yungay in the White Cordillera (Peru) on 31 May 1970 was about 20 000. Finally, it is important to note cultural and religious factors. Most of the Andean summits are traditionally venerated by the population, who organize periodic pilgrimages to glaciers and offer them sacrifices.

Contact : Pierre Chevallier (IRD) - Institut Languedocien de Recherche sur l'Eau et l'Environnement - Maison des Sciences de l'Eau - Université Montpellier 2, Pl. Eugene Bataillon, CC 57 - 34095 Montpellier Cedex 5 - chevalli@mse.univ-montp2

Evolution du débit de fusion du glacier Zongo (Bolivie)

Le débit de l'eau de fusion a été suivi depuis 1973 à l'aide d'une station située à 4830 m près du front du glacier. L'eau de fusion est collectée à la sortie d'un bassin de 3,7 km² dont le glacier représente 65 % de la surface. Sur la figure sont portées les anomalies de débit et les anomalies de température. Celle-ci est obtenue après réanalyses des données du NCEP-NCAR et représente la moyenne de la température de l'air, sur une surface allant de 15° à 17,5°S et de 70° à 67,5°W, à une altitude où la pression atmosphérique est de 500 hPa (voisine de l'altitude du glacier). Les valeurs portées ont été lissées sur 13 mois.

Débit et température montrent des évolutions très semblables. Les fortes fusions correspondent aux événements El Niño, durant lesquels la température est alors particulièrement élevée. Cette forte fusion n'est en fait pas causée directement par la température élevée mais par l'existence d'un albédo particulièrement faible (d'où forte absorption du rayonnement solaire entraînant la fusion). Cette baisse de l'albédo en période El Niño est le résultat de la diminution de



Evolution de l'anomalie du débit de fusion du glacier Zongo ainsi que celle l'anomalie de température de 1973 à 2001.

Evolution of the runoff anomaly and the temperature anomaly from the Zongo glacier from 1973 to 2001.

chutes de neige fraîche sur le glacier, (la neige fraîche a un albédo proche de 0,9 ; une surface de glace non recouverte de neige fraîche a un albédo pouvant descendre jusqu'à 0,25).

Durant les épisodes El Niño, qui sont caractérisés par un déficit en précipitation, l'augmentation de la fusion des glaciers tend à compenser ce déficit. Inversement, lors des épisodes La Niña, les précipitations sont plus élevées (ainsi que les chutes de neige sur le glacier), l'albédo, plus fort, et la fonte, plus faible. Les glaciers jouent ainsi un rôle de régulateur dans les ressources en eaux.

Evolution of the runoff from the Zongo glacier (Bolivia)

The runoff from the Zongo glacier (16°S) is measured by a permanent station set up near the glacier terminus at 4830 m asl. Runoff is collected from a 3.7 km² basin, 65% of which is occupied by the glacier surface. On the figure, runoff anomaly (line with open squares) is compared to temperature anomaly at 500 hPa (line with filled squares), over the period January 1973 - January 2001. Temperature is extracted from the NCEP-NCAR data set and is averaged over the 15°-17.5°S and 70°-67.5°W grid. Both time series have been smoothed with a 13-month-averaging filter. Extensive melting and high temperature occurs during El Niño phases. This extensive melting is not caused by the high temperature, but is related to the low albedo (due to the decreased snow fallout on the glacier). Energy balance measurements performed on this glacier have pointed to wave radiation and albedo as the main factors controlling melting at the glacier surface, while air temperature through the sensible heat flux and liquid precipitation are of minor importance (Wagnon et al., 1999).

The dependence of glacier balance variability on ENSO contributes to increased melting when precipitation decreases (El Niño phases), and conversely to decreased melting when precipitation increases (La Niña phases), thus enhancing the role of glaciers as regulators of the water resource.

Contact : Bernard Pouyaud (IRD), Pierre Chevallier (IRD) Institut Languedocien de Recherche sur l'Eau et l'Environnement - Maison des Sciences de l'Eau - Université Montpellier 2, Pl. Eugène-Bataillon, CC 57 - 34095 Montpellier Cedex 5 - pouyaud@msem.univ-montp2.fr - chevallier@msem.univ-montp2.fr

glace de plus de 3 mètres d'eau sur l'année. Une étude sur le glacier Zongo des paramètres intervenant dans le bilan de masse a montré que la forte fusion qui existe en période El Niño n'est en fait pas causée directement par la température élevée mais par l'existence d'un albédo particulièrement faible sur le glacier, d'où une forte absorption du rayonnement solaire entraînant la fusion (Wagnon et al., 2001). Cette baisse de l'albédo en période El Niño est le résultat en Bolivie de la diminution des chutes de neige fraîche sur le glacier, (la neige fraîche a un albédo proche de 0,9, une surface de glace non recouverte de neige fraîche un albédo pouvant descendre jusqu'à 0,25). En Equateur, cette baisse de l'albédo est plus directement reliée à l'augmentation de température atmosphérique qui entraîne des pluies et non de la neige sur une large part du glacier. Durant les épisodes La Niña (froids et humides), la situation opposée a lieu : l'ablation décroît fortement suite à la persistance dans la zone d'ablation d'une couche de neige d'albédo élevé.

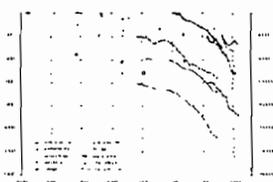


Figure 5 (voir pages couleur).
(see colour pages)

Une évolution similaire sur une distance de plus de 1000 km

On observe durant la dernière décennie une régression similaire des volumes de glace sur 3 glaciers étudiés en détail, dont l'un (Antizana) est situé sous l'équateur et les deux autres (Zongo et Chacaltaya) à 16°S (figure 4). Cette évolution commune traduit l'impact d'un signal climatique au niveau régional.

Les glaciers de plus grande taille comme ceux de Zongo et d'Antizana ont perdu entre 3 et 5 mètres d'eau durant cette dernière décennie, tandis que le petit glacier de Chacaltaya (0,06 km²) a subi, lui, une perte de plus de 14 m d'eau. Ce petit glacier, réduit à sa zone d'ablation, a donc subi une perte de masse beaucoup plus importante que les plus grands glaciers qui eux disposent d'une vaste zone d'accumulation.

Sur les dernière décennies : une régression constante

La figure 5 (pages couleur) montre l'évolution de la longueur et de la surface de 10 glaciers des Andes centrales. Bien que la relation entre ces paramètres et les variations climatiques soit moins directe que celle reliant climat et bilan de masse (car ils font intervenir la dynamique du glacier), ils n'en indiquent pas moins une régression constante de l'ensemble des glaciers remontant aux plus anciennes données (1930). La vitesse de recul augmente nettement à partir de la fin des années 1970, puis accélère à nouveau dans les années 1990. Une illustration de cette accélération est donnée par l'évolution du bilan de masse de Chacaltaya, paramètre directement relié au climat.

On the last decades: a constant recession

The evolution of length and surface of 10 glaciers of the central Andes is shown on figure 5 (see colour pages). Although the relationship of climate with these parameters is less straightforward than with mass balance (because of glacier dynamics), a constant retreat of all glaciers is nevertheless clearly indicated since the data earliest time (1930s). A good agreement between the evolution of the length (and the area) of these glaciers is observed, pointing out a common response to a same climatic signal. Rates of retreat, moderate before 1976, clearly increased from the late 1970s, then during the 1980s and the 1990s. An illustration of this accelerating recession is given by the Chacaltaya mass balance, which is a parameter directly related to climate.

The acceleration of glacier recession since the 1970s

By reconstructing the Chacaltaya glacier mass balance by means of aerophotogrammetry and ground topography surveys, we observe that the recession of the glacier was already present since the 1940s. The recession began to accelerate two decades ago. The glacier an average of 1 m of w.e. yr⁻¹ since 1983, i.e., twice the estimate of the previ-

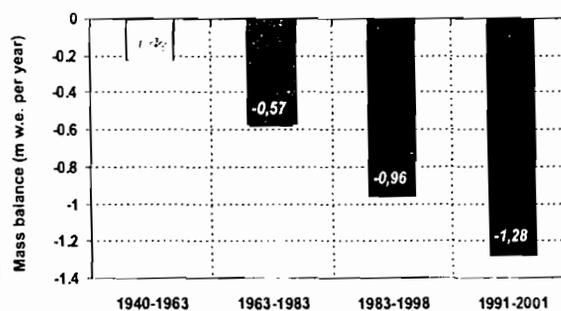


Figure 6 : Evolution du déficit moyen du glacier de Chacaltaya (en mètre d'eau équivalent) au cours des cinquante dernières années divisées en quatre périodes successives.

Evolution of the average mass deficit of Chacaltaya glacier (in m w.e. yr⁻¹) during four periods of the last half century. Data from aerophotogrammetry before 1991 and from ground surveys after 1991 (Source : Ramirez et al., 2001).

ous period 1963-1983 (figure 6). The shrinkage has increase more and more during the recent decade 1991-2001 and, with such a recession rate, a complete extinction of this glacier could be predicted for 2015 AD, or more probably before this date (Ramirez et al., 2001). A stabilization of the glacier would require a drop of 200 m of the present average ELA currently located at 5400 m asl, i.e., above the highest elevation point of the glacier.

L'accélération de la récession de glaciers dans les années 70...

A Chacaltaya, la reconstruction du bilan de masse sur les années antérieures aux années de mesures a été faite par aérophotogrammétrie et par relevés topographiques (figure 6). Ces reconstitutions indiquent que la régression du glacier qui existait dès les années 40 a commencé à accélérer, il y a environ deux décennies. Depuis 1983 le glacier a perdu en moyenne 1 mètre (équivalent eau) par an, soit le double de la valeur estimée sur la période 1963-1983. Cette perte de masse est encore supérieure durant la décennie la dernière décennie 1991-2001. Avec une telle vitesse de récession, une disparition complète du glacier est prévisible pour les années 2015 (Ramirez et al., 2001). Pour que le glacier se stabilise, il faudrait que la ligne moyenne d'équilibre des neiges (Equilibrium Line Altitude, ELA), qui est actuellement située à 5400 m (i.e. au-dessus du point le plus élevé du glacier) s'abaisse de 200 m.

... et le changement de climat du Pacifique

Les mesures suggèrent que les bilans de masse des glaciers sont fortement corrélés aux anomalies de température de surface de la mer (SSTA) dans le Pacifique équatorial. Une approche quantitative peut être faite à l'aide des bilans de masse mesurés à Chacaltaya. La meilleure corrélation entre la SSTA et le bilan de masse de Chacaltaya a été trouvée dans la région Niño 1+2, sur la période d'août à février, précédant de 2 mois la période d'octobre à avril, qui est cruciale pour le bilan de masse. L'anomalie de bilan de masse est portée sur la figure 7 en fonction de l'anomalie de température correspondant aux mêmes périodes. Ce graphique établit que la récession du glacier est linéairement corrélée avec l'évolution de la SSTA. L'accélération de la récession au cours des années 70 concorde avec le changement de mode de l'ENSO à partir de 1976 (e.g. Trenberth and Stepaniak, 2001), date depuis laquelle les El Niño apparaissent plus fréquents et plus intenses.

Conclusion.

Les observations dans les Andes centrales indiquent que les glaciers sont en récession constante sur les dernières décennies (début des reconstitutions des bilans de masse et des fronts/des glaciers) et répondent de façon cohérente à un même signal climatique, les épisodes de fontes particulièrement élevées coïncidant avec les épisodes El Niño. Une accélération de cette récession se manifeste dans les années 70, et coïncide avec le changement de régime de l'ENSO.

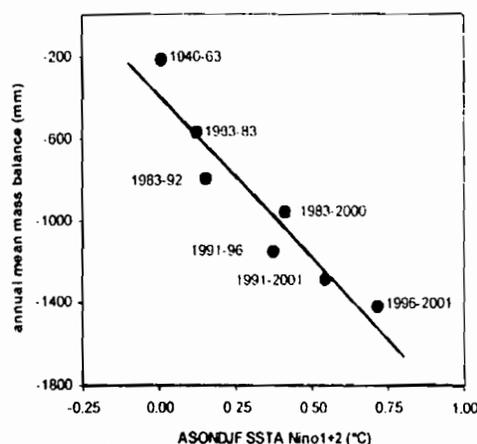


Figure 7 : Corrélation entre le bilan de Chacaltaya et la température superficielle du Pacifique (d'août à février) au large des côtes du Pérou et de l'Équateur. On observe une tendance au réchauffement du Pacifique depuis les années 1940 qui va de paire avec une accélération de la dégradation du glacier. (Source : Francou et al., 2003)

Linear relationship between averages of Chacaltaya mass balance and Aug.-Feb. SSTA in the Niño 1+2 region. SSTA are based on 1951-1980 average. Mass balance values are averages of annual totals (Oct.-Sept.). (Source : Francou et al., 2003).

...and the Pacific climate shift

The glacier mass balance appears to be strongly correlated with the Sea Surface Temperature Anomaly (SSTA) in the equatorial Pacific. The best correlation between the SSTA and Chacaltaya mass balance was found in the Niño1+2 region, and the best period for the SSTA is Aug.-Feb., leading by 2 months the crucial Oct.-Apr. period for the mass balance. On figure 7 are indicated the mass balance anomaly together with the SSTA anomaly, both estimated on identical periods of time these two anomalies appear to be linearly correlated. The acceleration of the glacier shrinkage of Andean glaciers is concurrent with the 1976/1977 Pacific climate shift (e.g. Trenberth and Stepaniak, 2001). The SSTA in the Niño1+2 region has been consistently higher during the Aug.-Feb. season since this shift took place. Rates of retreat, moderate before 1976, clearly increased from the late 1970s, and then during the 1980s and the 1990s.

Conclusion.

Observations on the central Andes indicate that glaciers respond with coherence to the climatic signal and experience a constant retreat at least since the recent decades. An accelerated recession has coincided with the Pacific shift on the late 1970s: an increasing frequency of long and intense warm ENSO events (El Niño) considerably accelerated the glacier retreat since this date, whereas less frequent cold events (La Niña) allowed glaciers to briefly save or gain mass.

Contact : Bernard Francou (IRD) - Patrick Wagnon (IRD)
Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l'Environnement, - UMR (CNRS-UJF)
BP 96 38402 Saint Martin d'Hères Cedex
francou@lgge.obs.ujf-grenoble.fr - wagnon@lgge.obs.ujf-grenoble.fr