

GLACIERS ET ÉVOLUTION CLIMATIQUE DANS LES ANDES BOLIVIENNES

GLACIER DE ZONGO ET GLACIER DE CHACALTAYA CORDILLÈRE ROYALE, 16°S

Bernard Francou, Pierre Ribstein *

Résumé

Par sa sensibilité et son délai de réponse bref, le glacier est d'un grand intérêt pour analyser l'évolution et la variabilité actuelles du climat entre les tropiques. Les méthodes de détermination des bilans de masse et des bilans hydrologiques, avec un pas de mesure mensuel, sont présentées. Les résultats obtenus sur trois années hydrologiques (1991-1994) montrent une grande variabilité. Celle-ci est contrôlée surtout par l'extension de la période des précipitations au sein de la saison chaude qui dure environ 6 mois. Les événements ENSO (*El Niño Southern Oscillation*) sont associés à des bilans nettement négatifs, ce qui est démontré par la réponse du glacier à l'épisode ENSO de 1991-1992 et dans la reconstruction des bilans effectuée sur la base de données hydrologiques pour les deux dernières décennies. Le recul accéléré des glaciers tropicaux depuis les années 1980 est lié à la fois à une succession d'événements ENSO et au réchauffement atmosphérique.

Mots-clés : Glaciers, climat, tropiques, Andes, réchauffement, phénomènes ENSO.

GLACIARES Y EVOLUCIÓN CLIMÁTICA EN LOS ANDES BOLIVIANOS GLACIAR DE ZONGO Y GLACIAR DE CHACALTAYA, CORDILLERA REAL, 16°S.

Resumen

Por su sensibilidad y su plazo de respuesta breve, el glaciar es de un gran interés para analizar la evolución y la variabilidad actuales del clima entre los trópicos. Se presentan los métodos de determinación del balance de masas y del balance hidrológico, con una frecuencia de mediciones mensual. Los resultados recogidos durante tres años (1991-1994) muestran una grande variabilidad. Ésta es controlada sobre todo por la extensión del periodo de precipitaciones en medio de la temporada cálida que dura más o menos 6 meses. Los eventos ENSO (*El Niño Southern Oscillation*) son asociados a balances netamente negativos, lo que es demostrado por la respuesta del glaciar al episodio de 1991-1992 y por la reconstrucción de los balances efectuada en base a los datos hidrológicos durante los dos últimos decenios. El retroceso acelerado de los glaciares tropicales desde los años 1980 es vinculado a la vez a una sucesión de eventos ENSO y al recalentamiento atmosférico.

Palabras claves : Glaciares, clima, trópicos, Andes, recalentamiento, fenómenos ENSO.

* ORSTOM - CP 9214 - La Paz - Bolivie.



GLACIERS AND CLIMATIC EVOLUTION IN THE ANDES OF BOLIVIA
ZONGO AND CHACALTAYA GLACIERS - REAL CORDILLERA, 16°S

Abstract

The high sensibility and the short lag time response of glaciers to climatic changing make it possible to use them for analyzing the variability and the evolution of climate in the Tropics. Measurements of mass balance and hydrological balance were performed every month on the two glaciers. Methods are presented. Results obtained during the three hydrological years 1991-1994 have shown great variability. This variability is controlled mainly by the extension of the precipitation period in the warm season which extends over six months. ENSO (El Niño Southern Oscillation) events are associated with quite negative mass balance, as shown both by the response of glaciers to the last 1991-1992 event and by the mass balance reconstruction from hydrological data for the two last decades. The glacier retreat is increasing dramatically since the 1980's in the Central Andes due to a succession of ENSO events and the forces of global warming.

Key words: *Glaciers, Tropics, climate, ENSO, Bolivia.*

INTRODUCTION

Des études faites récemment dans les Andes centrales (Thompson, 1992) et au Kenya (Hastenrath & Kruss, 1992) suggèrent que les effets du réchauffement global du climat pourraient être plus marqués sur les glaciers tropicaux que sur ceux des hautes et moyennes latitudes. On sait aussi que les glaciers proches de l'Équateur sont d'excellents indicateurs des oscillations climatiques de courte durée, comme par exemple les phénomènes ENSO (*El Niño-Southern Oscillation*) dans les Andes (Thompson *et al.*, 1984; Ribstein *et al.*, 1995; Francou *et al.*, 1995).

Malheureusement, la réponse des glaciers intertropicaux à ces évolutions est encore mal comprise. On dispose de données sur la diminution qui affecte leur surface ou leur volume depuis plus de 20 ans, notamment au Pérou en Cordillère Blanche, mais par contre très peu d'informations ont été recueillies sur les bilans de masse et les paramètres climatiques qui les contrôlent. Ceci est d'autant plus regrettable que les Andes rassemblent 95% de la glaciation intertropicale (Jordan, 1991) et que l'évolution actuelle des glaciers s'y accompagne de conséquences graves dans les domaines des risques naturels et de la ressource en eau (Ames & Francou, 1995).

Le seul glacier d'entre les tropiques à faire l'objet de mesures complètes depuis 1978 est le Glacier Lewis au Kenya (0°9'S/37°18'E) (Hastenrath, 1984). Ses données sont régulièrement publiées par le *World Glacier Monitoring Service* (IAHS/ICSI-UNEP-UNESCO). Cet organisme s'est donné comme priorité de susciter des études glaciologiques sous les tropiques et dans l'Hémisphère Sud pour pallier la carence actuelle d'informations dans ces aires géographiques.

L'ORSTOM et ses partenaires locaux ont commencé à mettre en place depuis 1991 un réseau d'observations glaciologiques et hydrologiques à travers les Andes Centrales, entre la Bolivie (16°S) et l'Équateur (00°). Outre les applications hydrologiques, le but principal de ce programme est de documenter et d'analyser l'évolution actuelle du climat — réchauffement global et phénomènes ENSO — en étudiant un système naturel hautement sensible et dont le temps de réponse est très bref. On évoquera ici les principaux résultats obtenus après 3 cycles hydrologiques sur 2 glaciers de la Cordillère Royale de Bolivie, les glaciers de Zongo et de Chacaltaya.



eaux continentales

LABORATOIRE D'HYDROLOGIE

Date :

M. RABBIA à M. F.D.O.

- | | | | |
|-------------------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------|
| <input type="checkbox"/> | A votre demande | <input type="checkbox"/> | Pour avis |
| <input type="checkbox"/> | En retour | <input type="checkbox"/> | Pour suite |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Pour vous | <input type="checkbox"/> | Pour élément de réponse |
| <input type="checkbox"/> | Pour information | <input type="checkbox"/> | Prière de m'en parler |
| <input type="checkbox"/> | Voir page | <input type="checkbox"/> | Pour signature |
| <input type="checkbox"/> | Pour classement chez vous | | |
| <input type="checkbox"/> | Prière de restituer | <input type="checkbox"/> | Pour diffusion |

Remarques :

Nous n'avons pas reçu
de copie de ces rapports
et du TAP à la Doc
Montpellier

Cordialement

Reçu
le 14/2/96

Télex ORST MPL 485 507 F
Télécopie du Laboratoire d'Hydrologie : 67.41.18.06.

Comant

B 1170

cas

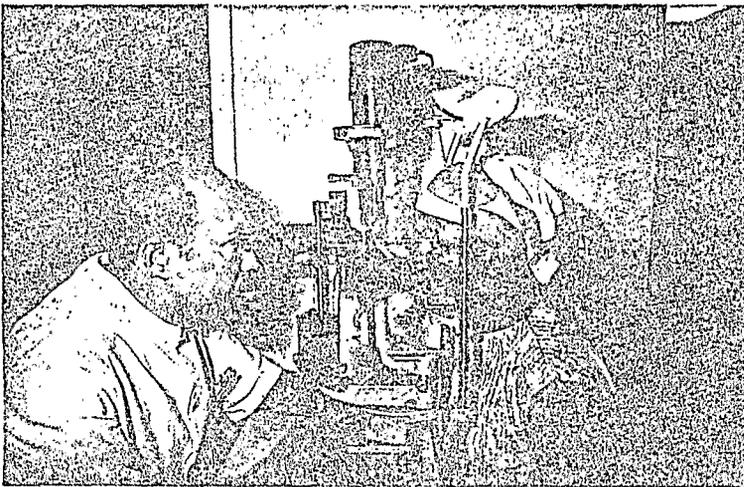
P. 1

Laboratoire d'Hydrologie
ORSTOM

B.P. 5045 - 34 032 - Montpellier - France
Tél : (33) 67 61 74 35 Fax : (33) 67 41 18 06

73255

Les thérapeutiques



Jusqu'à présent, le traitement médical de l'onchocercose se résumait en l'utilisation de deux médicaments aux effets secondaires très lourds.

Tout d'abord, un macrofilaricide, la suramine (Moranyl), qui entraîne souvent des troubles sévères (néphrotoxicité) pouvant être mortels.

Mais, surtout, les médecins utilisent depuis trente ans un médicament qui, lors de sa découverte, suscita de grands espoirs, la diéthylcarbamazine (Notézine).

Prescrit sur une période de vingt jours, ce microfilaricide donne très souvent lieu à des réactions allergiques — connues sous le nom de réaction de Mazzotti — liées à la lyse larvaire et pouvant occasionner des lésions oculaires irréversibles.

Les recherches se sont poursuivies avec, notamment, l'isolement en 1978 d'une substance, l'ivermectine, qui s'est rapi-

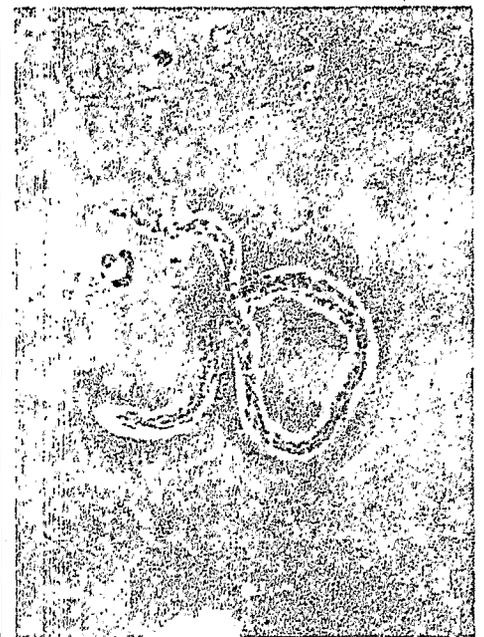
dement révélée être un antiparasitaire remarquable. Dans le cadre du programme de lutte contre l'onchocercose, des protocoles d'essai sur l'homme sont en cours dans plusieurs pays d'Afrique. Après un an de contrôle post-thérapeutique, les espoirs se concrétisent.

L'ivermectine se montre bien supérieure à la Notézine sur le plan de l'efficacité (avec une action microfilaricide prolongée), mais aussi par sa commodité d'emploi (une dose en une prise continue) et par sa très bonne tolérance. Plusieurs centaines de patients ont été guéris grâce à l'utilisation de ce produit.

L'association d'un traitement médical performant et d'une lutte prolongée et tenace contre le vecteur doit permettre de voir se concrétiser, dans les prochaines années, « un rêve fou », celui de la quasi-élimination de ce fléau qu'est l'onchocercose.

Afrique occidentale sera couvert par le programme contre l'onchocercose. Dans le même temps, la recherche thérapeutique a été vivement encouragée et la découverte récente d'un médicament, l'ivermectine, ouvre la voie à une prophylaxie de masse.

En dix ans, 170 millions de dollars ont été investis dans cette aventure. La décision vient d'être prise de la prolonger dix ans encore, avec la ferme volonté de maîtriser



Onchocerca volvulus, transmis à l'homme par la piqûre de la femelle simulie

l'onchocercose africaine en 1997. Vu les résultats déjà engrangés, le pari peut tout à fait être tenu. Mais l'important sera la prise en main par les Africains de la surveillance et de l'entretien de tous ces acquis. Formation et information des personnels seront déterminantes pour cette prise en charge. C'est dans cette optique que l'OMS et l'Orstom ont produit un très beau film, *Mara ou le regard du lion*, réalisé par Bernard Surugue, qui retrace les dix premières années de cette épopée et définit les enjeux.

Les projets généreux de l'OMS tels que la vaccination de tous les enfants, la lutte contre la faim dans le monde ou la santé pour tous en l'an 2000 restent des vœux pieux. Cette fois, le programme de lutte contre l'onchocercose est en passe d'être une grande réussite, comme a pu l'être l'éradication de la variole.

Un bel exemple à suivre pour d'autres maladies parasitaires. ■ Philippe Daroux

à tout moment de la journée et qu'elles ont disparu à présent. D'ailleurs, son village s'est développé si rapidement qu'il n'a pas encore de nom !

On encourage les villageois à créer des exploitations qui soient rentables ; fini le labourage à la main, l'introduction des charrues et des engrais a permis à la production de croître. Au Mali, par exemple, les zones d'onchocercose recouvraient 125 000 km². Depuis l'éradication de Mara, la terre de la région est à nouveau propice à la culture du mil, du sorgho et du maïs. On a même introduit des cultures industrielles (arachide, co-

ton, sisal) et maraichères (tomates, oignons, légumineuses) exportables. A Sikasso s'est établie une vaste plantation de thé, culture inconnue jusque-là dans la contrée. Dans les villages traversés, la vie a repris ses droits et ce sont des enfants sains et espiègles qui vous entourent et vous font fête.

Preuve du succès de l'opération, quatre nouveaux pays doivent rejoindre le programme en 1986 : la Guinée, la Guinée-Bissau, le Sénégal et la Sierra Leone. La zone de lutte va donc passer à 1 315 000 km². Dès lors, pratiquement tout l'habitat naturel de la simulie en

1. QU'EST-CE QU'UN GLACIER ET COMMENT L'ÉTUDIÉ ?

Un glacier est un stock d'eau solide comprenant de la neige, du névé et de la glace qui se renouvellent par le jeu combiné de l'accumulation (précipitations) et de l'ablation (fonte, sublimation). Il s'écoule par gravité continuellement des parties hautes où l'accumulation l'emporte vers les parties basses où l'ablation domine, le flux de glace maximum étant atteint au niveau de la "ligne d'équilibre". La ligne d'équilibre du glacier (ELA) est le lieu intermédiaire où l'accumulation équilibre l'ablation ; son altitude varie en fonction des années, comme varie le bilan lui-même. Le bilan (ou bilan de masse) est le gain, la perte ou l'équilibre de masse enregistré par le glacier au cours d'une année hydrologique (septembre-août dans les Andes de Bolivie et du Pérou). Le signe du bilan au cours d'une année est déterminé d'une part par le total et la répartition des précipitations solides, variables qui "font" l'accumulation, d'autre part par les températures et le rayonnement, variables qui contrôlent l'ablation, tous ces paramètres climatiques se combinant de façon complexe et formant ce que l'on peut considérer comme le "signal d'entrée" du système. Le "signal de sortie" est une augmentation ou une perte de volume qui se traduit par une croissance ou une diminution des vitesses d'écoulement de la glace, et en définitive par une avancée ou un recul du front. Les oscillations du front d'un glacier traduisent donc la tendance enregistrée par les bilans au cours des années précédentes, après un délai plus ou moins long, qui est fonction de la taille du glacier et de sa pente moyenne. Entre les tropiques, les glaciers sont souvent de petite taille et l'ablation à basse altitude élevée tout au long de l'année, aussi les mouvements du front traduisent-ils de façon presque synchrone la tendance du bilan.

La mesure topographique du front, qui revient à estimer la variation de la longueur totale du glacier au cours du temps, est donc à elle seule une donnée riche d'indications. Elle est faite chaque année sur les glaciers étudiés en fin d'année hydrologique. Néanmoins, c'est la mesure du bilan de masse qui constitue la source d'information majeure et qui permet de relier l'évolution du glacier avec celle du climat.

Cette mesure consiste à mettre en place un semis de balises le long du glacier. Ces balises sont des tubes enfoncés dans la glace, qui, superposés, forment un ensemble d'une dizaine de mètres de hauteur. La lecture de l'émergence de ces balises sur la glace selon un pas de temps fixe (mois, an) donne le bilan net (bn) en un lieu. La répartition de ces balises le long du glacier en fonction de l'altitude, qui doit tenir compte des variations imposées par l'exposition, permet d'obtenir une courbe liant l'altitude et le bilan. Dans la zone d'accumulation du glacier, au-dessus de la ligne d'équilibre, pour pallier l'ensevelissement inévitable des balises dans la glace, on réalise des sondages directs dans la couche neigeuse ; ceci permet, après mesure des densités, de calculer l'équivalent en eau gagné par le glacier selon le pas de temps choisi. Finalement, on calcule le bilan Bn du glacier en intégrant le bilan de masse sur toute la surface S selon l'équation :

$$B_n = \int_{S_c} b_n dS + \int_{S_a} b_n dS$$

où S_c et S_a sont les surfaces calculées pour les zones d'accumulation et d'ablation.

L'expérience a montré sur tous les glaciers étudiés que les courbes de bilan/altitude ont la même allure (pente) au cours des années successives et sont donc à peu près parallèles. Elles sont seulement décalées dans un sens ou dans un autre, vers les bilans positifs ou vers les bilans négatifs.

Sur certains glaciers ne comprenant que quelques balises dans la zone d'ablation et où l'on ne peut estimer le bilan de masse, on utilise ce décalage entre les courbes annuelles obtenues de cette façon comme indicateur de réponse du glacier au forçage climatique : c'est le paramètre β du modèle linéaire de Liboutry (1974). C'est le cas pour les glaciers suivis au Pérou depuis une quinzaine d'années sur lesquels on ne dispose pas de mesures d'accumulation dans la zone haute.

Les vitesses superficielles, ainsi que les variations d'épaisseur sont obtenues en positionnant chaque année le réseau de balises par topographie au sol à partir de points fixes situés sur le pourtour du glacier.

Quand il s'agit d'étudier le glacier pour des applications hydrologiques, on estime le bilan à partir de la mesure du débit du torrent émissaire, en tenant compte des pertes estimées par sublimation ou par infiltration dans le lit rocheux, et des précipitations tombées sur le glacier. Cette dernière donnée est recueillie au moyen d'un réseau de pluviomètres totalisateurs dont la surface de captation, agrandie par rapport aux pluviomètres classiques, est conçue pour recevoir les précipitations solides. Les températures sont mesurées sous abri à proximité du glacier. Toutes ces données sont comparées aux valeurs des stations météorologiques régionales pour estimer les gradients pluviométrique et thermique. Des appareils destinés à mesurer le rayonnement sur le glacier aux différentes longueurs d'onde sont utiles pour calculer des bilans énergétiques et identifier les variables qui contrôlent l'ablation de la neige et de la glace tout au long de l'année.

2. LES GLACIERS SUIVIS ET L'ÉQUIPEMENT MIS EN PLACE

Le dispositif de mesure sur un glacier décrit plus haut est assez lourd à gérer et limite ce type d'étude à quelques individus sélectionnés au sein d'un massif. Au demeurant, l'expérience a montré que ces individus, dans la mesure où ils sont bien choisis, sont représentatifs de la tendance générale propre à tout le massif (Letréguilly & Reynaud, 1990).

C'est en tenant compte de ce fait établi que l'on a sélectionné pour l'étude faite en Cordillère Royale deux glaciers réputés pour leur importance économique et leur accessibilité : le Glacier de Zongo et de Glacier de Chacaltaya.

Le Glacier de Zongo ($16^{\circ}15'S$, $68^{\circ}10'O$) est un glacier de vallée de 3 km de long, $2,1 \text{ km}^2$, situé dans un bassin versant de 3 km^2 . Il est compris dans une tranche d'altitude allant de 6000 m à 4890 m et se place en exposition sud puis est. La ligne d'équilibre moyenne est vers 5200 m, ce qui laisse environ 70% de la surface totale à la zone d'accumulation. Ses eaux sont captées et utilisées par le complexe hydroélectrique du Zongo, versant amazonien des Andes, qui alimente la ville de La Paz située à 40 km. L'équipement mis en place en 1991 et complété par la suite, est présenté figure 1. Son exploitation se fait dans le cadre d'un accord entre la COBEE (*Compañía Boliviana de Energía Eléctrica*) et l'ORSTOM.

Le Glacier de Chacaltaya ($16^{\circ}21'S$, $68^{\circ}07'O$) est un petit glacier de cirque de 0,64 km de longueur, $0,1 \text{ km}^2$ de surface, s'étendant entre 5345 m et 5082 m en exposition sud. Il est représentatif des petits glaciers andins de faible altitude dont la masse a fortement diminué depuis un demi-siècle et tout particulièrement ces dernières années. Des premières estimations de son recul ont été faites à partir de documents photographiques et de marques peintes sur le front : ainsi, entre 1941 et 1982, le glacier a perdu environ 70 m de sa longueur, soit avec

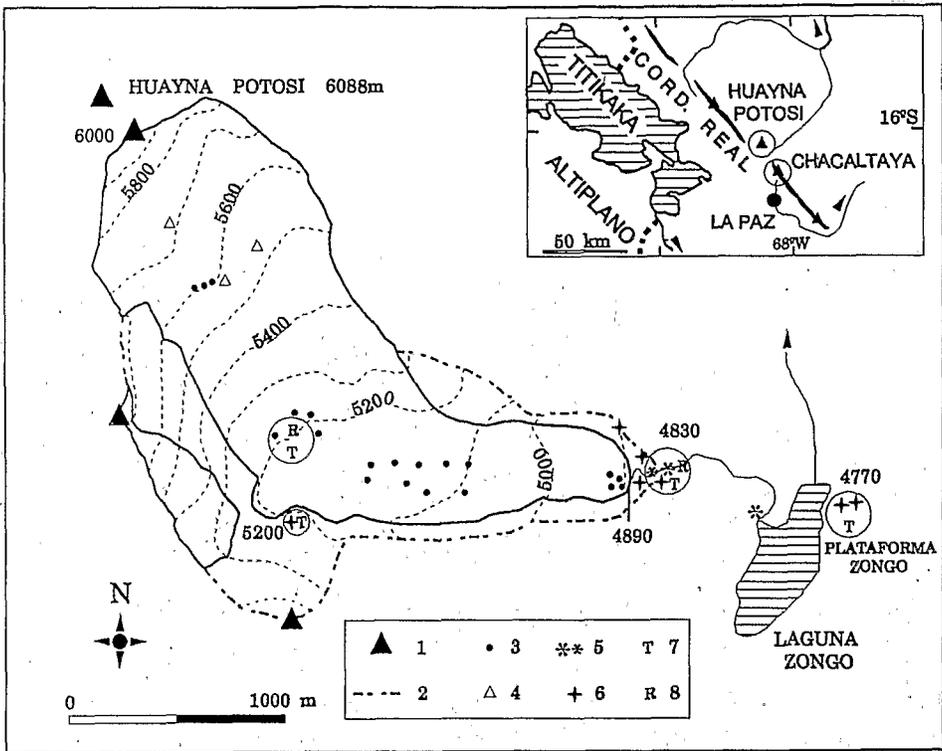


Fig.1 - Le Glacier de Zongo et son système de mesure en 1993.

1. Sommets principaux - 2. Limites de bassin versant - 3. Balises de bilan-vitesse - 4. Puits et crevasses pour les mesures du bilan d'accumulation - 5. Stations hydrométriques - 6. Pluviomètres totalisateurs - 7. Thermographes sous abri - 8. Pyranomètres et bilanmètre.

un taux de recul moyen de 1,7 m/an, alors qu'entre 1982 et 1993, il s'est rétréci de 66 m en passant à une vitesse de recul moyenne de 6,0 m/an. Outre l'intérêt de ce type de petits glaciers comme réservoirs d'eau pour la ville de La Paz, Chacaltaya offre depuis un demi-siècle le champ de ski équipé le plus haut du monde et présente de ce fait une attraction touristique non négligeable pour la Bolivie. Le dispositif mis en place depuis 1991 concerne le contrôle des variations de surface par topographie au sol, la détermination du bilan de masse et la mesure des précipitations et des températures (Fig. 2) Cette étude s'inscrit dans le cadre d'une convention liant l'Universidad Mayor San Andrés de La Paz à l'ORSTOM.

Dans les 2 cas, les mesures sont effectuées selon un pas mensuel, ce qui n'est pas courant à l'échelle du suivi mondial des glaciers, mais imposé ici par la complexité de la détermination du bilan au cours de l'année liée aux particularités du climat intertropical.

3. BILANS ET ÉCOULEMENTS : LES MOIS DÉTERMINANTS DANS L'ANNÉE

La principale originalité des glaciers intertropicaux par rapport aux glaciers alpins ou subpolaires vient du synchronisme entre saison d'accumulation et saison chaude : les

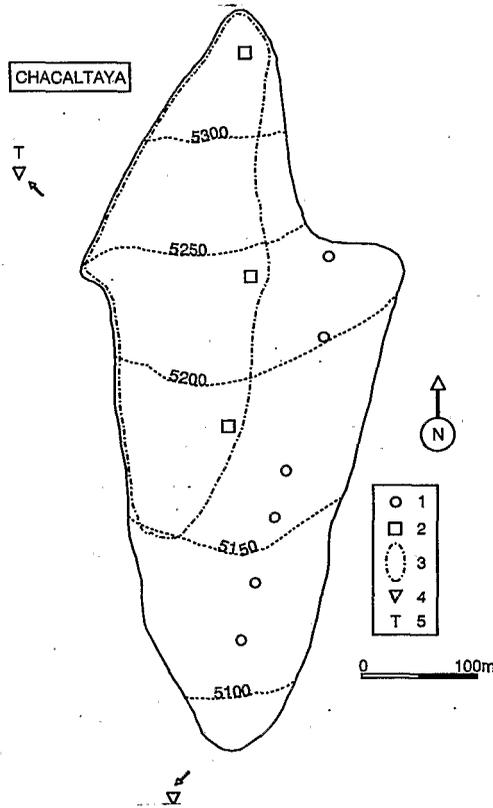


Fig. 2 - Le Glacier de Chacaltaya et son système de mesure en 1993.

1. Balises de bilan- vitesse - 2. Sondages nivométriques - 3. Piste de ski - 4. Pluviomètres totalisateurs - 5. Thermographe sous abri.

précipitations se produisent lorsque le soleil est proche du zénith et le rayonnement au sommet de l'atmosphère à son maximum d'intensité, soit entre octobre et mars, avec une concentration optimale des chutes entre décembre et mars. En conséquence, cette saison est celle où le glacier gagne le plus de masse par accumulation dans sa partie haute, mais perd aussi le plus d'eau par ablation dans sa partie basse. Aussi, une possible variation dans la saison des précipitations — réduction de la saison humide à une période de deux mois seulement ou au contraire son extension à plus de 4 mois — peut produire un double effet : 1) faire varier l'accumulation dans la zone haute ; 2) mais aussi et surtout augmenter ou diminuer dans de grandes proportions l'ablation sur une bonne partie du glacier. On s'attend donc à ce que le bilan sur ce type de glacier réagisse de façon prononcée à la variabilité du climat, notamment pendant la saison chaude qui s'étend sur 6 mois environ.

Les résultats obtenus au cours des 3 cycles hydrologiques confirment ces hypothèses et permettent de diviser l'année en 3 périodes (Fig. 3 et 4).

1) Les mois du début de l'été, octobre à décembre, précédant l'arrivée des précipitations importantes, sont des mois de forte ablation. On peut ajouter à ces mois mars et avril, mois

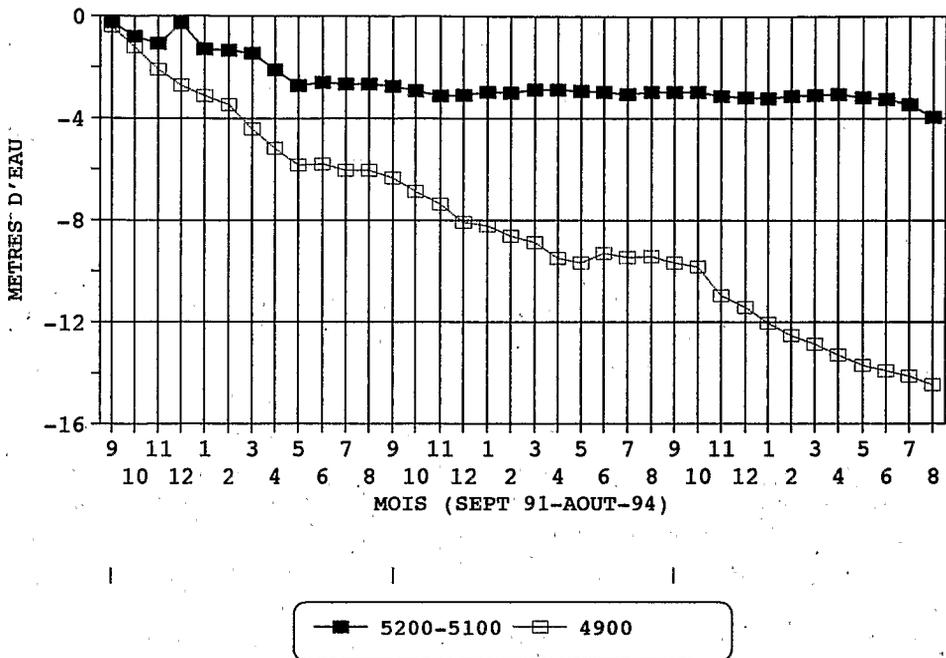


Fig. 3 - Bilan mensuel cumulé pendant 36 mois, de septembre 1991 à août 1994, sur deux ensemble de balises du Glacier de Zongo : 5200-5100 m (rectangles noirs) et 4900 m (rectangles blancs).

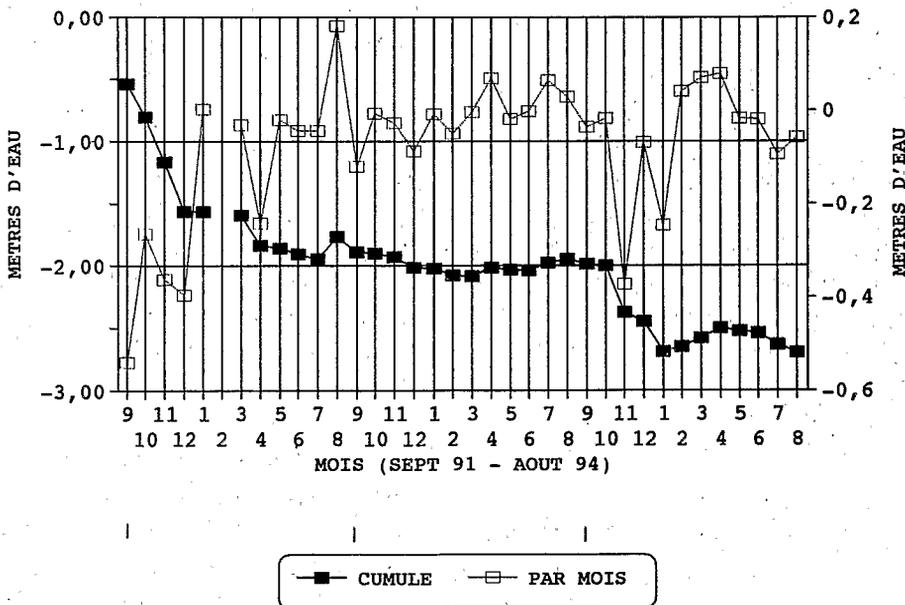


Fig. 4 - Bilan mensuel à 5150-5100 m pendant 36 mois de septembre 1991 à août 1994 sur le Glacier de Chacaltaya. Rectangles noirs : mois cumulés. Rectangles blancs : mois seuls.

qui suivent immédiatement la période la plus humide. En novembre, mois le plus chaud, la limite du névé (limite qui sépare la neige de densité égale ou supérieure à 0,5 de la glace à la surface du glacier) se place au moins à 5500 m, donc bien à l'intérieur de la zone d'accumulation. Le taux d'ablation important de cette période s'explique par : 1) la grande quantité d'énergie qui arrive au sommet de l'atmosphère en cette période de solstice d'été, 2) une nébulosité encore peu constante, 3) un albédo peu élevé, le glacier présentant encore en surface une glace salie par divers dépôts de saison sèche, 4) et une chaleur sensible déjà élevée en raison de l'augmentation de l'hygrométrie.

2) Les mois janvier-février et parfois mars, sont des mois d'accumulation. Mais l'énergie disponible pour la fusion reste élevée dans le bas du glacier, près du front, par rayonnement direct, chaleur sensible et chaleur latente de condensation ; les précipitations liquides sont rares sur les glaciers de Bolivie, la limite pluie/neige se situant le plus souvent quelques centaines de mètres en dessous du glacier.

À noter qu'une baisse des précipitations pendant ces mois entraîne un glissement rapide vers le haut (5100/5200 m) de la zone où l'ablation est dominante, effet d'une arrivée massive d'énergie sur le glacier par suite de l'atténuation du couvert nuageux.

3) Les mois d'hiver, de mai à août, sont en général secs et froids. La couverture nuageuse diurne est faible voire absente, mais l'énergie rayonnée au sommet de l'atmosphère est réduite de 30% par rapport à l'été. Aussi, l'énergie disponible sur le glacier est-elle tout juste capable de fondre ou de sublimer les quelques apports reçus par chutes de neige, sans pouvoir être suffisante pour porter une glace refroidie par les pertes du rayonnement nocturne à la température de fusion. Le mois d'août 1994, très sec, a toutefois démontré que l'ablation peut reprendre sensiblement en fin d'hiver dès lors que l'énergie rayonnée à la surface du glacier est élevée et l'albédo faible. À noter que c'est pendant ces mois que l'énergie reçue par les versants nord est la plus élevée par rapport aux versants sud. Ceci permet d'expliquer une différence d'élévation d'environ 300 m entre les lignes d'équilibre glaciaires des versants les plus contrastés, qui sont dans les Andes Centrales les versants NE et les versant SO.

Les données hydrométriques (Fig. 5) soulignent l'importance de la fusion en début et en fin de saison des pluies et l'étiage prononcé de la saison sèche. Un modèle de fonte combinant bilan énergétique, ablation et valeurs d'écoulement est en cours d'élaboration, qui permettra de simuler les situations de fonte observées sur le Glacier de Zongo au cours de l'année. Sur la même courbe (Fig. 5), on peut remarquer que les cycles annuels présentent entre eux des différences marquées dans l'intensité et la répartition mensuelles de l'ablation.

4. BILANS NETS ANNUELS : VARIABILITÉ ASSOCIÉE AUX ÉVÉNEMENTS EN SO

Après 3 cycles hydrologiques, de septembre 1991 à août 1994, on peut déjà apprécier à travers la réponse du glacier l'importance de la variabilité du climat andin.

Le tableau de la page suivante donne pour les 3 années le bilan net, les précipitations, l'ablation déduite du bilan, l'écoulement, l'altitude de la ligne d'équilibre et le pourcentage de la surface d'accumulation par rapport à la surface totale sur le Glacier de Zongo.

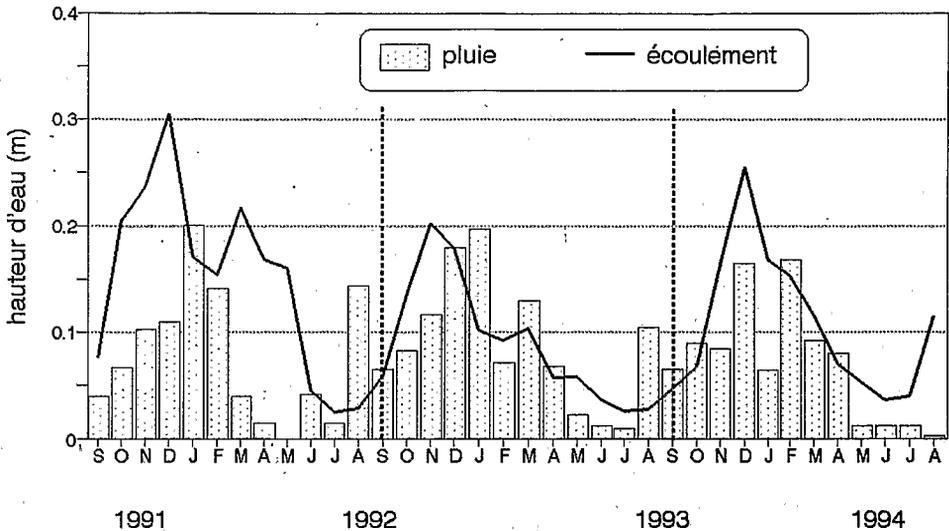


Fig. 5 - Précipitations mensuelles (moyenne de 4 pluviomètres totalisateurs proches du glacier) et écoulement sur le Glacier de Zongo pendant 36 mois (septembre 1991-août 1994).

ANNÉES	Bn (1)	P (2)	A (3)	Q (4)	ELA (5)	AAR (6)
1991-2	-1,38	0,92	2,30	2,25	5300	58
1992-3	0,02	1,06	1,04	1,18	5100	86
1993-4	-0,73	0,85	1,58	1,56	5200	67

1) Bilan net spécifique (m d'eau)
 2) Précipitations mesurées près du glacier (4880-5200 m) (m d'eau)
 3) Ablation spécifique : $A = P - Bn$ (m d'eau)
 4) Écoulement spécifique (ramené à une surface de glacier de 2,1 km²) (m d'eau)
 5) Altitude de la ligne d'équilibre glaciaire (en m)
 6) Rapport entre surface de la zone d'accumulation et surface totale (en %).

En comparant les 3 années successives, dont aucune ne se ressemble, on peut faire les remarques suivantes :

1) L'année 1991-1992 a montré un bilan très déficitaire ; le glacier a perdu par ablation près de 2,5 fois ce qu'il a reçu par les précipitations. Ceci s'explique par 3 facteurs :

a) une réduction de la durée de la pleine période des précipitations ; plus précisément, alors que 7 mois reçoivent un total mensuel moyen de plus de 50 mm de précipitations en année normale, en 1991-1992 seulement 4 ont pu dépasser ce seuil ; b) une nette dérive positive des températures par rapport à la normale (de 1°C à 2°C, soit 1 à 2 écarts-types, pour

les maximums et les minimums) observée de janvier à mai, la plupart de ces mois appartenant à la saison chaude ; c) une accentuation de l'ablation en novembre-décembre, visible par les hauteurs d'eau enregistrées à cette époque (Fig. 5) ; la fonte a été amplifiée par la multiplication d'épisodes secs d'une durée minimum d'une dizaine de jours durant lesquels l'énergie a pu s'accumuler et l'albedo s'abaisser suffisamment pour donner lieu à des pointes d'écoulement record.

Ce cycle caractérise une année ENSO d'intensité moyenne. L'indice d'oscillation sud (SOI), soit la différence entre les pressions standardisées, au niveau de la mer, de Tahiti et de Darwin, Australie, est l'indicateur des phénomènes ENSO le plus utilisé. Le SOI a été en 1991-1992 nettement négatif, passant par un minimum de -2,2 pour la moyenne mobile établie sur 5 mois (Kousky, 1993). C'est la valeur la plus basse enregistrée depuis l'ENSO de 1982-1983, considéré comme le plus fort de ce siècle.

On sait depuis les travaux de Thompson *et al.* (1984) sur la Calotte de Quelccaya, en Cordillère de Vilcanota au Pérou, que les épisodes ENSO sont associés, entre autre, à des taux d'accumulation faibles à haute altitude, ce qui est cohérent avec le déficit des précipitations enregistré sur les Andes, l'Altiplano et une partie de l'Amazonie au cours de ces événements (Franco & Pizarro, 1985). Sur les glaciers de Bolivie, on observe un bilan très déficitaire dans lequel le terme ablation est prépondérant : le total des précipitations en 1991-1992 n'apparaît que faiblement inférieur à la normale reflétée par le cycle suivant 1992-1993 (2ème colonne du tabl. de la page 9).

Par la suite, il importera de tester la validité de cette information sur d'autres cycles ENSO, afin de déterminer parmi les 2 paramètres qui contrôlent le bilan, précipitations et températures, celui qui a une influence dominante dans ce type de situation.

2) En année ENSO, la ligne d'équilibre (ELA) grimpe de 5100 m (situation normale pour un bilan de masse équilibré) à 5300 m et le ratio surface d'accumulation/surface totale (AAR) diminue fortement ; dans ces conditions, les masses glaciaires situées à basse altitude subissent un régime d'ablation sur toute leur surface, ce qui a été le cas pour Chacaltaya en 1991-1992. Aussi la perte de masse et le recul sont-ils très élevés ces années-là : rien qu'en 1991-1992, Chacaltaya a perdu une tranche moyenne de 1,2 m d'eau en surface et reculé de plus de 6 mètres au niveau de son front, ce qui correspond à une perte de près de 1% de sa longueur totale.

3) Les années ENSO ne sont pas les seules à être associées à des bilans négatifs, comme le montre le cycle 1993-1994 qui ne peut être considéré comme faisant partie de l'un de ces épisodes ; la détermination de la part des événements ENSO dans le recul actuel des glaciers et l'importance d'autres facteurs comme le réchauffement global ne peuvent donc être abordés qu'à partir d'une série de bilans couvrant plus d'une décennie.

4) Les estimations de l'ablation faites de façon indépendante à partir des balises de bilan et de la lame d'eau écoulée donnent des valeurs très proches (colonne 4 et 5 du tableau de la page 9). On peut en déduire, en première approximation, que les pertes par sublimation sont faibles sur ce type de glacier et d'une quantité qu'il n'est pas possible de déterminer compte tenu de l'imprécision de la mesure.

5. LA TENDANCE DEPUIS 20 ANS : RECONSTRUCTION DES BILANS FAITS SUR LE GLACIER DE ZONGO À PARTIR DES DONNÉES HYDROLOGIQUES

La reconstruction a été rendue possible grâce à deux lectures de hauteurs d'eau faites chaque jour depuis 1973 sur le canal qui recueille les eaux du glacier pour les amener au Lac

de Zongo (Fig. 1) (Ribstein *et al.*, 1995). Trois conditions ont dû être remplies : 1) une bonne corrélation calculée de 1991 à 1993 entre les valeurs d'écoulement déduites de ces lectures et celles mesurées à la station limnimétrique installée à 4830 m ; 2) la possibilité de reconstituer les données manquantes à partir des températures de la station de La Paz-El Alto (4060 m) au vu des bonnes corrélations existant entre celles-ci et les débits ; 3) la coincidence étroite entre le bilan de masse obtenue par la méthode glaciologique et par la méthode hydrologique.

Les résultats sont présentés à la figure 6, en parallèle avec la courbe de l'indice d'oscillation sud. Les deux courbes ont été lissées par une moyenne mobile afin de filtrer la variabilité saisonnière. On observe que les valeurs de bilan les plus négatives correspondent bien à des événements ENSO : 1982-1983, 1991-1992, 1987-1988 et 1977-1978 dans un ordre d'intensité décroissante ; seul le bilan négatif de 1979-1980 ne suit pas la tendance. L'importance de l'ablation dans le terme du bilan est soulignée par les fortes valeurs d'écoulement obtenues au cours de ces épisodes. Ce résultat doit être mis en rapport avec le niveau des températures enregistrées dans les stations d'altitude proches : à chaque période où l'indice d'oscillation sud est négatif et signale un ENSO, les températures sont supérieures à la moyenne aux stations d'El Alto et de Chacaltaya.

Les corrélations calculées entre les valeurs d'écoulement du glacier et l'indice d'oscillation sud traduisent la complexité de la relation ENSO/bilan glaciaire : c'est avec 5 mois de décalage que l'indice et l'écoulement sont les mieux corrélés (coefficient $r = 0,61$, avec $n = 234$), délai que l'on retrouve dans la corrélation faite entre l'indice d'oscillation sud et les températures de l'Alto ($r = 0,60$, $n = 234$). Inversement, parmi les quelques années à bilans plus positifs, certaines n'apparaissent pas associées à la situation anti-ENSO (valeur de l'indice d'oscillation sud positive), comme l'épisode 1986-1987, une année très humide où le Lac Titicaca a atteint une cote exceptionnellement élevée.

Si sur toute la période de reconstruction des bilans, on soustrait le total moyen des précipitations qu'on estime reçu chaque année par le glacier (équivalent au total de la station de la *Plataforma de Zongo* augmenté de 20%), soit 1,062 m d'eau, au total moyen écoulé dans l'année par le torrent émissaire, soit 1,472 m d'eau, on calcule un bilan déficitaire moyen de 0,410 m d'eau sur ces 20 ans. Seuls, trois années ont enregistré des bilans positifs, 1974-1975, 1975-1976 et 1986-1987. Il est à noter que ces mêmes années, les fronts des petits glaciers mesurés en Cordillère Blanche au Pérou n'ont pas reculé (Ames & Francou, 1995), ce qui démontre une tendance commune à cette partie des Andes. Mais dans l'ensemble, ici comme au Pérou, les bilans sont surtout négatifs, ce que traduisent les chiffres de recul glaciaire très importants mesurés au cours des deux décennies écoulées.

6. DISCUSSION ET CONCLUSION : POURQUOI LES GLACIERS TROPICAUX CONNAISSENT-ILS UN REcul ACCÉLÉRÉ ?

Parmi les études les plus récentes publiées sur les glaciers tropicaux, toutes relèvent l'impressionnante vitesse à laquelle s'opère leur recul, aussi bien en Afrique, au Kenya (Hastenrath & Kruss, 1992) et au Ruwenzori (Kaser & Noggler, 1991), qu'en Nouvelle Guinée (Allison & Peterson, 1989) ou au Pérou (Kaser *et al.*, 1990). Thompson *et al.* (1993) viennent de souligner qu'à Quelccaya, entre 1976 et 1991, les conditions permettant d'identifier les strates annuelles de glace sur la base de l'analyse isotopique du rapport O^{16}/O^{18} se sont détériorées au sommet (5670 m) par suite de la percolation dans le profil des eaux de

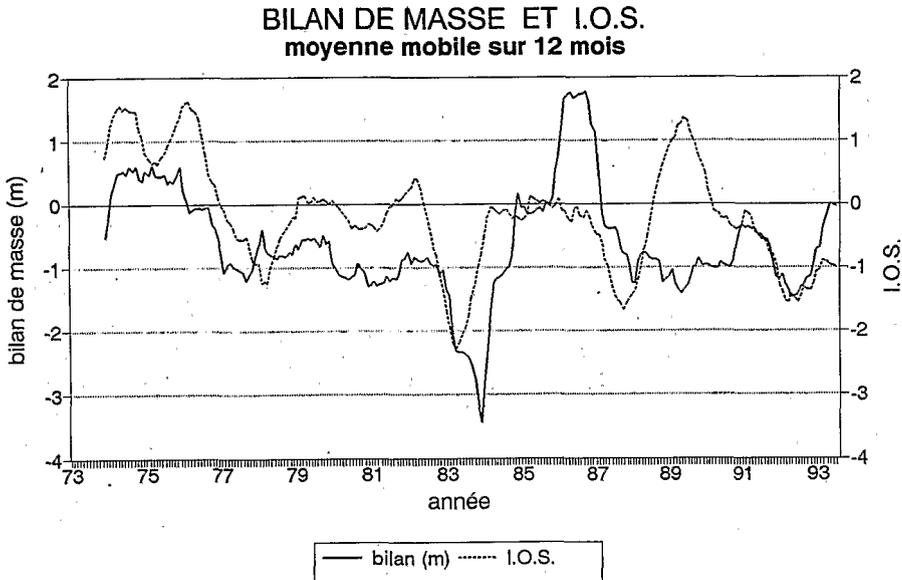


Fig. 6 - Bilan de masse du Glacier de Zongo et indice d'oscillation sud (IOS, ou SOI). Le bilan est reconstruit à partir des données hydrologiques (voir texte). Le IOS est la différence de pression entre Tahiti et Darwin en valeurs standardisées. Chaque courbe représente une moyenne mobile sur 12 mois.

fonte ; la fusion affecte donc à présent les masses de glace situées à haute altitude et *de facto* limite les sites possibles pour acquérir de longs enregistrements climatiques par carottage aux sommets de 6000 m et plus.

Le problème le plus ardu consiste à trouver la ou les raisons déterminantes de cette rapide évolution des glaces tropicales. Les auteurs s'accordent pour désigner le réchauffement par effet de serre comme étant le principal facteur responsable, cependant il apparaît difficile de le mettre en évidence de façon quantitative. Selon Thompson et *al.* (1992), le signal d'un réchauffement très net détecté dans les calottes glaciaires de basses latitudes, au Pérou et en Asie, pourrait être lié au fait que la moyenne troposphère tropicale (entre 5 et 10 km d'altitude) réagirait de façon précoce et accentuée au réchauffement global en cours, ce que semblent confirmer les sondages réalisés dans la troposphère à cette altitude, notamment au-dessus de l'Inde. D'autres (Hastenrath & Kruss, 1992) estiment que l'augmentation des températures observée au Kenya sur les enregistrements des stations météorologiques et qui porte sur une fraction de degré C, ne peut rendre compte à elle seule de la rapidité de l'évolution des glaciers de la région, qui suppose un apport d'énergie supplémentaire estimée à 5 W/m^2 . Aussi faut-il chercher l'origine de cet apport dans l'évolution des transferts de chaleur associée à l'augmentation de l'humidité atmosphérique que l'on a détectée dans la moyenne troposphère au niveau de la ceinture équatoriale : cette humidité croissante d'origine advective contribuerait à modifier les transferts de chaleur latente et à augmenter l'ablation du glacier.

Les premières analyses faites sur les séries d'enregistrements des températures et des précipitations dans les Andes Centrales tendent à montrer que les variations d'une année sur l'autre de ces deux paramètres portent sur des grandeurs bien plus élevées que celles qu'on pourrait observer sur une tendance pluri-décennale et dont on a déjà du mal à préciser le sens. Sur les glaciers, l'exemple bolivien (et celui du Pérou, voir Kaser *et al.*, 1990) montre que températures et précipitations sont étroitement couplées dans la détermination du bilan d'un glacier tropical : ainsi les années à bilan négatif sont-elles des années chaudes et plutôt déficitaires en précipitations. Ceci est clair à travers l'exemple des années ENSO, années qui rendent compte à elles seules d'une part importante de la variabilité du climat andin. Mais il faut bien admettre que l'évolution climatique responsable du recul accéléré des glaciers, notamment depuis le début de la décennie 1980, nous échappe encore.

Plus que jamais, l'approche de la question par les bilans, bilans glaciologiques et hydrologiques couplés à des bilans énergétiques détaillés, reste nécessaire. Ceci dans un cadre géographique étendu à toutes les Andes centrales, de Bolivie à l'Équateur, pour appréhender le problème dans les contextes climatiques les plus divers de la haute montagne tropicale.

Références citées

- ALLISON, I. & PETERSON, J.A., 1989 - Glaciers of Irian Jaya, Indonesia. U.S. Geological Survey Professional Paper, 1386 H : 1-20.
- AMES, A. & FRANCOU, B., 1995 - Cordillera Blanca, Perú. Glaciares en la Historia. *Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines*, 24(1) : Lima :
- FRANCOU, B. & PIZARRO, L., 1985 - El Niño y la sequía en los Altos Andes Centrales (Perú y Bolivia). *Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines*, 14(1-2) : 1-18.
- FRANCOU, B., RIBSTEIN, P., SARAVIA, R. & TIRIAU, E., (sous presse) - Monthly balance and water discharge of an intertropical glacier : the Zongo Glacier, Cordillera Real, Bolivia, 16°S. *Journal of Glaciology*, 41, 137: 61-67.
- HASTENRATH, S., 1984 - The glaciers of Equatorial East Africa. Boston, Lancaster : D. Reidel Publishing Co., Dordrecht.
- HASTENRATH, S. & KRUSS, P.D., 1992 - The dramatic retreat of Mount Kenya's glaciers between 1963 and 1987 : greenhouse forcing. *Annals of Glaciology*, 16 : 127-134.
- JORDAN, E., 1991 - Die gletscher der bolivianischen Anden. Stuttgart : Franz Steiner Verlag.
- KASER, G., AMES, A. & ZAMORA, M., 1990 - Glacier fluctuations and climate in the Cordillera Blanca, Peru. *Annals of Glaciology*, 14 : 136-140.
- KASER, G. & NOGGLER, B., 1991 - Observations on Speke Glacier, Ruwenzori Range, Uganda. *Journal of Glaciology*, 37, 127 : 315-318.
- KOUSKY, V.E., 1993 - The global climate of December 1991-February 1992 : mature phase warm (ENSO) episode conditions develop. *Journal of Climatology*, 6, 8 : 1639-1655.
- LETRÉGUILLY, A. & REYNAUD, L., 1990 - Space and time distribution of glacier mass balance in the Northern Hemisphere. *Alpine and Alpine Research*, 22, 1 : 43-50.
- LLIBOUTRY, L., 1974 - Multivariate statistical analysis of glacier annual balance. *Journal of Glaciology*, 13, 69 : 371-392.
- RIBSTEIN, P., TIRIAU, E., FRANCOU, B. & SARAVIA, R., 1995 - Tropical climate and glacier hydrology : a case study in Bolivia. *Journal of Hydrology*, 165 : 221-234.

- THOMPSON, L.G., 1992 - Ice core evidence from Peru and China. *in: Climate since A.D.1500.* (R. Bradley and P.D. Jones editors) : 517-548, London: Routledge.
- THOMPSON, L.G., MOSLEY-THOMPSON, E. & MORALES ARNAO, B., 1984 - El Niño Southern Oscillation events recorded in the stratigraphy of the Tropical Quelccaya ice cap, Peru. *Science*, 22 : 50-53.
- THOMPSON, L.G., MOSLEY-THOMPSON, E., DAVIS, M., LIN, P.N., YAO, T., DYURGEROV, M. & DAI, J., 1993 - "Recent warming" : ice core evidence from tropical ice cores with emphasis on Central Asia. *Global and Planetary Change*, 7 : 145-156.

20

DEBATE AGRARIO

ANÁLISIS Y ALTERNATIVAS

Seminario internacional:

AJUSTE ESTRUCTURAL, POLÍTICAS AGRARIAS Y SECTOR AGROPECUARIO EN BOLIVIA, CHILE, ECUADOR Y PERU, organizado por el CEPES y FAO y realizado en mayo de 1994 en la ciudad de Lima.

Ajuste estructural y el papel relativo del sector agrario en el desarrollo del Perú/*Javier Iguíñiz*

Ajuste estructural y sus efectos en el agro ecuatoriano/*Rafael Urriola y Luciano Martínez*

Ajuste estructural y sus efectos en el agro boliviano/*Juan Antonio Morales*

Ajuste estructural y sus efectos en el agro chileno/*Maximiliano Cox*

Ajuste estructural y las inversiones en el agro peruano/*Bruno Barletti*

Los efectos de la privatización en el agro: El caso de la comercialización de productos agrícolas/*Geoffrey Cannock*

Ajuste estructural y sus efectos sobre las instituciones económicas. El caso de los mercados financieros y de tierras/*Javier Alvarado*

Ajuste estructural y pequeña agricultura/*Javier Escobal*

Valor de la suscripción por cuatro números:

Latinoamérica	US\$ 38
Norteamérica y Europa	40
Asia y África	42

Pedidos y giros a nombre de CEPES Av. Salaverry 818, Lima 11, Perú. Teléfono: 336610 Fax: (5114) 331744