

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

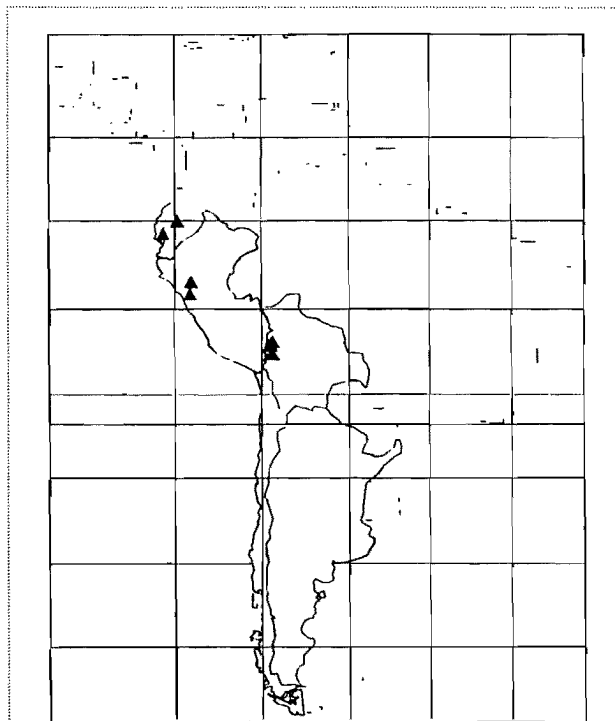


Figure 1 : Localisation des glaciers surveillés dans les Andes tropicales par l'IRD et ses partenaires. Deux de ces glaciers (Antizana et Zongo) font partie du réseau GLACIOCLIM, réseau qui comprend également des glaciers des Alpes et de l'Antarctique (ORE-Observatoire de Recherche pour l'Environnement).

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.

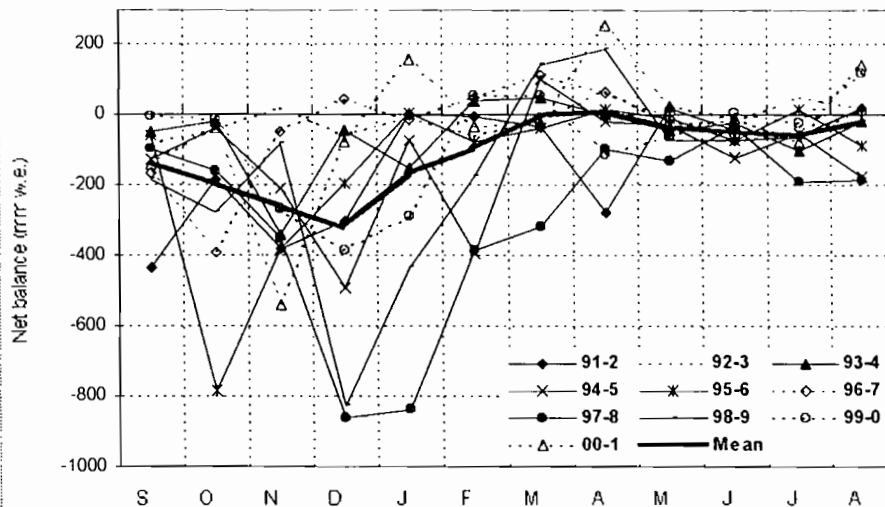


Figure 2 : Evolution du bilan de masse mensuel (en mm eau équivalent) du glacier Chacaltaya entre 1991 et 2001. Ce glacier de basse altitude (situé entre 5360 et 5140 m) est en constant recul. Son bilan moyenné sur l'année est négatif tout au cours de la décennie : ce sont les mois d'été (octobre-mars)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

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.

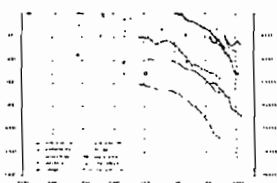


Figure 5 (voir pages couleur).
(see colour pages)

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-

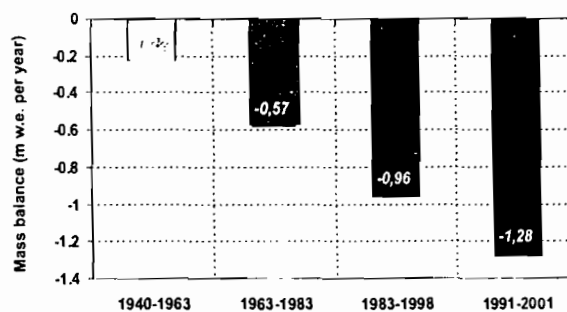


Figure 6 : Evolution du déficit moyen du glacier de Chacaltaya (en mètre d'eau équivalent) au cours des cinquante dernières années divisées en quatre périodes successives.

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.

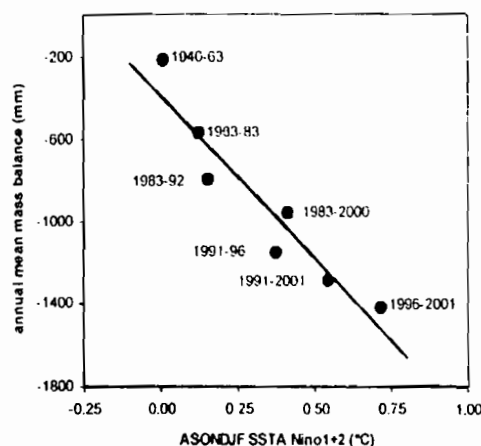


Figure 7 : Corrélation entre le bilan de Chacaltaya et la température superficielle du Pacifique (d'août à février) au large des côtes du Pérou et de l'Équateur. On observe une tendance au réchauffement du Pacifique depuis les années 1940 qui va de paire avec une accélération de la dégradation du glacier. (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 Niño 1+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 Niño 1+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