

## **Pluie ou neige? Dispositif de mesures pluviographiques dans les Andes de Bolivie et interprétation des enregistrements**

**YANN L'HÔTE, PIERRE CHEVALLIER**

*IRD, Maison des Sciences de l'Eau, BP 64501, F-34394 Montpellier Cedex 5, France*  
[yann.lhote@msem.univ-montp2.fr](mailto:yann.lhote@msem.univ-montp2.fr); [pierre.chevallier@msem.univ-montp2.fr](mailto:pierre.chevallier@msem.univ-montp2.fr)

**PIERRE ETCHEVERS, YVES LEJEUNE**

*Météo France, Centre d'Etude de la Neige, 1441 Rue de la Piscine, F-38406 Saint Martin d'Hères, France*

**PATRICK WAGNON**

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

**Résumé** La connaissance de la phase, solide ou liquide, de la précipitation en haute montagne est une information importante pour l'utilisation des modèles de bilan hydrique et de bilan d'énergie. Dans le cadre d'une étude expérimentale menée dans les Andes de Bolivie, une station météorologique complète installée à environ 4800 m d'altitude comprenait en particulier deux pluviographes, l'un à pesée équipé d'antigel et d'huile et l'autre à augets basculeurs, couplés à des mesures de température de l'air. Ce dispositif a permis de représenter avec réalisme la séparation des phases liquides et solides dans cette région de très haute montagne tropicale, où les conditions de maintien au sol des chutes de neige sont fortement limitées par des rayonnements solaires extrêmes rendant la couverture neigeuse particulièrement fugace. L'automatisation de la méthode dite "pluviographique", comparée à d'autres plus classiques, montre des performances satisfaisantes.

**Mots clefs** mesure des précipitations; pluie; neige; Andes, Bolivie

### **Rainfall or snowfall? Device for measuring the precipitation phase in the Bolivian Andes and analysis of the records**

**Abstract** The knowledge of the precipitation phase, solid or liquid, is important in high mountains, in order to use models of water and energy balances. During an experiment led in the Bolivian Andes, a complete weather station was installed at an altitude close to 4800 m, including two raingauge recorders, the first one with added antifreeze and oil, based on weight measurement, and the other one with tipping buckets. This device allowed a realistic partition of the liquid and solid phases in this region of tropical mountains, where the observed snow pack at the ground level is strongly influenced by the extremely high solar radiation and where the snow cover is ephemeral. The automation of the "raingauges" method, compared with several other classical methods, shows satisfactory results.

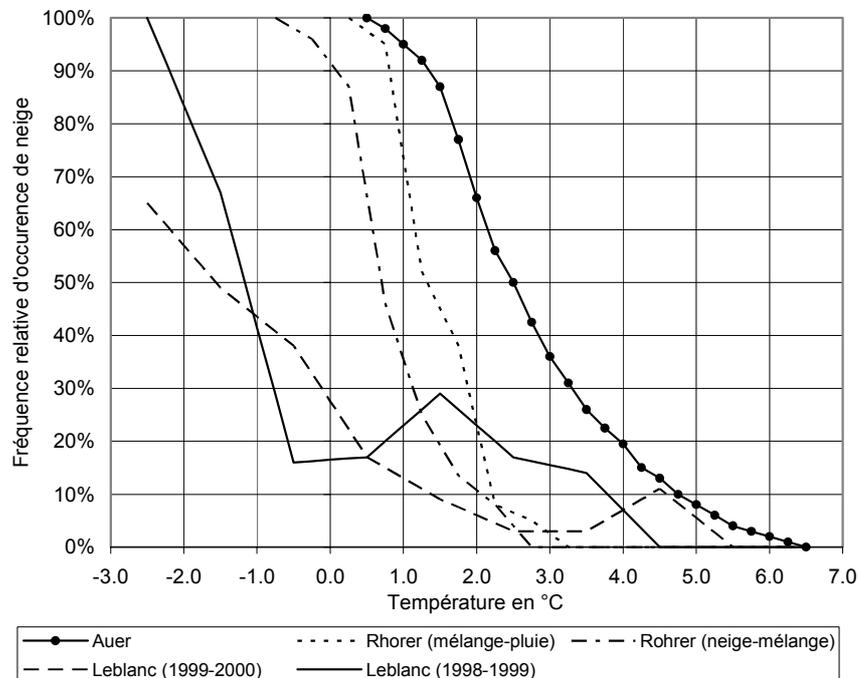
**Key words** precipitation measurement; rainfall; snowfall; Andes, Bolivia

## **INTRODUCTION**

L'Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement (IRD) conduit depuis 1991 des recherches dans la Cordillère des Andes (Bolivie, Chili, Equateur et Pérou) afin de mieux comprendre l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau de très haute montagne et d'en évaluer les conséquences sur les

usages. Les précipitations, selon l'altitude et les conditions climatiques de l'instant, affectent ce milieu sous forme de pluie—phase liquide, et sous forme de neige—phase solide. A très haute altitude, au-dessus de 5000 m dans les Andes tropicales, les précipitations neigeuses, en s'accumulant dans des conditions favorables, constituent les glaciers qui dominent les reliefs. Sur les versants non englacés d'altitude moindre, l'alternance des phases solides ou liquides est plus fréquente et est à l'origine de comportements hydrodynamiques complexes. Les conséquences d'une variabilité climatique affectant en particulier les conditions de température ont un impact prononcé sur les phases de ces précipitations. Celles-ci se produisent très souvent pour des températures de l'air au voisinage du sol comprises entre 0 et +2°C. Or les modélisations mises en œuvre dans les Andes (Caballero, 2001) utilisant des méthodes de bilan d'énergie au travers de schémas validés dans le contexte des Alpes (ISBA: Boone & Etchevers, 2001; CROCUS: Etchevers *et al.*, 2000) sont très dépendantes des phases des précipitations. Il est donc nécessaire de différencier celles-ci dans les Andes tropicales de manière précise, réaliste et, si possible, automatisée. Ceci est d'autant plus nécessaire que les conditions de maintien de la neige au sol sont fortement influencées par les rayonnements solaires extrêmes propres à ces latitudes et altitudes. La conséquence en est un couvert neigeux particulièrement fugace, observable la plupart du temps seulement quelques heures dans la journée.

Une étude préliminaire (Leblanc, 2001) effectuée sur un site des Andes boliviennes à 4750 m d'altitude, a permis d'estimer des températures de séparation



**Fig. 1** Fréquences relatives d'occurrence de chute de neige pour différentes températures de l'air; reconstitutions des graphiques d'après les publications: Auer, 1000 observations aux Etats Unis. Rhorer, station automatique de Davos, Suisse (altitude 1590 m), 1978–1987: séparation pluie avec mélange (pluie et neige indistinctes) et séparation neige avec mélange. Leblanc, station Plataforma–Zongo, Bolivie (4750 m): 711 enregistrements demi-horaires pendant la saison des pluies 1998–1999 et 1039 enregistrements demi-horaires pendant la saison des pluies 1999–2000.

pluie-neige et de les comparer à celles de deux autres études mentionnées dans la littérature (Auer, 1974; Rohrer, 1989), situées toutes deux dans l'hémisphère nord et en climat tempéré (Fig. 1). Malgré une certaine dispersion des résultats, les faits marquants dans le travail de Leblanc en Bolivie résident dans des températures d'observation de neige (a) sur une plage plus étendue, et (b) nettement plus basses que dans les autres publications. D'après Rohrer (1989), les différences observées sont dues à la localisation du site, à l'heure d'observation et parfois à la saison.

Une station climatologique complète a été installée sur un site représentatif de cette zone intermédiaire où alternent les précipitations neigeuses et pluvieuses. L'emplacement choisi se trouve à l'aval du Glacier de Charquini, à une altitude de 4795 m ( $16^{\circ}17'11''S$ ,  $68^{\circ}6'32''W$ ) dans la haute vallée du Rio Zongo sur le versant amazonien de la Cordillère Royale de Bolivie (Fig. 2). La station est exposée au nord-ouest. Elle a été maintenue pendant près de deux années, de la mi-octobre 2001 à la mi-juillet 2003. Tous les paramètres climatiques requis par les modélisations actuelles ont été enregistrés avec un pas de 30 min: températures de l'air et du sol, humidité relative, rayonnements solaires incidents et réfléchis de courtes et de grandes longueurs d'ondes, précipitations, vitesse et direction du vent, hauteur de neige, flux d'énergie à l'interface sol/atmosphère.

Le problème posé était de définir une méthode réaliste de distinction des phases liquide et solide. La méthode retenue est une comparaison, visuelle, puis automatisée des enregistrements de deux pluviographes de conceptions différentes, l'un à pesée fournissant neige et pluie dès leurs chutes, et l'autre à augets basculeurs pour lequel l'enregistrement des lames d'eau sous forme de neige est retardé du temps nécessaire à sa fonte dans le collecteur.

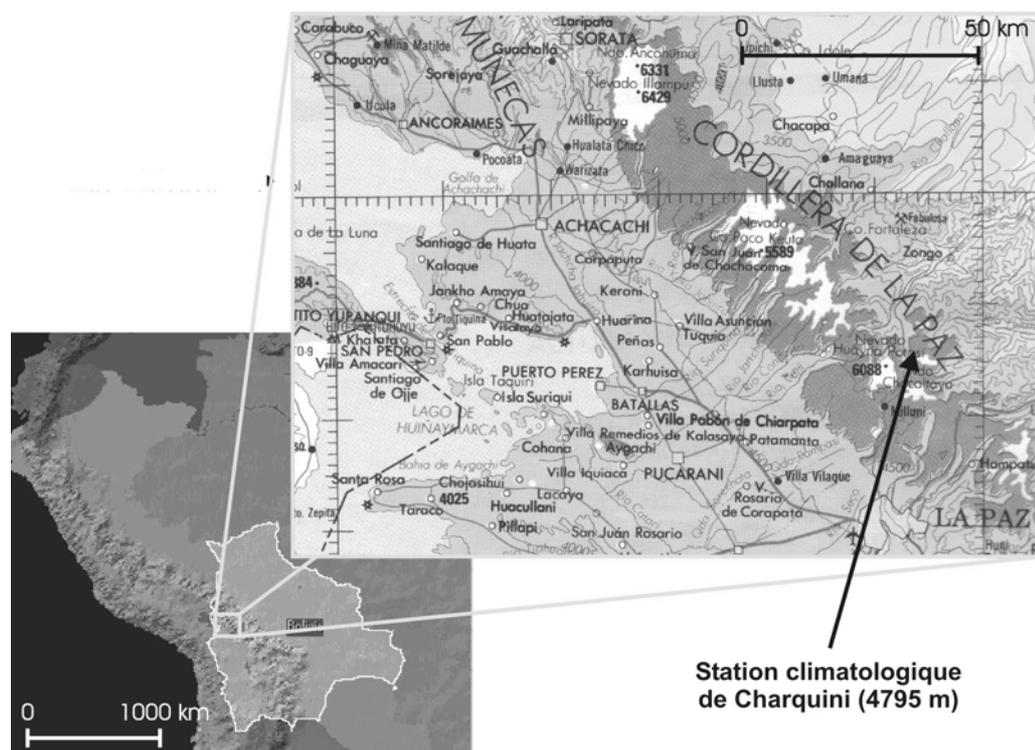


Fig. 2 Localisation de l'étude.

## DISPOSITIF DE MESURES

### Mesure des précipitations, pluviographes

Afin de valider les mesures, un pluviomètre manuel de type Association, classique en France, a été relevé quasi quotidiennement en février et mars 2002. Il a permis de constater que les observations par pesée étaient précises et sans biais, ce qui n'était pas le cas du pluviographe à augets pour des raisons que nous avons corrigées au mieux sur le terrain. Ainsi, ce sont les relevés par pesée qui constituent la mesure de référence des précipitations.

Le pluviographe à augets basculeurs est un appareil d'origine américaine, de marque Hobo. La surface de réception est de 200 cm<sup>2</sup> et l'auget bascule pour 2.5 mm d'eau. Le total cumulé des précipitations est enregistré par l'une des centrales d'acquisition de marque Campbell (Campbell Scientific Inc., 1993, 2000).

Le pluviographe par pesée est d'origine norvégienne, de marque Geonor, type T-200B (Géonor AS, 1995). Cet appareil est recommandé par l'Organisation Météorologique Mondiale pour les mesures de précipitations solides (Forland *et al.*, 1996). La surface de réception est de 200 cm<sup>2</sup>. Le seau collecteur des précipitations comprend des produits réfrigérants (éthylène glycol et méthanol) pour abaisser le point de congélation et de l'huile pour empêcher l'évaporation. Le principe du capteur de pesée est celui du fil vibrant: mesure de fréquence électrique transformée en voltage. Une structure circulaire solidaire du pied de l'appareil soutient un pare-vent formé de lames métalliques dont le niveau supérieur est celui de la surface de réception du pluviographe, soit 1.75 m au dessus du sol. L'enregistrement des cumuls intervient à chaque demi-heure ronde.

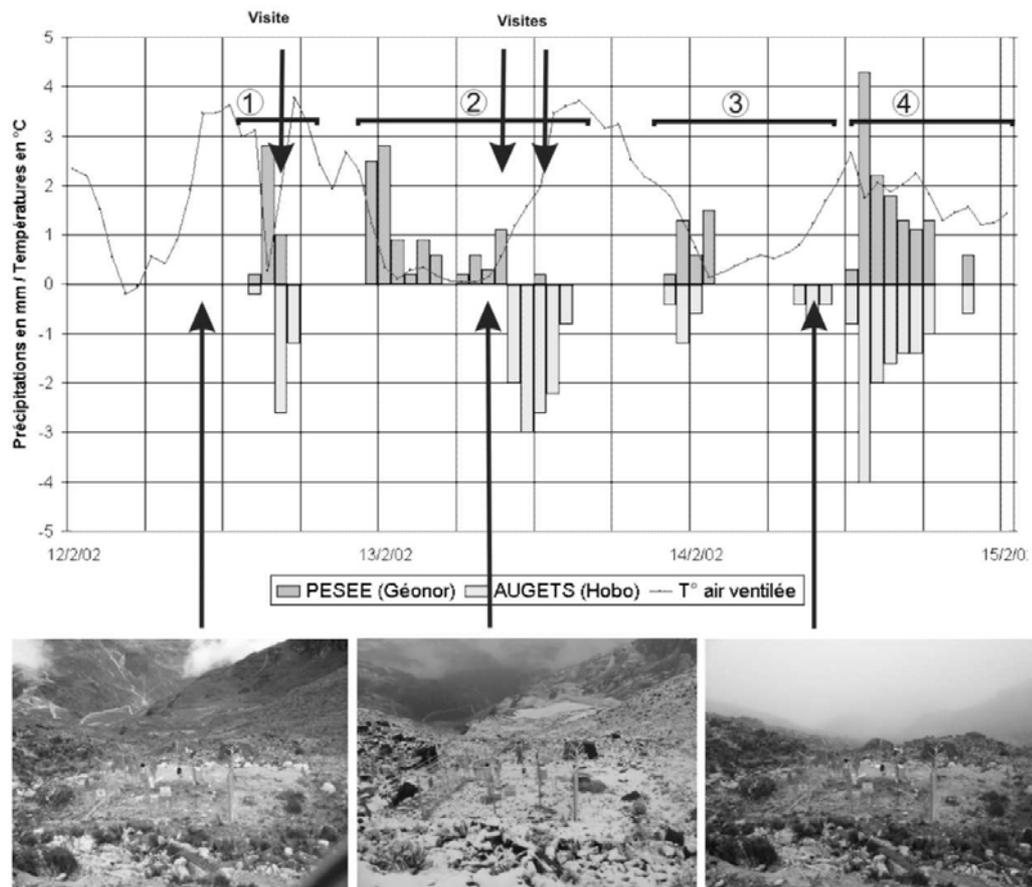
### Observations visuelles

Pour compléter les mesures automatiques à la station météorologique, nous disposons d'un certain nombre d'observations visuelles:

- (a) Chaque jour en début de matinée, un observateur résidant à 2 km de la station vient y faire avec un appareil photographique numérique une série de trois clichés bien repérés sur le terrain, dont la Fig. 3 présente des photos dites "vues vers l'aval".
- (b) Depuis le début de l'exploitation de la station, des visites sont effectuées par le personnel scientifique basé à environ 50 km avec une fréquence d'une à deux visites par semaine. La mission, outre les vérifications des appareils et la collecte des données enregistrées, consiste à faire une observation précise des événements: types d'hydrométéores rencontrés, description de la couche de neige au sol (épaisseur, répartition sur les versants, type de neige), nébulosité... En outre, deux campagnes de mesures intensives de 13 et 5 jours ont été effectuées en février et mars 2002.

## ANALYSE DES OBSERVATIONS

Tout d'abord les relevés demi-horaires ont été traduits en données horaires pour faciliter les visualisations. Dans un premier temps nous analysons simultanément les



**Fig. 3** Enregistrements horaires du pluviographe à pesée (en haut, valeurs positives), du pluviographe à augets basculeurs (en bas, valeurs négatives) et de la température sèche de l'air. Horaires des visites et photos quotidiennes lors de la même période, du 12 au 14 février 2002.

graphiques relevés aux deux pluviographes, en nous appuyant sur les photos journalières et les compte-rendus de visites pour confirmer ou infirmer s'il y a eu ou non occurrence de chute de neige. Par exemple, la Fig. 3 représente les cumuls horaires des 12–14 février 2002 aux deux pluviographes ainsi que le report des photos vues vers l'aval, les horaires de visites et enfin la température de l'air moyennée sur une heure. Sur cette période de trois jours, on distingue quatre corps d'averses séparés (numérotés de 1 à 4 sur la figure) que l'on peut décrire comme suit, en commençant par les cas les plus caractéristiques:

**Le corps d'averses numéro 2** donnant par pesée une précipitation de 10.3 mm répartie sur 11 h (du 12 février à 23:00 h au 13 à 10:00 h), ne correspond à aucun basculement des augets aux mêmes horaires. Les augets donnent un enregistrement de hauteur semblable (10.6 mm) réparti sur seulement cinq heures groupées autour de midi le 13 février (10:00–15:00 h). Plusieurs arguments nous amènent à dire qu'il s'agit d'un événement entièrement neigeux: (a) l'enregistrement par pesée s'est produit au cours de la nuit pendant laquelle le rayonnement est négligeable, mais aussi avec des températures de l'air basses, en dessous de 0.30°C, à l'exception de la première heure (1.23°C) et de la dernière (0.57°C); (b) à l'inverse, le début d'enregistrement des

augets, centré sur midi, a commencé avec les premiers rayons du soleil à 09:30 h, pour des températures supérieures à 1.20°C; (c) les répartitions par tranches horaires de précipitation sont différentes selon le dispositif de mesure: réparties sur 11 h par pesée et groupées sur seulement 5 h par augets; (d) le graphique de l'enregistrement des augets n'est pas sans rappeler une loi de vidange de l'enregistrement par pesée. Les observations visuelles suivantes confirment cette interprétation: (e) la photo quotidienne du 13 février prise à 08:10 h montre un paysage enneigé et on a mesuré une couche d'environ 3.5 cm lors de la visite sur le terrain à 08:40 h; (f) à ce dernier horaire, on a observé que l'entonnoir du pluviographe à augets était empli de neige jusqu'à la rupture de pente du cône; (g) lors de la deuxième visite à 12:30 h, on a observé qu'il y avait encore de la neige en fusion dans l'entonnoir du pluviographe à augets, avec très peu de neige résiduelle au sol (recouvrement de 3% dans l'enceinte de la station).

**L'averse numéro 4** est interprétée comme une averse de pluie, avec des totaux identiques aux deux pluviographes (12.9 et 12.8 mm) et des graphiques symétriques.

**Les averses 1 et 3** sont plus délicates à interpréter, mais peuvent l'être à la lumière des raisonnements proposés ci-dessous:

Lors de **l'averse numéro 1**, après une petite pluie de 0.2 mm observée sur les deux appareils de 14:00 à 15:00 h, le décalage des enregistrements d'une heure selon le dispositif de mesure, ainsi que la température de 0.27°C amènent à penser que la deuxième heure de précipitation (15:00–16:00 h; 2.8 mm) correspond pour partie au moins à de la neige, suivie de pluie de 16:00 à 17:00 h (1.2 mm et 2.0°C). Ces interprétations de détail sont confirmées par les observations visuelles suivantes: (a) lors de la visite à la station à 17:00 h, il ne restait que quelques traces de neige éparses au sol, et (b) il avait été noté en matinée, au refuge de haute montagne situé à la même altitude et à 2 km de la station, une chute de neige qui s'est terminée peu après 15:00 h.

**L'averse 3** est interprétée comme suit: pluie de 22:00 à 01:00 h (2.1 et 2.2 mm) suivie de neige pesée de 01:00 à 02:00 heures (1.5 mm, température 0.13°C) que l'on retrouve avec les augets en matinée seulement (08:00–11:00 h) avec un total de 1.6 mm et une température croissante au dessus de 0.80°C.

## MÉTHODE “PLUVIOGRAPHIQUE”

L'analyse détaillée présentée sur un exemple dans le paragraphe précédent s'appuie sur une approche graphique; on parle de méthode “pluviographique”. On identifie des critères simples à appliquer aux autres événements pour différencier les phases neigeuses ou pluvieuses de façon semi-automatique.

Le premier test sur chaque tranche horaire est de déterminer s'il y a un enregistrement par pesée là où il n'y en a pas par augets, ou s'il lui est supérieur. Ce critère associé à une température relativement basse de l'air, permet de discriminer sans grande erreur la neige de la pluie, en s'appuyant sur les vérifications visuelles. Différents essais nous ont conduit à retenir une température limite de +0.30°C.

Après ce travail de dégrossissement effectué automatiquement, nous revenons aux données en traçant des graphiques sur les périodes intéressantes. Ces graphiques nous amènent parfois à faire dans le détail des choix différents des résultats automatiques; par exemple les première et dernière heures de l'averse numéro 2 de la Fig. 3 enregistrée par pesée avec des températures de 1.23 et 0.57°C n'ont pas été retenues par calcul comme correspondant à de la neige, alors que le raisonnement et les observations directes montrent qu'il y en a eu.

Ces quelques exemples montrent l'intérêt exploratoire de cette méthode dite "pluviographique" dans le contexte météorologique des Andes tropicales.

## COMPARAISON AVEC D'AUTRES MÉTHODES

Malgré le choix initial d'exploitation semi automatique, il était intéressant de comparer les résultats obtenus automatiquement avec ceux d'autres méthodes développées par différents auteurs.

Tout d'abord, la méthode proposée par Rohrer (1989) prenant en compte la température humide de l'air n'a pas pu être mise en œuvre, du fait de l'imprécision des enregistrements de l'humidité de l'air, donc du calcul de la température humide. Il en va de même, en ce qui concerne la méthode développée par Ferguson & Breyfogle (1995), en l'absence de données similaires.

Pour effectuer les comparaisons, nous avons bénéficié d'un travail rigoureux de séparation des phases de précipitation effectué postérieurement par Lejeune *et al.* (2003), précisément sur les mêmes données d'observation. Les phases liquides et solides sont séparées, à l'échelle de la demi-heure, en prenant en compte les onze paramètres météorologiques suivants: intensité de la précipitation (pluviographe à pesée), flux d'énergie sol/atmosphère et sa variation, température de surface du sol et sa variation, radiations de grandes longueurs d'ondes émises et leurs variations, albédo et sa variation, et enfin température sèche de l'air et sa variation.

Le Tableau 1 fournit les comparaisons des résultats de cette méthode dite "experte", considérée comme référence avec, d'une part, la méthode "pluviographique" développée ici (colonne 1) et, d'autre part en colonne 2, la méthode

**Tableau 1** Comparaison de quatre méthodes. Période du 21 octobre 2001 à 00:00 h au 18 avril 2002 à 14:00 h (saison des pluies): 4311 événements horaires observés et 1190 h de précipitations.

	Méthode "pluviographique"	Méthode "classique-1"	Méthode "experte"	Méthode "classique-2"
	2 pluviographes et temp. air <0.3°C	1 pluviographe et temp. air <0.3°C	1 pluviographe et 11 paramètres climatologiques	1 pluviographe et temp. air <1.65°C
Total des précipitations * (neige + pluie) (mm)	860	860	907	860
Hauteur totale de neige "détectée" (mm)	277	274	569	568
Coefficients $R^2$ des hauteurs de neiges horaires, avec les hauteurs "expertes"	0.654	0.568		0.894
Sur 1190 h, nombre d'heures avec neige	294	264	655	643

\* Dans la méthode "experte", la hauteur de précipitation mesurée est corrigée avec le vent, d'où la différence avec les autres méthodes.

dite “classique-1” où la distinction des phases est obtenue par une simple séparation au dessus et en dessous d’une température de l’air de  $+0.3^{\circ}\text{C}$ , valeur retenue avec la méthode “pluviographique”. On voit que cette dernière donne des résultats aussi bons, sinon meilleurs, pour ce qui concerne le coefficient  $R^2$  des hauteurs de neige horaires.

Enfin, forts de cette référence “experte”, nous avons recherché *a posteriori* quelle température aurait dû être choisie dans une méthode ne prenant en compte que la température de l’air. La colonne 4 (classique-2) montre les résultats très satisfaisants obtenus avec une température de  $+1.65^{\circ}\text{C}$ , surprenante *a priori*. On notera que cette valeur de température correspond à des fréquences relatives d’occurrence de neige de l’ordre de 10–30% (soit 90 et 70% d’occurrence de pluie) dans l’étude préliminaire de Leblanc (2001) (Fig. 1).

## CONCLUSION

Dans cet article, nous avons présenté un dispositif de mesures pluviographiques permettant de représenter assez sûrement les phases—liquide ou solide—des précipitations à une échelle de temps relativement fine, ici l’heure. Les premiers résultats d’une séparation automatisée à cette échelle peuvent être jugés relativement satisfaisants par comparaison avec, d’une part, les observations visuelles faites en complément et, d’autre part, la méthode “classique” ne prenant en compte que la température de l’air. Ce travail a pu être précisé par la méthode “experte” prenant en compte onze autres facteurs météorologiques enregistrés.

Il n’en reste pas moins vrai que la méthode “pluviographique” mise en œuvre a été fort utile lors de la phase d’exploration dans cette région des Andes tropicales, où les conditions météorologiques des chutes de neige et de couvert neigeux observées au niveau du sol étaient difficiles à appréhender *a priori*.

**Remerciements** Cette étude a été réalisée grâce à un financement du Programme National français de Recherche en Hydrologie. Les institutions suivantes en ont facilité la réalisation: la Compagnie Bolivienne d’Electricité et d’Energie, l’Institut d’Hydraulique et d’Hydrologie de l’Université San Andrés de La Paz et la Représentation de l’IRD en Bolivie. Les personnes dont les noms suivent doivent être remerciées: à Météo France F. Habets, J. Noilhan et N. Fritz, à l’IRD Y. Caballero, J. P. Chazarin, E. Berthier, P. Ribstein, E. Cadier, R. Fuertes et R. Gallaire, les correspondants des Sociétés Campbell et Géonor qui ont été sollicités à plusieurs reprises, et enfin les deux réviseurs anonymes qui ont permis d’améliorer significativement la rédaction du présent article.

## REFERENCES

- Auer, A. H. Jr (1974) The rain versus snow threshold temperatures. *Weatherwise* April 1974, **27**, 67.
- Boone, A. & Etchevers, P. (2001) An inter-comparison of three snows schemes of varying complexity coupled to the same land surface and macro-scale hydrologic models. *J. Hydromet.* **2**, 374–394.
- Caballero, Y. (2001) Modélisation des écoulements d’origine pluvio-nivo-glaciaire en contexte de haute montagne tropicale. Application à la haute vallée du Zongo (Bolivie). Thèse doctorat, Université Montpellier II, France.
- Campbell Scientific Inc. (1993) *Dataloggers and Data Acquisition Systems for Environmental and Water Resources. CR10 Measurement and Control Module, Operator’s Manual*. Logan, Utah, USA. <http://www.campbellsci.co.uk/>
- Campbell Scientific Inc. (2000) *CR23X Micrologger, Operator’s Manual*. Logan, Utah, USA.

- Etchevers, P., Durand, Y., Habets, F., Martin, E. & Noilhan, J. (2000) Impact of spatial resolution on the hydrological simulation of the Durance high Alpine catchment. *Ann. Glaciol.* **32**, 87–92.
- Ferguson, S. A. & Breyfogle, S. (1995) Remote identification of precipitation type. In: *Proc. Int. Snow Science Workshop* (Snowbird, Utah, USA, 30 October–3 November 1994), 222–259. Available from: ISSW 94, PO Box 49, Snowbird, Utah 84092, USA.
- Forland, E. J., Allerup, P., Dahlström, B., Elomaa, E., Jonsson, T., Madsen, H., Perälä, J., Rissanen, P., Vedin, H. & Vejen, F. (1996) Manual for operational correction of Nordic precipitation data. DNMI Klima Report no. 24/96, DNMI (Norwegian Meteorological Institute), Oslo, Norway.
- Géonor AS (1995) *Precipitation gauge T-200B; User Manual*. Roa, Norway.
- Leblanc, J. M. (2001) Dynamique de la couverture neigeuse dans les Andes Tropicales. Vallée du Rio Zongo, Bolivie. Mémoire, DEA, Université Montpellier II, France. <http://www.mpl.ird.fr/hydrologie/pch/documents/leblanc.html>
- Lejeune, Y., L'Hôte, Y. & Chevallier, P. (2003) Instrumentation et constitution d'une base de données météorologiques et nivologiques dans les Andes. IRD, Météo France, Centre National de Recherches Météorologiques/Centre d'Etude de la Neige, Note de Centre no. 21. Grenoble, France. [http://www.mpl.ird.fr/hydrologie/pch/documents/PNRH01-37/pdf/PNRH0137\\_note\\_charquini.pdf](http://www.mpl.ird.fr/hydrologie/pch/documents/PNRH01-37/pdf/PNRH0137_note_charquini.pdf).
- Rohrer, M. (1989) Determination of the transition air temperature from snow to rain and intensity of precipitation. In: *Instruments and Observing Methods, Report no. 48*: Int. Workshop on Precipitation Measurement (St Moritz, Switzerland, 3–7 December 1989). WMO/TD 328, 475–482. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.

Reçu le 21 février 2003; accepté le 24 janvier 2004