

Laboratoire Mixte International *Great Ice*

Points de mire



Photo BF - IRD

GLACIERS & RESSOURCES EN EAU DANS LES ANDES TROPICALES

INDICATEURS CLIMATIQUES ET ENVIRONNEMENTAUX

France – Bolivie – Pérou – Equateur –

ETUDE DU REcul ACTUEL DES GLACIERS

Bolivie

Ce thème a été l'un des grands objectifs du programme GreatIce. Le glacier de Chacaltaya (16°S, 5400 m), qui domine la ville de La Paz, a disparu en une trentaine d'années. « Station de ski la plus haute du monde », jusqu'à l'année 2000, il était l'un des petits glaciers de la Cordillère Royale participant à l'alimentation en eau de l'agglomération de La Paz El Alto (2 millions d'habitants). Cette évolution est typique de beaucoup de glaciers de cette cordillère de Bolivie, ainsi que de tous glaciers situés à moins de 5300-5400 m dans les Andes tropicales.

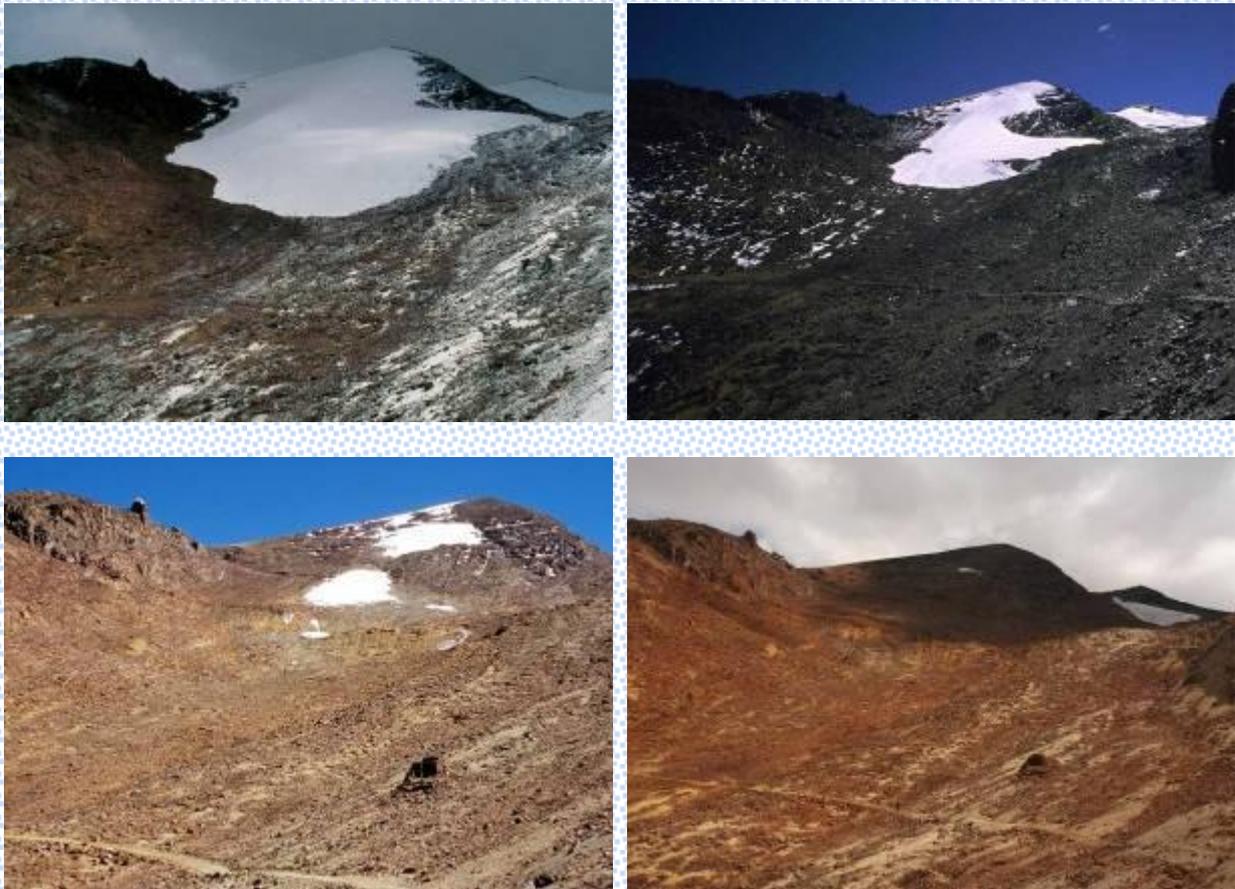
Références

Ramirez, E., Francou, B., Ribstein, P., Descloîtres, M., Guérin, R., Mendoza, J., Gallaire, R., Pouyaud, B., & Jordan, E. 2001. Small glaciers disappearing in the tropical Andes. A case study in Bolivia : Glaciar Chacaltaya (16°S). *Journal of Glaciology*, 47, 157: 187-194

Soruco, A., Vincent, C., & Francou, B., 2009. Glacier decline between 1963 and 2006 in the Cordillera Real, Bolivia. *Geophysical Research Letters*, vol. 36, L03502, doi:10.1029/2008GL036238

National Geographic : The Big Thaw (juin 2007, English edition)

Le Recul des Dieux : Documentaire de 52 minutes (France 3 et IRD, 2002)



Photos BF & PG - IRD

Glacier de Chacaltaya en 1994, 2000, 2005 et 2009

ETUDE DU REcul ACTUEL DES GLACIERS

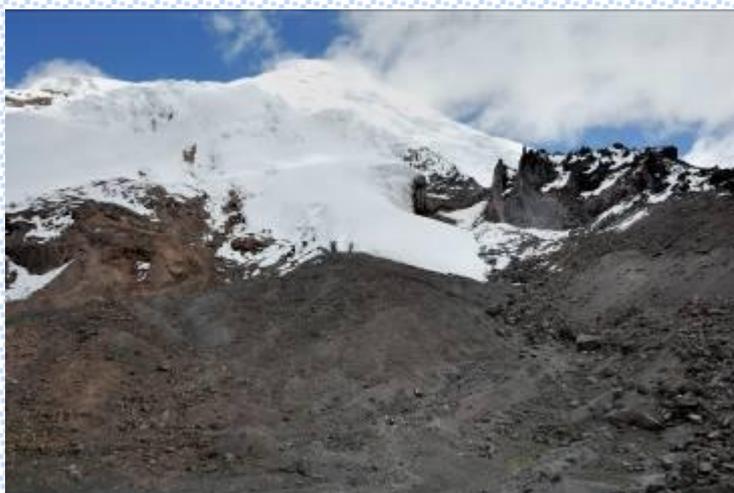
Equateur

Le Glacier 15 α de l'Antisana (0°28'S) en Equateur est le seul glacier au monde étudié sous la ligne équatoriale. Il fait partie des réseaux Great Ice et du SOERE-GLACIOCLIM. Il joue un rôle dans l'alimentation en eau de Quito (2 millions d'habitant). Il a perdu plus de 40% de sa surface depuis 1976, tout comme son voisin, la calotte glaciaire du volcan Cotopaxi (10 km²), qui a connu 45% de perte dans la même période.

Références

Jordan, E., Ungerechts, L., Cáceres, B., Peñafiel, A. & Francou, B., 2005. Estimation by photogrammetry of the glacier recession on the Cotopaxi Volcano (Ecuador) between 1956 and 1997. *Hydrological Sciences/Journal des Sciences Hydrologiques, IAHS*, 50, n°6: 949-961.

Vuille, M., Francou, B., Wagnon, P., Juen, I., Kaser, G., Mark, B.G. & Bradley, R.S., 2008. Climate change and tropical Andean glaciers – Past, present, future. *Earth Science Reviews*, 89 (2008): 79-96.



Photos BF - IRD

Langue terminale du Glacier 15 α de l'Antisana (Equateur) entre 1995 et 2011, un recul de près de 300 m

LE REcul DES GLACIERS, REPlAcE DAns SON CONTEXTE MULTISECULAIRE

Des travaux sur l'extension des glaciers des Andes Tropicales pendant les derniers siècles réalisés par GreatIce en collaboration avec une équipe du CNRS, ont montré que les glaciers y ont atteint un maximum d'extension entre 1630 et 1730 AD (le « Petit Âge Glaciaire »). Cette période était froide à l'échelle mondiale, car marquée par une baisse de l'intensité du soleil, et humide dans les Andes. Depuis le XVIIIe siècle, les glaciers ont reculé par à-coups, avec des périodes d'accélération et de période de relative stabilisation. Le recul depuis la fin des années 1970 apparaît plus rapide que pendant toute autre période qui a succédé au Petit Âge Glaciaire. Il est à mettre en relation avec le réchauffement atmosphérique de l'ordre de 0,6°/0,7°C enregistré par les stations météorologiques en 50 ans. En cela, les glaciers des Andes tropicales connaissent une évolution comparable à celle de la plupart des massifs montagneux de la planète.

Références

Jomelli, V., Favier, V., Rabatel, A., Brunstein, D., Hoffmann, G., & Francou, B., 2009. Fluctuations of glaciers in the tropical Andes over the last millennium and palaeoclimatic implications: A review. In: *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, Vol. 281, Issues 3-4, Long-term multi-proxy climate reconstructions and dynamics in South America (LOTRED-SA): State of the art and perspectives: 269-282.

Rabatel, A., Francou, B., Jomelli, V., Naveau, P., & Grancher, D., 2008. A chronology of the Little Ice Age in the tropical Andes of Bolivia (16°S) and its implications for climate reconstruction. *Quaternary Research*, doi:10.1016/j.yqres.2008.02.012.

Francou, B., & Vincent, C., 2007 : *Les glaciers à l'épreuve du climat*. IRD Editions et Editions Belin, Paris, 274 pp.



Photo VJ – IRD CNRS

Datation des moraines par le taux de croissance des lichens (lichénométrie)
du glacier Charquini Sud en Bolivie (Sources : Rabatel et Jomelli)

LES VOLUMES DE GLACE DISPARAISANT AUX ECHELLES DE TEMPS MENSUELLES ET ANNUELLES : LE BILAN DE MASSE

Depuis 1991, le programme Great Ice, dans le cadre de Service d'Observation GLACIOCLIM (qui concerne les Alpes, les Andes, l'Antarctique et l'Himalaya), mesure en routine le bilan de masse d'une dizaine de glaciers des Andes tropicales. Cela permet de suivre l'état de ces glaciers années par années. Ces mesures sont cohérentes avec celles qui utilisent les photographies aériennes depuis les années 1950 à un pas de temps décennal. On estime que les glaciers perdent actuellement 4 m à 14 m d'eau par décennie depuis 30/35 ans. Cette base de données est unique sous les tropiques et sert de référence pour déterminer l'impact du changement climatique.

Références

Francou, B., Cáceres, B., Gomez, J. & Soruco, A., 2007. Coherence of the glacier signal throughout the tropical Andes over the last decades. Proceedings of the First International Conference on the Impact of Climate Change on High-Mountain System, IDEAM, Bogota, November 2005, 87-97.

Soruco, A., Vincent, C., Francou, B., Ribstein, P., Berger, T., Sicart, J.E., Wagnon, P. & Arnaud, Y., 2009. Mass balance of Glaciar Zongo, Bolivia, between 1956 and 2006, using glaciological, hydrological and geodetic methods. Annals of Glaciology, vol.50, Number 50: 1-8



Photos BF - IRD

Mesure de l'accumulation annuelle, de l'ablation mensuelle sur diverses parties du glacier. Suivi également, le glacier rocheux du Caquilla (en bas à droite) dans la partie la plus aride de Bolivie où il n'y a pas de glacier actuellement, mais seulement des amas de permafrost mobiles à plus de 5500 m d'altitude.

RELIER LES GLACIERS AU CLIMAT EN IDENTIFIANT LES PROCESSUS D'ABLATION

Great Ice a travaillé sur les processus responsables de la fusion des glaciers tropicaux. Pour cela, il a installé des stations complètes et permanentes aux abords des glaciers surveillés. Ces stations sont équipées pour mesurer les bilans d'énergie de surface, grâce auxquels on peut discriminer les flux d'énergie (radiatifs, turbulents) qui jouent le rôle le plus important dans la fusion. C'est une manière rigoureuse, car « physique », de relier l'évolution du glacier (bilan de masse) et celle du climat. La hausse de la température joue un rôle important dans l'augmentation récente de l'ablation, mais la physique du phénomène est complexe et accorde une grande importance aux flux radiatifs et aux précipitations, phase (liquide/solide) et fréquence.

Références

Favier, V., Wagnon, P., Chazarin, J.-P., Maisincho, L., Coudrain, A., 2004. One-year measurements of surface heat budget on the ablation zone of Antizana glacier 15, Ecuadorian Andes. *Journal of Geophysical Research* 109, D18105, doi:10.1029/2003JD004359.

Sicart, J.E., Wagnon, P., Ribstein, P., 2005. Atmospheric controls of the heat balance of Zongo Glacier (16°S, Bolivia). *Journal of Geophysical Research* 110, D12106. doi:10.1029/2004JD005732.

Sicart, J.E., Hock, R., Ribstein, P., Litt, M., & Ramirez, E., 2011. Analysis of seasonal variations in mass balance and meltwater discharge of the tropical Zongo Glacier by application of a distributed energy balance model. *Journal of Geophysical Research*, vol. 116, D13105, doi:10.1029/2010JD015105, 2011

Wagnon, P., Ribstein, P., Francou, B. & Pouyaud, B., 1999. Annual cycle of energy balance of Zongo Glacier, Cordillera Real, Bolivia. *Journal of Geophysical Research*, 104, D4 : 3907-3924



Stations installées in situ, à 5000 m et plus, pour mesurer les bilans d'énergie. Ces stations forment l'unique réseau de haute altitude existant dans les Andes et sous les tropiques. Photos BF IRD

RELIER L'EVOLUTION DES GLACIERS AU CLIMAT A L'ECHELLE REGIONALE

La fonte des glaciers de l'aire andine tropicale est rythmée à l'échelle décennale par les anomalies de la température superficielle du Pacifique tropical, dans sa zone centrale (phénomènes El Niño/La Niña). Ces anomalies se transmettent de façon complexe à l'atmosphère andine et à la circulation atmosphérique sur tout le continent sud-américain, et de là aux glaciers des Andes. L'accélération du recul des glaciers entre 1976 et 2007 est à imputer en grande partie à un Pacifique « chaud », avec des El Niño fréquents, parfois très intenses ou longs. L'atmosphère est plus chaude en période El Niño, ce qui affecte la nature des précipitations sur les glaciers (neige/pluie). La fréquence des précipitations est également perturbée en certains secteurs. Avec moins de neige, l'albédo (pouvoir réfléchissant du glacier) diminue et l'absorption de l'énergie radiative à la surface du glacier, principale source d'énergie, profite à la fusion.

Références

Francou, B., Vuille, M., Favier, V. & Cáceres, B., 2004. New evidences of ENSO impacts on glaciers at low latitude : Antizana 15, Andes of Ecuador, 0°28'. *Journal of Geophysical Research*, 109, doi: 10.1029/2003JD004484.

Francou, B., Vuille, M., Wagon, P., Mendoza, J. & Sicart, J.E., 2003. Tropical climate change recorded by a glacier of the central Andes during the last decades of the 20th century : Chacaltaya, Bolivia, 16°S. *Journal of Geophysical Research*, 108, D5, 4154, doi: 10.1029/2002JD002959.

Wagon, P., Ribstein, P., Francou, B. & Sicart, J.E., 2001. Anomalous heat and mass budget of Zongo Glacier, Bolivia, during the 1997-98 El Niño year. *Journal of Glaciology*, vol. 47, no 156 : 21-28.



Photo BF - IRD

Glacier du Zongo (6000 m), dans la Cordillère Royale de Bolivie. Actuellement, le glacier le mieux étudié des tropiques, grâce à une longue série de données collectées (début des observations continues : 1991) et plusieurs thèses de doctorat (7) qui ont permis d'analyser son évolution récente. Ses eaux sont à la tête d'un des plus importants systèmes de génération hydro-électrique de Bolivie.

EN QUOI LE REcul DES GLACIERS AFFECTE LA RESSOURCE EN EAU ?

Une application importante du programme Great Ice est la connaissance de la ressource en eau d'origine glaciaire. En effet, le recul des glaciers implique des modifications notables dans la disponibilité de cette ressource. On a noté dans un premier temps une augmentation des débits hydrologiques dans les bassins comportant de grandes surfaces de glaciers, suite au déstockage dû à leur fonte. Cependant, le tarissement de cette ressource intervient dès lors que les glaciers atteignent une taille réduite. L'apport glaciaire est particulièrement important dans les régions comportant une longue saison sèche, comme la Bolivie, celui-ci compensant en partie les faibles précipitations de cette période. Great Ice tente de modéliser les apports hydriques des glaciers en fonction de leur évolution présente et future.

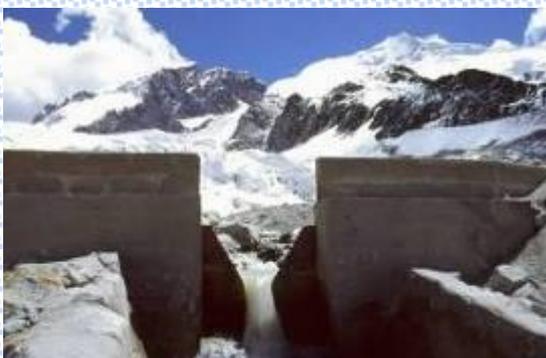
Références

Pouyaud, B., Zapata, M., Yerren, J., Gomez, J., Rosas, G., Suarez, W., Ribstein, P., 2005. Avenir des ressources en eau glaciaire de la Cordillère Blanche. *Hydrological Science Journal* 50(6) : 999-1022

Ribstein, P., Francou, B., Tiriau, E. & Saravia, R. 1995. Tropical climate and glacier hydrology. A case study in Bolivia. *Journal of Hydrology*, 165: 221-234.

Sicart, J.E., Ribstein, P., Francou, B., Pouyaud, B., Condom, T., 2007. Glacier mass balance of tropical Zongo glacier, Bolivia, comparing hydrological and glaciological methods. *Global and Planetary Change*, 59 (1-4): 27-36

Soruco, A., 2012. Medio siglo de fluctuaciones glaciares en la Cordillera Real y sus aspectos hidrológicos en la Ciudad de La Paz. IRD, La Paz, Bolivia: 227pp.



Mesure des débits hydrologiques à la sortie des glaciers (Antisana en haut, Zongo en bas). Photos BF - IRD

LES GLACES FROIDES DES SOMMETS, ARCHIVE DES CLIMATS DU PASSE

Le programme Great Ice a initié plusieurs opérations de carottages profonds dans les Andes tropicales pour reconstruire la variabilité du climat à partir de l'analyse géochimique de la glace : Sajama (6540 m) en 1997, Illimani (6240 m) en 1999, Chimborazo (6230 m) en 2000, Coropuna (6400 m) en 2003. Ce sont parfois près de 20 000 ans de climat qui ont pu être reconstitués. Le signal du réchauffement du XXe siècle est visible dans la colonne de glace, notamment à l'illimani (6240 m) où il atteint 1.1°C pour le XXe siècle.

Références

- Gilbert, A., Wagnon, P., Vincent, C., Ginot, P. and Funk, M.: Atmospheric warming at a high-elevation tropical site revealed by englacial temperatures at Illimani, Bolivia (6340 m above sea level, 16°S, 67°W), *J. Geophys. Res.*, 115, D10109, doi:10.1029/2009JD012961,
- Ginot, P., Kull, C., Schwikowski, M., Schotterer, U., Gäggeler, H.W., Francou, B., Gallaire, R., & Pouyaud, B., 2002. Potential for climate variability reconstruction from Andean glaciochemical records. *Annals of Glaciology*, 35, 443-450.
- Hoffmann, G., Ramirez, E., Taupin, J.D., Francou, B., Ribstein, P., Delmas, R., Dürr, H., Gallaire, R., Simões, J., Schotterer, U., Stievenard, M. & Werner, M., 2003. Coherent isotope history of Andean ice cores over the last century, *Geophysical Research Letters*, 30 (4) : 1179-1182.
- Ramirez E., Hoffmann G., Taupin J.D., Francou B., Ribstein P., Caillon N., Ferron F. A., Landais A., Petit J. R., Pouyaud B., Schotterer U., Simoes J., Stievenard M. 2003 : A new andean deep ice core from the Illimani (6350 m), Bolivia. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 212(3-4): 337-350.
- Schotterer, U., Grosjean, M., Stichler, W., Ginot, P., Kull, C., Francou, B., Gäggeler, H.W., Gallaire, R., Hoffmann, G., Pouyaud, B., & Schwikowski, M., 2003. Glacier and climate in the Andes between the Equator and 30°S. What is recorded under extreme environment conditions ? *Climatic Change*, 59 : 157-175.
- Thompson, L.G., Davis, M.E., Mosley-Thompson, E., Sowers, T.A., Henderson, K.A., Zagorodnov, V.S., Lin, P.N., Mikhailenko, V.N., Campen, R.K., Bolzan, J. & Francou, B., 1998. A 25,000-year tropical climate history from Bolivian ice cores. *Science*, 282: 1858-1864



Extraction des 54 m de glace présentes entre la surface et le lit rocheux du sommet du Chimborazo à 6240 m en 2000 Photos BF - IRD

PERENNISER LES ACTIONS DE RECHERCHE SUR LES GLACIERS AVEC LES PAYS ANDINS PAR DES ACTIONS DE COOPERATION

Un des volets importants de Great Ice est la formation des partenaires andins. Celle-ci s'effectue au niveau technique afin que le réseau de mesures soit pris en charge peu à peu par les institutions andines. Egalement au niveau académique, avec des bourses permettant d'accéder à des mastères et à des doctorats en France. Great Ice a ainsi encadré la réalisation d'une quinzaine de thèses, dont la moitié pour des étudiants originaires des pays andins. L'IRD vise *in fine* à constituer de véritables équipes dans les Andes, avec des outils tels que les Jeunes Equipes Associés à l'IRD (deux JEA créés, l'une en Bolivie, la JEA GRANT, l'autre en Equateur, la JEA IMAGE). Par la création du Laboratoire Mixte International (LMI) Great Ice en 2011 l'IRD vient parachever cette évolution. Cela 20 ans après avoir commencé à étudier les glaciers andins.

Références

Cáceres, B., Maisincho, L., Manciatí, C., Loyo, C., Cuenca, E., Villacís, M., Freire, D., Francou, B., Cadier, E., Guamanzara, C., 2008. Glaciares del Ecuador: Antizana y Carihuayrazo. Balance de masa, topografía, pluviometría, meteorología & hidrología. Informe del año 2006. IRD, INAMHI, EMAAP-Q.: 11èpp.

Francou, B., Pouyaud, B. (avec la collaboration de 13 autres auteurs, 2004) : Método de observación de glaciares en los Andes tropicales. Mediciones de terreno y procesamiento de datos. Document GREAT ICE en version électronique (CD-WEB): 240 p.

Soruco, A., Berger, T., Mendoza, J., Rabatel, A., Francou, B., Machaca, A., Rojas, F., Alexandrovna, T., Wagnon, P., Chazarin, J.P., Fuertes, R., Noriega, L., Ramirez, E. & Valdivieso H., 2005 : Glaciares Zongo, Chacaltaya, Charquini Sur, Bolivia, 16°S : mediciones glaciológicas, hidrológicas & meteorológicas. Año hidrológico 2003-2004. Informe IRD-IHH- SENAMHI-COBEE, février 2005.

