

VARIABILITÉ CLIMATIQUE ET FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE D'UN GLACIER TROPICAL

CLIMATIC VARIABILITY AND HYDROLOGICAL FUNCTIONING OF A TROPICAL GLACIER

P. RIBSTEIN¹, B. POUYAUD², J.-E. SICART³, P. WAGNON³, E. RAMIREZ RODRIGUEZ⁴, B. FRANCOU⁵.

¹IRD (Institut de Recherche pour le Développement, anciennement ORSTOM), UMR Sisyphe, Université Paris VI, case 123, 4, place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05, France / ²IRD, CP 9214, La Paz, Bolivia / ³LGGE, BP 96, 38402 Saint Martin d'Hères Cedex, France / ⁴IHH, CP 699, La Paz, Bolivia / ⁵IRD, Apartado postal. 17.12.857, Quito, Ecuador

ABSTRACT

The high sensibility and the short lag time response of glaciers to climate change make them relevant climatic indicators in the Tropics. Climatic signals lead to variation of the glacier mass balance calculated by the difference between the accumulation terms (precipitation) and the ablation terms (melting and sublimation). The discharge of the proglacial stream integrates most of the reaction of the glacier in response to climate variability. Here we present the main results of a research program developed since 1991 in the Andes.

This paper is based on the data obtained on Zongo Glacier, Cordillera Real of Bolivia (16°S, 68°W). The 2.1 km² glacier is part of a 3 km² basin above the main hydrometric station. The hydrological regime is analysed at different time scales and compared to the mass balance measurements and to the energetical fluxes close to the Equilibrium Line Altitude. The accumulation season, between October and March, coincides with the period of higher ablation. During this humid season, melt rates at the glacier surface lead to high discharges of the stream escaping from the glacier snout. Net all-wave radiation is the main source of energy at the glacier surface and shows strong fluctuations in relation to the highly variable albedo. An important peculiarity of tropical glaciers is the negative latent heat flux indicating strong sublimation, particularly during the dry season. The El Niño-Southern Oscillation (ENSO) events have a great influence on tropical glaciers, as shown during the last 1997-98 ENSO event. The main factor responsible for the dramatic melting of the glacier during the last ENSO warm event is the deficit of precipitation which reduces the accumulation and causes a low albedo on a large part of the glacier. Since 1973, monthly discharges from Zongo Glacier have been calculated, on the base of two daily readings at a staff gauge downstream the main hydrometric station. The established discharges from Zongo Glacier are compared to monthly discharges of the Charquini basin, similarly calculated since 1973. The Charquini basin is close to Zongo, with the same area (3 km²) and similar characteristics but less glacierized (10 % glacierized instead of 77 %). During ENSO warm events, basins with a small influence of glaciers exhibit low discharges due to the deficit of precipitation. Tropical glaciers have

been retreating rapidly for some decades because of the combination of both effects, the influence of strong ENSO warm events and the well documented global warming.

1. INTRODUCTION

Les glaciers situés en zone inter-tropicale sont d'une importance mineure à l'échelle des glaces de la planète : ils représentent environ 2 800 km², soit moins de 5 % des glaciers de montagne dans le monde et à peine 0,16 % des glaces de la planète. Les proportions étant encore plus faibles si on raisonne en terme de volumes de glaces, leur disparition passerait presque inaperçue, le niveau des océans ne bougerait pratiquement pas. Même les grands lacs endoréiques recueillant leurs eaux de fonte, comme le Lac Titicaca, varieraient dans des proportions peu significatives car les facteurs qui contrôlent les niveaux à l'échelle de ces vastes bassins versants sont principalement les quantités d'eau précipitées et évaporées. Néanmoins, ces glaciers occupent une position privilégiée comme indicateurs climatiques.

En réponse au changement du climat, le glacier voit son volume et sa longueur varier. Cette variation est intégratrice du signal climatique, car elle prend en compte les précipitations solides et tous les flux d'énergie échangés entre l'atmosphère et le glacier. Elle est à haute résolution car elle traduit directement ce signal pratiquement sans perte d'information. Elle est immédiate car les méthodes de mesure, comme celles permettant d'estimer le bilan de masse du glacier, fournissent à tout moment un diagnostic de l'évolution des volumes de glace, et que ces volumes par ailleurs sont faibles. Aussi, les temps d'inertie entre l'input climatique et la réponse visible du glacier (recul du front, réduction d'épaisseur, changement de vitesse) sont réduits.

Les glaciers tropicaux sont plus sensibles que les autres glaciers à la variabilité du climat du fait de leur situation et de leur fonctionnement spécifique (Franco et al., 1995). Ils subissent les influences climatiques globales dans les zones tropicales où les échanges énergétiques entre le sol et l'atmosphère sont considérables. Ils ont une taille plus réduite que leurs homologues des autres latitudes, et répondent donc plus rapidement à tout changement climatique. Enfin, en raison de l'absence de saison froide, ces glaciers connaissent une situation favorable à la fonte dans leur partir basse pendant tous les mois de l'année (Ribstein et al., 1995).

La relation entre la variabilité climatique et son impact sur les glaciers est au centre du programme " Neiges et



Glaciers Tropicaux " initié en 1991 dans les Andes centrales (Pouyaud et al., 1995). Les travaux ont commencé par l'équipement d'un glacier en Bolivie, le Glacier Zongo, pour les mesures des bilans glaciologique, hydrologique et d'énergie. Ils ont ensuite été étendus à d'autres glaciers de Bolivie, du Pérou et d'Equateur. Ces recherches permettent de mieux comprendre le fonctionnement des glaciers et complètent les travaux précurseurs publiés sur le Glacier Lewis au Kenya (e.g. Hastenrath, 1984, 1989) et dans la Cordillère Blanche au Pérou (Kaser et al., 1990 ; Hastenrath et Ames, 1995).

Le présent article propose une synthèse des résultats obtenus sur le régime hydrologique des torrents émissaires des glaciers tropicaux, en centrant l'analyse sur le Glacier Zongo (Bolivie) pour lequel il existe actuellement de nombreuses données précises des débits et des principales variables explicatives du régime hydrologique. Le fonctionnement hydrologique du bassin versant englacé du Zongo sera comparé à celui du bassin voisin peu englacé du Charquini pour souligner l'influence des glaciers sur les écoulements.

2. DISPOSITIF DE MESURES ET DONNÉES ACQUISES

2.1. Sites étudiés et équipements

Le Glacier Zongo (16°15'S, 68°10'O), dans la Cordillère Royale de Bolivie, possède une superficie de 2.1 km², dans un bassin de 3 km² appartenant au massif du Huayna Potosi à environ 30 km au nord de La Paz (Figure n° 1). La surface non couverte par le glacier principal comprend deux moraines latérales, quelques parois rocheuses (granodiorite) et deux petits glaciers supplémentaires de 0,2 km². Le bassin versant est donc actuellement englacé à 77 % et s'étend entre les altitudes de 6 000 m et 4 900 m. Il est exposé au Sud pour les parties hautes, et à l'Est pour la zone frontale.

Les premiers équipements ont été installés sur le Glacier Zongo en juillet 1991. Il s'agit des balises pour l'estimation annuelle du bilan glaciologique (aussi appelé bilan de masse), réparties sur l'ensemble de la zone d'ablation, entre le front du glacier (environ 4 900 m) et l'altitude moyenne de la ligne d'équilibre (5 250 m) qui sépare la zone d'accumulation (bilan de masse positif) et la zone d'ablation (bilan de masse négatif). L'émergence des balises est lue chaque mois. Le dispositif d'estimation du bilan de masse comprend aussi des mesures de densité pour transformer l'émergence des balises en hauteur d'eau équivalente. Dans la partie haute du glacier, des sondages pour estimer l'accumulation, associés à des mesures de densité, sont réalisés une à deux fois par an, entre 5800 m et 5 500 m d'altitude.

Depuis 1991, les précipitations sur le bassin du Zongo sont estimées avec 5 pluviomètres totalisateurs (2 000 cm² de section, 1,0 ou 1,2 m de haut), relevés mensuellement, installés sur les moraines latérales entre 5 200 m et 4 850 m.

Ces mesures sont complétées par les données d'un pluviomètre à lecture journalière, opérationnel depuis 1970 à la Plataforma (4 770 m) proche du lac Zongo. La station hydrométrique, à 4 830 m, comprend un limnigraphe et un déversoir triangulaire, installés en 1991, pour transformer les hauteurs d'eau en débits. Deux thermographes (à 4 770 m à la Plataforma et à 5 200 m sur la moraine) permettent d'estimer une température sous abri.

Depuis 1996, une station météorologique automatique de marque Campbell fournit à l'altitude de 5 150 m, des données correctes pour estimer les différents termes du bilan d'énergie sur le glacier Zongo (Wagnon et al., 1999).

Les variables mesurées à cette station sont la température, le vent (vitesse et direction), l'humidité, les flux radiatifs incidents et réfléchis de courtes longueurs d'onde (avec deux pyranomètres inversés), la radiation nette (avec un bilanmètre) et le profil de température dans le manteau neigeux. L'humidité, le vent et la température sont mesurés à deux hauteurs, 30 cm et 180 cm au-dessus de la surface du glacier. Les capteurs de température et d'humidité de la station sont des psychromètres composés de thermocouples Cu/Cst, protégés des radiations et ventilés à l'aide d'une aspiration d'air permanente. Une visite de routine, tous les quinze jours environ, permet de réajuster la hauteur et l'horizontalité des capteurs. Lors de missions prolongées sur le terrain, des mesures directes de sublimation/condensation ont été réalisées avec un réseau d'une dizaine de lysimètres. Il s'agit de récipients en plastique, remplis de neige/glace et enfouis jusqu'au bord supérieur de façon à représenter au mieux les surfaces avoisinantes. Plusieurs fois par jour, ces récipients ont été pesés, les différences étant traduites en hauteurs d'eau équivalentes pour estimer la sublimation (perte de masse) ou la condensation (gain de masse). La Figure n°1 présente un autre bassin versant, le Charquini, de même superficie 3 km², qui inclut un glacier de 0,3 km². Ce deuxième bassin, englacé à seulement 10 %, est exposé Nord-Ouest, entre les altitudes 5 392 m et 4 770 m.

A l'aval des deux bassins versants étudiés, des centrales hydro-électriques sont installées le long du rio Zongo. Pour gérer au mieux la ressource en eau disponible, des aménagements ont été construits, dont une lagune artificielle et un aqueduc dans la partie aval du bassin du Charquini. L'influence de ces aménagements sur les écoulements a été prise en compte pour reconstituer les débits en situation naturelle. Depuis 1973, sous la responsabilité de la COBEE (Compagnie Bolivienne d'Electricité) gestionnaire des centrales hydro-électriques, des mesures de hauteurs d'eau ont été réalisées, deux fois par jour (7 h et 15 h), à l'exutoire des bassins du Zongo et du Charquini.

Un limnigraphe a été installé en 1995 à l'exutoire du bassin du Charquini, à l'emplacement où sont mesurées les hauteurs d'eau depuis 1973.

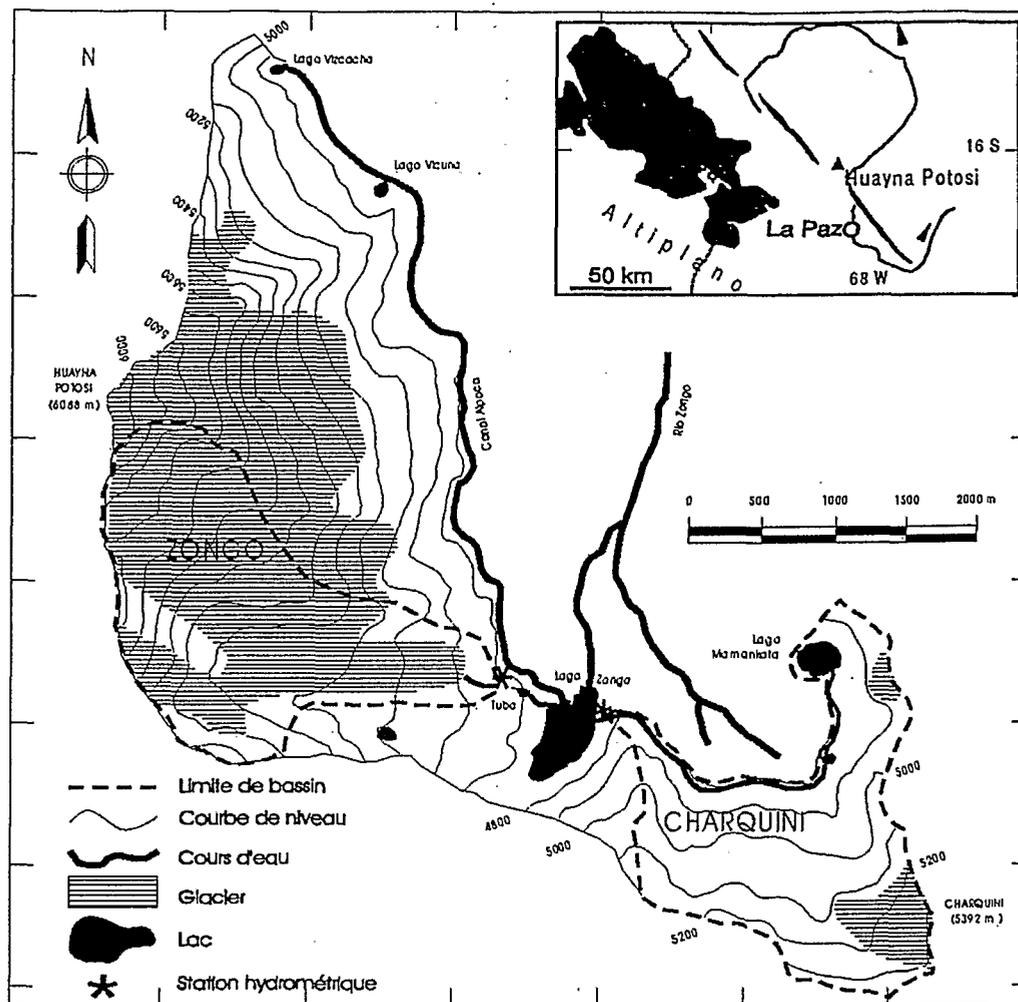


Fig. n°1 : carte de situation des bassins versants Zongo et Charquini

2.2. Données disponibles

Sur le bassin versant du Zongo, l'ensemble du dispositif de mesures permet de comparer le bilan glaciologique (intégration du bilan de masse lu avec les balises et des mesures d'accumulation dans les parties hautes), le bilan hydrologique (différence entre les précipitations et les écoulements à l'exutoire) et le bilan énergétique (calcul de l'énergie disponible localement pour la fonte).

Dans la région d'étude, l'année hydrologique est définie du 1^{er} septembre d'une année au 31 août de l'année suivante. Pour le bassin versant du Zongo, sept années hydrologiques sont disponibles pour comparer le bilan hydrologique et le bilan glaciologique. En intégrant sur la surface du glacier le bilan ponctuel lu à partir des balises et les mesures d'accumulation en altitude, on obtient un bilan net spécifique (accumulation - ablation) du glacier Zongo qu'il est possible d'interpréter au niveau annuel. Pour comparer bilan glaciologique et bilan hydrologique, il faut diminuer les écoulements liquides, mesurés à l'exutoire, des volumes provenant des parties non englacées du

bassin. Pour ce faire, le coefficient de ruissellement hors glacier a été estimé constant et égal à 0,8 (Franco et al., 1995). Compte tenu de l'importance des surfaces englacées (77 % du bassin), cette estimation du coefficient de ruissellement hors glacier ne conduit pas à une trop forte erreur sur le volume de fusion des glaces estimé par le bilan hydrologique.

Le bilan d'énergie, mesuré durant deux années hydrologiques complètes de septembre 1996 à août 1998, permet de calculer le flux énergétique disponible en surface pour la fonte à partir de l'équation suivante :

$$R_n + H + LE + Q_p + Q_m = 0 \quad (1)$$

Avec R_n , radiation nette toutes longueurs d'onde confondues, H , flux de chaleur sensible, LE , flux de chaleur latente, Q_p , flux apporté par les précipitations et Q_m , énergie disponible pour la fusion (Wagnon et al., sous presse). Par convention, les flux sont considérés positifs lorsqu'ils sont dirigés vers la surface (apports) et négatifs

lorsqu'il s'agit de pertes de la surface. Il s'agit d'un glacier tempéré proche de 0°C sur toute la profondeur et le flux provenant des couches inférieures est nul. Comme les précipitations sont toujours sous forme de neige et de faible intensité dans la zone de la ligne d'équilibre, le terme Q_p reste négligeable par rapport aux autres termes de l'équation 1. La radiation nette R_n est mesurée directement par le bilanmètre, les flux turbulents, H et LE , sont calculés à l'aide de la méthode des profils de température, d'humidité et de vent. La méthode des profils, déduite de la théorie de similitude de Monin-Obukhov (Brutsaert, 1982), a été calée et validée à l'aide des mesures directes de chaleur latente (sublimation/condensation) obtenues par les lysimètres.

Pour les bassins du Zongo et du Charquini, les deux hauteurs d'eau journalières des émissaires, mesurées depuis 1973, ont été transformées en débit après détermination de la courbe de tarage. Les deux débits instantanés ainsi obtenus correspondent, pour un bassin englacé comme le Zongo, à un débit proche du minimum pour la valeur à 7 h du matin, et à un débit proche du maximum pour celle à 15 h. Les débits journaliers obtenus au limnigraphe (depuis 1991 au Zongo et depuis 1995 au Charquini) ont ensuite été corrélés aux débits instantanés reconstitués pour chaque bassin. Les coefficients de corrélation au niveau journalier sont supérieurs à 0,79 pour le Zongo et à 0,91 pour le Charquini, permettant ainsi de reconstituer de manière fiable les débits mensuels des deux bassins depuis 1973.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Bilan net spécifique

La variation de masse du glacier dans son ensemble est estimée (Table n°1) par le bilan net spécifique et par la variation d'altitude de la ligne d'équilibre (ELA pour "Equilibrium Line Altitude"). Pour les sept années étudiées, deux possèdent un bilan spécifique excédentaire, une est équilibrée et les autres sont déficitaires. La proportion de la superficie de la zone d'accumulation par rapport à la surface totale varie de 37 % en 1997-98 pour une ligne d'équilibre à 5 525 m jusqu'à 89 % en 1992-93 pour une ligne d'équilibre à 5 050 m. La tendance est au déficit avec un bilan spécifique moyen de - 430 mm d'équivalent en eau par an, pour toute la période.

3.2. Régime hydraulique

A cette latitude de 16°S, le cycle climatique annuel est principalement rythmé par les précipitations : environ 83 % des précipitations tombent en saison humide, entre les mois d'octobre et de mars, au pluviomètre de la Plata-

	91-2	92-3	93-4	94-5	95-6	96-7	97-8
Bn	-900	+516	-88	-703	-675	+797	-1961
ELA	5500	5050	5250	5450	5425	5075	5525

Table n°1 : Bilan net spécifique Bn (en mm d'eau) et altitude de la ligne d'équilibre ELA (en m.s.n.m.).

forma, proche du Lac Zongo, à 4 770 m d'altitude. La pluie moyenne annuelle à cette station est de 836 mm pour la période 73-98.

Les pluviomètres totalisateurs installés sur les moraines du Zongo sont supposés représenter l'accumulation reçue par le glacier, ce qui est approximativement confirmé par les comparaisons avec les quelques sondages effectués dans le manteau neige-glace pour déterminer l'accumulation. Ces données des totalisateurs sont assez bien corrélées aux valeurs mensuelles observées au pluviomètre de la Plataforma, avec cependant une sous-estimation systématique d'environ 20 % à la Plataforma. En conséquence, les précipitations mesurées à la Plataforma seront majorées de 20 % pour représenter les précipitations moyennes sur tout le bassin versant du Zongo (Ribstein et al., 1995).

Pour la période 1973-98, la moyenne interannuelle des précipitations sur le bassin du Zongo est de 1 000 mm (Plataforma + 20 %). Pour la même période, le module du torrent émissaire du Zongo est de 1 580 mm. Le constat du recul dramatique des glaciers tropicaux apparaît aussi dans ce bilan hydrologique d'un bassin englacé avec un déficit, sans tenir compte de la sublimation/évaporation, de plus de 500 mm par an durant 25 ans (1973 à 1998).

La Figure n°2 compare les précipitations à la Plataforma aux débits du torrent émissaire du Zongo. Cette figure illustre une caractéristique importante qui semble commune à tous les glaciers tropicaux de l'hémisphère sud (Kaser et al., 1996) : la période de plus fort écoulement (ablation la plus forte) correspond à la saison humide (accumulation sur le glacier). Les écoulements à l'aval du Glacier Zongo présentent une saisonnalité marquée avec plus de 72 % des écoulements durant la saison humide, entre octobre et mars. La saisonnalité plus faible des débits (72 %) par rapport à celle des précipitations (83 %) montre le caractère régulateur des glaciers. Les écoulements issus des bassins versants englacés soutiennent les étiages lors de la saison sèche dans les vallées andines.

La saison humide est aussi la saison la plus chaude mais les caractéristiques de température présentent une faible saisonnalité : pour la période de 1943 à 1998 à la station de El Alto, aéroport de La Paz (16°30'S, 4 071 m), la température moyenne de saison humide (octobre-mars) est de 8,7°C, alors qu'elle n'est que de 6,7°C en saison sèche. La température moyenne mensuelle la plus forte est en janvier avec 9,4 °C, et la plus faible en juillet avec 5,6°C. L'amplitude journalière, différence entre la température minimum et maximum à l'intérieur de la journée, est supérieure en moyenne à 8°C à la station El Alto.

En valeurs journalières, les corrélations sont faibles entre les débits et les variables météorologiques prises séparément. La saisonnalité marquée des débits ne s'explique ni par le faible rythme saisonnier des températures, ni par la radiation nette qui ne présente aucun rythme marqué sur le glacier. Il faut estimer les différents termes du bilan énergétique pour expliquer la variabilité observée des débits du torrent émissaire du Zongo.

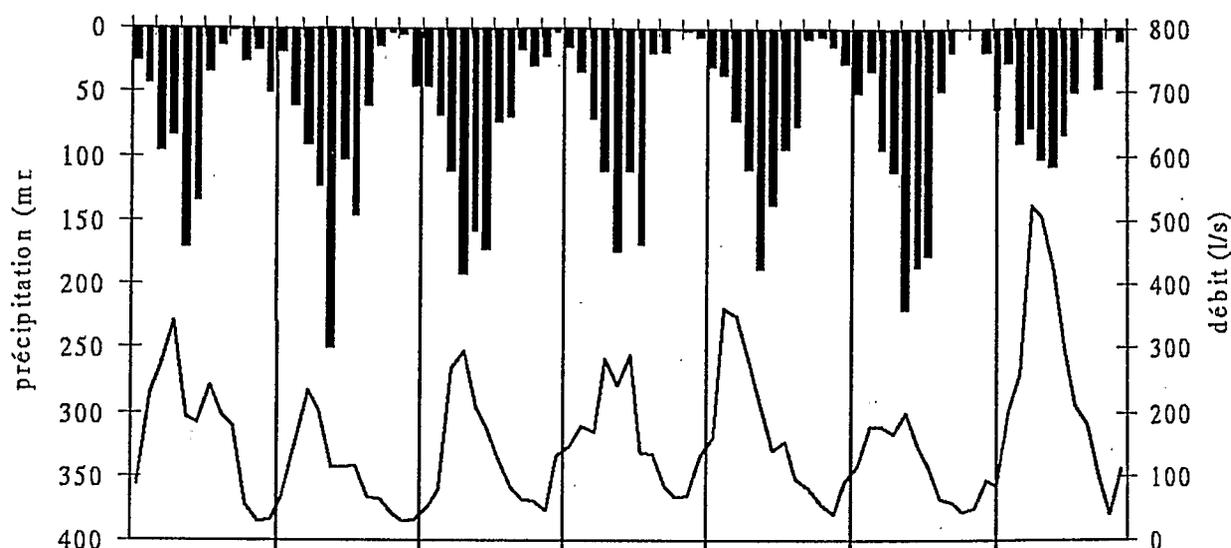


Fig. n°2 : Précipitations mensuelles à la Plátaforma (4 770 m) et débits mensuels du bassin du Zongo.

3.3. Bilan d'énergie locale et sublimation

Le bilan d'énergie a été calculé pour deux années hydrologiques, septembre 1996 - août 1997 et septembre 1997 - août 1998. La Table n°2, qui correspond à l'équation 1, présente les valeurs annuelles du bilan énergétique local, calculé à partir des données de la station météorologique automatique installée à 5 150 m sur le Glacier Zongo. Comme pour tous les glaciers dans le monde, la radiation nette R_n joue un rôle prépondérant dans le bilan d'énergie.

La spécificité des glaciers tropicaux apparaît avec les valeurs de flux turbulents. Le flux de chaleur sensible H , positif toute l'année, est faible comparé au flux de chaleur latente LE . Alors que, dans les Alpes, le flux de chaleur sensible explique entre 20 et 50 % de la fusion en période d'ablation, au Glacier Zongo il explique à peine quelques pour cents (Wagon et al., 1999). Le flux de chaleur latente LE est négatif tous les mois observés, avec surtout des fortes valeurs en saison sèche. Cela correspond à une sublimation beaucoup plus importante que pour les glaciers des zones tempérées. L'analyse du bilan d'énergie local permet de comprendre les variations de débits, qu'il s'agisse du rythme saisonnier expliqué dans le paragraphe suivant ou de la variabilité interannuelle analysée par comparaison des valeurs en 1996-97 et en 1997-98 dans le chapitre sur le phénomène El Niño.

Le flux de chaleur latente varie fortement d'une saison à l'autre et explique la forte variation saisonnière des

	R_n	LE	H	Q_M
96-97	15,8	-18,1	6,1	-3,8
97-98	48,7	-11,6	9,8	-46,9

Table n°2 : Bilan énergétique local, à 5 150 m, sur le Glacier Zongo en 1996-97 et 1997-98 (valeurs en $W m^{-2}$).

débits. Pendant la saison sèche, l'apport d'énergie à la surface du glacier, sous forme de radiation nette et chaleur sensible, est en majorité consommé par la forte sublimation déterminée par les gradients importants d'humidité spécifique dans la couche limite de surface. L'énergie disponible pour la fusion est limitée et les débits du torrent émissaire sont faibles en saison sèche. Les pénitents grandissent en surface du glacier, preuve de la sublimation intense.

A l'opposé, en saison humide, les gradients verticaux d'humidité spécifique sont plus faibles, ce qui limite nettement la sublimation. En conséquence, l'énergie disponible en surface du glacier sert presque exclusivement à fondre la neige/glace et le débit du torrent émissaire est élevé, alors que la quantité d'énergie qui arrive en surface du glacier est à peu près la même que le reste de l'année. L'humidité spécifique est un paramètre clé pour expliquer les régimes hydrologiques du torrent émissaire car elle est responsable du partage de l'énergie entre la fusion et la sublimation (Wagon et al., sous presse).

Comme la chaleur latente de sublimation L_s est 8,5 fois plus grande que la chaleur latente de fusion L_f ($L_s = 2,834 \cdot 10^6 J kg^{-1}$ et $L_f = 0,334 \cdot 10^6 J kg^{-1}$), la sublimation met en œuvre des quantités d'énergie importantes, alors qu'en terme de masse, c'est une quantité bien plus faible que la fusion. En 1996-97, la sublimation a été de 202 mm ($LE = -18,1 W m^{-2}$) pour une fusion locale à 5 150 m de 360 mm ($Q_M = -3,8 W m^{-2}$), alors qu'en 1997-98 elle a été de 129 mm ($LE = -11,6 W m^{-2}$) pour une fusion locale à 5 150 m de 4 431 mm ($Q_M = -46,9 W m^{-2}$).

3.4. Fonte des glaciers et El Niño

La fusion en surface du glacier est principalement contrôlée par les échanges radiatifs. Le bilan radiatif de grandes longueurs d'onde reste toujours négatif et la source principale d'énergie en surface correspond au bilan

radiatif de courtes longueurs d'onde. Comme la radiation solaire incidente est peu variable en fonction des saisons ou des années, l'albédo (rapport entre la radiation réfléchie et la radiation incidente de courtes longueurs d'onde) est le paramètre clé qui détermine la période de fusion et la quantité de solide qui change d'état d'une année à l'autre.

Les deux années d'étude du bilan d'énergie sont très contrastées du point de vue hydrologique (Figure n°3). En 1996-97, la précipitation moyenne sur le bassin du Zongo a été de 1 140 mm, pour un écoulement annuel de 1 280 mm. En 1997-98, la précipitation a été plus faible, 790 mm, mais l'écoulement a été le double de l'année précédente, 2 570 mm. La deuxième année d'étude se caractérise par une diminution des précipitations de l'ordre de 30 %, mais aussi par une augmentation de la température moyenne de l'air en saison humide, supérieure de 1,4°C à celle de l'année précédente.

Le contraste hydrologique des deux années est à rapprocher de conditions climatiques particulières : l'année 1996-97 correspondait à un faible événement La Niña alors que l'année 1997-98 a connu un des plus forts événements El Niño du siècle. Le phénomène El Niño, dont l'origine se situe dans l'Océan Pacifique, est caractérisé dans les Andes de Bolivie par une diminution notable des précipitations et une légère augmentation des températures de l'air (Thompson et al., 1984 ; Vuille, sous presse ; Wagnon et al., soumis).

En terme de masse, la fusion locale à 5 150 m (voir chapitre précédent) a été beaucoup plus importante en 1997-98 qu'en 1996-97. Cet accroissement provient de l'augmentation de la radiation nette (Table n°2) qui s'explique en grande partie par l'évolution de l'albédo. A cause des précipitations moins abondantes et plus espacées dans le temps en 1997-98, le manteau neigeux de la saison humide, moins épais, a disparu plus vite, laissant apparaître la surface d'ablation du glacier, d'albédo faible.

Par rapport à l'année 1996-97, la glace a affleuré plus souvent et plus haut en altitude dans l'année 1997-98 au

cours de laquelle la ligne d'équilibre était à 5 525 m, au lieu de 5 075 m en 1996-97 (Table n°1). La Figure n°4 présente les valeurs journalières d'albédo et de précipitations. Sous les Tropiques, la métamorphose de la neige est très rapide et une précipitation neigeuse, d'albédo supérieur à 0,8, évolue en quelques jours en neige transformée ou névé d'albédo inférieur à 0,4.

Depuis le début du programme " Neiges et Glaciers Tropicaux " en 1991, deux événements El Niño importants ont été observés, en 1991-92 et en 1997-98, qui correspondent à deux années hydrologiques avec de très forts écoulements mesurés à l'exutoire du bassin du Zongo.

L'impact des événements El Niño sur le bilan de masse du glacier est d'autant plus sensible que les perturbations climatiques qu'ils entraînent se font surtout ressentir en saison humide. En effet, ablation forte et accumulation apparaissant simultanément durant cette saison d'octobre à mars, des perturbations des paramètres climatiques, même modérées, peuvent avoir des conséquences très importantes sur les bilans du glacier.

3.5. Influence des glaciers sur les débits

Ce paragraphe est basé sur la comparaison des écoulements du Zongo et du Charquini, ces deux bassins présentant des conditions différentes d'englacement (respectivement 77 % et 10 % de glaciers). Les débits ont été reconstitués depuis 1973, sur une période de 25 ans sans lacune (Figure n°5). Pour la période 1973-1998, l'écoulement moyen annuel est de 978 mm (93,0 l s⁻¹) au Charquini, bien plus faible qu'au Zongo avec 1 580 mm (150,2 l s⁻¹).

Le comportement hydrologique des deux bassins est étudié en rapport avec l'influence du phénomène El Niño, à l'origine de la variabilité climatique la plus importante après les variations saisonnières. L'Indice d'Oscillation Sud (IOS) est un indicateur très utilisé pour caractériser le phénomène El Niño. Il est calculé au niveau mensuel par la différence, en valeurs centrées réduites, des pressions à Tahiti et à Darwin (Australie). L'occurrence du phénomène El Niño, ou événement ENSO (El Niño-Sou-

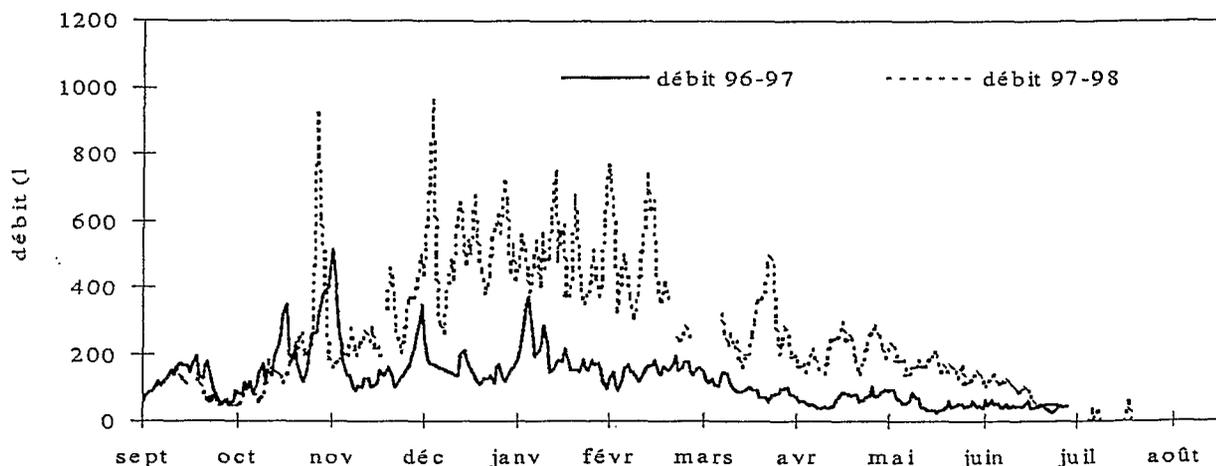


Fig. n°3 : Débits journaliers du bassin du Zongo en 1996-97 et 1997-98.

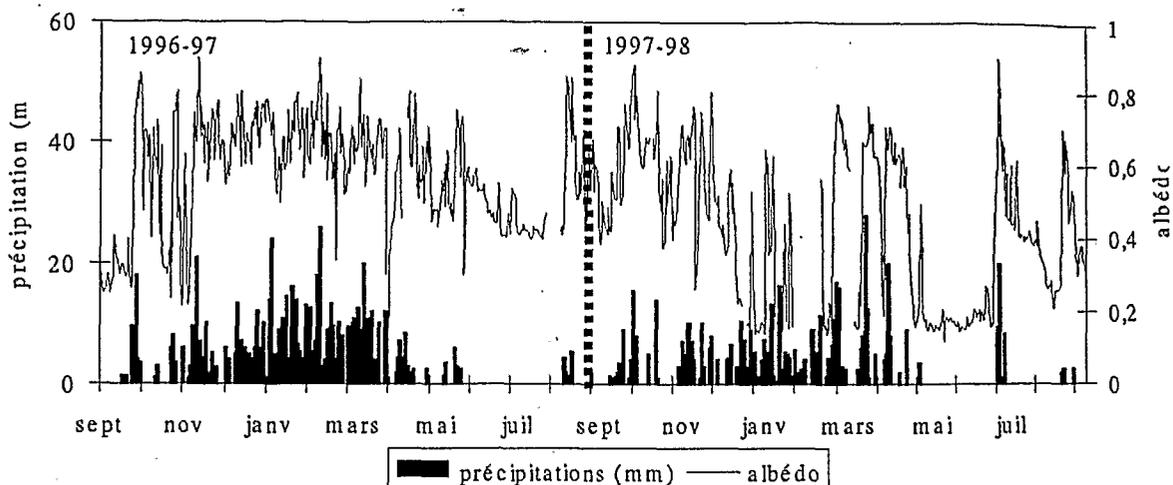


Fig. n°4 : Précipitations et albédo sur le Glacier Zongo.

thern Oscillation), se traduit par des valeurs significativement négatives de cet indice. Sur la Figure n°5, avec les débits du Zongo et du Charquini, sont reportées les valeurs de l'Indice d'Oscillation Sud. Les trois séries de données sont des moyennes mobiles sur 12 mois pour lisser la saisonnalité des écoulements. Différentes définitions du phénomène El Niño existent et nous avons choisi celle de Trenberth (1997), basée sur une anomalie positive, supérieure à 0,4°C pendant au moins 6 mois, des températures de surface de la mer dans la zone Niño 3.4. Les périodes avec El Niño, ainsi déterminées par la définition de Trenberth (1997), sont indiquées par une double flèche sur la Figure n°5.

Dans les Andes tropicales, la fonte des glaciers est accrue lors des phénomènes El Niño, comme le montrent les débits du Zongo sur la Figure n°5. Depuis 1973, les deux plus importants événements El Niño, en 1982-83 et 1997-98, présentent les plus forts débits de la série. En 1982-83, la précipitation moyenne du bassin a été de 629 mm (Plataforma + 20 %) et l'écoulement annuel estimé pour le Zongo de 2 370 mm, nettement plus faible qu'en 1997-98 (pluie de 790 mm, écoulement de 2 570 mm).

Pour le bassin du Charquini, les débits sont faibles durant les événements El Niño. Les écoulements ont été de 746 mm (71,0 l s⁻¹) en 1982-83, le plus faible écoulement depuis 1973, et de 948 mm (90,2 l s⁻¹) en 1997-98. C'est le déficit de précipitations lors des événements El Niño qui explique les faibles écoulements des bassins versants "pluviaux", possédant peu de glaciers, comme le Charquini.

Les comportements hydrologiques des bassins Zongo et Charquini ont été nettement opposés lors des événements El Niño très marqués de 1982-83 et 1997-98. Cependant, la différence de comportement hydrologique est moins nette lors des événements El Niño plus faibles de la période 1973-98, par exemple en 1976-77, 1979-80, 1986-87, 1991-94.

Les écoulements du bassin du Charquini présentent une décroissance significative depuis 1973. Une analyse des informations disponibles, cartes, photographies

aériennes et images satellites, montre que le glacier du Charquini a significativement reculé au cours des dernières décennies. En 1975, l'enlacement a été estimé à 15 % de la surface du bassin alors qu'il est de 10 % actuellement.

En généralisant les observations faites pour les bassins du Zongo et du Charquini, les torrents émissaires des bassins versants avec glaciers présentent des débits de fonte importants liés au recul accéléré des glaciers sous les Tropiques. A l'opposé, les bassins andins possédant une faible couverture glaciaire offrent plutôt une diminution des écoulements qui pourrait être expliquée par la diminution de la contribution glaciaire aux écoulements du fait du recul accéléré des glaciers depuis les années 1980.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Dans le cadre du programme " Neiges et Glaciers Tropicaux " (NGT), des résultats nombreux et originaux ont été obtenus qui améliorent la compréhension de la relation entre la variabilité climatique et le comportement hydrologique des glaciers tropicaux.

A partir de l'exemple du Glacier Zongo en Bolivie, les trois bilans, en terme d'hydrologie, de glaciologie et d'énergie, confirment le recul accéléré des glaciers tropicaux depuis le début des années 1980. Pour l'hydrologie, le recul des glaciers se traduit par des écoulements, bien supérieurs aux précipitations, qui s'expliquent par la fusion des glaces. L'importance hydrologique du recul des glaciers apparaît ainsi dans les débits du torrent émissaire du Zongo, plus importants que ceux du Charquini moins englacé, alors que les superficies des deux bassins sont comparables.

Les efforts des équipes qui travaillent sur le programme " Neiges et Glaciers Tropicaux " portent maintenant sur la comparaison des trois bilans du Glacier Zongo. Cet objectif passe par une amélioration des mesures d'accumulation sur le glacier, en particulier dans les zones

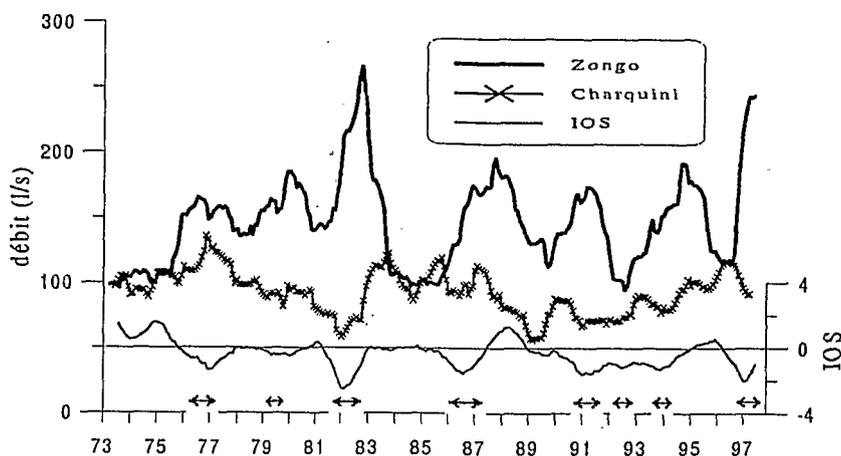


Fig. n°5 : Débits mensuels des bassins Zongo et Charquini et Indice d'Oscillation Sud (IOS). Les données sont des moyennes mobiles sur 12 mois. Les doubles flèches, au-dessus de l'axe des abscisses, correspondent aux événements El Niño suivant la définition de Trenberth (1997).

hautes du Zongo, et par une précision des bilans de masse dans les zones de crevasses et de séracs. Le bilan local d'énergie ayant permis une première explication de la saisonnalité et de la variabilité interannuelle des écoulements, il sera important de spatialiser les résultats obtenus pour les comparer au bilan hydrologique. A cet effet, l'accent doit être mis sur le bilan énergétique dans la zone d'ablation qui présente les variations les plus rapides de l'albédo, paramètre essentiel des processus physiques à l'origine des écoulements. Par ailleurs, la représentativité régionale du Glacier Zongo doit être évaluée en comparant les résultats obtenus avec ceux d'autres glaciers andins actuellement observés dans le cadre du programme " Neiges et Glaciers Tropicaux ".

Les enregistrements de la variabilité climatique dans les carottes de glace semblent indiquer que le recul actuel des glaciers tropicaux est sans précédent depuis au moins 2 000-3 000 ans (Thompson et al., 1995). Cette fonte accélérée des glaces concorde avec l'augmentation à long terme des températures de surface des mers tropicales, et avec l'accroissement des températures de l'air mesurées aux stations d'altitude (Diaz et Graham, 1996). Par ailleurs, ces changements récents de température s'accompagnent d'une augmentation de l'humidité spécifique dans la basse troposphère (Hastenrath et Kruss, 1992). Ce n'est donc pas seulement l'accroissement des températures qui explique la fusion accélérée des glaces dans les dernières décennies mais aussi l'augmentation de l'humidité spécifique qui, en diminuant les valeurs du flux de chaleur latente LE, accroît l'énergie disponible pour la fusion. Cette variation de la température et de l'humidité, liée au changement global du climat, s'ajoute à l'impact des phénomènes El Niño pour expliquer la fonte des glaces. La poursuite des études dans les Andes devrait permettre de mieux comprendre la part de chaque terme

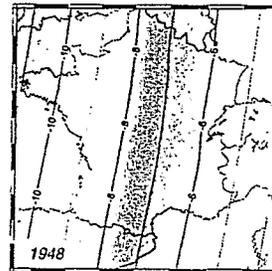
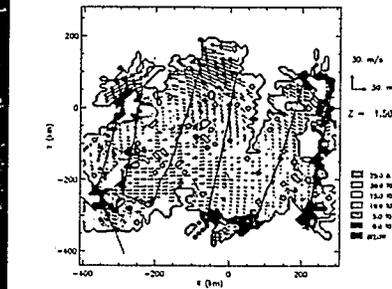
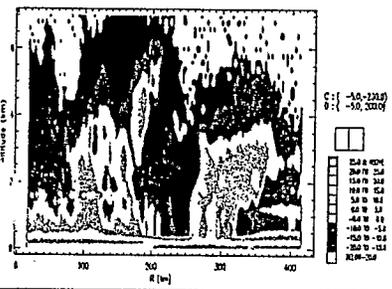
dans le recul actuel des glaciers et aussi améliorer les reconstitutions du climat passé à partir de carottes extraites des glaces tropicales (e.g. Thompson et al., 1998).

RÉFÉRENCES

- Brutsaert, W., *Evaporation into the atmosphere*, 299 pp., D. Reidel, Kluwer Academic Publishers, 1982.
- Diaz, H. F., and N.E. Graham, Recent changes in tropical freezing heights and the role of sea surface temperature. *Nature*, 333, 152-155 (1996).
- Franco, B., P. Ribstein, R. Saravia, and E. Tiriau, Monthly balance and water discharge of an inter-tropical glacier: Zongo Glacier, Cordillera Real, Bolivia, 16°S, *J. Glaciol.*, 41, 61-67, 1995.
- Hastenrath, S., *The glaciers of Equatorial East Africa*. 353 pp., D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, 1984.
- Hastenrath, S., Ice flow and mass changes of Lewis Glacier, Mount Kenya, East Africa: observations 1974-86, modelling and predictions to the year 2000 A.D., *J. Glaciol.*, 35, 325-332, 1989.
- Hastenrath, S., and P.D. Kruss, The dramatic retreat of Mount Kenya's glaciers between 1963 and 1987: Greenhouse forcing, *Ann. Glaciol.*, 16, 127-133, 1992.
- Hastenrath, S., and A. Ames, Diagnosing the imbalance of Yanamarey Glacier in the Cordillera Blanca of Peru, *J. Geophys. Res.*, 100, 5105-5112, 1995.
- Kaser, G., A. Ames, and M. Zamora, Glacier fluctuation and climate in the Cordillera Blanca, Peru, *Ann. Glaciol.*, 14, 136-140, 1990.
- Kaser, G., S. Hastenrath, and A. Ames, Mass balance profiles on tropical glaciers. *Z. Gletscherkd. Glazialgeol.*, 32, 75-81, 1996.
- Pouyaud, B., B. Franco, and P. Ribstein, Un réseau d'observation des glaciers dans les Andes tropicales. *Bulletin de l'Institut Français d'Etudes Andines*, 24(3), 701-714, 1995.

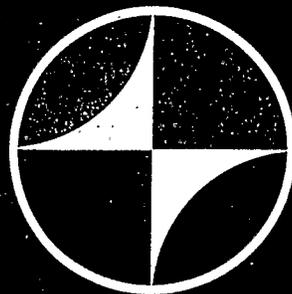
- Ribstein, P., E. Tiriou, B. Francou, and R. Saravia, Tropical climate and glacier hydrology: a case study in Bolivia, *J. Hydrol.*, 165, 221-234, 1995.
- Thompson, L.G., E. Mosley-Thompson, and B.J. Arno, El Niño – Southern Oscillation events recorded in the stratigraphy of the tropical Quelccaya Ice Cap, Peru, *Science*, 226, 50-53, 1984
- Thompson, L. G., E. Mosley-Thompson, M.E. Davis, P.-Lin, K.A. Henderson, J. Cole-Dai, J.F. Bolzan and K.-b. Liu, Late glacial stage and Holocene tropical ice core records from Huascarán, Peru. *Science* 269, 46-50, 1995.
- Thompson, L. G., M.E. Davis, E. Mosley-Thompson, T.A. Sowers, K.A. Henderson, V.S. Zagorodnov, P.-N. Lin, V.N. Mikhalenko, R.K. Campen, J.F. Bolzan, J. Cole-Dai and B. Francou, A 25,000-year tropical climate history from bolivian ice cores. *Science*, 282, 1858-1864, 1998.
- Trenberth, K., The definition of El Niño, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78, 2771-2777, 1997.
- Vuille, M., Atmospheric circulation over the Bolivian Altiplano during dry and wet periods and extreme phases of the Southern Oscillation, *Int. J. Climat.*, sous presse, 1999.
- Wagon, P., P. Ribstein, B. Francou, and B. Pouyau, Annual cycle of energy balance of Zongo Glacier, Cordillera Real, Bolivia. *J. Geophys. Res.*, 104, D4, 3907-3924, 1999.
- Wagon, P., P. Ribstein, G. Kaser and P. Berton, Energy balance and runoff seasonality of a bolivian glacier. *Global and Planetary Change*, sous presse, 1999.
- Wagon, P., P. Ribstein, B. Francou, and J.E. Sicart, The influence of the 1997-98 El Niño warm event on tropical glaciers, *Science*, soumis, 1999.

RAPPORT QUADRIENNAL 1995 - 1998



XXII^e Assemblée Générale de l'Union Géodésique et Géophysique Internationale

Birmingham (Angleterre), du 18 au 30 juillet 1999



RAPPORT QUADRIENNAL

1995 - 1998

Edité par Jean-Pierre Barriot
Observatoire Midi-Pyrénées
14, avenue Edouard Belin, 31400 Toulouse