

Etude des précipitations et de la fonte sur un glacier tropical: le glacier du Zongo, Bolivie, 16°S

JEAN EMMANUEL SICART

Centre for Glaciology, Institute of Geography and Earth Sciences, University of Wales, Aberystwyth, Ceredigion SY23 3DB, UK

jms@aber.ac.uk

PIERRE RIBSTEIN

L'Institut de Recherche pour le Développement (IRD, ex-ORSTOM), Maison des Sciences de l'Eau, BP 64501, F-34394 Montpellier Cedex 5, France

BERNARD FRANCOU

IRD, Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement, BP 96, F-38402 Saint-Martin-d'Hères Cedex, France

ROBERT GALLAIRE

IRD, Université Mayor de San Andrés, CP 9214, 00095 La Paz, Bolivie

Résumé Cet article présente les relations entre les précipitations et la fonte sur le glacier du Zongo en Bolivie où l'ablation et l'accumulation sont maximales en saison des pluies (été austral). Les nuages, provenant du bassin amazonien, donnent des précipitations à midi dans les vallées, puis dans l'après-midi en montagne. Lors de l'installation de la saison des pluies de septembre à décembre, les chutes de neige recouvrent temporairement la glace en fusion. Par effet d'albédo, l'énergie solaire absorbée et la fusion varient beaucoup et atteignent leur maximum lorsque le couvert neigeux est réduit. Au cœur de la saison des pluies de janvier à mars, la neige reste à basse altitude sur le glacier, l'albédo est fort et la fonte diminue. La saison sèche de mai à août est une période de faible ablation. La fonte sur les glaciers tropicaux dépend fortement de la répartition saisonnière des précipitations, par l'augmentation d'albédo due aux chutes de neige d'été.

Mots clefs glacier tropical; précipitation; neige; albédo; Bolivie

Precipitation and melting on a tropical glacier: the Zongo Glacier, Bolivia, 16°S

Abstract The relationships are presented between snowfall and melting on the Zongo Glacier in Bolivia, where precipitation and ablation reach their peaks in the wet season (austral summer). Clouds originate in the Amazon basin and produce precipitation at mid-day in the Andean valleys, then in the afternoon in the mountains. During the gradual build-up of the wet season, from September to December, sporadic snowfalls cover the melting ice. Due to the albedo fluctuations, net solar radiation and melting vary drastically, reaching their yearly maximum values when the snow cover is reduced. In the middle of the wet season, from January to March, snow remains on the glacier surface at low altitude, albedo is high and melting reduced. The dry season from May to August is a period of low ablation interrupted by scarce precipitation events. Melting of tropical glaciers strongly depends on the seasonal distribution of precipitation due to the high albedo of the fresh snow deposited during the summer.

Key words tropical glacier; precipitation; snow; albedo; Bolivia

INTRODUCTION

Cette étude a pour objectifs de caractériser les précipitations sur un glacier tropical et d'examiner leurs effets sur la fusion, lorsque la neige recouvre temporairement la zone

d'ablation. Le cas d'étude est le glacier du Zongo en Bolivie (Ribstein *et al.*, 1995).

Dans la zone intertropicale, les saisons se distinguent par l'humidité présente dans l'atmosphère sous la forme vapeur ou liquide. Cette variable détermine le climat à toutes les échelles de temps et d'espace (Garstang & Fitzjarrald, 1999). Sur les glaciers des Andes tropicales, en Bolivie, les saisons d'ablation et d'accumulation coïncident en saison des pluies (décembre–mars). A la différence des glaciers des plus hautes latitudes, l'accumulation et l'ablation sont liées, ce qui rend les glaciers tropicaux particulièrement vulnérables à un changement dans le régime des précipitations et à un réchauffement climatique (Francou *et al.*, 1995; Kaser *et al.* 1996). Les fluctuations saisonnières de la fusion des glaciers tropicaux sont essentiellement contrôlées par le couvert nuageux et l'humidité (Wagnon *et al.*, 2001).

Tout au long de la saison des pluies, les chutes de neige alternent avec des périodes de fusion sur des intervalles de quelques heures, causant de fortes variations de l'albédo de surface. La mesure des précipitations à un pas de temps infra-journalier est donc nécessaire pour analyser la fusion. Sur le glacier du Zongo, les chutes de neige sont mesurées à un pas de temps de trois heures par une sonde à ultrasons qui enregistre la hauteur relative de neige (Gubler, 1981; Goodison *et al.*, 1988; Lecorps & Sudul, 1989). La méthode de mesure ultrasonique des chutes de neige a été adaptée récemment aux conditions tropicales (Sicart *et al.*, 2002).

Dans une première partie, cette étude détaille les répartitions des précipitations sur le glacier au cours des cycles annuels et nyctéméraux, en relation avec le régime des vents relié à la circulation atmosphérique locale. La dernière partie est consacrée à l'analyse des effets des chutes de neige sur la fusion, à travers l'albédo.

SITE D'ETUDE, CLIMAT ET MESURES

Site d'étude et climat

Le glacier du Zongo est situé dans le massif du Huayna Potosí par 16°15'S et 68°10'W, à environ 30 km au nord de La Paz (Fig. 1). La Cordillère Royale est bordée à l'ouest par l'Altiplano et à l'est par le bassin amazonien. Le glacier a une superficie de 2.4 km² et s'écoule sur environ 3 km, de 6000 à 4850 m d'altitude. L'exposition, de sud-est dans la partie supérieure devient ensuite est. La ligne d'équilibre du glacier, estimée à partir des mesures de balises et de carottages, se situe vers 5240 m pour un bilan équilibré.

La Cordillère Royale se situe dans la zone tropicale externe caractérisée par une saisonnalité marquée des précipitations, avec une saison des pluies d'octobre à mars (été austral) et une saison sèche de mai à août (hiver austral) (Kaser, 2001). La saison sèche est associée au déplacement vers le nord des flux d'ouest de la moyenne et haute troposphère qui empêchent l'entrée des flux humides provenant de l'est. En été, les flux d'ouest se décalent vers le sud en perdant en intensité et laissent se développer un régime de vent d'est dans les basses couches de l'atmosphère (Garreaud, 1999). La remontée des masses d'air humide le long du flanc est des Andes à partir du bassin amazonien produit des précipitations orographiques. La saison des pluies concentre en Bolivie plus des deux tiers des précipitations annuelles (Vuille *et al.*, 1998).

Le début de l'année hydrologique est placé par convention le 1 septembre. La précipitation annuelle est de l'ordre de 1 m d'eau. La moyenne annuelle de la

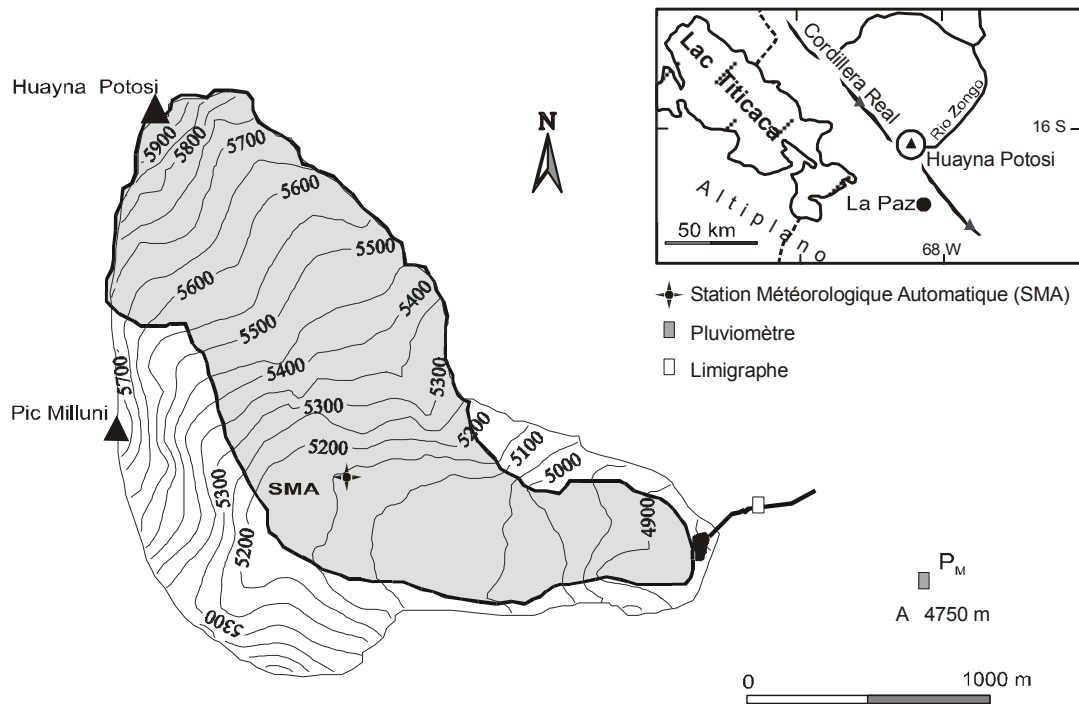


Fig. 1 Carte du bassin versant du glacier du Zongo et du dispositif de mesure.

température de l'air est d'environ $+1.5^{\circ}\text{C}$ en aval du glacier à 4750 m d'altitude et son amplitude annuelle est inférieure à 10°C . Sur le glacier, la moyenne annuelle de la température de l'air est de l'ordre de -1°C à proximité de la ligne d'équilibre. L'altitude de la limite entre la pluie et la neige varie peu au cours de l'année; elle reste inférieure à 5100 m et ne concerne donc qu'une partie restreinte du glacier.

Acquisition des données météorologiques et hydrologiques

La sonde à ultrasons Depuis septembre 1998 les changements de hauteur de la surface du glacier sont mesurés à 5150 m au pas de temps demi-horaire par une sonde à ultrasons Campbell UDG01. Le capteur, installé à un mètre au-dessus d'une surface sub-horizontale, est relié à un support ancré dans la glace. On mesure le temps écoulé entre l'émission et la réception d'échos multiples sur un cycle de temps de quelques secondes. La sonde permet d'enregistrer l'accumulation de la neige (qui se traduit par une diminution de la hauteur), ainsi que la fusion de la glace, la fusion ou le tassement de la neige (avec augmentation de la hauteur). Selon le constructeur, la précision et la résolution du capteur UDG01 sont respectivement de ± 1 cm (ou 0.4 % de la distance à la cible) et de 1 mm (Campbell Scientific, 1993). Le parallélisme avec la surface et la hauteur du capteur sont ajustés tous les 15 jours environ lors des visites de terrain. Nous n'avons jamais observé de givre dur obstruant le capteur. Au cours des années 1998–2000, la surface du glacier est restée lisse, sans pénitents pouvant perturber les mesures ultrasoniques.

Sicart *et al.* (2002) ont étudié l'erreur et la sensibilité des mesures ultrasoniques sur le glacier du Zongo afin de calculer les variations de hauteur sur un intervalle de temps suffisamment long pour détecter les vrais changements de hauteur dus aux

chutes de neige, et suffisamment court pour détecter les chutes de neige avant que la fusion intervienne. La méthode de mesure retenue consiste à comparer à intervalles de trois heures les moyennes de trois mesures successives réparties dans l'heure, afin de détecter les changements de hauteur supérieurs à 1 cm. Les précipitations solides sont calculées en retenant les diminutions de hauteur, qui sont multipliées par la densité de la neige fraîche pour obtenir des hauteurs d'eau. La densité de la neige est donnée par comparaison entre les mesures de la sonde et les relevés d'un pluviomètre totalisateur posé sur le glacier. En raison de températures proches de 0°C lors des précipitations, la densité de la neige fraîche est élevée en saison des pluies (de l'ordre de 200–300 kg m⁻³), et la neige est en fusion dès sa chute (Sicart *et al.*, 2002). La forte densité de la neige permet une détection précise de la surface par la sonde à ultrasons.

Station météorologique sur le glacier La température de l'air (ventilé artificiellement jour et nuit, à 180 cm de hauteur), la vitesse et la direction du vent (à 180 cm de hauteur), ainsi que les rayonnements solaires incident et réfléchi par la surface (à 100 cm de hauteur), sont mesurés à un pas de temps demi-horaire par une station météorologique automatique Campbell, située sur le glacier à 5 m de la sonde à ultrasons. Wagon *et al.* (1999) donnent une description complète de la station météorologique.

Pluviomètres A 3900 m, en aval du glacier et en dessous de la limite des précipitations neigeuses, un pluviomètre à augets basculeurs (P_V , de section de 900 cm²) mesure chaque demi-heure les précipitations au pas de 0.1 mm. A 4750 m, à proximité du front du glacier (Fig. 1), un pluviomètre est relevé chaque jour par un observateur (P_M , de section de 314 cm²).

Limnigraphe Le bassin versant du glacier, d'une superficie de 3 km², est défini par rapport au limnigraphe placé à 4830 m d'altitude (Fig. 1). La hauteur d'eau est scrutée toutes les 15 min par un capteur de pression. La traduction de la hauteur d'eau en débit est faite par la courbe de tarage d'un déversoir en V calibré par jaugeages.

RESULTATS ET DISCUSSION

Répartition des précipitations et de la fusion au cours de l'année.

La Fig. 2(a) montre l'évolution du débit mensuel du torrent émissaire du bassin versant du glacier du Zongo de septembre 1991 à août 2000, avec les précipitations mensuelles mesurées à 4750 m (P_M). Le débit, assuré surtout par la fonte de la neige et de la glace, est maximum en saison des pluies et minimum en saison sèche. A l'exutoire du bassin versant du glacier, environ 85% des précipitations et 70% de l'écoulement de l'année sont concentrés d'octobre à mars (moyennes de 1991 à 2000). Les forts débits sont associés à des précipitations déficitaires et à des épisodes de forte fusion de la glace, comme pendant l'année 1997/98 qui correspond à un événement El Niño de grande intensité. Cette anomalie de forte fusion s'étend sur le cycle suivant (1998/99), alors que la situation dans le Pacifique équatorial s'est inversée avec l'arrivée d'un épisode froid (La Niña).

On a détaillé pour l'année hydrologique 1999–2000 les cycles annuels des précipitations et du débit de fonte (Fig. 2(b)). On observe de septembre à décembre

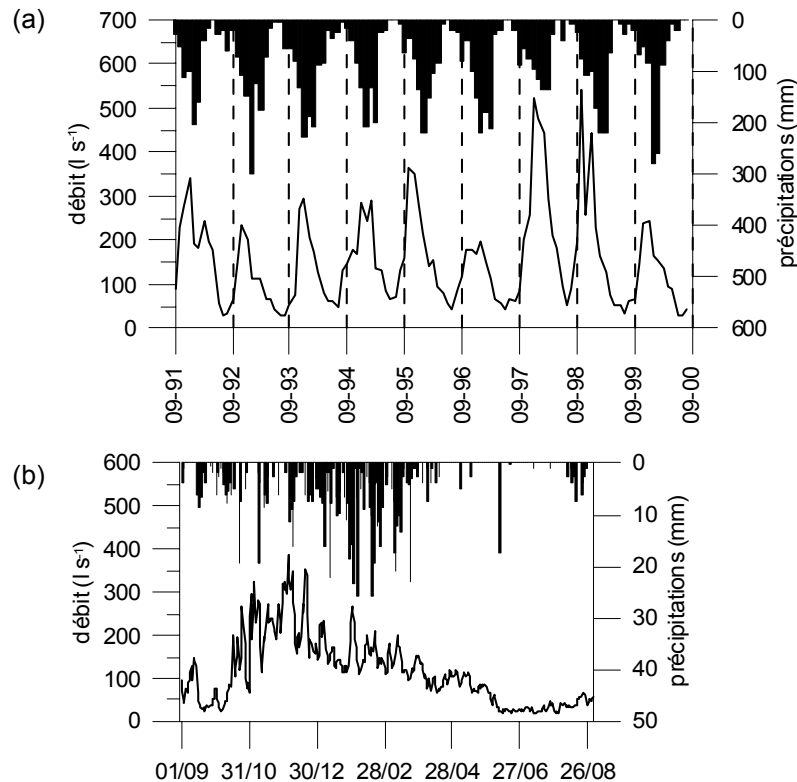


Fig. 2 Débit à l'exutoire du bassin versant du glacier du Zongo (axe y de gauche) et précipitations à 4750 m d'altitude (P_M , axe y de droite inversé). Les précipitations ont été augmentées de 20% afin de compenser le déficit de captation dû au vent (Ribstein *et al.*, 1995) : (a) les valeurs mensuelles de septembre 1991 à août 2000; et (b) les valeurs journalières de l'année hydrologique 1999–2000.

l'installation progressive de la saison des précipitations, avec des périodes de forte fusion alternant avec des chutes de neige de plus en plus fréquentes. Une telle situation, typique du début de la saison humide, est observée aussi bien en Bolivie qu'au Pérou (Schwerdtfeger, 1976). Le cœur de la saison des pluies se produit généralement en janvier et dure jusqu'à mars. Les trois mois de décembre à février, au cours desquels il neige en moyenne 2 jours sur 3, concentrent environ 56% des précipitations annuelles. En mai, le passage à la saison sèche est assez abrupt. Il peut se produire quelques chutes de neige en saison sèche et en général l'ablation y est faible jusqu'à la fin août (Fig. 2(b)).

Répartition des précipitations dans la journée et régime des vents

Sur le glacier, l'accumulation de neige au pas de temps de 3 h (cumul des diminutions des hauteurs de la sonde à ultrasons) au cours des saisons de pluies 1998–1999 (du 25 décembre au 10 avril) et 1999–2000 (du 12 décembre au 1 mai), était respectivement de 3.5 et 3.8 m de neige, soit environ l'équivalent d'un mètre d'eau. La répartition des chutes de neige au cours de la journée est bimodale, avec un maximum en milieu de nuit et un autre dans l'après-midi (Tableau 1). Deux maxima de précipitations sont également observés dans la vallée, l'un autour de minuit et l'autre en milieu de journée (P_V , Tableau 1).

Tableau 1 Répartition au cours de la journée des précipitations au pas de temps de 3 heures, sur le glacier et dans la vallée (en % du cumul journalier). Saisons des pluies 1998–1999 et 1999–2000.

Cumul: Période	36 mm neige / jour glacier 1999 (%) ^a	27 mm neige / jour glacier 2000 (%) ^b	6 mm / jour <i>P_V</i> 2000 (%) ^c
0–3 h	16	23	15
3–6 h	13	14	9
6–9 h	14	6	9
9–12 h	7	4	15
12–15 h	12	22	17
15–18 h	15	12	13
18–21 h	10	8	8
21–24 h	12	12	13

^{a b} Chutes de neige mesurées par la sonde à ultrasons sur le glacier à 5150 m pour les saisons des pluies 1998–1999 (janvier–mars, 98 jours) et 1999–2000 (décembre–avril, 121 jours), respectivement.

^c pluies mesurées par *P_V* à 3900 m dans la vallée du Zongo pour la saison des pluies 1999–2000 (121 jours).

La vitesse du vent à 5150 m est généralement faible (2 m s^{-1} en moyenne), et inférieure à 4 m s^{-1} au cours des précipitations. Tout au long de l'année, la direction du vent alterne entre deux secteurs (Fig. 3). La nuit et jusqu'en début de matinée, le vent provient du nord-ouest: c'est le vent de montagne qui domine (Fig. 1). De la fin de matinée jusqu'en fin d'après midi, le vent est de secteur est ou sud-est, et provient donc de la vallée. La Fig. 3 montre que les précipitations sont généralement associées à un vent de la vallée, en particulier dans l'après-midi. Des mesures à une autre station météorologique à 5050 m montrent des régimes de vent et de précipitations associées très similaires, montrant une faible variabilité du vent dans la zone d'ablation du glacier.

La circulation atmosphérique locale, c'est-à-dire le vent de vallée le jour et le vent de montagne la nuit, domine le régime des vents dans la zone d'ablation du glacier du Zongo. Au cours de la saison des pluies, les conditions météorologiques générales tendent à produire des vents de faible intensité qui permettent le développement d'une circulation thermique locale. Sur les glaciers des plus hautes latitudes, les chutes de neige d'hiver sont généralement associées à des vents forts causés par des dépressions, alors que sur le glacier du Zongo les précipitations ne sont pas associées à des tempêtes. Les précipitations sont le plus souvent d'origine convective suite à l'apport local de chaleur dans la vallée par la radiation solaire, laquelle est à son maximum en saison des pluies (Vuille *et al.*, 1998). Les précipitations sur le glacier durent de la demi-journée à quelques jours, mais ne sont pas intenses à l'échelle horaire. Le bassin amazonien est une source continue de vapeur d'eau et d'énergie, les nuages convectifs se succèdent sur plusieurs jours, apportant des pluies persistantes sur les Andes. Aceituno & Montecinos (1993) ont mentionné qu'au cours de la saison des pluies alternent des périodes de 5–10 jours de fort et de faible couvert nuageux sur l'Altiplano bolivien, reliées respectivement à des conditions humides et sèches. Les périodes humides sont responsables des importantes chutes de neige nocturnes sur le glacier. Cette alternance de périodes sèches et pluvieuses au sein de la saison des pluies est liée à un renforcement ou à un affaiblissement du "Bolivian High", un système de haute pression centré en été sur l'Altiplano à 200 hPa (Garreaud, 1999).

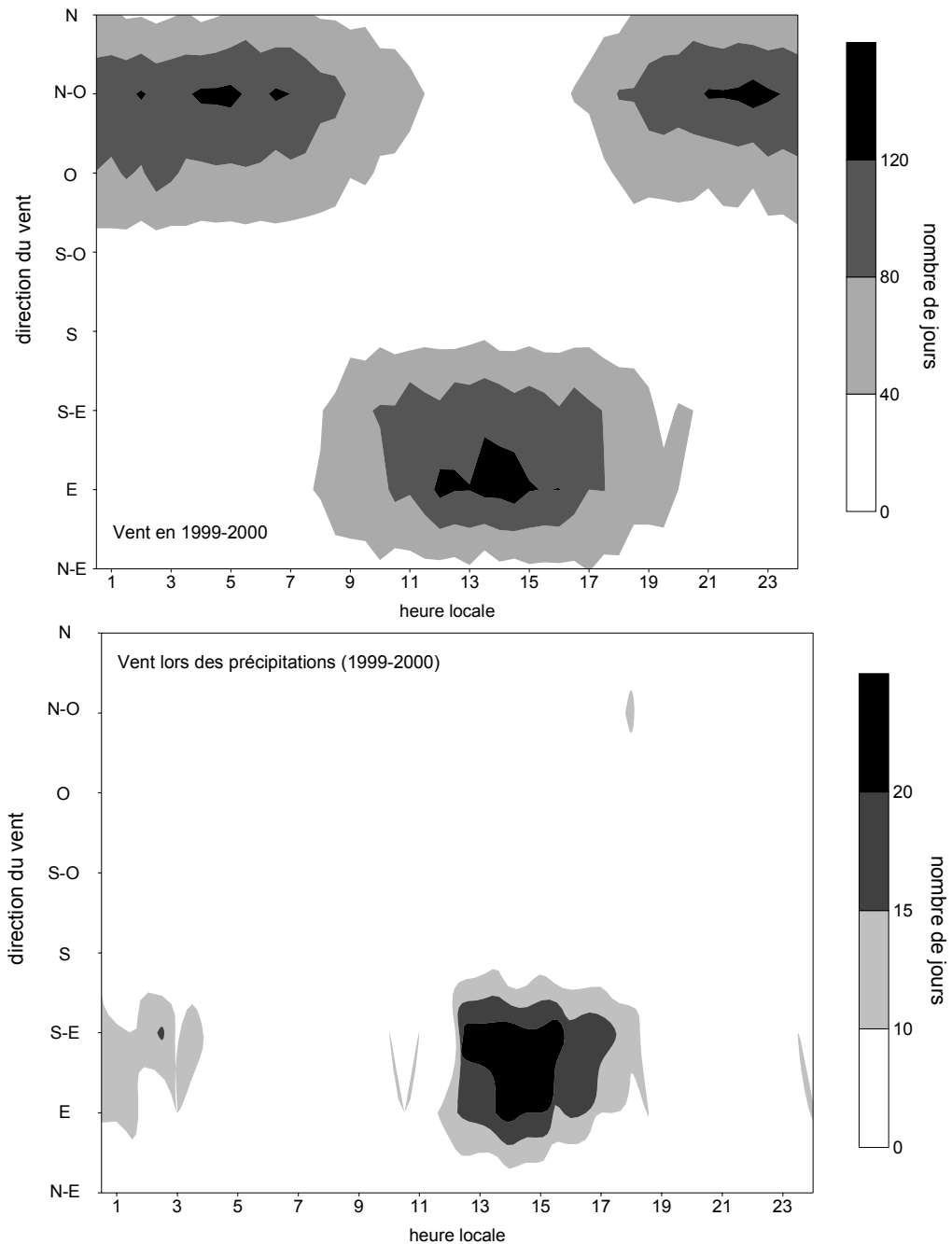


Fig. 3 Moyennes horaires de la direction du vent (en ordonnées) selon l'heure dans la journée (en abscisses). Les contours représentent le nombre de jours sur l'année. Le graphe du haut montre les valeurs sur l'année 1999–2000. Chaque verticale représente 365 valeurs de direction du vent. Le graphe du bas montre la direction du vent lors des précipitations de l'année 1999–2000 (l'échelle des contours en nombre de jours est différente de celle du graphe supérieur). Les mesures de vent et de précipitations solides (sonde à ultrasons) sont à 5150 m sur le glacier.

Effets des chutes de neige sur la fusion

La Fig. 4 compare sur l'année 1998–1999 l'évolution de la hauteur relative de la surface mesurée par la sonde à ultrasons, de l'albédo et du bilan radiatif de courtes longueurs d'onde (R_c). Les variations saisonnières de l'éclairement solaire

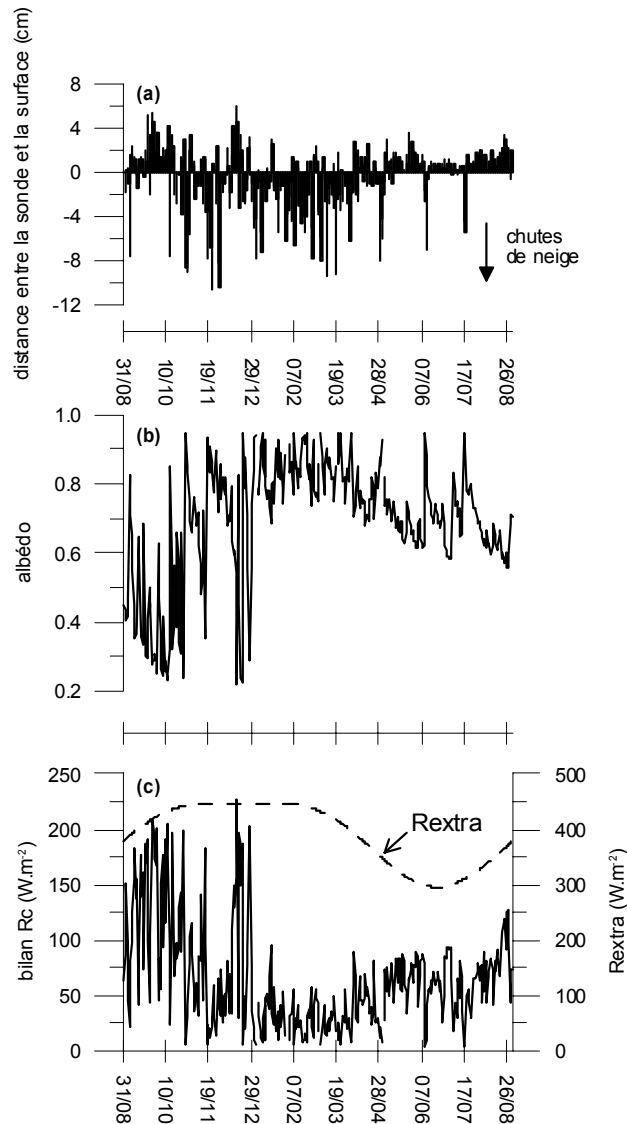


Fig. 4 (a) Les variations de la distance entre la surface et la sonde à ultrasons (histogrammes); (b) l'albédo; et (c) le bilan radiatif de courte longueur d'onde R_c (trait continu) et l'éclairement solaire extraterrestre R_{extra} (tirets). Moyennes journalières à 5150 m de septembre 1998 à août 1999. L'albédo est calculé entre 09:00 et 15:30 h locales afin d'éliminer les effets d'ombre du relief.

extraterrestre à 16° de latitude sud (éclairage potentiel avant atténuation de l'atmosphère) sont aussi représentées. L'éclairement solaire variant peu aux basses latitudes (Fig. 4(c)), la radiation solaire absorbée par la surface (R_c) est surtout contrôlée par l'albédo et par le couvert nuageux.

Les mesures de la sonde à ultrasons permettent de retrouver les trois périodes de l'année distinguées en termes de débit et de précipitations (Figs 4(a) et 2).

(a) Lors de l'installation progressive de la saison des pluies de septembre à décembre 1999, les chutes de neige sont peu fréquentes et fondent rapidement (Fig. 4(a) et (b)). Quelques jours après les chutes de neige, la glace apparaît en surface et l'albédo chute à des valeurs inférieures à 0.3. C'est entre septembre et décembre que le maximum d'énergie solaire est absorbé par le glacier, causant les plus forts

débites de l'année (Figs 2 et 4(c)). Les variations de R_c liées aux changements d'albédo peuvent être considérables d'un jour sur l'autre (jusqu'à un facteur quatre).

- (b) Au cœur de la saison des pluies (janvier–mars 1999), les chutes de neige sont fréquentes, la neige se maintient en surface à 5150 m et l'albédo reste supérieur à 0.6. En raison du fort albédo, de l'atténuation du rayonnement solaire par les nuages, et malgré le fort rayonnement solaire potentiel, l'énergie solaire absorbée reste faible, inférieure à 75 W m^{-2} (Fig. 4(c)), entraînant une réduction du débit de fonte (Fig. 2).
- (c) D'avril à août, la décroissance progressive de l'albédo jusqu'à une valeur de 0.55 correspondant au névé est interrompue par quelques chutes de neige (Fig. 4(a) et (b)). En saison sèche, l'augmentation de R_c due à la baisse du couvert nuageux et à la baisse de l'albédo de la neige transformée est en partie compensée par la diminution de l'éclairement solaire extraterrestre. L'énergie solaire absorbée par la surface reste faible, augmentant progressivement alors que l'on se rapproche de l'équinoxe de septembre (Fig. 4(c)).

CONCLUSION

Sur le glacier du Zongo, dans les Andes boliviennes, l'année est marquée de septembre à décembre par un long début de saison humide au cours de laquelle les précipitations deviennent de plus en plus fréquentes. Puis vient de janvier à mars une période de précipitations très fréquentes qui précède la saison sèche de mai à août. Tout au long de l'année, les vents de vallée en journée, et de montagne la nuit, tendent à être réguliers.

Des maxima de précipitations diurnes sont enregistrés en milieu de journée dans la vallée, et en milieu d'après-midi en haute montagne. Les masses d'air humide proviennent des basses terres d'Amazonie et sont entraînées en altitude sur le versant est des Andes, où elles se déchargent par effet orographique. Les précipitations nocturnes amènent au cours de la saison des pluies des quantités de neige comparables aux précipitations diurnes. Elles se produisent sur des périodes de mauvais temps continu de plusieurs jours. En saison des pluies, l'alternance de périodes de 5–10 jours de forte et de faible couverture nuageuse est liée à des changements dans la circulation atmosphérique à l'échelle continentale.

Sous les tropiques externes, l'ablation est maximum en saison des pluies et son intensité dépend étroitement des chutes de neige. C'est de septembre à décembre, lorsque l'albédo est encore faible et que la radiation incidente est forte que la surface du glacier absorbe le maximum d'énergie solaire. Le bilan de masse annuel dépend fortement de la date d'installation de la saison des pluies (décembre–février), qui interrompt une période de forte fusion par rayonnement solaire. C'est ce qui explique que l'arrivée tardive de la saison des pluies lors des phases chaudes de l'ENSO (El Niño) provoque une fusion accélérée de ces glaciers, qui peut être maximum en janvier, voire février.

Remerciements Ce programme glaciologique (UR GREATICE) est développé par l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD, ex-ORSTOM). Nous sommes

reconnaisants de l'assistance reçue de l'IHH (Instituto de Hidraulica e Hídrolgia), de l'UMSA (Universidad Mayor de San Andrés) et de la COBEE (Compania Boliviana de Energia Electrica) à La Paz. Le travail de terrain effectué par Franz Quispe et Rolando Fuertes fut très apprécié.

REFERENCES

- Aceituno, P. & Montecinos, A. (1993) Circulation anomalies associated with dry and wet periods in the South American Altiplano, in *Proc. Fourth Int. Conf. on Southern Hemisphere Meteorology* (Hobart, Australia), 330–331. Am. Met. Soc.
- Campbell Scientific (1993) *UDG01 Ultrasonic Depth Gauge, User Guide 17*. Loughborough, UK.
- Francou, B., Ribstein, P., Saravia, R. & Tiriau, E. (1995) Monthly balance and water discharge of an intertropical glacier: Zongo Glacier, Cordillera Real, Bolivia, 16°S. *J. Glaciol.* **41**(137), 61–67.
- Garreaud, R. D. (1999) Multiscale analysis of the summertime precipitation over the Central Andes. *Mon. Weath. Rev.* **127**, 901–921.
- Garstang, M. & Fitzjarrald, D. R. (1999) *Observations of Surface to Atmosphere Interactions in the Tropics* (first edn). Oxford University Press, Oxford, UK.
- Goodison, B. E., Metcalfe, J. R. & Wilson, R. A. (1988) Development and performance of a Canadian automatic snow depth sensor. In: *Proc. WMO Technical Conference* (Leipzig, German Democratic Republic), 1–8.
- Gubler, H. (1981) An inexpensive remote snow-depth gauge based on ultrasonic wave reflection from the snow surface. *J. Glaciol.* **27**(95), 157–163.
- Kaser, G. (2001) Glacier–climate interactions in low latitudes. *J. Glaciol.* **47**(157), 195–204.
- Kaser, G., Hastenrath, S. & Ames, A. (1996) Mass balance profiles on tropical glaciers. *Z. Gletscherk. Glazialgeol.* **32**, 75–81.
- Lecorps, D. & Sudul, M. (1989) 10 years of snow depth measurement. In: *Workshop on Precipitation Measurements* (St. Moritz, Switzerland, 3–7 December) (ed. by B. Sevruk), 217–220. WMO/IAHS/ETH.
- Ribstein, P., Tiriau, E., Francou, B. & Saravia, R. (1995) Tropical climate and glacier hydrology: a case study in Bolivia. *J. Hydrol.* **165**, 221–234.
- Schwerdtfeger, W. (1976) *Climates of Central and South America* (first edn). Elsevier Scientific, Amsterdam, The Netherlands.
- Sicart, J. E., Ribstein, P., Chazarin, J. P. & Berthier, E. (2002) Solid precipitation on a tropical glacier in Bolivia using ultrasonic depth gauge measurements. *Water Resour. Res.* **38**(10), 7.1–7.7.
- Vuille, M., Hardy, D. R., Braun, C., Keimig, F. & Bradley, R. S. (1998) Atmospheric circulation anomalies associated with 1996/1997 summer precipitation events on Sajama Ice Cap, Bolivia. *J. Geophys. Res.* **103**(D10), 11191–11204.
- Wagnon, P., Ribstein, P., Francou, B., & Pouyaud, B. (1999), Annual cycle of energy balance of Zongo Glacier, Cordillera Real, Bolivia. *J. Geophys. Res.* **104**(D4), 3907–3923.
- Wagnon, 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. *J. Glaciol.* **47**(156), 21–28.

Reçu le 11 décembre 2002; accepté le 19 juillet 2003