

PLUIE OU NEIGE ? DISPOSITIF DE MESURES DANS LES ANDES DE BOLIVIE ET PREMIERS RESULTATS.

L'HOTE Y.¹, CHEVALLIER P.¹, ETCHEVERS P.², LEJEUNE Y.² & WAGNON P.¹

**Séminaire International d'Hydrologie nivale en Méditerranée,
Beyrouth, décembre 2002**

IRD & Météo France

¹ IRD, Unité de Recherche Great Ice

² Météo France, Centre d'étude de la Neige, Grenoble.

Pluie ou neige ? Dispositif de mesures dans les Andes de Bolivie et premiers résultats.

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 sur un site installé à environ 4800 m d'altitude, un dispositif formé de deux pluviographes, l'un à pesée et équipé d'antigel, l'autre à augets basculeurs, complété par des mesures de température de l'air a permis avec une bonne précision de séparer les volumes des deux phases précipitées. La consultation de photographies numériques quotidiennes confirment la bonne performance de cette méthode.

Mots clés : Mesure des précipitations, pluie, neige, Andes, Bolivie.

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 4500 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, les précipitations, alternativement solides ou liquides, sont à l'origine de comportements hydrodynamiques distincts qu'il convient d'étudier pour évaluer les conséquences d'une variabilité climatique affectant en particulier les conditions de température, de précipitation et de vent.

La mise en oeuvre de modélisations complexes (Caballero, 2001) utilisant des méthodes de bilan d'énergie au travers de schémas validés dans le contexte des Alpes (ISBA, Boone et Etchevers, 2000 ; CROCUS, Etchevers *et al.*, 2000) prend en compte cette différenciation de phase des précipitations.

Dans le cadre d'un projet soutenu par le PNRH (Programme National de Recherche en Hydrologie) intitulé "Dynamique de la couverture neigeuse dans les Andes Tropicales", 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 4 795 mètres (16°17'11" sud, 68°6'32" ouest) dans la haute vallée du Rio Zongo sur le versant amazonien de la Cordillère Royale de Bolivie (Figure 1). La station est exposée au nord-ouest. Elle a été maintenue pendant une durée d'un an de la mi-octobre 2001 à la mi-octobre 2002. Tous les paramètres climatiques requis par les modélisations actuelles ont été enregistrés avec une fréquence de 30 minutes : températures de l'air et du sol, humidité relative, rayonnements solaires incidents et réfléchis de courtes et de grandes longueurs d'onde, précipitations, vitesse et direction du vent, hauteur de neige, flux d'énergie à l'interface sol/atmosphère.

Pour l'utilisation et la validation des modèles, il était nécessaire de pouvoir différencier de manière précise et, si possible, automatisée les précipitations solides des précipitations liquides. En effet, une étude préliminaire (Leblanc, 2001) a montré que les observations de température de l'air ne suffisaient pas, à elles seules, pour discriminer la phase des précipitations relevées manuellement par un observateur vivant en permanence à environ 2 km de la station et à la même altitude. De plus ces résultats présentaient des différences significatives avec les rares études de ce type mentionnées dans la littérature (Auer, 1974 ; Rohrer, 1989 ; Shwer, 1989), toutes dans l'hémisphère nord et en climat tempéré.

DISPOSITIF DE MESURES

Mesure des précipitations, pluviographes

Parmi les enregistrements météorologiques automatiques cités ci-dessus, le dispositif de mesure des précipitations comprend deux pluviographes enregistreurs de conceptions différentes, l'un "à augets basculeurs" et l'autre "par pesée".

Afin de valider ces mesures, un pluviomètre manuel de type Association, classique en France, a été relevé quotidiennement en février et mars 2002. Il a permis de constater que les observations par pesée étaient particulièrement exactes, sans biais, ce qui n'était pas le cas du pluviographe à augets pour des raisons décrites ci-dessous et que nous avons corrigées au mieux sur le terrain. Ce sont donc 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 cm², l'auget bascule pour 2.5 mm d'eau. Du fait de basculements intempestifs pouvant être reliés au vent, il a été nécessaire de remplacer le 20 mars 2002 le support de l'appareil par un autre plus stable. On a aussi constaté qu'après basculement, de l'eau restait dans les augets constitués de matière plastique ; cet artéfact a été estimé pouvoir représenter jusqu'à 15% d'erreur sur la mesure. Le total cumulé des précipitations est enregistré toutes les 10 minutes à l'une des centrales d'acquisition de marque Campbell (Campbell Scientific INC, 1993 et 2000).

Le pluviographe par pesée est d'origine norvégienne, de marque GEONOR, type T-200B (Geonor AS, 1995 ; Figure 2) : la précipitation est collectée par un cylindre creux d'alliage d'aluminium peint en noir mat, de 200 cm² de base (16 cm de diamètre) et 36 cm de hauteur, elle tombe directement dans un seau de collecte en matière plastique de 12 litres de volume. Ce dernier est suspendu sur un plateau support par trois chaînes métalliques, l'une comprenant le capteur de pesée dont le principe est celui du fil vibrant : mesure de fréquence électrique transformée en voltage. Pour éviter la prise en glace et éventuellement des détériorations, le seau de plastique est rempli de 1.7 litre de produits réfrigérants (éthylène glycol et méthanol) permettant de descendre jusqu'à -7°C, température largement suffisante ici. Pour empêcher l'évaporation, 0.4 litre d'huile a été ajoutée. Cet ensemble de mesure contenu dans un capot de forme aérodynamique (75 cm de hauteur totale) est fixé sur un pied massif, lui même ancré par 4 forts boulons dans un socle de béton. Une structure circulaire solidaire du pied de l'appareil et de 1.20 mètre de diamètre soutient un pare - vent formé de 32 lames métalliques dont le niveau supérieur est celui de la surface de réception du pluviographe, soit 1.75 mètre au dessus du sol. La masse importante de cet appareil estimée à plus de 50 kg et son ancrage

solide au sol réduisent l'influence du vent sur les mesures qui se sont révélées être très précises, au dixième de millimètre près. Les mesures sont effectuées lors d'une scrutation toutes les 10 secondes et l'enregistrement des données intervient à chaque demi heure ronde ; il s'agit, d'une part, de la valeur instantanée du cumul et, d'autre part, d'une valeur moyennée pour lisser les légères distorsions qui demeuraient encore sur les enregistrements instantanés.

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 kilomètres de la station vient y faire avec un appareil photographique numérique une série de 3 clichés bien repérés sur le terrain, dont la Fig. 3 présente des photos dites "vues vers l'aval".

(b) Depuis le début d'exploitation de la station, des visites sont effectuées par le personnel scientifique basé à environ 50 kilomètres 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

Dans un premier temps nous analysons simultanément les 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 de la neige. Par exemple, la Figure 3 représente les cumuls horaires des 12 au 14 février 2002 aux deux pluviographes ainsi que le report des photos vues d'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 que l'on peut décrire comme suit, en commençant par les cas les plus caractéristiques :

Le corps d'averse numéro 2 donnant par pesée une précipitation de 10.3 mm répartie sur 11 heures (du 12 février à 23 heures au 13 à 10 h), ne correspond à aucun basculement des augets aux mêmes horaires. Les augets donnent un enregistrement de volume semblable (10.6 mm) réparti sur seulement cinq heures groupées autour de midi le 13 février (10 à 15 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°) ; (b) à l'inverse, le début d'enregistrement des augets, centré sur midi, a commencé avec les premiers rayons du soleil à 9 h 30, pour des températures supérieures à 1.20° ; (c) les répartitions par tranches horaires de précipitation sont différentes selon le dispositif de mesure : réparties sur 11 heures par pesée et groupées sur seulement 5 heures 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) les trois photos quotidiennes du 13 février prises entre 8 h 10 et

8 h 20 montrent un paysage enneigé et on a mesuré une couche d'environ 3.5 cm lors de la visite sur le terrain à 8 h 40 ; (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 h 30, 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% de 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-dessus :

Lors de l'averse numéro 1, après une petite pluie sur une heure de 0.2 mm, le décalage des enregistrements d'une heure selon le dispositif de mesure, ainsi que la température de 0.27 degré amènent à penser que la deuxième heure de précipitation (15 à 16 h ; 2.8 mm) correspond pour partie au moins à de la neige, suivie de pluie de 16 à 17 heures (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 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 kilomètres de la station, une chute de neige qui s'est terminée peu après 15 heures.

L'averse 3 est interprétée comme suit : pluie de 22 heures à 1 heure (2.1 et 2.2 mm) suivie de neige pesée de 1 à 2 heures (1.5 mm, température 0.13°C) que l'on retrouve avec les augets en matinée seulement (8 à 11 heures) avec un total de 1.6 mm et une température croissante au dessus de 0.80°C.

BILAN DE PHASES

A partir de la méthode d'analyse détaillée dans le paragraphe précédent, on a pu identifier des critères simples à appliquer à l'ensemble des 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 voisine de 0.30°C. Après ce travail de dégrossissement pouvant être 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 avec des températures de 1.23 et 0.57°C n'ont pas été retenues par calcul comme ayant subi de la neige, alors que le raisonnement et les observations directes montrent qu'il y en a eu.

L'exploitation selon cette méthode des mois de janvier et février 2002 en prenant 0.30°C comme limite de température donne les répartitions journalières (0 heure à 0 heure) pluie / neige présentées sur la Figure 4. On constate que janvier a été le mois le plus enneigé des deux avec 11 jours ayant connu la neige et un rapport quantité de neige sur total des précipitations de 39%. En février ce rapport n'est que de 14% avec 8 jours ayant connu la neige.

Toutefois, dès maintenant nous avons relevé certaines limites à cette modélisation simple puisque divers essais ont montré des différences de comportement. Par exemple en prenant 0.0°C comme critère de température, le mois de janvier présente un rapport neige/précipitation totale de 22% (au lieu de 39%) et dans le détail encore 9 jours de neige (11 ci dessus) correspondant bien aux observations visuelles. Par contre avec le même critère de 0.0°C, le mois de février ne présente plus qu'une journée de neige, le 27 avec 0.6 mm, ce qui est en total désaccord avec les observations visuelles. Il est évident qu'un complément d'analyse s'impose, où l'on pourrait prendre en compte d'autres caractéristiques météorologiques enregistrées comme les rayonnements, le flux sol/atmosphère...

CONCLUSION

Dans cet article, nous avons présenté un dispositif de mesures permettant de discriminer assez sûrement les phases –liquide ou solide- des précipitations à une échelle de temps relativement fine, ici l'heure. Les premiers résultats d'une modélisation simple à cette échelle peuvent être jugés satisfaisants par comparaison avec les observations visuelles faites en complément.

Ce travail de modélisation doit néanmoins être précisé en prenant en compte d'autres facteurs météorologiques enregistrés.

Remerciements. Cette étude a été réalisée grâce à un financement du Programme National de Recherche en Hydrologie. Les institutions suivantes en ont facilité la réalisation : la COBEE, Compagnie Bolivienne d'Electricité et d'Energie, l'IHH, Institut d'Hydraulique et d'Hydrologie à La Paz, la Représentation de l'IRD en Bolivie. Les personnes ci après doivent être remerciées : à Météo France J. Noilhan et N. Fritz, à l'IRD J. P. Chazarin et E. Berthier qui ont assuré la construction et le démarrage de la station, P. Ribstein, E. Cadier, R. Fuertes et R. Gallaire et enfin les cadres des Sociétés Campbell et Geonor qui ont été sollicités à plusieurs reprises.

REFERENCES

- Auer, A. H. Jr. (1974) The rain versus snow threshold temperatures. *Weatherwise* April 1974 : 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. Hydrometeor.*, **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. 198 p. + annexes.
- Campbell Scientific, INC. (1993) Dataloggers and data acquisition systems for Environmental and Water Resources. CR10 Measurement and Control Module, Operator's Manual. 148 p.
- Campbell Scientific, INC. (2000) CR23X Micrologger, Operator's Manual. 200 p.
- 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. *Annals of Glaciology*, **32**, 87-92.

- Geonor AS. (1995) Precipitation gauge T-200B ; User manual. Roa, Norway. 33 p.
- Leblanc, J.M. (2001) Dynamique de la couverture neigeuse dans les Andes Tropicales. Vallée du Rio Zongo, Bolivie. Mémoire, DEA, Université Montpellier II. 52 p.
- Rohrer, M. (1989) Determination of the transition air temperature from snow to rain and intensity of precipitation. In : *Workshop on precipitation measurement* (Sevruck, B. ed.). Swiss Federal Institute of Technology, WMO/IAHS/ETH, 475-482.
- Shwer, T.A. (2002) Different types of precipitation in climatic zones. In : *Workshop on precipitation measurement* (Sevruck, B. ed.). Swiss Federal Institute of Technology, WMO/IAHS/ETH, 483-487.

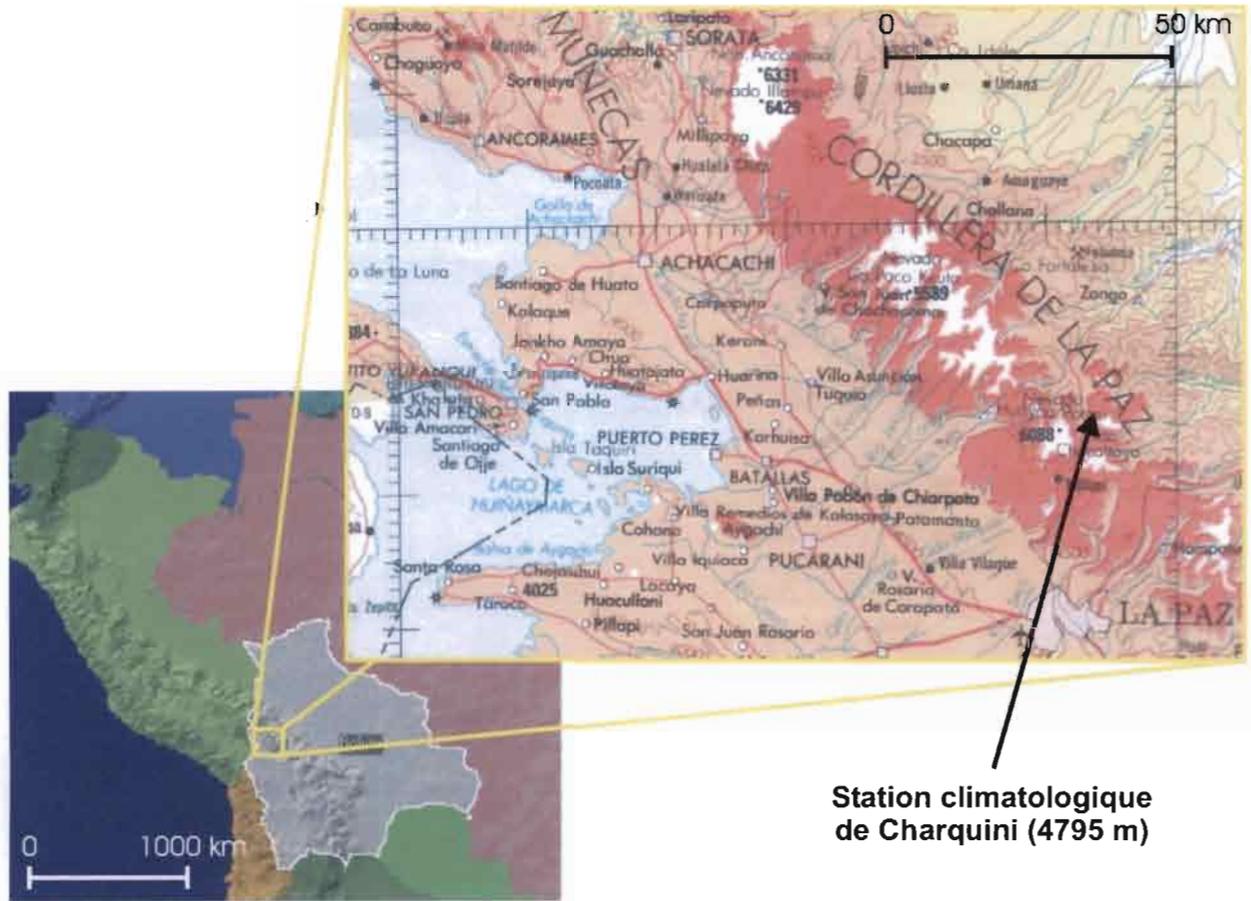


Fig. 1 Localisation de l'étude.

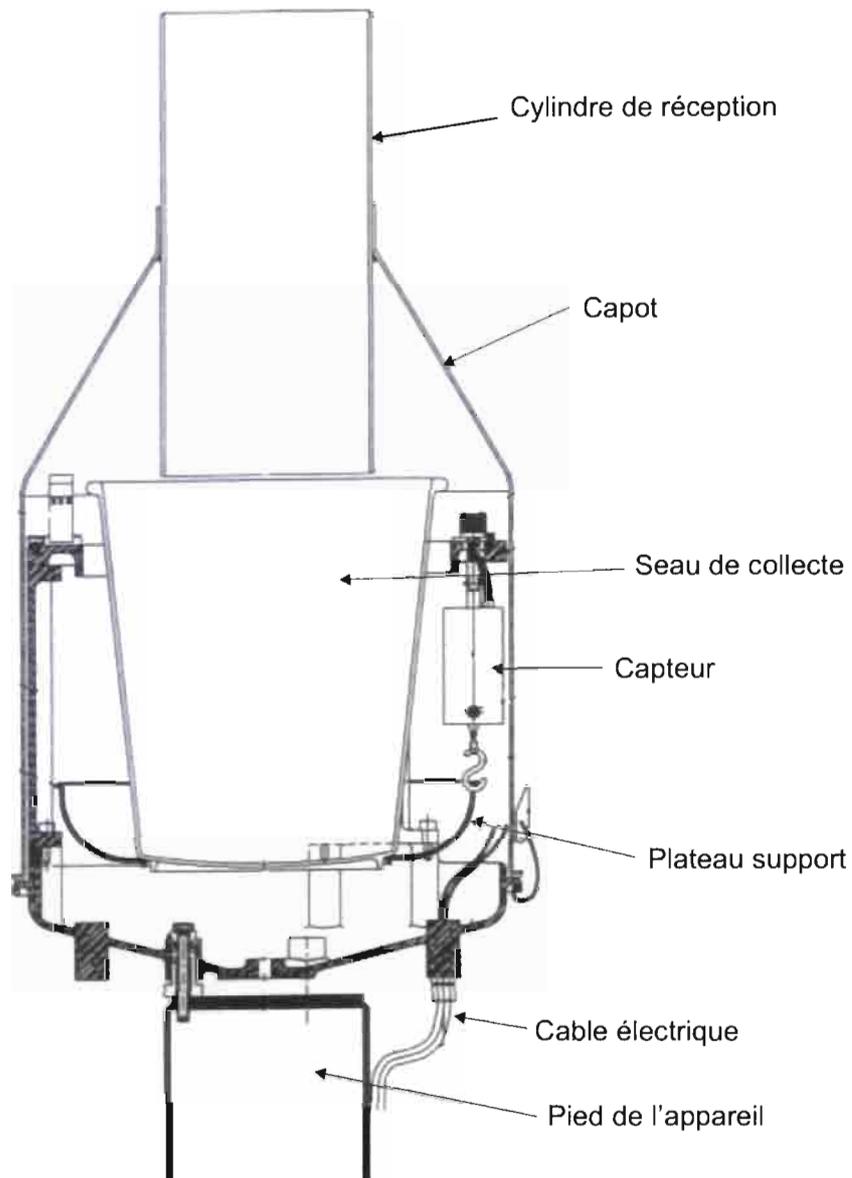


Fig. 2 Schéma du pluviographe par pesée, selon un document Géonor AS, Norway.

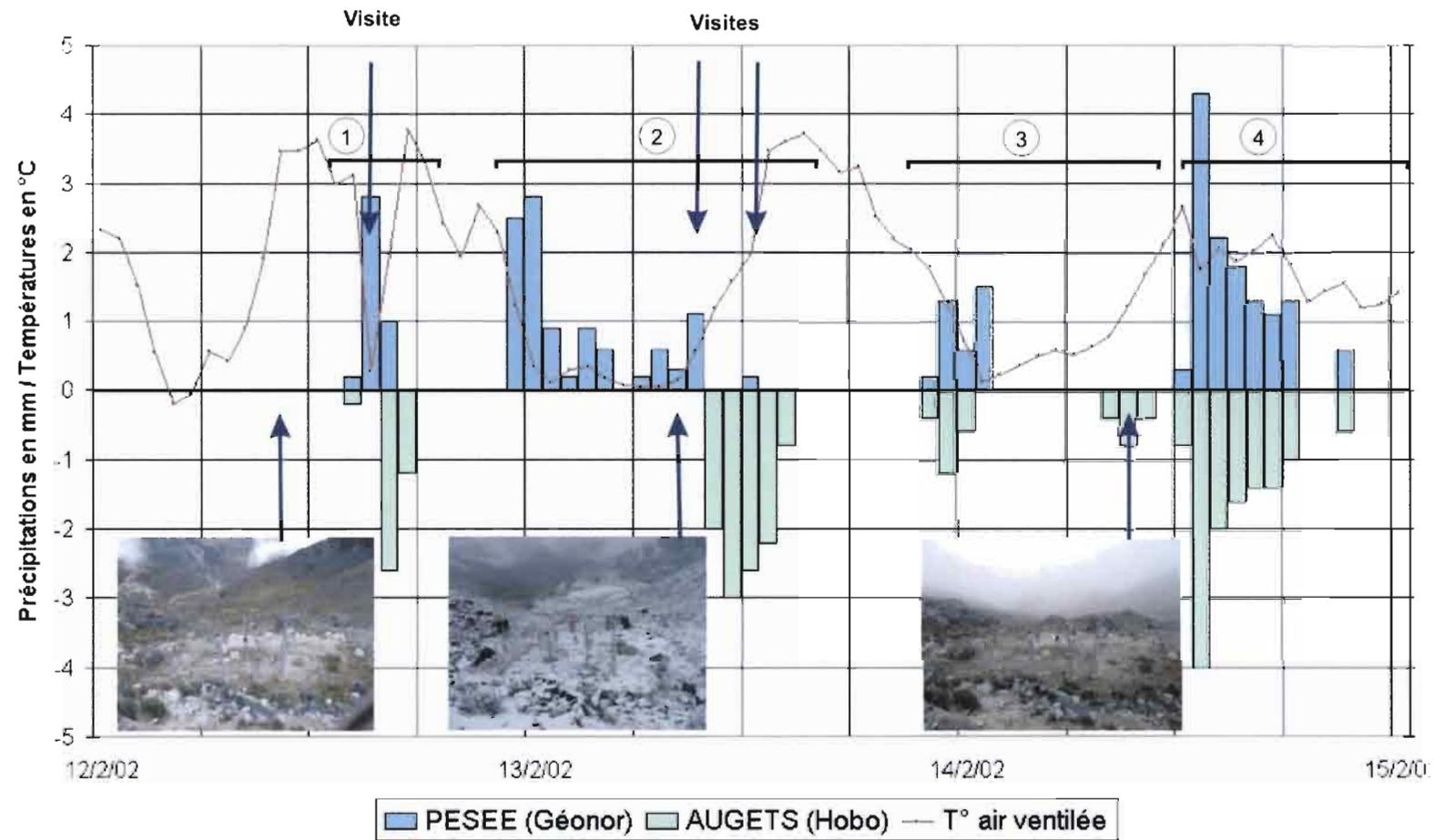


Fig. 3 Enregistrements des pluviographes et de la température de l'air, photos et horaires de visites au cours de la période du 12 au 14 février 2002.

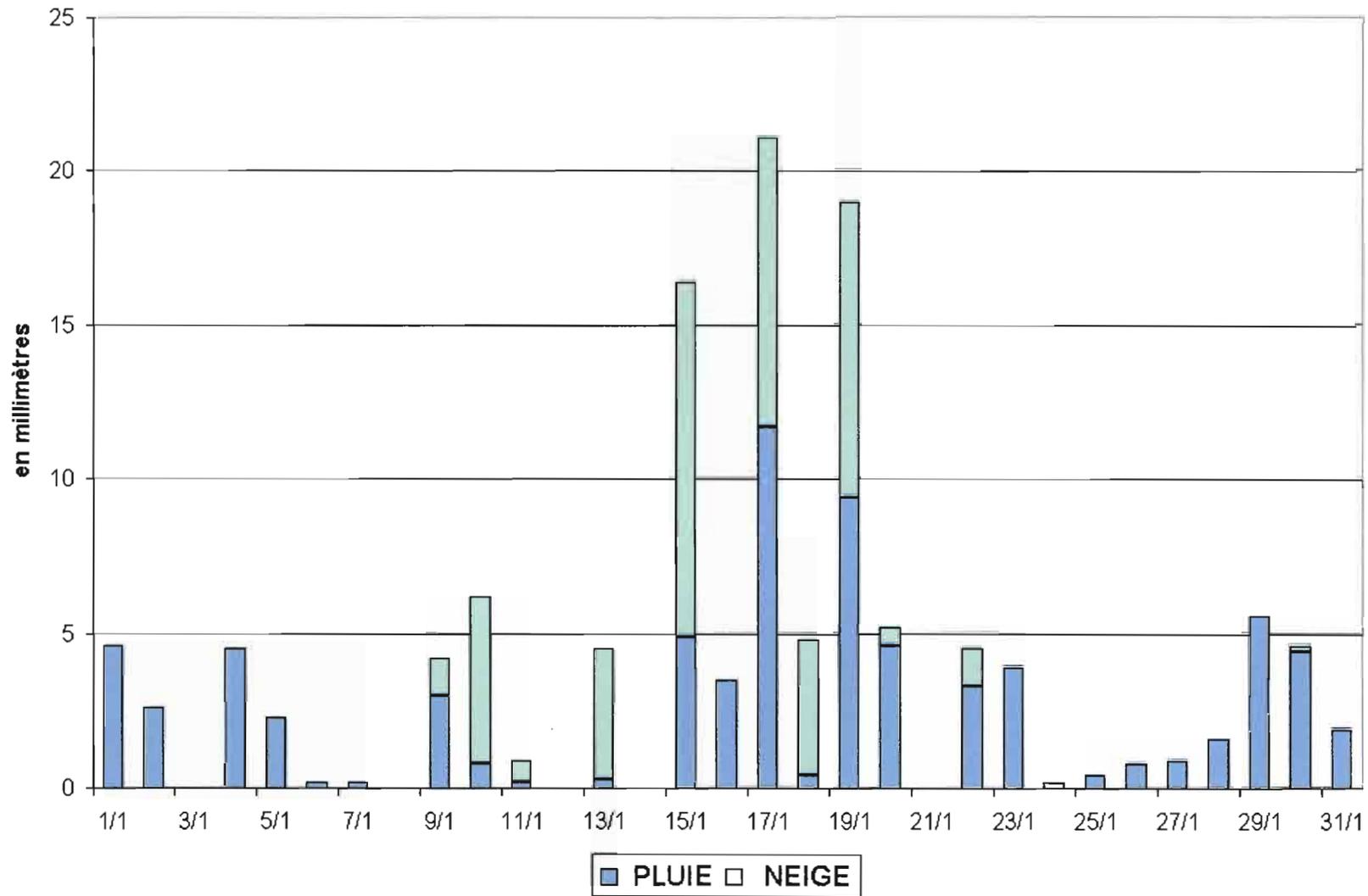


Fig. 4 Répartition quotidienne pluie / neige au cours des mois de janvier et février 2002.