

**NOTE  
DE CENTRE**



**N° 21  
CENTRE D'ETUDES DE LA NEIGE**

***INSTRUMENTATION ET CONSTITUTION D'UNE BASE DE DONNEES  
METEOROLOGIQUES ET NIVOLOGIQUES DANS LES ANDES;  
STATION CHARQUINI, 4795 m, BOLIVIE***

**SEPTEMBRE 2003**

**Y. LEJEUNE, Y. L'HOTE, P. CHEVALLIER**

**CENTRE NATIONAL  
DE RECHERCHES MÉTÉOROLOGIQUES**

 **METEO FRANCE**

METEO-FRANCE



**METEO  
FRANCE**

**CENTRE NATIONAL  
DE RECHERCHES METEOROLOGIQUES**

***NOTE DE TRAVAIL  
DU CENTRE D'ETUDES DE LA NEIGE***

***N° 21***

***INSTRUMENTATION ET CONSTITUTION D'UNE BASE DE DONNEES  
METEOROLOGIQUES ET NIVOLOGIQUES DANS LES ANDES;  
STATION CHARQUINI, 4795 m, BOLIVIE***

***par***

***Y. LEJEUNE, Y. L'HOTE, P. CHEVALLIER***

Cette note n'engage pas la responsabilité de Météo-France

**SEPTEMBRE 2003**



**INSTRUMENTATION ET CONSTITUTION D'UNE BASE DE DONNEES  
METEOROLOGIQUES ET NIVOLOGIQUES DANS LES ANDES ;**

**STATION CHARQUINI, 4795 m, BOLIVIE.**

**PROJET 01-37 DU PROGRAMME NATIONAL DE RECHERCHE EN HYDROLOGIE (PNRH)  
(DYNAMIQUE DE LA COUVERTURE NEIGEUSE DANS LES ANDES TROPICALES)**

**YVES LEJEUNE<sup>1</sup>, YANN L'HOTE<sup>2</sup>, PIERRE CHEVALLIER<sup>2</sup>.**

**AVEC LA COLLABORATION DE :**

**ETIENNE BERTHIER<sup>2</sup>, MARIE BOURQUI<sup>2</sup>, JEAN-PHILIPPE CHAZARIN<sup>2</sup>, PIERRE ETCHEVERS<sup>1</sup>,  
ROLANDO FUERTES<sup>2</sup>, ROBERT GALLAIRE<sup>2</sup>, PHILIPPE GARRETA<sup>2</sup>, FLORENCE HABETS<sup>3</sup>,  
JOËL NOILHAN<sup>3</sup>, ANTOINE RABATEL<sup>2</sup>, ALVARO SORUCO<sup>4</sup>, PIERRE RIBSTEIN<sup>2</sup>, PATRICK WAGNON<sup>2</sup>.**

<sup>1</sup> Météo France, Centre National de Recherche en Météorologie, Centre d'Etude de la Neige, Grenoble

<sup>2</sup> Institut de Recherche pour le Développement, Unité de Recherche GREAT ICE (Glaciers et Ressources en Eau dans les Andes Tropicales ; Indicateurs Climatiques et Environnementaux), Montpellier, Grenoble et La Paz

<sup>3</sup> Météo France, Centre National de Recherche en Météorologie, Groupe de Météorologie à Mésoscale – échelle, Toulouse

<sup>4</sup> Universidad Mayor de San Andrés, Instituto de Hidráulica e Hidrología, La Paz



1	Présentation du projet PNRH 01-37 .....	6
2	La réalisation du projet .....	8
3	Conditions climatiques moyennes .....	10
3.1	Le climat régional.....	10
3.2	Caractéristiques générales de la période étudiée .....	11
3.2.1	Les précipitations .....	11
3.2.2	La température de l'air.....	13
3.3	Eléments de comparaison avec les données du Col de Porte .....	16
4	La station météorologique .....	17
4.1	Situation, paysage .....	17
4.2	Description .....	19
4.2.1	Centrales d'acquisition des données.....	19
4.2.2	Pluviographe par pesée.....	20
4.2.3	Pluviographe à augets basculeurs .....	21
4.2.4	Capteur de hauteur de neige.....	22
4.2.5	Fluxmètres .....	22
4.2.6	Température de l'air non ventilée .....	23
4.2.7	Sondes de températures du sol.....	24
4.2.8	Vitesse et direction du vent.....	24
4.2.9	Humidité relative et température de l'air ventilée .....	24
4.2.10	Radiations de courtes et grandes longueurs d'ondes .....	25
5	Observations et contrôles .....	27
5.1	Mesures et vérifications de routine .....	27
5.1.1	Visites de la station.....	27
5.1.2	Série de trois photos quotidiennes .....	27
5.2	Campagnes de mesures intensives.....	27
5.2.1	Visites quotidiennes à la station, suivi de l'instrumentation.....	28
5.2.2	Carnet d'observations météorologiques horaires .....	28
5.2.3	Planches à neige et suivi des événements neigeux.....	28
5.2.4	Relevés des masques solaires.....	29
5.2.5	Descriptions des sols et prélèvements .....	30
5.3	Principaux dysfonctionnements de l'appareillage.....	31
5.3.1	Pluviographe à augets basculeurs Hobo.....	31
5.3.2	Capteur de hauteur de neige.....	31

5.3.3	Fluxmètres .....	31
5.3.4	Température de l'air non ventilée .....	31
5.3.5	Vitesse et direction du vent.....	32
5.3.6	Rayonnements de grandes longueurs d'ondes (LW).....	32
6	Critique et validation de quelques données brutes.....	35
6.1	Centrales de mesures.....	35
6.2	Mesures des précipitations .....	35
6.3	Fluxmètres .....	35
6.4	Sondes de températures de surface du sol.....	36
6.5	Vitesse et direction du vent.....	36
6.6	Mesures de hauteur de neige .....	36
7	Méthodes de détermination des paramètres élaborés .....	37
7.1	Traitement des "micro-précipitations" .....	37
7.2	Nébulosité (N).....	37
7.2.1	Description de la méthode $N_{pw}$ .....	38
7.2.2	Validation de la méthode $N_{pw}$ .....	41
7.3	Rayonnements de grandes longueurs d'ondes $LW\downarrow$ et $LW\uparrow$ .....	42
7.4	Décomposition du rayonnement solaire atmosphérique en rayonnements directs et diffus .....	42
7.5	Albédo seuillé.....	43
7.6	Méthode experte d'évaluation des phases des précipitations .....	43
7.6.1	Cas faciles .....	44
7.6.2	Cas difficiles : $T_{air} \in ] -1^{\circ}C, +3^{\circ}C[$ .....	44
7.6.3	Résultats et validation de la méthode.....	45
7.7	Correction des lames d'eau mesurées par le pluviomètre Géonor .....	47
7.8	Albédo "sol nu" .....	49
7.9	Pression atmosphérique à la station Charquini .....	49
8	Constitution des fichiers de forçage et de validation .....	50
9	Conclusions et perspectives .....	51
10	Bibliographie .....	52
10.1	Publications .....	52
10.2	Matériel.....	53
11	Annexes.....	54
11.1	Annexe 1 : Exemple de compte rendu de visite à la station Charquini (page 1 / 2) .....	54
11.2	Annexe 2 : Fiches descriptives des planches à neige .....	56
11.3	Annexe 3 : Relevés de trois des quatre planches à neige, le 04 février 2002.....	57
11.4	Annexe 4 : Inventaire des mesures de densité de la neige .....	58

11.5	Annexe 5 : Relevés des masques solaires ; angles donnés en degrés .....	59
11.6	Annexe 6 : Description et analyses de la fosse pédologique sur le site PNRH.....	60
11.7	Annexe 7 : Description et analyses de la fosse pédologique « planche à neige Huayna Potosi » .....	61
11.8	Annexe 8 : Exposé détaillé et algorithmique de la méthode d'évaluation des phases des précipitations pour les cas difficiles .....	62

# 1 Présentation du projet PNRH 01-37

L'IRD étudie depuis 1991 les ressources en eau dans les hautes vallées des Andes Tropicales (Francou et Ribstein, 1995 ; Ribstein, *et al.*, 1995a ; Pouyaud, *et al.*, 1996 ; Francou, *et al.*, 1997 ; Pouyaud, *et al.*, 1999). Après s'être surtout intéressé à l'impact de la variabilité climatique sur les bilans de masse et d'énergie des glaciers tropicaux qui dominent certaines de ces vallées, la même question s'est posée pour les ressources en eau d'origine pluviale et nivale.

Diverses recherches ont été conduites au cours des dernières années en Bolivie et au Chili pour identifier et modéliser cette ressource largement utilisée pour la production énergétique et pour l'alimentation en eau potable, accessoirement pour l'agriculture, y compris à des altitudes très élevées – au dessus de 4000 m (Covarrubias, 1996 ; Pourrut et Patoux, 1996; Covarrubias et Chevallier, 1997 ; Caballero, 1998 ; Chaffaut, 1998 ; Caballero, 2001a, Caballero, *et al.*, 2003 accepté).

Très vite les observations ont montré que la neige jouait un rôle important non seulement pour son accumulation sur les glaciers, mais aussi dans les hautes vallées et sur les reliefs non englacés. Des constats qualitatifs ont été établis :

- Les couvertures neigeuses sont fugaces, même à des altitudes élevées, et il est exceptionnel de les observer en dessous de 4000 m. Elles sont généralement peu épaisses et se maintiennent rarement plus de quelques jours.
- Les forçages climatiques à haute altitude en région tropicale conduisent à une forte combinaison sublimation/fusion.
- En zone tropicale climatiquement contrastée (nord Chili, Bolivie), les précipitations (neige ou pluie) correspondent à la saison « *chaude* » et les températures de surface sont très souvent positives dans la journée – même à des altitudes élevées (5000 m) – avec des gels nocturnes.
- Le réchauffement climatique entraîne une diminution des superficies susceptibles d'être enneigées conduisant ainsi à ce que de nouvelles surfaces soient plus fréquemment soumises à des précipitations pluvieuses ; cela modifie de manière sensible les régimes d'écoulement dans les vallées.

L'ensemble de ces observations et de ces travaux nous a convaincu que l'objet hydrologique que nous maîtrisons le plus mal était bien la couverture neigeuse accumulée dans les vallées hors des glaciers et qu'il était important de l'étudier plus finement pour le prendre en compte dans les modélisations.

C'est pour aborder ces questions que le Programme National de Recherche en Hydrologie a approuvé le projet soumis sous le numéro 01-37 par un groupe de travail constitué par des chercheurs de l'unité de recherche Great Ice de l'IRD et par deux équipes du CNRM- Météo France rattachées, d'une part, au Centre d'Etude de la Neige à Grenoble et, d'autre part, au Groupe de Météorologie à Moyenne Echelle à Toulouse. Une expérimentation spécifique a été mise en place dans le bassin versant du Rio Zongo en Bolivie sur le site de Charquini à une altitude de 4800 mètres.

Un des objectifs de l'instrumentation du site consistait à collecter des données d'entrée et de validation pour des modèles de simulation de bilan de surface, tels que le modèle ISBA, ou des modèles de simulation de couvert

nival, tels que le modèle CROCUS. Ces modèles, utilisés en exploitation et parfaitement validés aux latitudes tempérées pour toutes tranches d'altitude, ont jusqu'alors très peu été testés sur un site tropical d'altitude. Les jeux de données, dont l'élaboration est décrite dans cette note, présentent un caractère particulièrement original pour la communauté scientifique.

## 2 La réalisation du projet

Elle a essentiellement consisté à installer et suivre une station météorologique dans un contexte de haute altitude sur un site non englacé dont les caractéristiques techniques et opérationnelles sont largement inspirées du dispositif du Centre d'Etude de la Neige de Météo France au Col de Porte (Massif de la Chartreuse, Isère). Le site de Charquini dans la Cordillère Blanca de Bolivie (Cartes, Figure 1) a été choisi sur les critères suivants :

- un contexte bien connu des chercheurs de l'IRD et de ses partenaires,
- une altitude proche de la limite pluie – neige, correspondant localement à celle de la limite inférieure des glaciers,
- une relative facilité d'accès,
- un soutien logistique et matériel important pouvant être apporté par la **Compagnie Bolivienne d'Energie Electrique (COBEE)** qui exploite la vallée aval du Rio Zongo à des fins hydroélectriques.

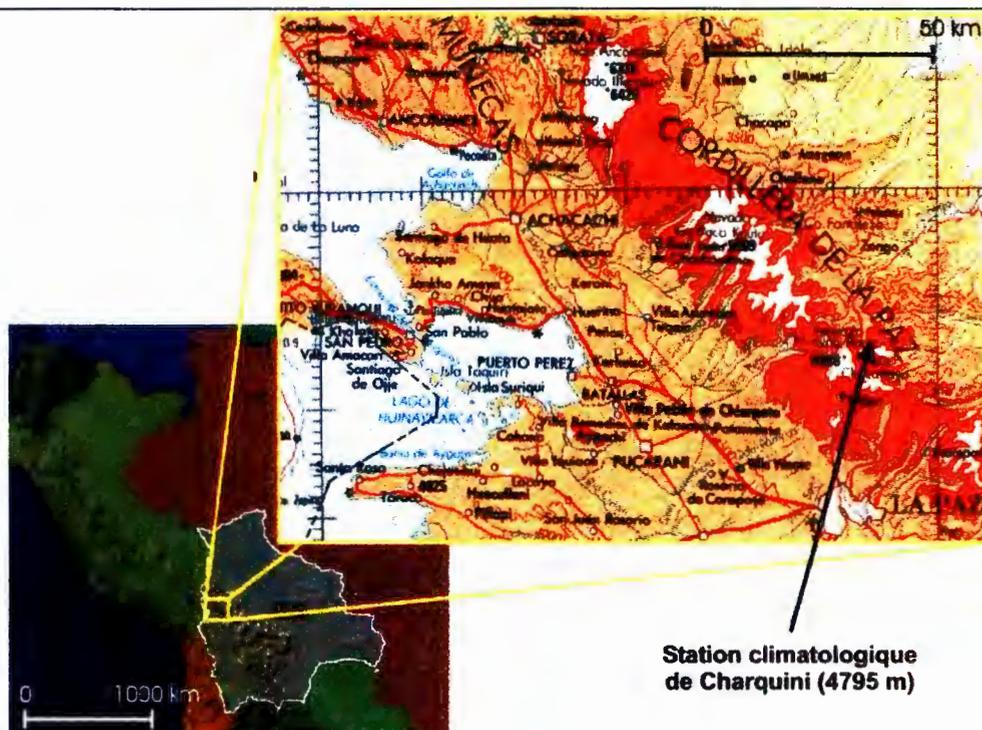


Figure 1. Carte de situation

Cette station devait initialement avoir une durée de fonctionnement limitée à la saison humide tropicale australe entre octobre 2001 et mai 2002. Plusieurs facteurs ont conduit à prolonger sa durée de vie :

- l'excellente qualité et le caractère exceptionnel des enregistrements ;
- la relative faiblesse du nombre d'évènements neigeux, la saison étudiée s'avérant nettement plus chaude que la moyenne observée depuis 1948 ;
- l'intérêt de disposer d'au moins un cycle annuel complet ;
- le coût relativement modéré de maintenance en phase de routine ;

- la perspective de réemployer l'équipement de la station dans le cadre de la mise en place de l'Observatoire de Recherche en Environnement (ORE)<sup>1</sup> *Glacioclim* dont le Glacier Zongo constituera un élément à partir de fin juillet 2003.

Les observations ont débuté le 20 octobre 2001. La fermeture de la station pour son transfert sur le site du Glacier Zongo est définitivement programmée pour la mi-juillet 2003. Son équipement et ses protocoles de contrôle sont décrits dans la section 4 de ce document.

Au vu des résultats recueillis, il a été décidé de constituer une base de données organisée et complète à l'image des bases de données utilisées par les météorologues à des fins d'inter comparaison de modèles (Wood, *et al.*, 1998). C'est ainsi que les résultats sont présentés sous la forme de deux fichiers : un fichier de *forçage* dont les paramètres interviennent directement dans les modèles, et un fichier de *validation*, constitué d'un ensemble d'observations complémentaires<sup>2</sup> susceptibles d'être utilisé pour estimer la performance du modèle dans sa représentation des phénomènes climatiques.

La section 5 du document décrit diverses observations complémentaires de terrain ainsi que les contrôles du fonctionnement de l'appareillage.

La section 6 traite de la critique et la validation de quelques données brutes.

La section 7 du document décrit la méthode, justifie les hypothèses et détaille les traitements qui ont permis d'établir la base de données. Elle s'appuie sur les observations réalisées entre octobre 2001 et avril 2002 qui ont été complètement traitées à la date de rédaction de ce document. Les observations réalisées ultérieurement seront traitées en respectant strictement les mêmes procédures.

Enfin, la section 8 donne la constitution des fichiers de forçage et de validation.

---

<sup>1</sup> Labellisé par le Ministère Délégué à la Recherche et aux Nouvelles Technologies.

<sup>2</sup> Dans la pratique, il s'agit de toutes les observations non nécessaires à la mise en œuvre du modèle choisi

### 3 Conditions climatiques moyennes

[Les paragraphes 3.1 et 3.2 sont essentiellement des extraits du mémoire de DEA de Marie Bourqui (2003)]

#### 3.1 Le climat régional

La Cordillère Royale est une zone climatiquement contrastée avec une saison des pluies (ou été austral) qui débute en novembre et dure jusqu'à 6 mois, avec un maximum de précipitations généralement en janvier (Roche, *et al.*, 1990). Cette saison des pluies se produit lorsque la Zone Intertropicale de Convergence (ITCZ) se trouve à la latitude de la Cordillère Royale ; les alizés apportent alors l'humidité contenue dans les bases couches de l'atmosphère depuis l'Océan Atlantique et l'Amazonie (Vuille, 1999) (Figure 2.a). 80% des précipitations annuelles tombe durant cette période, dont les deux tiers entre novembre et février (Ramirez, *et al.*, 1995). Les précipitations arrivent par cycles de plusieurs jours, entrecoupés de périodes de temps plus sec (Garreaud et Aceituno, 2001). Ces cycles sont liés à la position d'un anticyclone situé au niveau de pression 200hPa dans la haute troposphère, et centré approximativement sur l'Altiplano (Figure 2.b). Une période faible en précipitations serait due à un affaiblissement assorti d'un déplacement vers le nord de cette zone de hautes pressions. Le schéma contraire (déplacement vers le sud) est rencontré pendant les longues périodes humides (Garreaud 1999; Vuille, 1999).

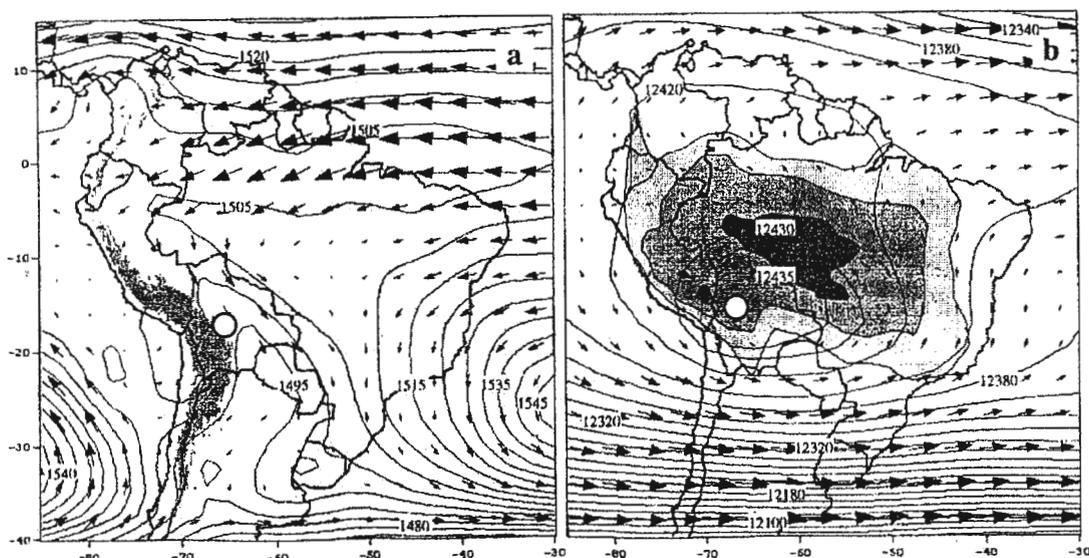


Figure 2 : conditions climatiques d'été austral (1968 –1996) basées sur les réanalyses NCEP/NCAR. D'après Vuille, 2000. a) vent au niveau 850 hpa (flux intertropicaux d'est) b) vent à 200h Pa, le « High Bolivian » centré sur la Bolivie. Le point blanc marque la zone d'étude.

La saison sèche (ou hiver austral) est, quant à elle, associée au départ de l'ITCZ, donc à un affaiblissement des alizés, ainsi qu'à l'arrivée de solides anticyclones subtropicaux au sud qui maintiennent une forte stabilité des masses d'air et bloquent les arrivées humides de la plaine amazonienne. La saison sèche sévère dure généralement 4 mois (mai, juin, juillet et août) et représente entre 5 et 10 % des précipitations annuelles. Ces précipitations sont en majorité dues à des perturbations du système stable qui provoque une remontée par le sud d'air polaire. Ces fronts polaires sont appelés « surazos » en Bolivie. Ils se produisent durant toute l'année mais

sont quatre fois plus fréquents durant l'hiver austral (Garreaud 2000; Roche , *et al.*, 1990; Ronchail, 1989). Les masses d'air sont originaires du Pacifique sud oriental. Elles sont canalisées dans la direction sud-nord par la cordillère et sont significatives jusqu'à 10° de latitude sud. La présence de ces masses d'air est signe d'un abaissement des températures et de précipitation en saison sèche. En hiver, ces fronts polaires provoquent des fluctuations de températures moins fortes, mais ils sont associés à des précipitations provoquées par la rencontre de l'air froid avec l'air relativement chaud de la région. Ces «surazos» entraînent, en saison sèche, des chutes de neiges qui peuvent être conséquentes en haute montagne et durent quelques jours (Ribstein, *et al.*, 1995b).

Dans les vallées de montagne, on peut noter l'importance d'un gradient altitudinal de précipitations. Les flux humides en provenance d'Amazonie étant bloqués par la Cordillère, ceux ci s'élèvent et provoquent des précipitations d'origine orographique par la remontée des masses d'air le long des pentes. La cause vient de la diminution des températures avec l'altitude qui entraîne la chute de la pression de vapeur saturante, déclenchant la condensation (Barry, 1992).

Les précipitations augmentent depuis les contreforts amazoniens pour atteindre un optimum pluviométrique entre 1500 et 2000 mètres d'altitude (avec 2 à 3 mètres d'eau par an) (Wagnon 1999). Au-dessus, le gradient de précipitations devient franchement négatif, l'air se déchargeant au fur et à mesure de son humidité. En haute montagne, le cumul annuel de précipitations annuelles se situe en moyenne entre 800 et 1000 mm (Caballero, 2001).

Du fait des forts changements saisonniers d'humidité, les gradients altitudinaux de températures ont eux aussi leur évolution saisonnière qui répond aux lois de la thermodynamique et à l'existence de deux types d'adiabatiques : l'adiabatique sèche étant supérieure en valeur absolue à l'adiabatique humide (Queney, 1974). Dans les Andes du Nord du Chili, on passe d'environ -0,55 °C pour 100 m en saison humide à -0,80°C/100m en saison sèche (Lliboutry, 1999).

## **3.2 Caractéristiques générales de la période étudiée**

La station Charquini a fonctionné du 20 octobre 2001 jusqu'à la mi-juillet 2003. Il était intéressant de replacer la période centrale de l'étude (novembre 2001 – décembre 2002) par rapport aux chroniques climatiques disponibles ou reconstituées sur une période longue dans les années récentes. Pour deux grandeurs caractéristiques, les précipitations et la température de l'air, cette opération a été rendu possible par comparaison avec les jeux de données existant sur des postes voisins.

### **3.2.1 Les précipitations**

Il existe 30 années de données mensuelles de précipitation sur le site de la Plataforma situé à environ 2km à l'ouest de la station Charquini, à une altitude voisine. Les valeurs des 14 mois de la période (novembre 2001 – décembre 2002) entre ce poste de la Plataforma et le pluviographe principal de la station Charquini sont très bien corrélées ( $R^2= 0,908$  ; Figure 3). Le cumul nettement moindre en valeur absolue de la station de la Plataforma s'explique par la différence d'appareillage. Mais on peut admettre que la distribution temporelle des cumuls de Charquini suit la même loi qu'à la Plataforma.

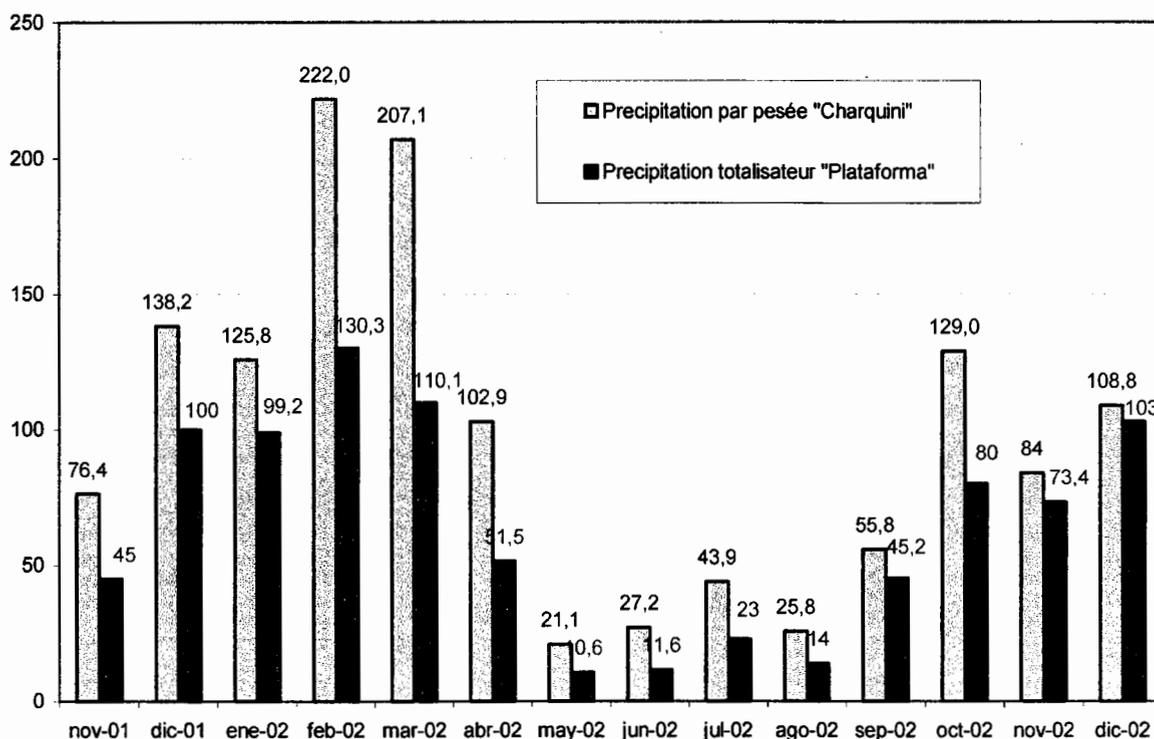


Figure 3 : Précipitations mensuelles de novembre 01 à décembre 02 relevées au pluviographe du site Charquini et au pluviomètre de la Plataforma.

La distribution statistique des totaux annuels à la Plataforma est représentée sur la Figure 4. Le cumul novembre 2001 / octobre 2002 correspond à une période de retour de trois années sèches. En détaillant, Bourqui (2003) montre que la période de saison des pluies est légèrement déficitaire et la saison sèche plutôt excédentaire. On note aussi l'importance du signal ENSO<sup>3</sup> : durant l'épisode El Niño 82/83, on a enregistré les plus faibles cumuls de précipitations depuis 1971 tandis que l'évènement La Niña de 73/74 rend compte du plus fort cumul annuel.

La Figure 5 présente la distribution des cumuls mensuels de précipitations à la Plataforma sur la période 1971 – 2000 sur laquelle les valeurs mensuelles de la période octobre 2001 – décembre 2002 ont été reportées (la distribution pour les mois de novembre et décembre est la même en début et fin de graphique). Pour l'année 2001/2002, la plupart des cumuls mensuels se situent autour de la médiane ; quelques uns s'en écartent :

- Les mois de novembre 2001 et de janvier 2002 sont significativement déficitaires, respectivement au niveau du quartile inférieur et sous le quartile inférieur. Le déficit pluviométrique en janvier 2002 est notable, car il s'agit en année normale du mois le plus abondant de la saison des pluies.
- Les mois de juillet 2002 et d'octobre 2002 sont très largement excédentaires approchant les valeurs maximales de précipitations observées depuis 1971.

<sup>3</sup> *El Niño Southern Oscillation* : nom générique du phénomène climatique de l'oscillation australe.

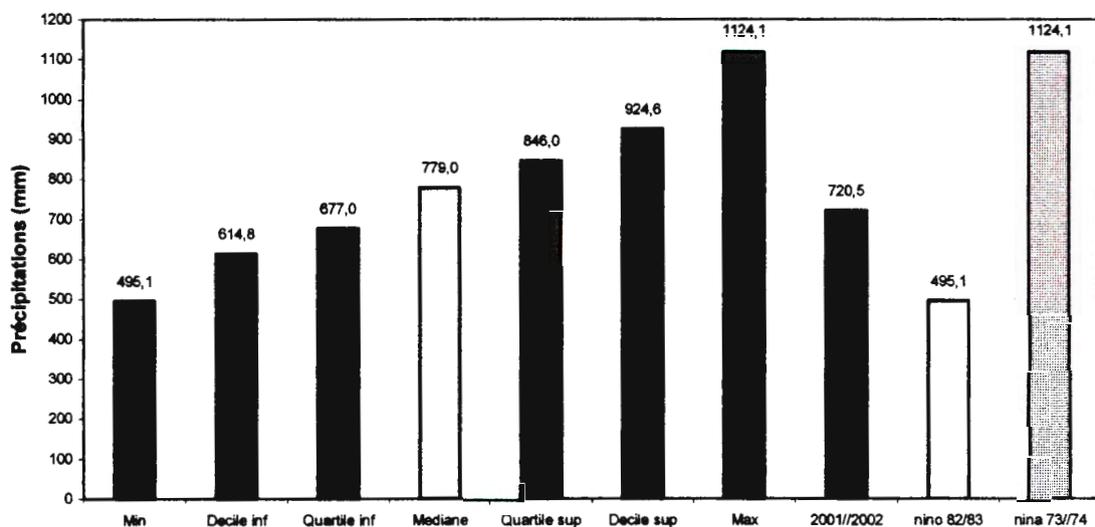


Figure 4 : distribution des cumuls de précipitations de novembre à octobre relevés sur le site de La Plataforma de 1971 à 2002.

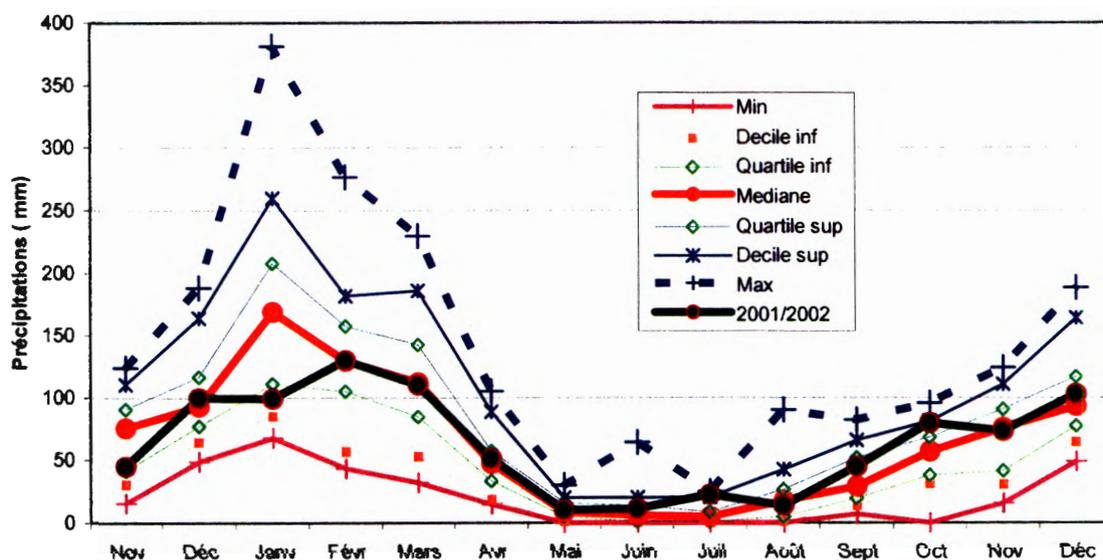


Figure 5 : distribution des précipitations mensuelles sur le site de la Plataforma. En trait noir épais : les totaux mensuels enregistrés de novembre 2001 à décembre 2002.

### 3.2.2 La température de l'air

Les températures mensuelles moyennes observées à la station Charquini montrent une variation annuelle d'amplitude réduite : il y a seulement 3,5 °C entre le mois le plus chaud et le plus froid (Figure 6). Les données de réanalyses mensuelles fournies par les services météorologiques américains NCEP-NCAR sont calculées pour la même altitude théorique que le site Charquini (570 hPa par interpolation des résultats entre 500 et 600 hPa). Elles présentent des valeurs bien corrélées, mais inférieures de 4°C en moyenne. Ceci est dû au fait que les données sont calculées en atmosphère libre sans influence de la chaleur du sol.

Les températures relevées à la station de Charquini sont aussi très bien corrélées avec les stations voisines (Plataforma –  $R^2=0,976$ , Zongo 5150 –  $R^2=0,880$ ), nettement moins bien avec la station de La Paz El Alto à une vingtaine de kilomètres ( $R^2=0,64$ ).

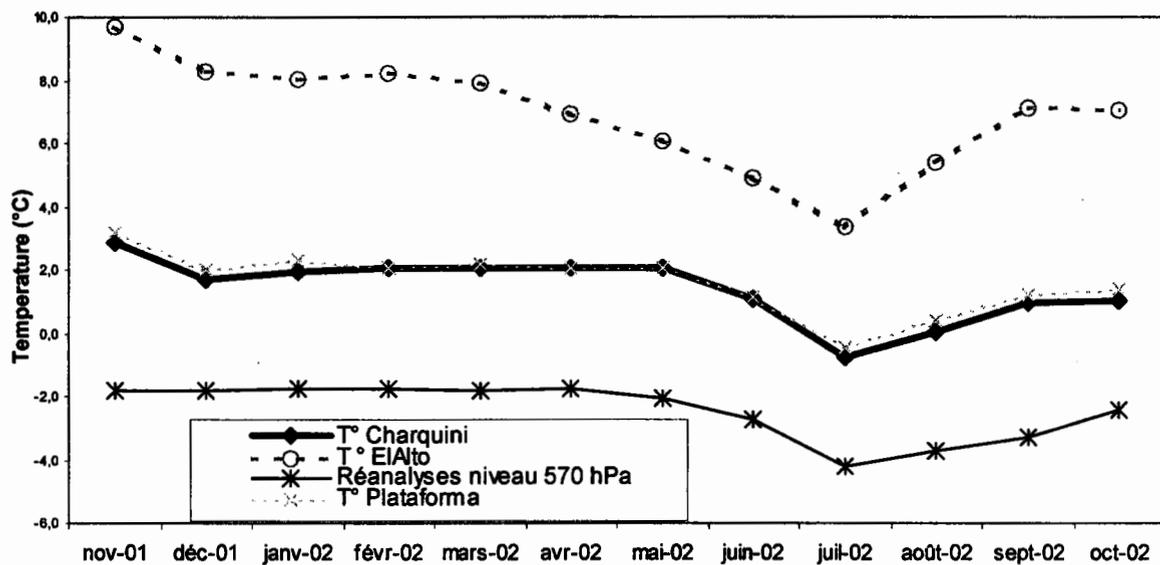


Figure 6 : Températures moyennes mensuelles de novembre 2001 à octobre 2002 sur les sites de Charquini, la Plataforma, El Alto et sur les données de réanalyses mensuelles NCEP-NCAR interpolées au niveau de pression 570hPa.

La corrélation observée entre la série de températures mensuelles de la Plataforma de septembre 1995 à novembre 2002 et celle des réanalyses NCEP-NCAR est acceptable ( $R^2=0,74$  pour 75 points, Figure 7). On peut donc formuler l'hypothèse que les valeurs fournies par les réanalyses fonctionnent dans le même sens que celles observées sur le terrain.

La Figure 8 représente la distribution des données mensuelles des réanalyses NCEP NCAR entre janvier 1948 et décembre 2002.

Le mois le plus chaud en valeur médiane est le mois de janvier, le plus froid est le mois de juillet. Tous les mois de la série «médiane de 1995 à 2002» (à relier à la moyenne des observations à la Plataforma) sont situés au-dessus de la médiane 1948-2002 et rendent ainsi compte d'une tendance vers un réchauffement climatique.

Pour la série 2001/2002, le mois de novembre est très chaud mais aussi les mois de mai et juin qui atteignent les déciles supérieurs. Par contre la température du mois de juillet 2002 est la seule valeur située en dessous de la médiane des températures, ceci étant probablement dû à une advection polaire de grande ampleur.

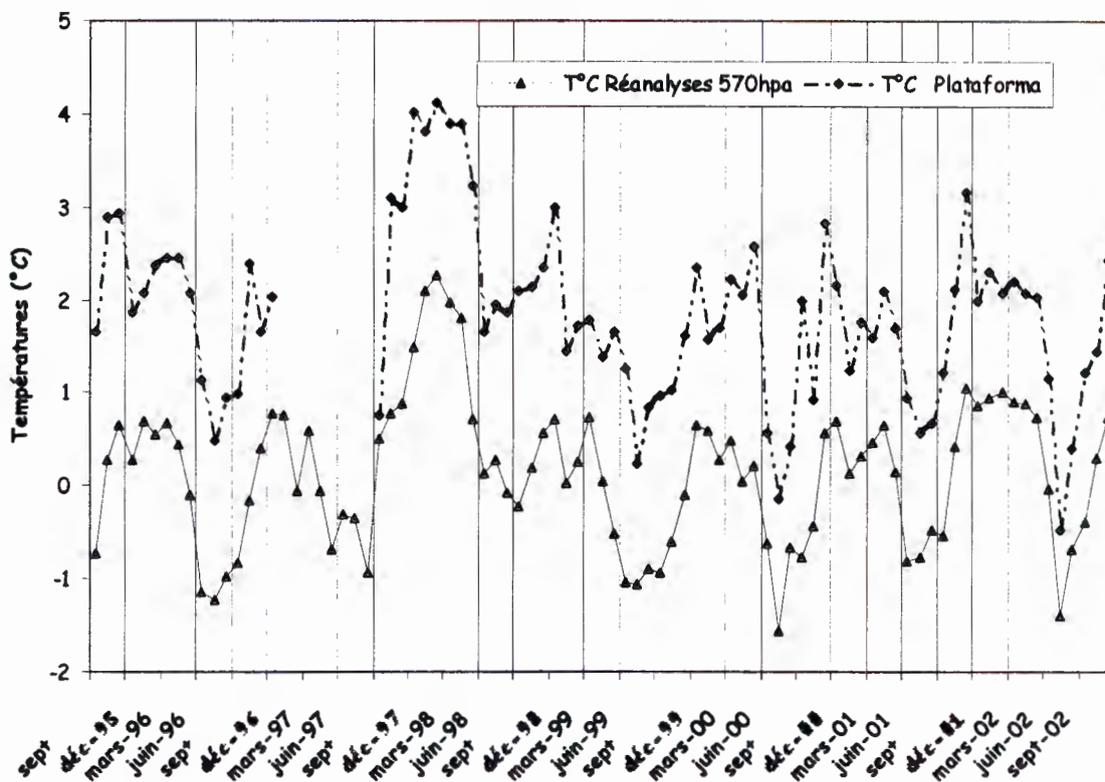


Figure 7 Températures mensuelles de septembre 1995 à novembre 2002 sur le site de la Plataforma et provenant des résultats du modèle de réanalyses NCEP-NCAR au niveau de pression 570 hPa. La station de la Plataforma se trouvait en panne de janvier 1997 à septembre 1997.

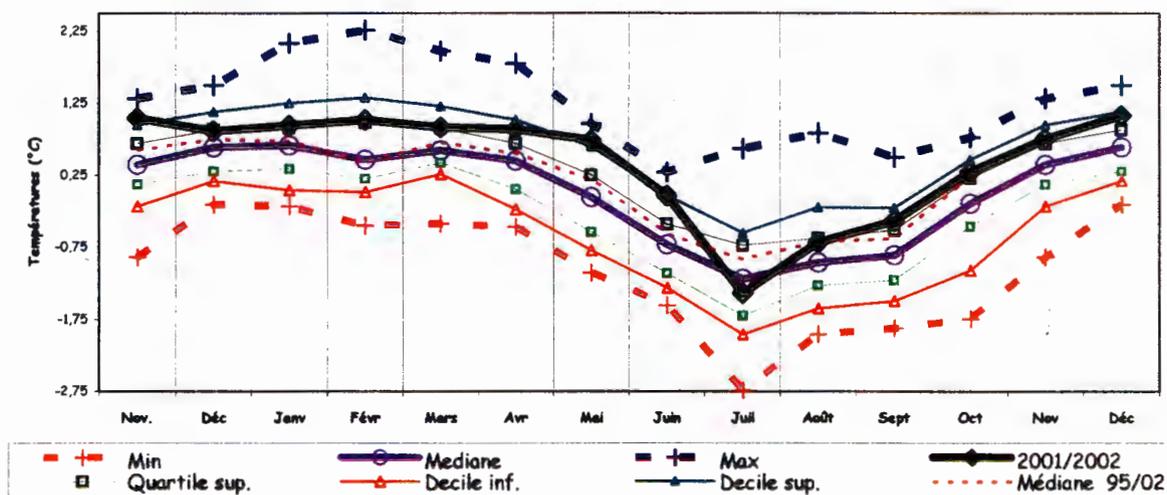


Figure 8 : Distribution depuis 1948 des valeurs mensuelles de températures du modèle de réanalyses NCEP/NCAR. En trait noir épais, le modèle en 2001/2002 ; en pointillé rouge fin la médiane des valeurs de 1995 à 2002.

### 3.3 Eléments de comparaison avec les données du Col de Porte

A titre indicatif, le Tableau 1 présente, sur des périodes d'observation similaires incluant des saisons contrastées, quelques valeurs (moyenne, maximale et minimale) des principaux paramètres caractéristiques du climat local. On note en particulier la moindre amplitude thermique et les valeurs nettement plus élevées du rayonnement solaire dans le cas de la Cordillère des Andes. Les valeurs d'humidité et de rayonnement terrestre sont dans les mêmes gammes.

**Tableau 1 : Comparaison des principaux paramètres climatologiques mesurés à la station Charquini (Cordillère Royale de Bolivie) et au Col de Porte (Massif de la Chartreuse dans les Alpes françaises).**

Station Charquini (4795 m) - (novembre 2001 – avril 2002)						
Valeurs 1/2 horaires	T°air °C	Humidité U %	Vitesse vent (ff) m/s	SWmes↓ W/m <sup>2</sup>	SWmes↓ >10W/m <sup>2</sup>	LWmes↓ W/m <sup>2</sup>
Moy	2,4	84,5	1,2	180	400	300
Min	-3,2	10,0	0	/	/	182
Max	12,0	100	5,1	1358	1358	390

Col de Porte (1340 m) - (octobre 1996 - juin 1997)						
Valeurs 1/2 horaires	T°air °C	Humidité U %		SWmes↓ W/m <sup>2</sup>	SWmes↓ >10W/m <sup>2</sup>	LWmes↓ W/m <sup>2</sup>
Moy	3,8	79,4	--	108	250	291
Min	-11,6	14,0	--	/	/	188
Max	21,7	100	--	1022	1022	389

## 4 La station météorologique

### 4.1 Situation, paysage

La station météorologique Charquini est située à une altitude de 4795 m en tête du bassin versant du Rio Zongo, dont les eaux, par les Rios Coroico, puis Béni, participent aux écoulements du bassin du Fleuve Amazone.

Son emplacement est figuré précisément sur la Figure 9 qui est extraite de la carte topographique au 1/50 000ème de Bolivie (IGM, Instituto Geografico Militar, 1993).

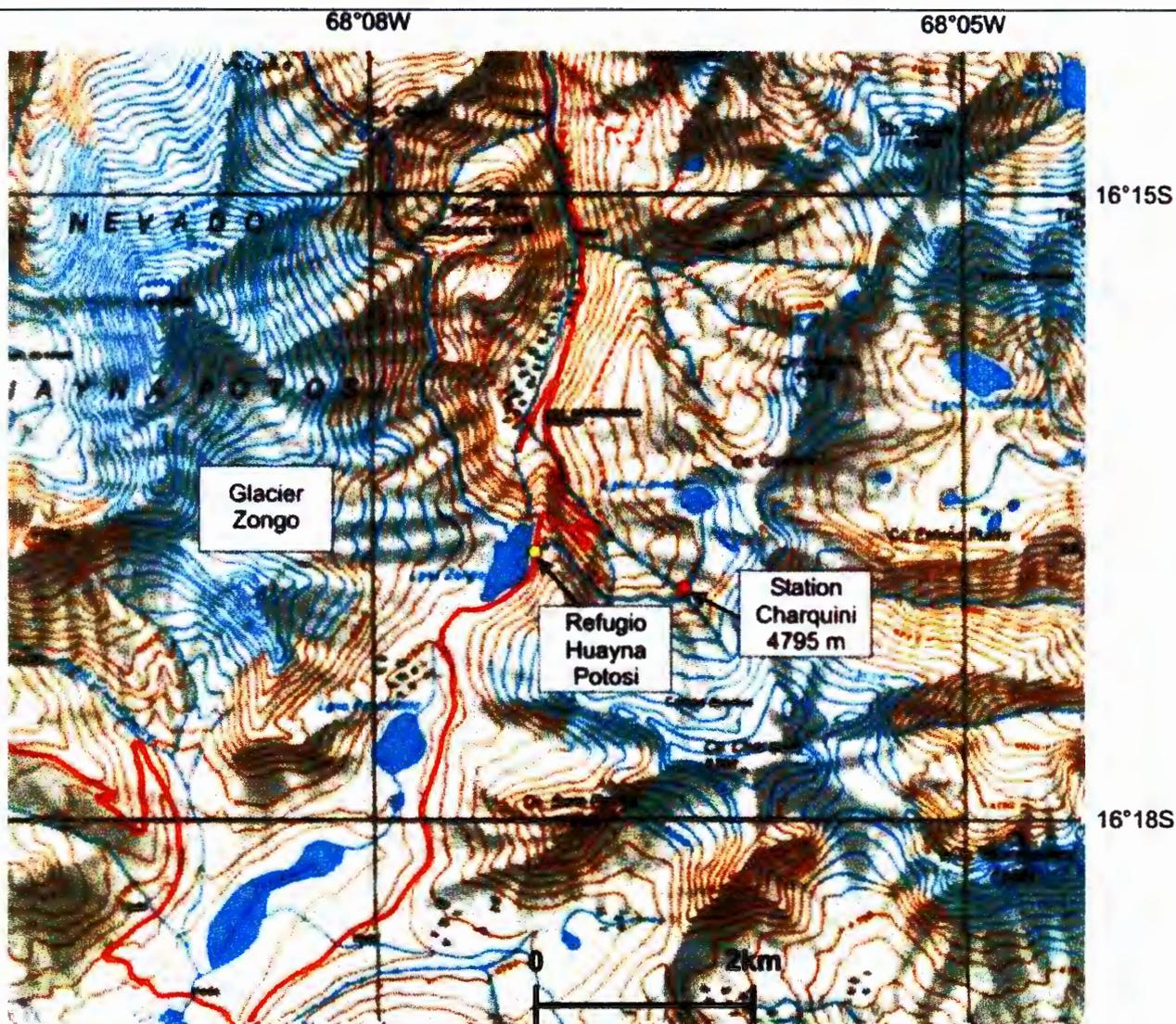


Figure 9. Site de la station Charquini en tête du bassin du Rio Zongo.

Le paysage qui caractérise l'environnement de la station météorologique est marqué par les principaux traits suivants :

- a) Une "tête" de vallée, d'orientation sud-est nord-ouest, dominée au sud-sud-est à environ 1,5 km de la station par le Cerro Charquini (5392 m), couvert sur toutes ses faces de glaciers de tailles réduites.

- b) La vallée profonde du Rio Zongo, qui s'allonge dans une direction sud-nord sur dix kilomètres environ. Cette vallée est fermée par un col (à 250 mètres au sud d'un réservoir artificiel, la Laguna Zongo) séparant le bassin de l'Amazonie au nord, du bassin de l'Altiplano Bolivien au sud (lac Titicaca et lac Popoo, communiquant par le Rio Desaguadero).
- c) Le sommet du Nevado Huayna Potosi (6088 m) à cinq kilomètres et demi au nord-ouest qui domine toute cette partie de la chaîne de la Cordillère Royale de Bolivie. Ce sommet est entouré de glaciers sur toutes ses faces et, sur le versant sud-est, le Glacier Zongo (3 km<sup>2</sup>) fait l'objet d'études glaciologiques et hydrologiques depuis 1991 (Francou, *et al.*, 1995, Ribstein, *et al.*, 1995a).

Dans le détail (photo, Figure 10), la station météorologique est implantée parmi des éboulis granitiques à proximité du principal torrent glaciaire émissaire du Glacier Charquini (face nord-ouest), à une altitude d'environ 150 mètres en dessous de la langue de ce dernier. Un canal artificiel, dit canal Prado, passe environ 4 m au dessus (en dénivelée) de la station. Ce canal qui a été construit vers 1949, capte les eaux des torrents et ruisseaux des versants montagneux à l'est de la Laguna Zongo qu'il alimente. La Laguna Zongo est un lac artificiel faisant partie du vaste système hydroélectrique installé dans la vallée du Rio Zongo (10 usines en cascade entre 4 500 et 1 000 m d'altitude). Accessoirement, le canal sert aussi de voie d'accès à la station météorologique selon un cheminement pédestre de 2 km, vertigineux mais pratiquement horizontal.



Figure 10 : photo de détail du site d'installation de la station Charquini.

Deux relevés de coordonnées géographiques ont été effectués au GPS<sup>4</sup> les 23/10/2001 et 09/04/2002 ; ils ont donné des valeurs cohérentes entre elles (différence maximale de 0,3 seconde en latitude et de 10 mètres en altitude) :

16° 17' 11,3" Sud et 068° 06' 32,0" Ouest, altitude 4795 m

## 4.2 Description

La station météorologique est implantée sur une terrasse naturelle, d'une pente orientée nord-ouest d'environ 5%, inférieure à celle du versant général (de l'ordre de 20 à 25%). Les appareils sont groupés à l'intérieur d'une enceinte grillagée de forme carrée d'environ six mètres de côté ; dans cette enceinte, le sol a été laissé autant que possible en l'état, à l'exception de quelques cailloux et blocs de granit qui ont été déplacés.

Dans l'enceinte de la station on trouve les centrales d'acquisition et différents capteurs repérés sur la photo – Figure 11 (20/10/2001) et présentés ci dessous dans l'ordre où les paramètres sont enregistrés dans les fichiers originaux collectés sur le terrain. Les adresses des sites Web correspondant aux différents appareils sont données dans la bibliographie.



Figure 11 : capteurs et centrales d'acquisition de la station Charquini.

### 4.2.1 Centrales d'acquisition des données

Deux centrales d'acquisition de marque Campbell (fabrication britannique), modèles Cr10 et Cr23x (Campbell Scientific INC, 1993 & 2000) permettent l'enregistrement des paramètres. L'énergie électrique est fournie par deux

<sup>4</sup> Le GPS utilisé est rattaché au système géodésique WGS 84 (commun en Amérique du Sud). Les coordonnées (différentes) lues sur la carte au 1/50 000ème (projection UTM – zone 19, système "Provisionnal 56" pour la Bolivie) sont les suivantes : 16° 16' 56" Sud et 068° 06' 25" Ouest, altitude 4800 m environ, (soit des différences d'environ 460 m en latitude et 210 m en longitude).

batteries sèches rechargées par des panneaux solaires, visibles sur la photo en dessous de la centrale Cr23x ; aucune défection de l'alimentation électrique n'a été enregistrée.

Le tableau 2 ci-dessous fournit, pour deux périodes d'exploitation distinctes imposées par des considérations opérationnelles, la liste des capteurs reliés à chacune des deux centrales d'acquisition.

**Tableau 2, répartition des capteurs sur les centrales d'acquisition**

	Centrale Cr23x	Centrale Cr10
Du 20/10/2001 au 18/04/2002	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pluviographe par pesée Géonor,</li> <li>• Pluviographe à augets Hobo,</li> <li>• Capteur de hauteur de neige (ultra – sons),</li> <li>• Fluxmètres F383 &amp; F 384,</li> <li>• Thermocouple pour T° de l'air non ventilée,</li> <li>• Sondes de températures du sol.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Girouette et anémomètre,</li> <li>• Hygromètre et thermomètre (ventilé),</li> <li>• Radiomètres de courtes et grandes longueurs d'ondes (SW &amp; LW). Appareil unique Kipp &amp; Zonen.</li> </ul>
A partir du 18/04/2002	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pluviographe par pesée Géonor,</li> <li>• Pluviographe à augets Hobo,</li> <li>• Capteur de hauteur de neige (ultra – sons),</li> <li>• Fluxmètres F383 &amp; F 384,</li> <li>• Thermocouple pour T° de l'air non ventilée,</li> <li>• Sondes de températures du sol,</li> </ul> <hr style="width: 20%; margin: 10px auto;"/> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Girouette et anémomètre,</li> <li>• Hygromètre et thermomètre (ventilé),</li> <li>• Pyranomètre pour mesure des rayonnements de courtes longueurs d'ondes (SW), marque Schenk,</li> <li>• Pyrradiomètre pour mesure du rayonnement total (Rtot), marque Schenk.</li> </ul>	

Sauf exception donnée dans les descriptions ci-dessous, une scrutation de la valeur des paramètres est effectuée chaque 10 secondes et l'enregistrement de la valeur moyenne intervient chaque demi heure ronde, étant entendu que la base temps est l'heure locale, soit TU – 4 heures. A intervalles définis selon les besoins, de l'ordre de quelques jours à trois semaines, les enregistrements aux centrales d'acquisition sont déchargés sur deux modules distincts de stockage de données (storage module, SM), puis recopiés sur ordinateurs.

#### 4.2.2 Pluviographe par pesée

Le pluviographe par pesée est de marque Géonor (fabrication norvégienne), type T-200B (Géonor AS, 1995, Figure 12) : la précipitation est collectée par un cylindre creux d'alliage d'aluminium peint en noir mat, de 200 cm<sup>2</sup> de section 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 d'une fréquence électrique proportionnelle au poids mesuré. Pour éviter la prise en glace et éventuellement des détériorations, le seau de plastique est rempli de 1,7 litre d'alcools (éthylène glycol et méthanol) permettant de descendre jusqu'à - 7°C, température largement suffisante ici. Pour limiter l'évaporation, 4 centilitres d'huile sont ajoutés. Pour pallier aux vibrations intempestives

dues au vent, le dispositif de mesure, contenu dans un capot de forme aérodynamique (75 cm de hauteur totale) est fixé sur un pied massif, lui même ancré par quatre forts boulons dans un socle de béton, le total ayant une masse d'environ 50 kg. Une structure circulaire (Cf. Figure 11) 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 précision de l'appareil est de  $1/10^{\text{ème}}$  de millimètre.

Deux valeurs sont enregistrées chaque demi heure ronde : d'une part, la mesure instantanée du cumul et, d'autre part, le cumul moyenné sur la demi heure. Pour différentes raisons, de précision en particulier, ce sont les cumuls moyennés qui sont pris en compte dans la base de données, malgré une légère sous-estimation d'intensité sur la première demi heure de l'événement, rattrapée les demi heures suivantes.

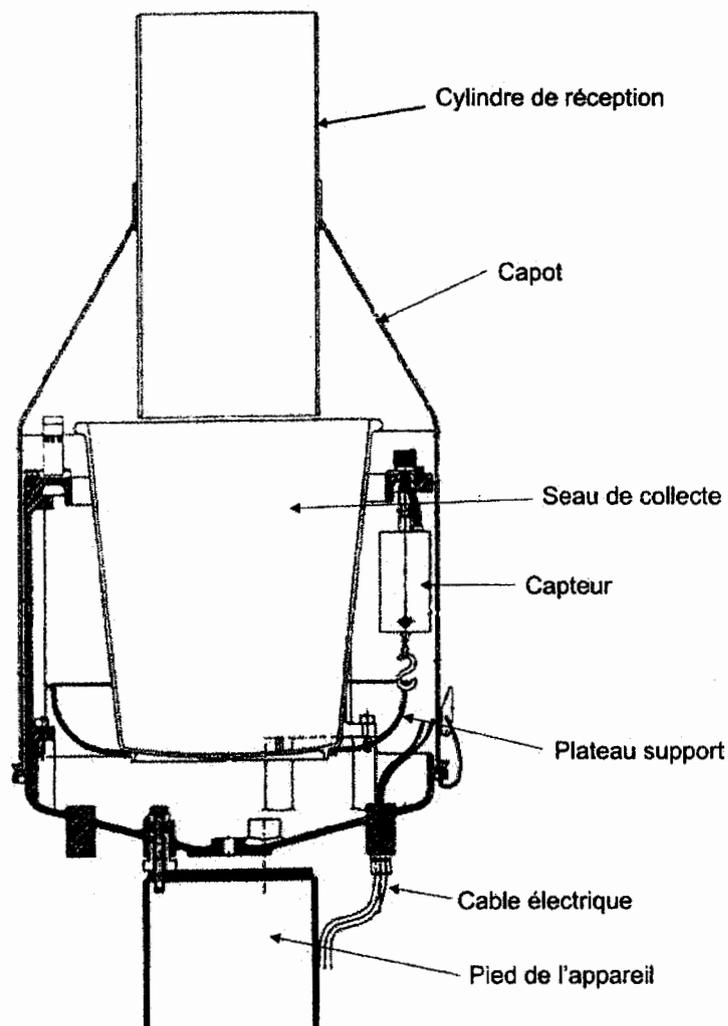


Figure 12 : schéma de fonctionnement du pluviographe Geonor.

Un pluviomètre manuel relevé quotidiennement pendant la campagne de mesures intensives de février 2002 (Cf. § 6.2) a permis de valider les observations effectuées au Géonor.

#### 4.2.3 Pluviographe à augets basculeurs

Le pluviographe à augets basculeurs est de marque Hobo (fabrication américaine), Figures 11 et 13. La bague de réception à 1,60 mètre du sol a une surface de 200 cm<sup>2</sup>, l'auget bascule pour 0,25 mm d'eau. Le nombre de

basculements traduits en hauteur d'eau est enregistré toutes les 10 minutes ; sur le fichier original on effectue un regroupement de ces valeurs chaque demi heure ronde.

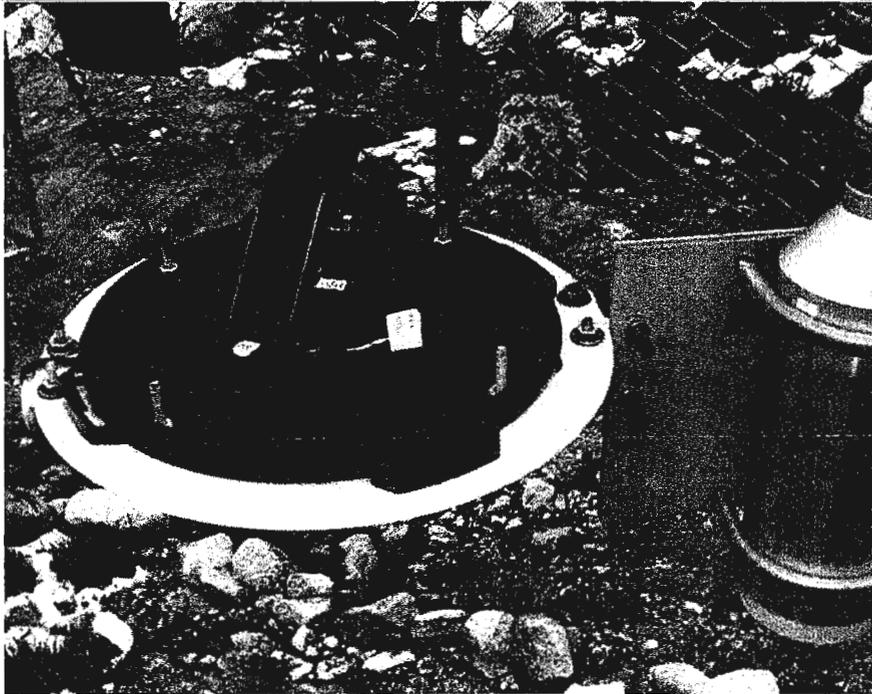


Figure 13 : pluviographe à augets Hobo et capteur de hauteur de neige (à droite)

Les mesures de cet appareil, dont la précision et la fiabilité sont moindres que celles du pluviographe Géonor, n'ont pas été retenues pour la base de données de *forçage*. Elles peuvent toutefois être utilisées pour la discrimination entre les événements de pluie et de neige (L'Hôte *et al.*, 2002).

#### 4.2.4 Capteur de hauteur de neige

La sonde à ultrasons, pour mesure de la hauteur de neige (Figures 11 et 13) est de marque Campbell (fabrication britannique), modèle UDG01, comparable à l'actuel modèle SR50. Le capteur émet des ondes ultrasoniques réfléchies par le sol ou la surface de la neige, puis mesure le temps aller – retour de ces ondes. La précision de la mesure, lue au millimètre, est donnée par le constructeur à  $\pm 1$  centimètre, ou  $\pm 0,4\%$  de la distance à la cible.

L'angle formé par le faisceau est d'environ  $20^\circ$ , soit une surface prospectée de forme circulaire (diamètre 40 cm) pour le capteur situé à 1,15 mètre au dessus du sol. Lorsque le sol n'est pas suffisamment perpendiculaire au faisceau d'ultrasons, la mesure n'est pas correcte.

#### 4.2.5 Fluxmètres

Il a été installé deux fluxmètres identiques, codés F 383 et F 384, de marque Hukseflux (fabrication hollandaise), modèle HFP01 (pour Heat Flux Plate). Des thermocouples sont noyés dans des petits disques plats de bakélite, de 80 mm de diamètre et 5 mm d'épaisseur. Ils ont été implantés parallèlement à la surface du sol sous environ 2 à 3 centimètres de terre. Les flux fournis en  $Wm^{-2}$  sont positifs pour un gain d'énergie par le sol et vice versa. La sensibilité mesurée proposée par le constructeur est de l'ordre de  $60 \mu V/W.m^2$ . La disposition des deux fluxmètres, depuis le 15/01/2002, est représentée sur la Figure 14.

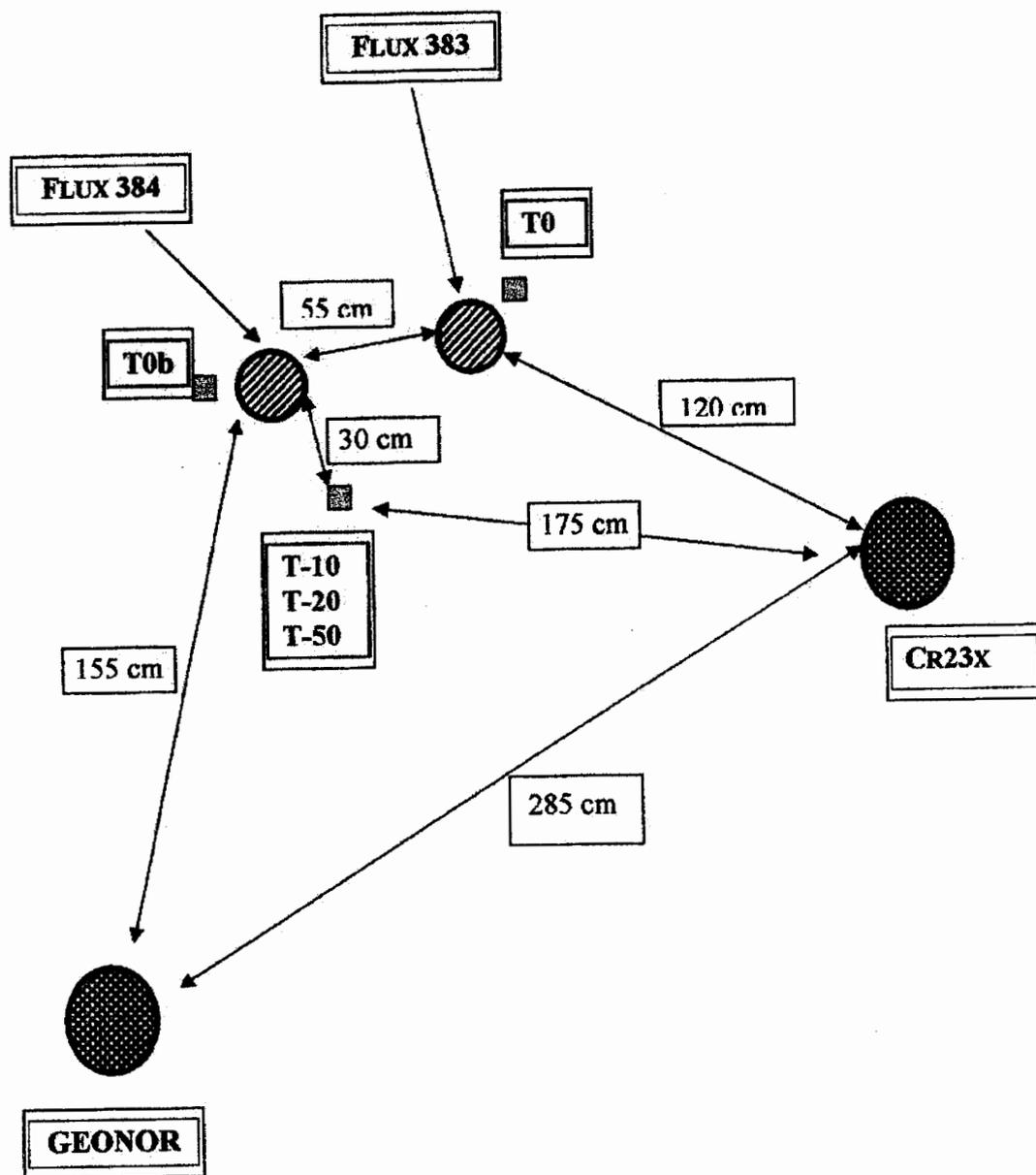


Figure 14 : disposition des fluxmètres 383 et 384 et des thermocouples (carrés gris) après le 15 janvier 2002

#### 4.2.6 Température de l'air non ventilée

Afin de disposer d'une mesure de température de l'air pour correction éventuelle de la vitesse de propagation du son (sonde à neige), un petit abri en matière plastique a été implanté sur le mat de la centrale Cr23x, il contient un thermocouple de fabrication artisanale, testé par notre équipe. Le thermocouple est construit à partir d'un câble de type T en cuivre – constantan (référence Campbell A3537), le point de soudure est collé sur une plaque de tôle galvanisée de 12,5x12,5 mm, épaisseur 10/10, ceci pour assurer une meilleure inertie thermique et éviter une conduction de la chaleur à travers le fil. La plaque fixée sur différentes gaines, peut être soit installée dans un abri, soit enfoncée dans différents milieux à mesurer : sols, neige, glace.

#### 4.2.7 Sondes de températures du sol

Un ensemble de cinq thermocouples en cuivre - constantan (fabrication artisanale et tests par notre équipe) permettent de suivre les variations de température dans le sol. Il s'agit (Cf. Figures 11 et 14) des sondes de température T0 située à proximité et à même profondeur que le fluxmètre F 383, T0b à proximité de F 384, et des sondes (T-10) à 10 centimètres sous la surface du sol, (T-20) à 20 centimètres et (T-50) à 43 centimètres réels de la surface.

Les trois dernières sondes ((T-10), (T-20) et (T-50)), introduites directement et en force dans le sol d'une petite tranchée, n'ont jamais été déplacées. A l'inverse, T0 et T0b ont été déplacés en même temps que les fluxmètres auxquels ils se rapportent.

#### 4.2.8 Vitesse et direction du vent

La girouette et l'anémomètre de type hélice (Figure 11) sont réunis sur un appareil de modèle Young 05103 distribué par la Société Campbell (fabrication britannique). Les précisions annoncées par le distributeur sont de  $\pm 3^\circ$  pour la direction du vent et  $\pm 0,3$  m/s pour la vitesse. L'appareil est implanté en haut du mat supportant la centrale d'acquisition Cr23x, à 2,05 mètres au dessus du sol.

La vitesse du vent est la moyenne sur 30 minutes des observations faites toutes les 10 secondes, alors que la direction enregistrée est la valeur instantanée observée chaque demi heure ronde.

#### 4.2.9 Humidité relative et température de l'air ventilée

Les mesures d'humidité relative et de température de l'air ventilée (Figure 11) sont effectuées avec une sonde de marque Vaisala HMP45C (fabrication finlandaise). A une température de 20°C, la précision annoncée par le constructeur est de  $\pm 1\%$  pour l'humidité relative et de  $\pm 0,2^\circ\text{C}$  pour la température.

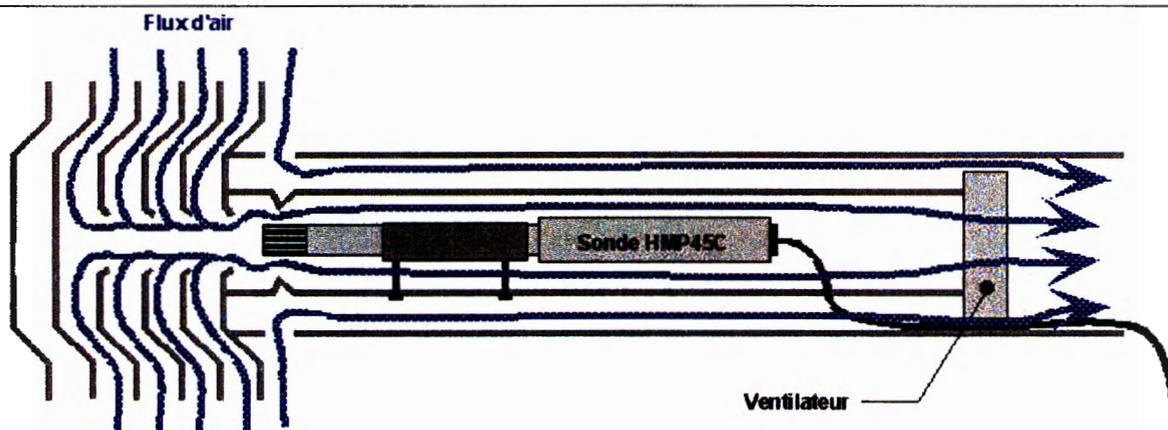


Figure 15 : principe de ventilation de la sonde hygrométrique Vaisala HMP 45C

La sonde qui se présente sous la forme d'un cylindre d'environ 35 centimètres de hauteur et 3 de diamètre, est installée à l'intérieur d'un abri ventilé réalisé sur place. Cet abri (Figure 15), d'une longueur totale de 60 centimètres et d'un diamètre extérieur de 12 cm, est constitué de deux tubes cylindriques concentriques en PVC de couleur blanche. Le tube intérieur (diamètre 8 cm), où est placée la sonde, est ventilé par un dispositif électrique. Cet abri était implanté horizontalement, à 1,00 mètre au dessus du sol ; le 18 avril 2002, il a été fixé verticalement sur le support de la centrale Cr23x, à 1,50 mètre au dessus du sol.

#### 4.2.10 Radiations de courtes et grandes longueurs d'ondes

Les radiations de courtes et grandes longueurs d'ondes (SW et LW) sont mesurées avec un radiomètre de marque Kipp & Zonen, modèle CNR1 (fabrication hollandaise), comprenant un double pyranomètre (SW) et un double pyrgeomètre (LW) – Figures 11 et 16. La plage spectrale du pyranomètre (modèle CM3) est fournie par le constructeur entre 0,3 et 2,8  $\mu\text{m}$ , celle du pyrgeomètre (CG3) entre 5 et 50  $\mu\text{m}$ . Pour les deux capteurs, la précision pouvant être attendue sur les totaux journaliers est annoncée à  $\pm 10\%$  par le constructeur. L'appareil est installé sur un bras métallique de plus d'un mètre rigidifié par un hauban et fixé au nord-ouest du pluviographe Géonor, sur un montant du pare-vent de celui-ci. L'axe de l'appareil se trouve à 90 centimètres au dessus du sol.

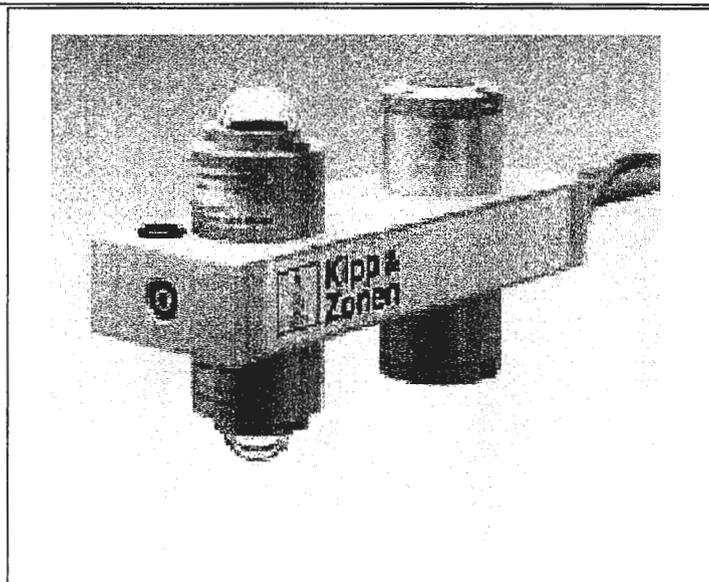


Figure 16 : Radiomètre Kipp & Zonen - photo extraite du document : CNR1, Net Radiometer. Société KIPP & ZONEN, Delft, The Netherlands. (<http://www.kippzonen.com/product/cnr1.html> )

Pour des raisons opérationnelles, le radiomètre Kipp & Zonen a dû être retiré le 18 avril 2002 (14 heures). Il a été remplacé par deux capteurs distincts de marque Schenk (fabrication autrichienne) fournissant, d'une part, des mesures de courtes longueurs d'ondes (SW) incidentes et réfléchies pour le pyranomètre, et d'autre part, des mesures de rayonnements totaux (R.tot) incidentes et réfléchis pour le pyrromètre. La Figure 17 représente le pyranomètre. Le pyrromètre a une présentation identique, mais avec des coupelles hémisphériques de matière plastique (diamètres de 8 cm), là où le pyranomètre présente des coupelles de verre. De plus on peut noter l'existence de deux capsules de silicagel qui permet de supprimer l'humidité à l'intérieur des appareils. La plage spectrale du pyranomètre est fournie par le constructeur entre 0,3 et 3  $\mu\text{m}$ , celle du pyrromètre entre 0,3 et 30  $\mu\text{m}$ . La résolution des deux appareils est annoncée de  $1 \text{ Wm}^{-2}$ . Ils ont été implantés à des positions sensiblement identiques à celle du radiomètre unique, avec des distances d'environ 40 cm entre les deux capteurs. Leur exploitation a apporté quelques problèmes qui seront analysés dans le rapport d'exploitation de ces données.

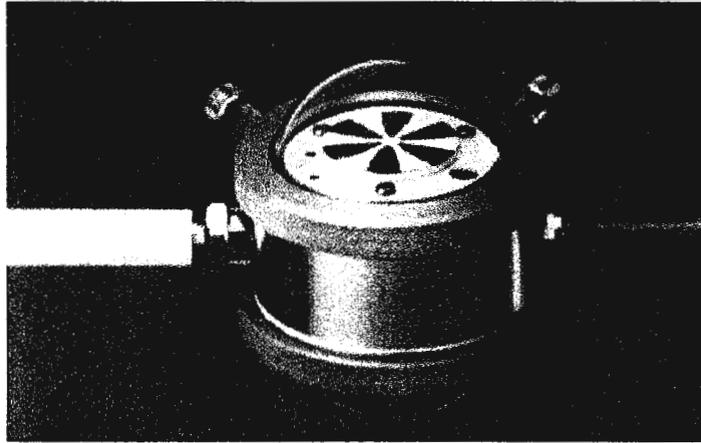


Figure 17 : pyranomètre Schenk - Photos extraite de : Schenk Dual Pyranometer & Pyrradiometer. Société Philipp SCHENK, Wien, Austria. (<http://www.schenk.co.at/schenk/> )

---

## **5 Observations et contrôles**

### **5.1 Mesures et vérifications de routine**

#### **5.1.1 Visites de la station**

Des visites de vérification du bon fonctionnement des différents appareils avec travaux éventuels sont effectuées par les agents de l'IRD en poste à La Paz. En routine, la fréquence des visites est d'environ trois semaines ; mais deux visites par semaine ont été faites pendant le séjour à La Paz d'un agent de l'IRD spécialement affecté à cette étude entre le 5 janvier et le 21 mai 2002. Les visites ont été quotidiennes lors des campagnes de mesures intensives (1<sup>er</sup> au 13 février et 3 au 5 mars) décrites ci-dessous au paragraphe 5.2.

Lors de ces visites on effectue, entre autres, diverses estimations météorologiques (nébulosité, vitesse et direction du vent, hauteur de neige à la station, éventuellement densité de la neige) ainsi que des descriptions de terrain (homogénéité et répartition du couvert neigeux, estimation de l'altitude de la limite de neige). Depuis le début des visites, un compte rendu type est utilisé et saisi au retour au bureau ; l'annexe 1 donne à titre d'exemple le compte-rendu<sup>5</sup> de la visite n°17 effectuée le 22/01/2002. Sur celui-ci on note : a) différentes observations d'ordre météorologique ou autre faites à la station ou lors du déplacement, b) le relevé systématique des mesures instantanées aux appareils lues sur les centrales d'acquisition de données, c) les travaux effectués à la station et des observations sur le fonctionnement des appareils et enfin d) les travaux à prévoir lors de la prochaine visite.

#### **5.1.2 Série de trois photos quotidiennes**

Un observateur, agent de la COBEE (Compagnie Bolivienne d'Electricité et d'Energie)<sup>6</sup>, effectue chaque jour, de préférence le matin, une série de trois clichés de la station bien repérés sur le terrain avec un appareil photographique numérique. A titre d'exemple, la Figure 10 est la photo dite « générale » prise le 21 février 2002 ; on peut y noter le point de repère du cliché constitué par une marque de couleur jaune sur la partie inférieure droite de la vue. Les deux autres photos, plus rapprochées sont dites « aval » (pour vers l'aval) et « amont ».

Parmi divers usages possibles, ces clichés permettent de vérifier le couvert neigeux à la station (cliché « aval »), d'avoir une indication sur la nébulosité (les trois clichés) et de confirmer certains paramètres enregistrés à la station météorologique (rayonnement, albédo, hauteur de neige, etc.).

### **5.2 Campagnes de mesures intensives**

Deux campagnes de mesures intensives ont été réalisées en 2002 dans le but d'effectuer diverses observations météorologiques et nivologiques précises et répétées. Ces dernières mesures sont nécessaires pour définir certains paramètres des modèles hydrologiques ou climatologiques. De plus, des contrôles critiques et des pré-interprétations des données enregistrées à la station météorologique pouvaient être effectuées sur place à l'aide

---

<sup>5</sup> Ces comptes-rendus sont accessibles sur le web à l'adresse :

[http://www.mpl.ird.fr/hydrologie/pch/documents/PNRH01-37/rapports\\_visites.html](http://www.mpl.ird.fr/hydrologie/pch/documents/PNRH01-37/rapports_visites.html).

<sup>6</sup> qui habite au lieu dit Plataforma, sur la route carrossable à deux kilomètres en aval de la station en suivant le Canal Prado.

d'un micro-ordinateur portable. La possibilité de résider sur place dans un refuge de haute montagne, le *Refugio Huayna Potosi*, situé à deux kilomètres en aval de la station météorologique en suivant le Canal Prado, a permis le séjour des missions scientifiques à proximité immédiate des installations.

La première campagne s'est déroulée du 1<sup>er</sup> au 13 février 2002 avec Pierre Etchevers et Yves Lejeune de Météo France, Yann L'Hôte de l'IRD, ainsi que Rolando Fuertes, Alvaro Soruco et Patrick Wagnon de l'IRD sur une période plus restreinte.

La deuxième campagne, du 3 au 5 mars 2002, comprenait Joël Noilhan de Météo France, Pierre Chevallier et Yann L'Hôte de l'IRD.

La présence simultanée sur le terrain de personnels d'expériences et d'horizons différents a stimulé les échanges de vue, principalement pour ce qui concerne la disposition relative des appareils, leurs exploitations et le suivi de l'instrumentation.

### **5.2.1 Visites quotidiennes à la station, suivi de l'instrumentation**

Pratiquement chaque jour, la station météorologique Charquini a reçu la visite des participants ; chacune d'elles a été consignée le jour même dans un compte-rendu du modèle déjà établi pour les visites de routine (annexe 1).

Parmi les observations, vérifications, essais de terrain et modifications consécutives à ces visites, on peut citer :

- l'identification du dysfonctionnement de certains appareils, Cf. 5.3 ;
- le contrôle des mesures de précipitations, § 6.2 ;
- la vérification et la correction de l'horizontalité (verticalité) des différents appareils ;
- la vérification de la programmation et le réglage exact du synchronisme des deux centrales d'acquisition de données Cr10 et Cr23x (moins d'une minute de différence avant le réglage).
- Enfin, des observations manuelles de certains paramètres (température, direction du vent) ont été effectuées pour vérification de la cohérence des mesures automatiques.

### **5.2.2 Carnet d'observations météorologiques horaires**

Pendant toute la durée de la première campagne intensive (1<sup>er</sup> au 13 février), un carnet d'observations météorologiques a été tenu, de jour, aux heures locales exactes (TU – 4 heures), soit au refuge, soit à la station météorologique Charquini. Pour consigner ces mesures, un carnet d'observation réduit (modèle OMM) a été utilisé. Il s'agissait de documenter les observations suivantes : vitesse et direction du vent, visibilité (brouillard), type de la précipitation, temps significatif, couverture nuageuse et enfin température de l'air mesurée avec un thermomètre portatif.

Le carnet manuscrit est utilisé principalement pour valider différents calculs ou estimations documentant les fichiers de forçage et de validation, tels que la nébulosité ou la phase de précipitation.

### **5.2.3 Planches à neige et suivi des événements neigeux**

Pour effectuer différentes mesures et descriptions de la neige, il a été installé quatre planches à neige du type de celles utilisées dans le réseau alpin de mesures nivologiques. Il s'agit de planches posées horizontalement sur le sol, fabriquées sur place en contre plaqué de qualité "marine" (1,5 cm d'épaisseur), de forme carrée de 40 cm de côté, peintes en blanc mat. Une tige métallique peinte (50 cm) en leur centre permet de les retrouver sous le manteau neigeux.

En plus d'une planche installée à la station météorologique, et afin de spatialiser les mesures pour d'autres expositions, trois planches ont été disposées pour représenter le bassin proche de la station. L'une d'entre elles est située en amont à 60 mètres de la station, l'autre sur le versant est (distance 170 m) et la dernière sur le versant ouest du bassin à 260 m de distance. Leurs noms et leurs situations sont fournis en annexe 2 et sur la Figure 18.

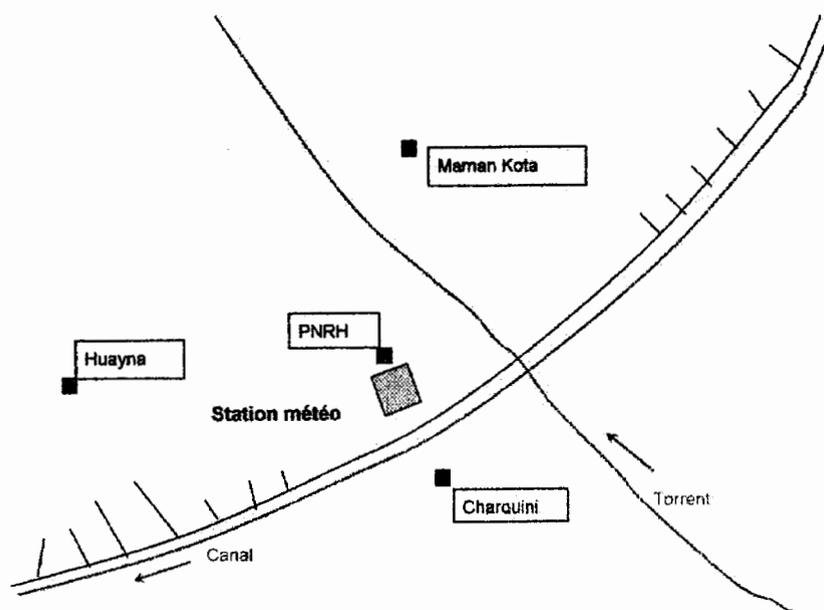


Figure 18 : plan de localisation des planches à neige

Lors des périodes d'enneigement (partiel ou total), des carottages verticaux effectués sur les planches ont permis d'évaluer sur chacun des sites les épaisseurs et les équivalents en eau des couverts neigeux (neige fraîche + neige totale). La fraction des surfaces enneigées et la nature du sol éventuellement déneigé, végétation rase, éboulis, végétation haute, ont aussi été consignés. Quand plusieurs couches constituaient le manteau neigeux, la stratigraphie (type de grains) de ces couches, l'humidité, les températures ont été mesurées ou quantifiées. L'évolution du couvert nival de chacun des sites a aussi été suivie. L'annexe 3 est la reproduction de la feuille des relevés effectués le 4 février 2002. L'annexe 4 fournit les principaux résultats de ces mesures.

#### 5.2.4 Relevés des masques solaires

En prévision de l'utilisation d'un modèle théorique d'évaluation de la radiation solaire atmosphérique, les masques vus du pyranomètre, occultant la voûte céleste ont été relevés (relief, obstacles de nature diverse). De même les masques pour chacune des quatre planches à neige ont été relevés. Ces masques ont été mesurés à l'aide d'un éclimètre de terrain et d'une boussole, méthode beaucoup plus souple que l'utilisation d'un théodolite.

La Figure 19 représente les différents masques relevés, tandis que l'annexe 5 reproduit les mesures effectuées sur le terrain.

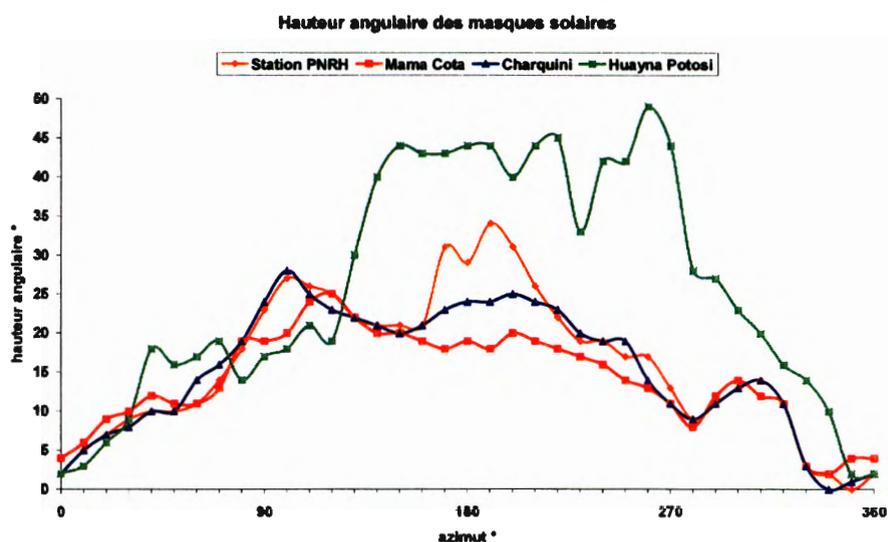


Figure 19 : relevé des masques solaires

### 5.2.5 Descriptions des sols et prélèvements

Dans le but de disposer de références sur la granulométrie des sols du bassin, en particulier pour la mise en œuvre de modèles de simulation de bilan de surface du type ISBA, deux petites fosses pédologiques ont été ouvertes et décrites lors de la deuxième campagne de mesures intensives, les 3 et 5 mars 2002. Des prélèvements de sol ont été effectués à différents horizons caractéristiques, soit en vrac dans des sachets plastique, soit en place par enfouissement de boîtes de conserve évidées (cylindres de 6 cm de rayon et 4 cm de hauteur).

La première fosse d'une profondeur maximale de 35 cm a été implantée à l'intérieur même de l'enceinte de la station météorologique, une deuxième fosse, creusée à proximité de la planche à neige « Huayna Potosi » a atteint 50 cm de profondeur.

L'annexe 6 donne les descriptions faites sur le terrain et les résultats des analyses de granulométrie et de matière organique correspondant à la fosse située à l'intérieur de l'enclos de la station météorologique (fosse PNRH).

L'annexe 7 fournit les mêmes éléments pour la fosse « Huayna Potosi ».

De plus, il a été effectué trois prélèvements en sachets de sol dans un petit *bofedal* (tourbière) situé à une distance d'environ 50 mètres en aval de la fosse « Huayna Potosi », le *bofedal* étant un type de sol courant sur le bassin.

Les résultats d'analyses de la matière organique des *bofedals* sont donnés dans le tableau 3 ci-dessous :

**Tableau 3, résultats d'analyse de matière organique des sols de *bofedal***

	prélèvement N° 10	prélèvement N° 11	prélèvement N° 12
Matière organique, mesure par calcination, en %	27,6	56,6	76,0

Toutes les analyses ont été effectuées par le Laboratoire d'analyses du CIRAD – AMIS / Agronomie de Montpellier.

### **5.3 Principaux dysfonctionnements de l'appareillage**

Le fonctionnement de l'instrumentation au cours de la période octobre 2001 à avril 2002 a été globalement satisfaisant. Les très nombreuses visites du site expérimental ont permis de contrôler le bon fonctionnement électrique des capteurs et des centrales de mesures. Si certains dysfonctionnements ont pu être solutionnés en cours de campagne, d'autres n'ont alors pas été identifiés ou n'ont pu être évités. Méthodes graphiques et recherches des valeurs extrêmes (mini, maxi) ont contribué *a posteriori* à repérer rapidement les valeurs manquantes ou celles qui présentaient des écarts anormaux aux quantités énergétiques que l'on pouvait raisonnablement attendre sur un tel site. Pour exemples, ont été repérées après la campagne, les mesures douteuses du pyrgéomètre (rayonnements de grandes longueurs d'ondes) du 15 janvier au 23 mars 2002 et celles de la sonde de hauteur de neige à ultrasons sur toute la période de mesures.

#### **5.3.1 Pluviographe à augets basculeurs Hobo**

La fixation du pluviographe avait été réalisée sur un support insuffisamment rigide, ce qui entraînait des basculements intempestifs dus au vent, par conséquent l'appareil a été déplacé le 20 mars 2002 sur un support plus stable, avec une bague située à 1,60 mètre du sol. Depuis cette date l'appareil a donné toute satisfaction.

Ainsi, les observations antérieures à cette date sont considérées comme peu fiables.

#### **5.3.2 Capteur de hauteur de neige**

Sur différentes photos quotidiennes prises sur paysage enneigé, et lors de visites, nous avons constaté que le pluviographe Hobo, situé directement à côté du capteur de hauteur de neige, déversait son eau directement sous ce capteur en modifiant le couvert neigeux mesuré. C'est une des raisons qui nous a amenés à déplacer le pluviographe Hobo de plusieurs mètres le 20 mars 2002 ; depuis cette date les mesures de hauteur de neige sont plus satisfaisantes.

Pour améliorer la mesure et pallier aux divergences des ultrasons réfléchis par le sol en légère pente (5%), une petite terrasse horizontale de 50 centimètres de diamètre environ a été nivelée sous le capteur le 2 février 2002 (vers 15 heures).

Néanmoins, jusqu'au 20 mars 2002, la hauteur de neige n'a jamais été correctement mesurée.

#### **5.3.3 Fluxmètres**

Dès le début des observations (20/10/2001), nous avons constaté que les deux appareils fournissaient des valeurs assez différentes entre elles (jusqu'à 80 W/m<sup>2</sup> sur les maximums journaliers et 40 W/m<sup>2</sup> sur les minimums). Après avoir déterré les deux appareils le 7 janvier 2002 et supposé que ces différences pouvaient venir de la présence de racines proches de F 384, les deux fluxmètres ont été testés du 10/01/2002 (11h30) au 15/01/2002 (10 h10) entre deux plaques de plexiglas posées sur le sol. Les comparaisons ayant donné entière satisfaction, les deux appareils ont été replacés le 15/01/2002 (11h10) dans un sol tamisé et dans des situations définitives (Cf. Figure 14). Depuis cette date, ils donnent des valeurs comparables entre elles, à 10% près au maximum.

#### **5.3.4 Température de l'air non ventilée**

La mesure de la température de l'air non ventilée ne présente pas de lacune, avec toutefois des valeurs erronées du 20/03/2002 (10h30) au 03/04/2002 (11h00) lorsque le thermocouple s'est trouvé directement au contact de l'air, après une chute hors de l'abri.

### 5.3.5 Vitesse et direction du vent

Pour la vitesse, l'anémomètre fournit fréquemment des valeurs nulles lors des chutes de neige avec des températures proches de 0°C. L'appareil n'étant pas chauffé, il est alors probable que l'axe de l'hélice soit bloqué par la neige ou le gel sur des périodes pouvant atteindre dix heures.

Concernant la direction du vent, un certain nombre de valeurs négatives apparaissent principalement entre le 15 janvier 2002 (11h00) et le 09 février 2002 (15h30). Ces valeurs correspondent à une mauvaise connexion électrique de la girouette à la centrale de mesures. Après le rétablissement de cette connexion, le fonctionnement de la girouette est redevenu correct. De plus, on a noté que les directions maximales sont de 349°, au lieu de 359°, ceci correspondant à des contraintes de fabrication du potentiomètre de mesure. A ce défaut près (absence de relevés entre 350° et 359°), la bonne concordance entre valeurs fournies et directions réelles du vent ont été vérifiées à plusieurs reprises.

### 5.3.6 Rayonnements de grandes longueurs d'ondes (LW)

Au vu des deux figures 20 et 21, il apparaît clairement que dès le 15 janvier le capteur de rayonnement incident et le capteur de rayonnement émis par le sol enregistrent subitement des valeurs proches de 550 W/m<sup>2</sup>. De telles valeurs énergétiques, surtout pour la radiation atmosphérique, sont évidemment excessives. Jusqu'au 23 mars sont collectées des mesures encore plus anormales, puisque fluctuant de 320 W/m<sup>2</sup> à plus de 800 W/m<sup>2</sup>. Le dysfonctionnement des capteurs est étonnement bien corrélé au très fort taux d'humidité régnant durant cette période en comparaison de ceux mesurés avant le 15 janvier et après le 23 mars (Figure 20 et 21 et tableau 4 ci-dessous). A partir du 24 mars, et cela sans aucune intervention sur les capteurs, les radiations mesurées redeviennent beaucoup plus réalistes.

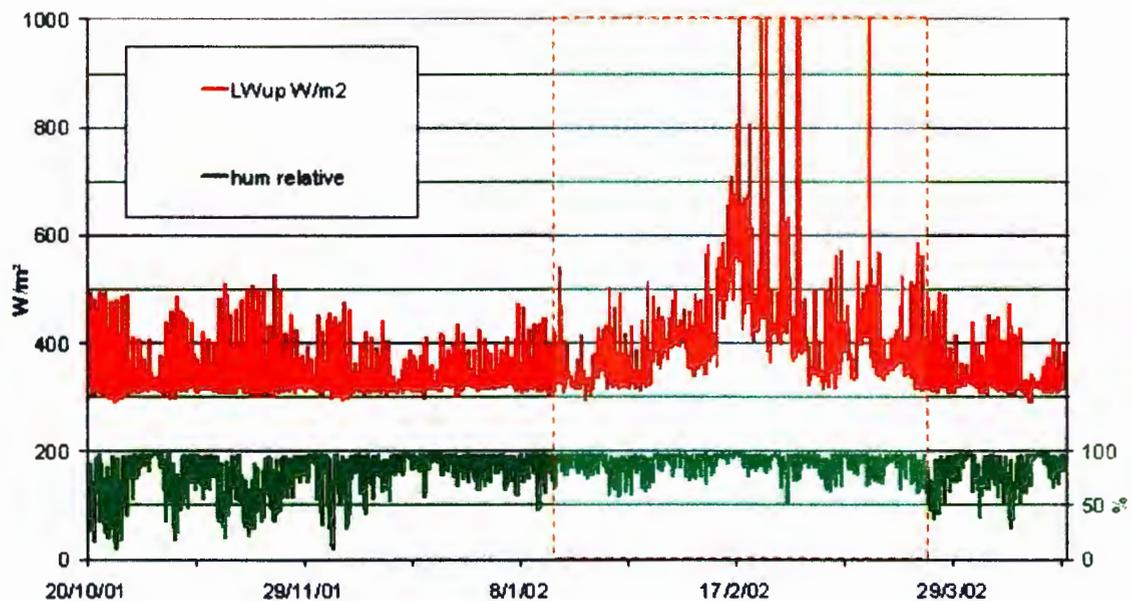


Figure 20 : radiations de grandes longueurs d'ondes LW émises par le sol et humidité de l'air U

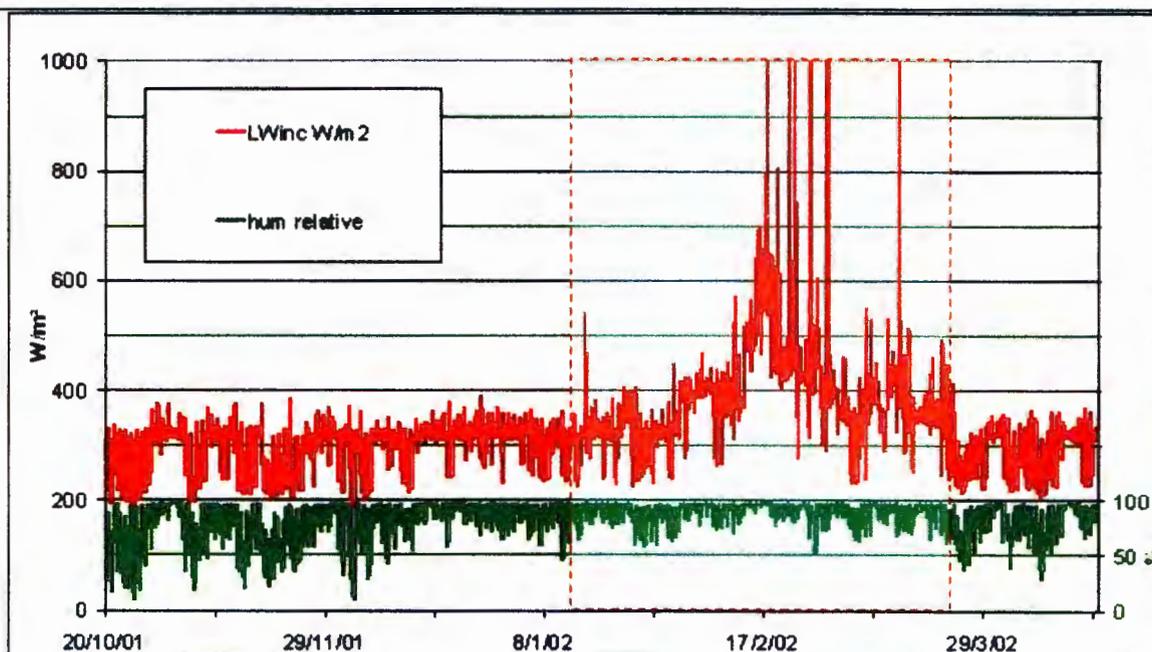


Figure 21 : radiations incidentes de grandes longueurs d'ondes LW↓ et humidité de l'air U

Tableau 4 : humidité relative, fréquences d'apparition de différentes valeurs, valeurs moyennes et minimales.

Période	Fréquence /seuil		Moyenne	Minimum
	U<65%	U>85%		
20/10/2001 13h30	18%	54%	80%	10%
15/01/2002 10h00				
15/01/2002 10h30	<1%	82%	91%	53%
23/03/2002 23h30				
24/03/2002 00h00	13%	50%	82%	29%
18/04/2002 14h00				

Du 15 janvier au 23 mars, l'hygrométrie moyenne supérieure d'environ 10% à celles de début et de fin de campagne est probablement à l'origine de la formation de gouttelettes d'eau condensée à l'intérieur des capteurs. Durant toute cette période les rares occurrences d'assèchement de la masse d'air (moins de 1% des cas où  $U < 65\%$ ) n'ont pas alors été suffisantes pour permettre l'évaporation des gouttelettes emprisonnées. C'est seulement l'épisode plus sec des 24 et 25 mars qui a occasionné ce processus. Durant cet épisode, des taux moyens d'humidité quotidienne de 68% et 61% et des valeurs demi-horaires minimales de 45% et 37% ont été enregistrées. A partir de cette date, les capteurs ont donc repris un fonctionnement correct.

Pour conforter cette analyse, et justifier au mieux la définition des périodes de bon fonctionnement du pyrgomètre, le rayonnement de grandes longueurs d'ondes émis par le sol a été comparé, sur les périodes antérieures au 15 janvier et postérieures au 23 mars, à la radiation théorique établie par la formulation de Stefan, formulation appliquée à la température de surface du sol  $T_0$  (sonde de température indépendante de la mesure de  $LW_{mes}^{\uparrow}$ ).

La radiation de grandes longueurs d'ondes émise par une surface de température  $T_0$  s'exprime par la formule de Stefan :

$$LW\uparrow_{\text{stefan}} = \varepsilon \sigma T_0^4$$

avec  $\varepsilon$  : émissivité (du sol) = 1 et  $\sigma$  : constante de Stefan =  $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$

- Du 20/10/2001 13h30 au 15/01/2002 à 10h00 :

$LW\uparrow_{\text{stefan}} = 345 \text{ W/m}^2$  et  $LW\uparrow_{\text{mes}} = 344 \text{ W/m}^2$  pour un EQM (écart quadratique moyen) de  $19 \text{ W/m}^2$

- Du 24/03/2002 à 00h00 au 18/04/2002 14h00 :

$LW\uparrow_{\text{stefan}} = 339 \text{ W/m}^2$  et  $LW\uparrow_{\text{mes}} = 339 \text{ W/m}^2$  pour un EQM de  $18 \text{ W/m}^2$ .

Sur ces deux périodes, le rayonnement du sol  $LW\uparrow_{\text{mes}}$  mesuré par le capteur est très comparable à celui obtenu par la formulation de Stefan. Cette étude comparative nous conduit donc à considérer qu'avant le 15 janvier et qu'après le 23 mars, le rayonnement du sol était correctement mesuré.

Sur ces mêmes périodes, nous étendrons cette hypothèse de bon fonctionnement de l'appareil à la mesure de la radiation atmosphérique ( $LW\downarrow$ ).

## 6 Critique et validation de quelques données brutes

### 6.1 Centrales de mesures

Des arrêts, correspondant à différentes interventions sur le terrain, n'ont pas excédé une heure. Les mesures non effectuées des paramètres ont été reconstituées par interpolations linéaires à partir de celles des pas de temps précédent et suivant.

### 6.2 Mesures des précipitations

- La validation des observations du pluviographe Géonor a été réalisée par lecture d'un pluviomètre manuel (type Association, cône de réception retiré pour collecter la neige) implanté dans l'enceinte de la station, à 2,30 mètres au nord-ouest (230°) du Géonor avec la bague à une hauteur de 1,30 m du sol. Huit mesures comparatives quotidiennes ont été faites pendant les campagnes intensives, ainsi que sept observations<sup>7</sup> effectuées une à deux fois par semaine jusqu'à la suppression du pluviomètre manuel le 20 mars 2002.
- Dans le fichier de forçage, les lames d'eau de précipitations mesurées par le pluviographe à augets basculeurs Hobo n'ont pas été retenues. Ceci en raison :
  - des dysfonctionnements évoqués précédemment (§ 5.3.1) ;
  - de notre grande confiance dans le pluviographe Géonor, recommandé par l'OMM (Organisation Météorologique Mondiale), pour la mesure des précipitations solides (Sevruc & Lejeune, 2002). Un pluviographe Géonor est utilisé par le Centre d'Etudes de la Neige au laboratoire du Col de Porte (Lejeune *et al.*, 1995, 2000 et 2001). Parmi les différents appareils testés sur le site, il est celui qui collecte le plus justement les lames d'eau des précipitations, quels que soient leurs phases et les types de temps associés (venté ou non...).

### 6.3 Fluxmètres

Il a été identifié que le rapport énergétique entre le flux de sol et le rayonnement net était trois fois plus fort que celui communément reconnu. Ceci provenait d'une erreur de programmation de la centrale de mesures. Cette erreur a été corrigée à posteriori sans perte d'information.

En raison des déplacements des fluxmètres décrits précédemment (§ 5.3.3), les mesures de flux retenues dans le fichier de validation sont les suivantes :

- avant le 15 janvier, celles du seul fluxmètre 383 ;

---

<sup>7</sup> Les huit relevés quotidiens ont montré des différences maximales de 6% sur les totaux supérieurs à 6,0 mm. A une exception près, le pluviographe Géonor donne des valeurs légèrement supérieures à celles du pluviomètre manuel, la différence correspondant à l'évaporation non mesurée dans ce dernier. Par ailleurs, les sept observations effectuées une à deux fois par semaine ont donné des totaux supérieurs à 20 mm et montré des différences maximales de 7% au bénéfice du Géonor, correspondant là aussi, à l'évaporation dans le pluviomètre manuel.

- après le 15 janvier, celles des deux capteurs 383 et 384.

On considérera en outre que les premières mesures (jusqu'au 15 janvier) réalisées dans le sol "naturel" (hétérogène) n'ont pas la même représentativité et sont de moindre qualité que celles effectuées par la suite dans le sol tamisé.

#### **6.4 Sondes de températures de surface du sol**

Comme pour les mesures de flux, deux séries de mesures de températures de surface ont été définies dans le fichier de validation :

- 1<sup>ère</sup> série : 20/10/2001 13h30 – 15/01/2002 11h30 pour T0 et T0b ;
- 2<sup>ème</sup> série : 15/01/2002 12h00 – 18/04/2002 14h00 pour T0 et T0b.

Les premières mesures réalisées dans le sol "naturel" (hétérogène) n'ont, comme pour les flux, pas la même représentativité que celles effectuées par la suite dans le sol tamisé.

De plus, avant le 15 janvier 2001, on préférera prendre en compte T0 à T0b.

#### **6.5 Vitesse et direction du vent**

**Vitesse** : Dans le fichier de forçage les valeurs douteuses de vent calme dues aux périodes de blocage indésirable de l'hélice n'ont pas pu être réévaluées et ont simplement été repérées par un sur lignage.

**Direction** : Les valeurs négatives (§ 5.3.5) n'ont pas été réévaluées et ont été supprimées.

#### **6.6 Mesures de hauteur de neige**

En raison du mauvais fonctionnement de l'appareil à ultrasons jusqu'au 20 mars 2002, ces mesures n'ont pas pu être réévaluées et n'ont pas été prises en compte dans les fichiers élaborés.

## 7 Méthodes de détermination des paramètres élaborés

Si la hauteur de neige n'est pas un paramètre d'entrée des deux modèles ISBA et CROCUS, le rayonnement atmosphérique de grandes longueurs d'ondes ( $LW\downarrow$ ) en est un essentiel. Sur la période de dysfonctionnement du pyrgéomètre, afin de préserver la continuité du jeu de données de forçage, il a été incontournable de réévaluer cette grandeur. Sur cette même période, la radiation de grandes longueurs d'ondes émise par le sol a aussi été reconstituée. Par ailleurs, certains paramètres non mesurés par le dispositif instrumental, mais utiles en entrées ou sorties des modèles ont été élaborés. Ces paramètres sont : la nébulosité du ciel, la phase et la lame d'eau corrigée des précipitations, la pression atmosphérique au niveau de la station, l'albédo du sol (seuillé et sol nu), les radiations atmosphériques directes et diffuses de courtes longueurs d'ondes  $SW\downarrow$ .

Des algorithmes traduits en Fortran ont été utilisés pour mener à bien ce travail.

La reconstitution ou l'élaboration de certains paramètres nécessitent parfois que d'autres quantités dont ils dépendent, manquantes ou non mesurées, aient été préalablement elles-même évaluées. C'est le cas de la radiation  $LW\downarrow$ , qui dans la formulation de reconstitution choisie, est fonction d'un paramètre non mesuré : la nébulosité (couvert nuageux). Il en est de même de la réévaluation des lames d'eau des précipitations collectées dans le pluviomètre Géonor, qui dépendante de leurs phases, ne peut être effectuée, que si ces dernières ont été auparavant définies. Ainsi le développement des diverses méthodes décrites ci-dessous respectera cette séquentialité.

### 7.1 Traitement des "micro-précipitations"

Le pluviomètre Géonor effectue à chaque pas de temps une pesée (principe du fil vibrant) du mélange : cumul des précipitations depuis la dernière purge + alcool + huile. Sur un pas de temps la différence entre la pesée du début et celle de fin correspond à la lame d'eau de la précipitation. Hors occurrence de précipitation, pour peu que le pluviomètre ait vibré légèrement sous l'effet du vent lors de la réalisation de l'une ou de l'autre des deux pesées, il est très fréquent qu'une quantité indésirable, positive ou négative (généralement faible, le plus souvent inférieure à 0,3 mm), puisse être enregistrée. Pour s'affranchir au mieux de ce problème, un algorithme de "remontée" des mesures négatives est utilisé (Lejeune et Martin, 1995). Par ce procédé, la lame d'eau réelle d'un épisode de précipitation même faible se trouve peu affectée et aucun biais n'est induit sur le cumul saisonnier. Enfin, ce n'est que très occasionnellement que l'on supprime ou que l'on fabrique "artificiellement" de très faibles précipitations.

### 7.2 Nébulosité (N)

C'est la fraction, exprimée en dixième, de la voûte céleste occultée par les nuages.

L'estimation de la couverture nuageuse, lorsqu'elle n'est pas mesurée humainement ou automatiquement, est un exercice assez difficile à réaliser à partir de la seule connaissance de paramètres météorologiques du site de mesures. Cependant cette estimation demeure indispensable pour alimenter des modèles comme CROCUS. La méthode, pratiquée en routine sur les séries saisonnières du Col de Porte, consiste à évaluer la nébulosité à partir d'une formule qui la relie à certains paramètres météorologiques mesurés : rayonnement atmosphérique de

grandes longueurs d'ondes, température et humidité de l'air. La formule utilisée au Col de Porte est celle de Berlianda (Lejeune et Martin, 1995).

Sur les données PNRH, les deux mois de dysfonctionnement du pyr géomètre nous ont conduit à développer une autre méthode d'estimation. Pour le glacier Zongo, P. Wagnon (1999) compare la radiation solaire globale mesurée  $SW\downarrow_{mes}$  à deux valeurs théoriques maximales et minimales. Lorsque le rayonnement mesuré atteint la valeur théorique maximale, la nébulosité est alors estimée comme celle d'un ciel clair ( $N=0$ ), s'il atteint la valeur minimale, la nébulosité est estimée comme celle d'un ciel couvert ( $N=1$ ). Entre ces deux seuils extrêmes, on estime que la nébulosité varie linéairement en fonction de la radiation solaire globale. Enfin, après le coucher du soleil, on considère que la nébulosité diminue régulièrement de un dixième par heure.

La méthode mise en œuvre pour les données PNRH s'inspire de ce travail, avec quelques aménagements originaux mis au point par Y. Lejeune. On l'appelle "méthode  $N_{pw}$ ", dans la suite du développement.

### 7.2.1 Description de la méthode $N_{pw}$

La méthode s'applique sur chaque pas de temps de 30 minutes, son principe diffère le jour et la nuit :

**Le jour**, les rayonnements solaires incidents mesurés et théoriques sont comparés et permettent de quantifier la nébulosité.

**La nuit**, la nébulosité est estimée comme celle d'un ciel couvert quand les valeurs de certains paramètres ou de leurs variations l'induisent. Sur les pas de temps pour lesquels le couvert nuageux reste à définir, celui-ci sera obtenu par interpolation linéaire à partir des valeurs encadrant les plus proches (dernière valeur de jour de la veille ou première valeur de jour du lendemain ainsi que toutes celles de nuit éventuellement forcées à 1).

NB : Par la suite la notation  $N_{pw}$  sera utilisée pour désigner la nébulosité ainsi évaluée.

#### 7.2.1.1 Le jour :

On entend par « jour », les pas de temps au cours desquels :  $SW\downarrow_{mes}$  ou  $SW\downarrow_{th}$  du ciel clair  $\geq 10W/m^2$

La première opération consiste à calculer les radiations solaires théoriques du pas de temps pour 11 valeurs de nébulosité comprises entre 0,0 et 1,0,  $SW\downarrow_{th}(N=0 \rightarrow 1)$ . Un modèle de simulation du rayonnement théorique est utilisé à cet effet. Il tient compte de la situation géographique et topographique du site ainsi que des caractéristiques météorologiques du pas de temps. Les paramètres d'entrée de ce modèle sont : la date, l'altitude, la longitude et la latitude du site, les masques solaires : azimut et hauteur angulaire (§ 5.2.4), l'humidité relative et la température de l'air, et bien sûr la nébulosité.

Les onze rayonnements théoriques ainsi obtenus sont ensuite comparés au rayonnement solaire atmosphérique mesuré  $SW\downarrow_{mes}$ . Cette comparaison n'est effectuée que si la condition suivante est réalisée : radiation mesurée et radiation théorique du ciel clair toutes deux supérieures à  $10 W/m^2$ . Si cette dernière condition n'est pas vérifiée,  $N_{pw}$  demeure à ce stade indéterminé. Sinon, on attribue à  $N_{pw}$  la valeur de la nébulosité  $N$  obtenue pour le minimum de la différence :  $SW\downarrow_{mes} - SW\downarrow_{th}(N=0 \rightarrow 1)$ .

Une des hypothèses inhérente à la méthode est l'égalité de répartition des nuages sur l'ensemble de la voûte céleste. Une telle hypothèse cautionne de fortes erreurs d'estimation de la couverture nuageuse réelle dans certaines situations particulières. En effet, la radiation réelle (directe) peut par exemple être fortement atténuée par la présence d'un nuage "isolé" occultant le soleil. En ce cas  $SW\downarrow_{mes}$  sera faible au regard des radiations  $SW\downarrow_{th}(N)$  des faibles valeurs de  $N$ . La nébulosité  $N_{pw}$  se trouve alors surestimée par rapport à la nébulosité réelle. Inversement, la nébulosité  $N_{pw}$  sera sous-estimée par rapport à la nébulosité réelle, lorsque dans un ciel

nuageux sont mesurées de fortes valeurs de radiations incidentes dues à la présence d'un "trou de ciel bleu" devant le soleil. C'est pourquoi, pour limiter au mieux ces problèmes, on recalcule (lisse) la nébulosité  $N_{pw}$  (de jour) d'un pas de temps donné à partir des nébulosités immédiatement encadrantes.

$$\text{Au pas de temps } i \text{ on a donc : } N_{pw}(i) = ( N_{pw}(i-1)+N_{pw}(i)+(N_{pw}(i+1)) / 3 .$$

42% des pas de temps (3648) de la campagne de mesures, considérés comme pas de temps "de jour", ont permis d'obtenir par cette méthode une nébulosité  $N_{pw}$ .

### 7.2.1.2 La nuit

On entend par « nuit », les pas de temps au cours desquels :  $SW_{\downarrow mes} \text{ ou } SW_{\downarrow th} \text{ du ciel clair} < 10W/m^2$

La nébulosité est forcée à celle d'un ciel couvert ( $N_{pw} = 1$ ) lorsque les seuils suivants sont atteints. Ces seuils, issus d'une expertise propre aux capteurs et au site, sont listés avec leur justification météorologique :

- précipitation durant le pas de temps :  $RR_{g\acute{e}onor} \geq 0.3 \text{ mm}$
- air proche de la saturation (site dans le brouillard ou dans le nuage) :  $U > 97,6\%$
- maintien du site sous un ciel couvert durant le pas de temps :  
 $U > 97,2\%$  et  $|\Delta T_{air}| \leq 0,1^\circ C$
- entrée nuageuse, le ciel n'étant pas couvert au pas de temps précédent :  
 $U > 96,5\%$  et  $\Delta T_{airprec} \leq -0,32$  et  $(\Delta T_{air} - 0,3) > \Delta T_{airprec}$  et  $\Delta U > 0$
- Enfin comme déjà énoncé, les valeurs demeurant indéfinies après ces traitements seront obtenues par interpolation linéaire à partir des valeurs encadrantes précédemment estimées les plus proches.

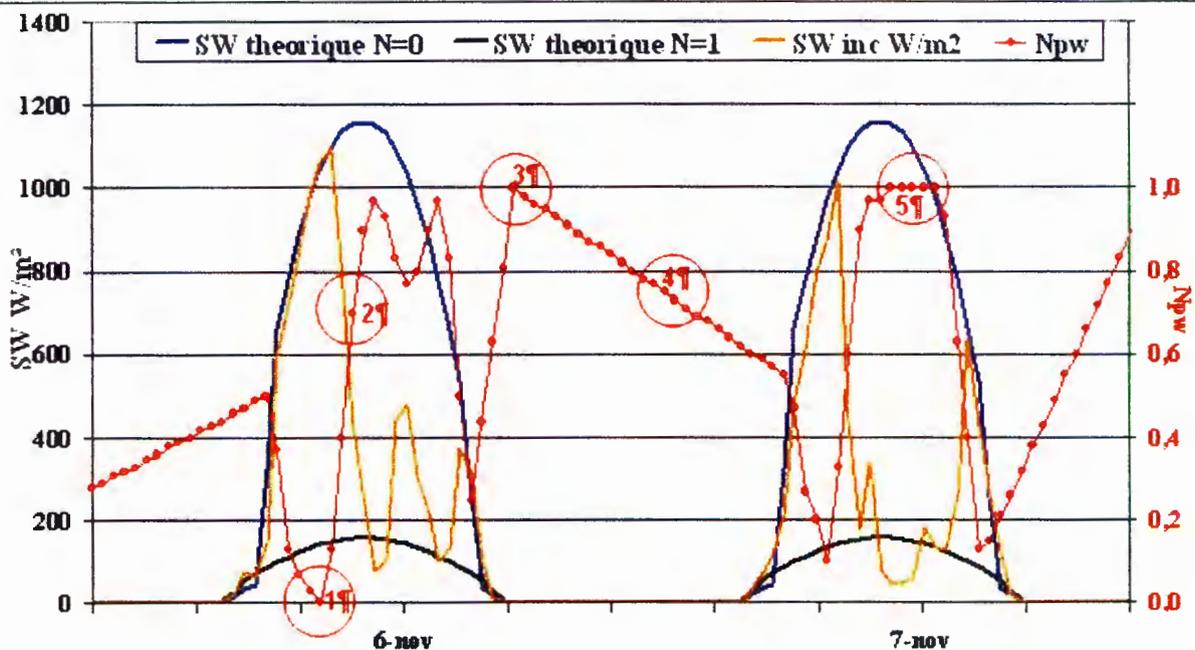


Figure 22 : exemples d'estimations de la nébulosité  $N_{pw}$

Sur ce graphique :

- les courbes bleue et noire représentent les rayonnements solaires incidents théoriques respectivement du ciel clair ( $SW_{th}(N=0)\downarrow$ , courbe bleue) et du ciel couvert ( $SW_{th}(N=1)\downarrow$ , courbe noire) ;

- la courbe orange représente la radiation solaire incidente mesurée  $SW_{mes}\downarrow$  ;
- la courbe rouge correspond aux valeurs de nébulosité  $N_{pw}$  estimées.

On va dans ce qui suit justifier l'obtention des cinq nébulosités, numérotées de 1 à 5 sur la Figure 22 :

- N1, nébulosité de "jour" le 6/11/2001 à 10h30 :

N1 a été estimée comme une nébulosité de ciel clair  $N1 = 0$ , car la radiation théorique du ciel clair  $SW_{th}(N=0)\downarrow$  ( $1044W/m^2$ ) est des onze radiations théoriques  $SW_{th}(N=0,0 \text{ à } 1,0)\downarrow$  la plus proche de la radiation mesurée  $SW_{mes}\downarrow$  ( $1059 W/m$ ).

- N2, nébulosité de "jour" le 6/11/2001 à 12h00 :

N2 a été estimée comme une nébulosité de ciel nuageux,  $N2 = 0,7$ , car  $SW_{th}(N=0,7)\downarrow$  est des onze radiations théoriques  $SW_{th}(N=0 \text{ à } 1)\downarrow$  la plus proche de  $SW_{mes}\downarrow$  ( $427W/m^2$ ).

- N3, nébulosité de "nuit" le 6/11/2001 à 19h30 :

Les valeurs de l'humidité sur le pas de temps (97%) et de la variation de la température de l'air par rapport au pas de temps précédent ( $0,07^\circ C$ ) permettent le "forçage à 1" d'une valeur nocturne de nébulosité,  $N3=1$ . On se trouve dans la situation: "maintien du site sous un ciel couvert", seuils respectifs: pour  $U\%$  96,7 pour  $\Delta T_{air}$   $0,1^\circ C$ .

- N4, nébulosité de "nuit" le 7/11/2001 à 03h00 :

$N4 = 0,73$ , nébulosité de ciel nuageux, a été obtenue par interpolation linéaire entre la nébulosité de nuit ( $N=1$ ) du 6/11/2001 à 19h30 et la première nébulosité de jour ( $N=0,55$ ) du 7/11/2001 à 08h00.

- N5, nébulosité de "jour" le 7/11/2001 à 14h00 :

$N5$  a été estimée comme une nébulosité de ciel couvert  $N5=1$ , car :

$$[SW_{th}(N=1)\downarrow = 180W/m^2] \sim [SW_{mes}\downarrow = 57W/m^2].$$

Dans le tableau 5 ci-dessous, sont portées les fréquences d'obtention des nébulosités de nuit (4994 pas de temps), par interpolation linéaire ou par l'utilisation d'un des filtres de forçage à 1.

**Tableau 5, nébulosité de nuit**

Filtre	Nébulosité forcée à 1 (591 cas)				Interpolation linéaire (4403 cas)
	$RR_{g\u00e9onor} \geq 0.3$ mm	$U > 97,6\%$	$U > 97,2\%$ et $ \Delta T_{air}  \leq 0.1^\circ C$	$U > 96,5\%$ et $\Delta T_{airprec} \leq -0.3$ et $(\Delta T_{air}-0.3) > \Delta T_{airprec}$ et $\Delta U > 0$	
Fr\u00e9quence %	8	1	3	1	88

**NB :** Certains filtres peuvent \u00eatre redondants lorsque la n\u00e9bulosit\u00e9 est forc\u00e9e \u00e0 1.

Il appara\u00eet que dans 12% des cas la n\u00e9bulosit\u00e9 a \u00e9t\u00e9 estim\u00e9e comme celle d'un ciel couvert; les trois quarts de ces situations \u00e9tant accompagn\u00e9es d'occurrences de pr\u00e9cipitation.

## 7.2.2 Validation de la méthode $N_{pw}$

Deux types de validation ont été réalisés. Les nébulosités  $N_{pw}$  ont tout d'abord été comparées aux nébulosités  $N_{berl}$  évaluées par la méthode de Berlianda. Puis, les quelques valeurs de nébulosité  $N_{mes}$  observées sur le site au cours de la première campagne intensive ont été comparées aux nébulosités  $N_{pw}$ .

### 7.2.2.1 Comparaison des nébulosités $N_{pw}$ et $N_{berl}$ sur les périodes de bon fonctionnement du pyrgéomètre.

Avant de détailler les résultats de cette validation, exposons l'expression de la radiation  $LW\downarrow$  théorique issue de la formule de Berlianda. :

$$LW\downarrow_{berl} = \Sigma \sigma T_{air}^4$$

où :  $\sigma$  : constante de Stéfán,  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} (Wm^{-2}K^{-4})$

$$\Sigma : \text{Emissivité de l'air} : \Sigma = 0,58 + 0,9 k N_{berl}^2 + 0,06 e_{air} (1 - k N_{berl}^2)$$

$$k = 0,09 + 0,2 N_{berl}$$

$e_{air}$  : tension de vapeur de l'air (hpa)

$N_{berl}$  : Nébulosité

$T_{air}$  : Température de l'air (K)

En appliquant cette formulation à la radiation incidente mesurée  $LW\downarrow_{mes}$  on déduit par une dichotomie inverse  $N_{berl}$ .

Du 20/10/2001 13h30 au 15/01/2002 à 10h00 :

Jour et nuit :  $N_{pw \text{ moy}} = 0,68$  ,  $N_{berl \text{ moy}} = 0,72$  pour un écart quadratique moyen (EQM) de 0,32

Jour uniquement :  $N_{pw \text{ moy}} = 0,63$  ,  $N_{berl \text{ moy}} = 0,75$  pour un EQM de 0,30

Nuit uniquement :  $N_{pw \text{ moy}} = 0,73$  ,  $N_{berl \text{ moy}} = 0,69$  pour un EQM de 0,34

Du 24/03/2002 à 00h00 au 18/04/2002 14h00 :

Jour et nuit :  $N_{pw \text{ moy}} = 0,75$  ,  $N_{berl \text{ moy}} = 0,65$  pour un EQM de 0,39

Jour uniquement :  $N_{pw \text{ moy}} = 0,67$  ,  $N_{berl \text{ moy}} = 0,71$  pour un EQM de 0,32

Nuit uniquement :  $N_{pw \text{ moy}} = 0,83$  ,  $N_{berl \text{ moy}} = 0,60$  pour un EQM de 0,44

Quelque soit la méthode utilisée, les moyennes des nébulosités sur les deux périodes sont très proches. En revanche à l'échelle du pas de temps, avec des EQM proches de 0,3 le jour, et de 0,34 et 0,44 la nuit, les estimations diffèrent sensiblement. Pour autant, il est peu justifié de considérer une des méthodes comme plus valable que l'autre. En fonction des situations météorologiques, les deux méthodes conduisent à des estimations parfois contradictoires plus ou moins proches de la nébulosité réelle. En cas de couverture importante constituée de nuages opaques de bases élevées, des faibles valeurs énergétiques des radiations  $LW\downarrow_{mes}$  seront déduites de faibles valeurs de  $N_{berl}$  très inférieures à celles plus réalistes des  $N_{pw}$  découlant des faibles valeurs des  $SW\downarrow_{mes}$ . A contrario, lorsque la radiation solaire  $SW\downarrow_{mes}$  directe est fortement atténuée par la présence d'un nuage bas "esseulé" occultant le globe solaire, la méthode  $N_{pw}$  occasionne une surestimation du couvert nuageux non suivie par la méthode Berlianda qui se trouve alors plus adaptée.

### 7.2.2.2 Comparaison des nébulosités $N_{pw}$ estimées aux nébulosités mesurées sur le site.

Nous disposons d'une courte série d'observations humaines réalisées pendant la campagne de mesures intensives du 1er février au 12 février 2002. Sur 92 cas de jour :  $N_{pw \text{ moy}} = 0,81$  ,  $N_{mes \text{ moy}} = 0,87$  pour un EQM de 0,18.

La comparaison des nébulosités "mesurées" avec les  $N_{pw}$  estimées est au vu de ces résultats très satisfaisante, avec la réserve que la taille de l'échantillon de mesure est limité à 92 observations diurnes.

Des observations supplémentaires permettraient de fiabiliser la méthode.

### 7.3 Rayonnements de grandes longueurs d'ondes $LW\downarrow$ et $LW\uparrow$

Si le dysfonctionnement du pyrgéomètre du 15 janvier au 23 mars ne nous a initialement pas conduit à choisir la formule de Berlianda pour réaliser l'estimation de la nébulosité, on l'utilisera sur cette période pour reconstituer la radiation atmosphérique de grandes longueurs d'ondes  $LW\downarrow$ . La nébulosité  $N_{pw}$  précédemment obtenue est alors une des variables d'entrée de la formule.

Du 15 janvier au 23 mars :

- la reconstitution de  $LW\downarrow$  est donc telle que:  $LW\downarrow = LW\downarrow_{berl}(N_{pw})$
- la radiation  $LW\uparrow$  émise par la surface est reconstituée à l'aide de la formule de Stefan appliquée à la température de surface  $T_0$  :  $LW\uparrow = LW\uparrow_{stefan}(T_0)$  (§ 6.4).

#### Validation de la méthode de reconstitution de $LW\downarrow$ :

La radiation  $LW\downarrow_{mes}$  mesurée sur les périodes de bon fonctionnement du pyrgéomètre a été comparée à celle obtenue par la formulation de Berlianda  $LW\downarrow_{berl}(N_{pw})$  (tableau 6 ci-dessous) :

**Tableau 6, radiation atmosphérique de grandes longueurs d'ondes**

	jour					nuit					jour et nuit				
	nbval	W/m <sup>2</sup>				nbval	W/m <sup>2</sup>				nbval	W/m <sup>2</sup>			EQM
		LWmesmoy	LWberlmoy	ecart relatif %	EQM		LWmesmoy	LWberlmoy	ecart relatif %	EQM		LWberlmoy	Lwberl	ecart relatif %	
20/10/01 au 15/01/02	2146	307	287	7	35	2024	286	283	1	31	4170	296	285	4	33
24/03/02 au 18/04/02	587	304	292	0	33	642	281	294	-5	36	1229	292	293	0	35

De jour comme de nuit sur les deux périodes, les écarts quadratiques moyens (EQM) sont inférieurs à 12%. Les écarts sur les bilans cumulés (Cf. valeurs moyennes) sont encore plus faibles (<7%). L'estimation de la radiation  $LW\downarrow$  par la méthode combinée  $N_{pw}$  + Berlianda est donc au vu des mesures très acceptable.

### 7.4 Décomposition du rayonnement solaire atmosphérique en rayonnements directs et diffus

La radiation solaire incidente de forçage du modèle CROCUS n'est pas une radiation globale. Le modèle utilise en entrée une radiation directe (celle du seul soleil) et une radiation diffuse (celle de tout l'hémisphère vu du capteur, excepté le globe solaire). Cela se justifie lorsque le modèle calcule l'albédo de la surface, puisque pour ce calcul on utilise une formulation différente pour les deux radiations. Pour le modèle CROCUS, il est donc impératif de décomposer la radiation globale mesurée  $SW\downarrow_{mesglob}$  en deux radiations directe et diffuse.

Le modèle de rayonnement théorique, préalablement utilisé pour l'évaluation de  $N_{pw}$  de jour (§ 7.2.1.1), calcule un rayonnement théorique global  $SW\downarrow_{thglob}$ , un rayonnement direct  $SW\downarrow_{thdir}$  et un rayonnement diffus  $SW\downarrow_{thdif}$ . En fonction de la nébulosité  $N_{pw}$  et de la radiation globale mesurée  $SW\downarrow_{mesglob}$ , les deux radiations élaborées, directes et diffuses sont donc telles que :

$$SW\downarrow_{dir} = (SW\downarrow_{thdir} / SW\downarrow_{thglob}) SW\downarrow_{mesglob}$$

$$SW\downarrow_{dif} = (SW\downarrow_{thdif} / SW\downarrow_{thglob}) SW\downarrow_{mesglob}$$

## 7.5 Albédo seuillé

L'albédo de la surface du sol (enneigé ou non) a été établi comme suit :

si les radiations  $SW\uparrow$  et  $SW\downarrow$  sont toutes deux supérieures à  $8W/m^2$  :  $alb = SW\uparrow / SW\downarrow$ , sinon :  $alb = 9,9$  (albédo indéfini). De plus, si  $alb > 1$  alors  $alb = 1$ .

De tels cas apparaissent lorsque la coupelle du capteur de rayonnement incident est recouverte de neige, givre... C'est pourquoi nous parlons d'albédo seuillé.

**NB** : à noter qu'en ces derniers cas dans le fichier de forçage, afin de ne pas trop sous-estimer le flux solaire incident, la radiation  $SW\downarrow_{mes}$  a été forcée à la valeur de la radiation réfléchie  $SW\uparrow_{mes}$  quand cette dernière radiation excédait  $10W/m^2$ .

## 7.6 Méthode experte d'évaluation des phases des précipitations

Une meilleure connaissance de la phase des précipitations arrosant le bassin du Zongo, et ce plus particulièrement à l'altitude de la station Charquini, était un des objectifs prioritaires du projet PNRH (Cf. section 2). C'est pourquoi, estimer les phases de la manière la plus objective, à partir des seuls paramètres météorologiques mesurés par la station, devenait prioritaire. Cela se justifiait d'autant que des modèles physiques faisant appel au bilan d'énergie, tels que le modèle ISBA et à plus forte raison le modèle d'enneigement CROCUS, sont tous deux très sensibles aux forçages par les phases des précipitations.

Quand, dans la couche limite, les températures sont voisines de  $+1^\circ C$ , l'estimation des phases des précipitations, neige, pluie, mélange de pluie et neige, est toujours un exercice délicat à réaliser, très souvent sujet à caution. Or, durant la campagne de mesures, sur les 1840 occurrences de précipitations recensées (pas 1/2h), 1532 se sont produites pour des températures de l'air comprises entre  $-1^\circ C$  et  $+3^\circ C$ , et 973 pour des températures de l'air comprises entre  $0^\circ C$  et  $+2^\circ C$  (tableau 7). De telles gammes de températures sont donc typiquement celles pour lesquelles l'estimation objective des phases se trouve être la plus difficile.

Ceci nous a conduit à accorder un soin tout particulier au développement d'une méthode d'estimation objective et répétitive des phases. Par la suite, la qualité des simulations de chacun des deux modèles apportera des éléments de validation supplémentaires de la méthode développée.

La méthode élaborée a été qualifiée de "méthode experte automatisée", pour la différencier d'une première approche dite "robuste" (L'Hôte *et al.*, 2002). Elle se décompose en deux types de détermination :

- les cas faciles qui ne dépendent que de la température de l'air ;

- les cas difficiles, où la détermination de la phase dépend en outre de plusieurs autres paramètres météorologiques : le flux de sol, l'albédo de la surface, la radiation de courtes longueurs d'ondes émise par le sol, la température de la surface du sol et l'intensité de la précipitation.

### 7.6.1 Cas faciles

Si  $T_{air} \geq +3^{\circ}\text{C}$  : phase = pluie

Si  $T_{air} \leq -1^{\circ}\text{C}$  : phase = neige

Il est en effet communément admis comme très rare qu'en dessous de  $-1^{\circ}\text{C}$  la pluie puisse encore se manifester et qu'au dessus de  $+3^{\circ}\text{C}$ , on puisse rencontrer la phase neige. Si dans ce dernier cas, certaines précipitations peuvent malgré tout se produire sous forme de neige, il s'agit alors de neige très fondante assimilable à un mélange de pluie et de neige.

### 7.6.2 Cas difficiles : $T_{air} \in ] -1^{\circ}\text{C}, +3^{\circ}\text{C}[$

Dans cette gamme de températures, la forme des précipitations est beaucoup plus variable, car intimement liée à la nature de la masse d'air, entre le sol et la haute atmosphère. Nature qui est dépendante des profils verticaux de température, du type des nuages associés, de la turbulence...

Cependant, comme on l'a précédemment exprimé, la discrimination objective reste possible à partir de la seule connaissance de paramètres météorologiques au sol. Sur le site PNRH nous disposons d'autres mesures, que la seule température de l'air, dont les valeurs sur le pas de temps et les variations par rapport au pas de temps antérieur, sont bien corrélées à la nature des précipitations.

Un accroissement de l'albédo est par exemple significatif de chutes de neige. Un accroissement conséquent de l'émission radiative  $LW\uparrow$  de la surface peut raisonnablement être imputé à une pluie, que le sol avant la précipitation n'ait pas été enneigé et a fortiori qu'il l'ait été. De même, si au début d'un pas de temps, le flux du sol non enneigé est positif, l'effet d'une précipitation neigeuse durant le pas de temps entraînera une forte baisse de ce flux, parfois telle que sur le pas de temps, sa valeur moyenne puisse devenir négative.

L'ensemble de ces "indicateurs météorologiques" de qualité des phases sera décrit dans l'exposé détaillé de la méthode donnée ci-dessous.

Le principe pour les cas difficiles consiste donc à comparer les valeurs moyennes ou les variations depuis le pas de temps précédent de certains indicateurs à celles de seuils estimés de manière "experte". Toute la difficulté de l'élaboration de la méthode résidait dans le choix des valeurs à attribuer aux différents seuils. Par tâtonnements nous avons pu réaliser ce travail. En regroupant toutes les informations partielles provenant de plusieurs comparaisons indicateurs/seuils, nous estimons la phase de la précipitation.

Pour chaque *paramètre déterminant*, un *seuil expert* (valeur estimée comme discriminatoire des phases) a été fixé. En fonction de la valeur du *paramètre déterminant* par rapport à son *seuil expert*, est affectée une valeur comptabilisée dans un compteur *filtre*. Les valeurs des *filtres* et des *seuils experts* diffèrent, si au pas de temps précédent il y a eu ou non occurrence de précipitation, et si oui, si leur phase avait alors été évaluée comme pluie, neige, ou pluie et neige mêlées.

Trois compteurs *filtres*, *filtre absolu*, *filtre majorant*, *filtre sélectif* et deux quantités *poidsmaxinitial* et *poidsmax* ont aussi été définis. Que les compteurs *filtre absolu* et *filtre sélectif* soient ou non incrémentés n'affectent pas la quantité *poidsmaxinitial*. En revanche l'incrément ou la non incrément du *filtre majorant* modifie la quantité *poidsmaxinitial* qui devient alors la quantité *poidsmax*.

A l'issue de l'incrémentation des trois filtres, l'estimation de la phase se fait par comparaison entre la quantité *poidsmax* et la quantité *filtre final* (somme des trois filtres).

L'exposé détaillé et algorithmique de la méthode pour les cas difficiles est fourni en annexe 8.

### 7.6.3 Résultats et validation de la méthode

#### 7.6.3.1 Résultats

Sur le tableau 7 ci dessous, sont répertoriés pour toute la campagne de mesures le nombre d'occurrences de précipitations et leurs phases associées pour différentes plages de températures de l'air.

Tableau 7, phases estimées des précipitations

Occurrences de précipitations (pas 1/2 h) et phases associées pour différentes plages de températures																				
occurrence de RR	occurrence de RR pour Tair ]-1°C,+3°C[	occurrence de RR pour Tair ]0°C,+2°C[	pluie seule pour Tair <= 0°C	neige seule pour Tair <= 0°C	pluie et neige mêlé pour Tair <= 0°C	pluie seule pour Tair ]0°C,+2°C[	neige seule pour Tair ]0°C,+2°C[	pluie et neige mêlé pour Tair ]0°C,+2°C[	pluie seule pour Tair >= +2°C	neige seule pour Tair >= +2°C	pluie et neige mêlé pour Tair >= +2°C	pluie seule pour Tair <= -1°C	neige seule pour Tair <= -1°C	pluie et neige mêlé pour Tair <= -1°C	pluie seule pour Tair ]-1°C,+3°C[	neige seule pour Tair ]-1°C,+3°C[	pluie et neige mêlé pour Tair ]-1°C,+3°C[	pluie seule pour Tair >= +3°C	neige seule pour Tair >= +3°C	pluie et neige mêlé pour Tair >= +3°C
1840	1532	973	0	244	7	235	461	277	580	0	36	0	33	0	540	672	320	275	0	0

Au dessus de +3°C et en dessous de -1°C, seuils de températures des cas faciles, les phases estimées ne sont bien sûr que respectivement pluie (275), respectivement neige (33). Pour des températures inférieures à 0°C, la méthode appliquée aux cas difficiles n'estime aucune occurrence de pluie seule et très peu de mélange pluie et neige (7). De même aucune occurrence de chutes de neige seule n'est obtenue pour des températures de l'air supérieures à +2°C. En revanche au dessus du seuil +2°C, le nombre d'occurrence de pluie et neige mêlées, quoique faible (36), est néanmoins non négligeable au regard de celles de pluie (580).

Entre 0°C et +2°C, si le nombre d'occurrences neigeuses (461) est le plus important, les occurrences de pluie (235) et de pluie et neige mêlés (277) sont assez proches et excèdent en cumul le nombre d'occurrences neigeuses. Ce dernier constat est important, car nous craignons initialement que dans cette gamme de températures, la méthode privilégie trop la phase solide aux dépens de la phase liquide.

#### 7.6.3.2 Validation de la méthode

Comme pour la nébulosité, la campagne de mesure intensive de février 2002 nous a permis d'observer sur site les phases de 54 événements précipitants (pas 1/2 h). Cet échantillon, trop faible pour permettre une validation exhaustive de la méthode, nous fournit cependant quelques enseignements sur sa qualité. Les phases observées ont été comparées à celles estimées avec la règle suivante :

- Si les phases observée et estimée sont identiques (ex : neige observée pour neige estimée), l'estimation est bonne.
- Si une composante de la phase observée (estimée) se retrouve dans la phase estimée (observée), l'estimation est moyenne, par exemples : neige observée et pluie et neige mêlées estimée, ou pluie et neige mêlées observée et pluie estimée....
- Enfin si aucune composante des phases observée et estimée n'est identique, pluie pour neige ou neige pour pluie, l'estimation est fausse.

Le score des bons résultats est de 32, celui des mauvais de 2, et enfin celui des résultats moyens est de 20.

Encore une fois, si toutes conclusions trop hâtives sont à proscrire en raison du petit nombre d'observations, il semble intéressant de détailler le comportement de la méthode de part et d'autre du seuil +1°C, (tableau 8).

**Tableau 8, scores des observations / estimations des phases de précipitations**

Score par rapport aux phases observées							
Phases		Neige		Pluie		Pluie + Neige	
T <sub>air</sub>		T <sub>air</sub> ≤ +1°C	T <sub>air</sub> > +1°C	T <sub>air</sub> ≤ +1°C	T <sub>air</sub> > +1°C	T <sub>air</sub> ≤ +1°C	T <sub>air</sub> > +1°C
Observations		9	6	1	24	0	14
Estimations	bonne	9	1	0	22		0
	moyenne	0	4	0	2		14 (13p,1n)
	fausse	0	1	1	0		

En première analyse, sur la période, il est beaucoup plus fréquent de rencontrer la seule phase solide (40%) pour des températures supérieures à +1°C, que la seule phase liquide (4%) pour des températures inférieures à +1°C.

Les enseignements les plus marquants quant à la qualité de la méthode sont les suivants :

- Pour les chutes de neige :

L'estimation est excellente pour T<sub>air</sub> ≤ +1°C (score de 100%).

Pour T<sub>air</sub> > +1°C, la méthode est moyenne puisque majoritairement elle estime un mélange de pluie et neige (4 sur 6) au lieu de la seule phase neige.

- Pour la pluie :

Pour T<sub>air</sub> ≤ +1°C, une seule occurrence de pluie non correctement estimée a été observée.

Pour T<sub>air</sub> > +1°C, l'estimation avec un taux de réussite de 92% (22 sur 24) est très bonne et aucune forme purement neigeuse n'est estimée.

- Pour la pluie et neige mêlées :

Ces précipitations (14 cas) ont été observées seulement pour T<sub>air</sub> > +1°C et l'estimation automatique ne les a jamais discriminées comme telles ; 13 fois la méthode a estimé de la pluie seule et une seule fois de la neige seule. Pour pluie et neige mêlées, il est donc très difficile de critiquer la méthode ; on peut simplement remarquer que sans être capable de reproduire parfaitement la réalité elle privilégie la phase liquide. Si cette tendance se répétait, on peut se poser la question de son influence sur les simulations des bilans de surface. Nous le saurons éventuellement par les modélisations ultérieures.

Outre l'objectivité d'une telle méthode, comparativement à une méthode d'estimation "manuelle" au cas par cas, l'intérêt de celle-là réside dans sa rapidité d'exécution et dans sa transportabilité à d'autres séries de mesures

(autres sites, climatologie différente...). L'adaptation de la méthode sur d'autres séries nécessite simplement de modifier la valeur de certains seuils ou d'ajouter éventuellement de nouvelles règles d'expertise.

## 7.7 Correction des lames d'eau mesurées par le pluviomètre Géonor

Le pluviographe Géonor est l'instrument fortement recommandé par l'OMM pour la mesure des lames d'eau des phases solides (Sevruck & Lejeune, 2002). Il est aussi tout à fait apte à bien quantifier les précipitations pluvieuses. Cependant, en raison de la faible surface de son collecteur (200 cm<sup>2</sup>), il est apparu nécessaire, surtout en cas de chutes de neige, que la lame d'eau mesurée soit corrigée.

Un groupe de l'OMM composé d'experts en mesure des précipitations, the *Nordic Working Group of Precipitations*, a testé durant deux campagnes complètes plusieurs modèles de pluviomètres et pluviographes du marché (Forland et al., 1996). Cette comparaison a permis de critiquer les appareils testés, et de recommander pour chacun des corrections dépendantes à la fois :

- de facteurs météorologiques : force du vent, température de l'air, évaporation potentielle,
- de paramètres instrumentaux : surface des collecteurs, mouillage des parois, présence ou non de bouclier canalisant le flux d'air au voisinage du collecteur...

Les corrections recommandées pour le pluviographe Géonor ont été utilisées avec succès sur les séries saisonnières du Col de Porte (Lejeune & Etchevers, 2000 et 2001). Elles ont permis de mieux appréhender les accumulations lors de chutes de neige ventées. La méthode a été appliquée aux données de la station Charquini.

Le principe des corrections est le suivant :

$$RR_{cor} = k RR_{mes} \text{ avec :}$$

$RR_{cor}$  : lame d'eau corrigée des précipitations,

$RR_{mes}$  : lame d'eau mesurée par le Géonor,

$k$  : facteur correctif dépendant de la phase.

- Pluie

$$RR_{cor} = k_p RR_{mes} \text{ avec : } k_p = f(V_g, I_{RR})$$

où :  $k_p$  : facteur correctif de la pluie,

$V_g$  = vitesse du vent au niveau du collecteur (m/s),

$I_{RR}$  = Intensité de la pluie (mm/30mn).

- Neige

$$RR_{cor} = k_n RR_{mes} \text{ avec : } k_n = f(V_g, T_{air})$$

où :  $k_n$  : facteur correctif de la neige,

$V_g$  = vitesse du vent au niveau du collecteur (m/s),

$T_{air}$  = Température de l'air (°C).

- Pluie et Neige

$$RR_{cor} = (f_p k_p + f_n k_n) RR_{mes}, \text{ avec :}$$

$f_p$  : ratio de la lame d'eau sous forme liquide,

$f_n$  : ratio de la lame d'eau sous forme solide.

**NB :** Sur les mesures effectuées à la station Charquini, on a arbitrairement décidé que pour tous les cas de précipitations mélangées, le ratio  $f_p$  est égal au ratio  $f_n$  : ( $f_p = f_n = 0,5$ ).

Plutôt que développer les expressions de  $k_n$  et  $k_p$ , expressions compliquées issues d'ajustements instrumentaux, celles-ci sont tracées en fonction des paramètres dont ils dépendent ( $V_g$  et  $I_{RR}$  pour  $k_p$ ,  $V_g$  et  $T_{air}$  pour  $k_n$ ) sur les Figures 23 et 24.

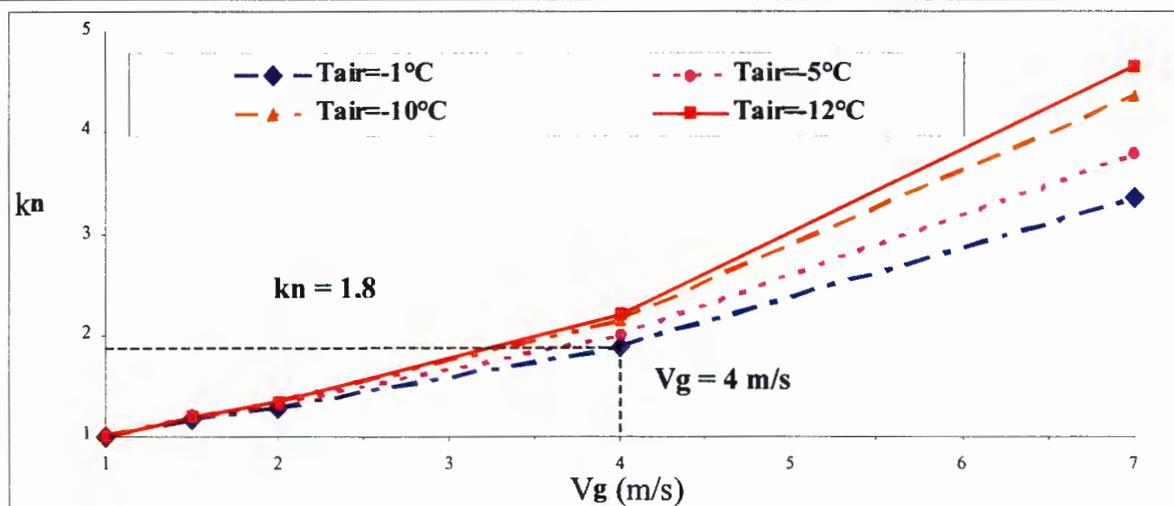


Figure 23 : expression de  $k_n$  en fonction de  $V_g$

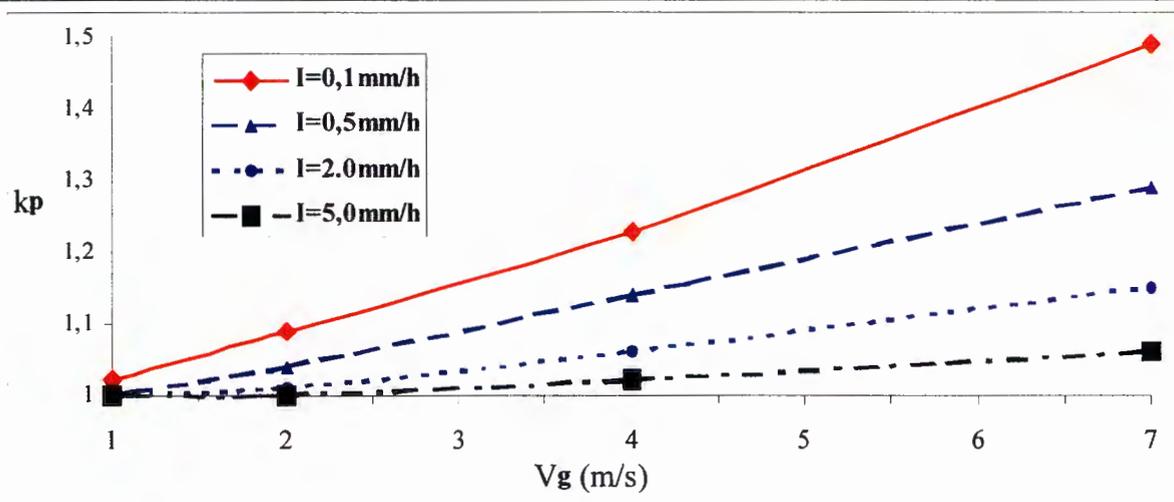


Figure 24 : expression de  $k_p$  en fonction de  $V_g$

Il apparaît que pour des températures de l'air froides et des vitesses de vent moyennes, la lame d'eau correspondant à de la neige doit être fortement augmentée. Pour exemple, elle est augmentée de 180% de la valeur collectée lorsque le vent est de 4m/s et la température de l'air de  $-1^{\circ}\text{C}$ . En cas de précipitation liquide ou de chute de neige se produisant par vents faibles, les corrections sont relativement faibles.

Lors de la campagne de mesures à la station Charquini (20/10/2001 13h30 au 18/04/2002 14h00), le cumul des précipitations collectées dans le pluviographe Géonor était avant corrections de 861 mm. L'augmentation relative de celui-ci due aux corrections est de 5%, soit un cumul corrigé de 906 mm, qui se décompose comme suit :

- Cumul pluie mesuré = 238 mm → Cumul pluie corrigé = 243 mm (+2%)
- Cumul neige mesuré = 447 mm → Cumul neige corrigé = 475 mm (+6%)
- Cumul pluie + neige mesuré = 176 mm → Cumul pluie +neige corrigé = 188 mm (+7%)

## 7.8 Albédo "sol nu"

La valeur de l'albédo du sol nu est la suivante :

- celle de l'albédo du sol quand celui-ci est non enneigé ;
- celle d'un albédo "théorique" qu'aurait le sol non enneigé, quand celui-ci est partiellement ou continûment recouvert de neige.

Ce paramètre est utile dans certains modèles calculant les bilans énergétiques de surface ; il est fourni dans le fichier de forçage.

L'albédo d'un sol, même s'il n'est jamais enneigé, varie au cours du temps en fonction de l'incidence des radiations solaires qui l'éclairent, des stades d'évolution des végétaux qui le recouvrent et de son humidité.

La méthode utilisée pour établir cette grandeur a été pratiquée manuellement, au cas par cas. Dans un premier temps, il a fallu repérer sur toute la période de mesures, celles d'enneigement continu ou partiel du sol. Cette information a été déduite des valeurs de l'albédo seuillé, de la phase des précipitations, des flux de sol, des températures de l'air et du sol, de la radiation LW↑. Les valeurs de ces paramètres ont été considérées sur le pas de temps courant et les pas de temps antérieurs.

Au total, l'albédo du sol nu sur le pas de temps courant est le suivant :

- si le sol est non enneigé, l'albédo seuillé défini au paragraphe 7.5 ;
- si le sol est enneigé, l'albédo seuillé d'un même pas de temps horaire de la journée la plus proche (antérieure ou postérieure), pas de temps pour lequel le sol était réellement non enneigé.

## 7.9 Pression atmosphérique à la station Charquini

Ce paramètre, utilisé dans certains modèles, n'est pas mesuré à la station et a du être estimé au mieux. Pour cela, nous disposons de données de pression mesurées à l'aéroport de La Paz - El Alto situé à 23 kilomètres de distance environ, à une altitude de 4071 mètres. Ce fichier est constitué de valeurs synoptiques principales (pas de temps de 6h) contenant la pression atmosphérique et la température de l'air.

Un fichier demi-horaire ( $P_{Paz}$ ,  $T_{airPaz}$ ) de pression et de température de l'air à la Paz a tout d'abord été constitué par interpolation linéaire des valeurs synoptiques.

La formule de Laplace a permis ensuite de reconstituer  $P_{Station}$ , la pression à la station Charquini.

$$Z_{Station} - Z_{Paz} = 67,4422 T_{vm} \log_{10} (P_{Paz} / P_{Station})$$

où :  $Z_{Station}$  : altitude de la station Charquini= 4795 m,  $Z_{Paz}$  : altitude de l'aérodrome de La Paz = 4071 m et  $T_{vm}$  : température virtuelle moyenne de la tranche  $P_{Paz} - P_{Station}$  (°K), calculée par l'approximation :

$$T_{vm} = ( T_{airStation} + T_{airPaz} ) / 2$$

## 8 Constitution des fichiers de forçage et de validation

Le travail décrit dans les paragraphes précédents a permis d'obtenir pour 180 jours, au pas de temps demi-horaire, un jeu continu de données de forçage et un jeu de données de validation ne présentant que très peu de valeurs manquantes. En raison du mauvais fonctionnement du capteur à ultrasons, la hauteur de neige est le seul paramètre absent du fichier de validation.

Hormis la vitesse du vent et la pression qui sont des grandeurs instantanées, tous les autres paramètres sont moyennés ou cumulés sur le pas de temps.

Le tableau 9 est la reproduction du début du fichier de forçage, le tableau 10 celle du fichier de validation ; les deux fichiers étant disponibles sous format Excel.

**Tableau 9, fichier de forçage**

date	Tair ventilé (°C)	Humidité relative (%)	Vit. vent (m/s)	SW↓ (W/m <sup>2</sup> )	LW↓ (W/m <sup>2</sup> )	Pluie éq.eau (mm)	Neige éq.eau (mm)	Pression (hPa)	Nébul. [O:1]	Albédo sol nu (s.d)
20/10/01 13:30	11,2	60,2	2,2	1190,0	259,1	0	0	576,48	0,36	0,22
20/10/01 14:00	9,0	60,7	2,0	1040,0	286,5	0	0	576,28	0,36	0,21
20/10/01 14:30	8,2	65,4	1,7	711,0	308,5	0	0	576	0,35	0,20

**Tableau 10, fichier de validation**

date	Flux 383 (W/m <sup>2</sup> )	T_0 (-3cm) (°C)	Flux 384 (W/m <sup>2</sup> )	T_0b (-3cm) (°C)	T-10 (-10cm) (°C)	T-20 (-20cm) (°C)	T-50 (-43cm) (°C)	LW↑ (W/m <sup>2</sup> )	SW↑ (W/m <sup>2</sup> )	Albédo mesuré (s.d)
20/10/01 13:30	174,1	22,1		22,4	9,7	9,4	6,2	492,1	257,6	0,22
20/10/01 14:00	142,7	22,0		21,1	9,9	9,3	6,2	484,1	219,4	0,21
20/10/01 14:30	120,5	22,5		17,2	10,2	9,3	6,2	451,5	145,5	0,20

En outre, des notices associées à chacun des fichiers documentent la manière dont on été établies les données : mesures brutes, données corrigées, données élaborées et méthodes d'élaboration, données reconstituées par interpolation, qualité des données ...+ codification de repérage du type de données.

## 9 Conclusions et perspectives

La présentation du dispositif mis en place à la station de Charquini a été volontairement détaillée dans ce rapport afin de servir de référence pour des installations ultérieures du même type. Cette station est exceptionnelle à de multiples égards : le site géographique à la fois tropical et de très haute altitude, la qualité et la fréquence des données acquises.

La méthode de constitution des fichiers de forçage et de validation a elle-aussi été détaillée pour pouvoir être réutilisée dans des opérations similaires. Elle fera sans doute l'objet ultérieurement d'une publication plus synthétique dans une revue scientifique.

La station Charquini va être démontée dans les prochaines semaines (juillet 2003) et transférée sur une moraine en bordure du glacier Zongo à une altitude d'environ 5100 m. Le nouveau dispositif présentera non seulement une altitude supérieure de 300 m, mais aussi une exposition différente en sus de la proximité immédiate d'un glacier d'étendue significative. Cette opération s'inscrit dans le cadre de la mise en place d'un *Observatoire de Recherche en Environnement* (Glacioclim) labellisé par le Ministère de la Recherche et dont le principal objectif est de suivre sur une durée longue (au moins 10 ans) des dispositifs glaciaires dans les Alpes, dans les Andes et dans les régions polaires (Antarctique et Groenland).

Un nouveau projet PNRH est soumis dans ce contexte en 2003 : il permettra de préciser les jeux de données utilisables pour le calage des modèles de neige (ISBA et CROCUS, mais pas seulement) et constituera un intéressant complément aux données acquises aux stations de Charquini sur un versant non englacé à 4800 m et du glacier Zongo à 5150 m.

## 10 Bibliographie

### 10.1 Publications

- Barry, R. G. - 1992. Mountain weather and climate. McConnin, R. (éd.)
- Bourqui, M. - 2003. Forçages climatiques et précipitations en très haute montagne tropicale, comparaison sols nu et englacé – Vallée du Rio Zongo (Cordillère Royale, Bolivie), Mémoire de DEA, Université Montpellier II, 55p.
- Caballero, Y. - 1998. Modélisation intégrée d'un système bassin versant aménagé de la Cordillère des Andes (Vallée du Zongo - Bolivie). Mémoire de DEA, Université Montpellier II, 56 +ann. p.
- 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, Université Montpellier II, 198+annexes p.
- Caballero, Y., Chevallier, P., Gallaire, R., Pillco, R. - 2003 accepté. Flow modelling in a high mountain valley equipped with hydropower plants: Rio Zongo Valley - Cordillera Real - Bolivia. Hydrological Processes.
- Chaffaut, I. - 1998. Précipitations d'altitudes, eaux souterraines et changements climatiques de l'Altiplano nord-chilien. Thèse, Université Paris-Sud,
- Covarrubias, A. - 1996. Modélisation hydraulique et hydrologique d'un réseau de captage dans la Cordillère des Andes : la vallée de Toconce (2ème Région du Chili). Mémoire, Université Montpellier 2, 50+ann p.
- Covarrubias, A., Chevallier, P. - 1997. Modelización de los escurrimientos en una cuenca andina de altura. Coloquio Internacional Recurso Agua en los Andes - su gestion en la II Region de Chile, Antofagasta (Chili). 11-13 juin 1997.
- 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. Klima Report N° 24/96, DNMI, Nordic Working Group on Precipitation (NWGP).
- Francou, B., Ribstein, P. - 1995. Glaciers et évolution climatique dans les Andes boliviennes. Glacier de Zongo et glacier de Chacaltaya, Cordillère Royale, 16°S. Bulletin de l'Institut Français d'Etudes Andines. 24 (1): 23-36.
- Francou, B., Ribstein, P., Pouyaud, B. - 1997. La fonte des glaciers tropicaux. Ils comptent parmi les indicateurs les plus fiables d'un réchauffement global. La Recherche. (302): 34-37.
- Francou, B., Ribstein, P., Saravia, R., Tiriaou, E. - 1995. Monthly balance and water discharge of an inter-tropical glacier : Zongo Glacier, Cordillera Real, Bolivia, 16°S. Journal of Glaciology. 41 (137): 61-67.
- Garreaud, R. D. - 1999. Multiscale analysis of the summertime precipitations over the central Andes. *Bulletin of American meteorological society*. 127: 920-921.
- Garreaud, R. D. - 2000. Cold air Incursions over Subtropical South America: Mean Structure and Dynamics. *Monthly Weather Review*. (128): 2544-2559.
- Garreaud, R. D., Aceituno, P. - 2001. Interannual rainfall variability over the South america Altiplano. *Journal of Climate*. (12): 2779-2789.
- IGM - Instituto Geografico Militar (1993 ?) carte au 1 :50 000ème intitulée « Cordillera Real o de La Paz-Sur », fuentes : IGM-CA (Instituto Geografico Militar), deposito legal N° 4-7-527-93 ; d'après Carta Nacional, Bolivia 1 :50 000, Hoja 5945 II, Milluni.
- Lejeune, Y., Martin, E. - 1995. Application du modèle Crocus aux données de la saison 1993/1994 du Col de Porte et de la campagne Leadex 1992. Note de Centre N°6, Météo-France (CNRM/CEN).
- Lejeune Y., Etchevers P. -2000 & 2001. Impact of a local deforestation on the snow modelling. Communications : Nice, EGS 2000. Innsbruck, IAMAS 2001.
- Lejeune, Y., Etchevers, P. - 2001. Impact d'une déforestation locale en bordure du champ de mesures du laboratoire du Col de Porte. Corrections des précipitations et choix du schéma de modélisation des flux turbulents. Note de Centre N°18, Météo-France (CNRM/CEN).
- L'Hôte, Y., Chevallier, P., Etchevers, P., Lejeune, Y., Wagnon, P. (2002) Pluie ou neige ? Dispositif de mesures dans les Andes de Bolivie et premiers résultats. Séminaire International d'Hydrologie Nivale en Méditerranée. Beyrouth, 16-17 décembre 2002. 5p., ref., 4 fig. (soumis à *Hydrological Sciences Journal*)
- Pourrut, P., Patoux, J. - 1996. Influence of temperature variations on the available daily runoff in a high mountain catchment. Ecohydrological processes in small basins. Assemblée Générale ERB'96 - Strasbourg. 24-26 septembre 1996. UNESCO, IHP-V. Technical Documents in Hydrology n°14, Paris, vol: pp: 141-146.
- Pouyaud, B., Francou, B., Ribstein, P. - 1996. Un réseau d'observation des glaciers dans les Andes Tropicales. Bulletin de l'Institut Français d'Etudes Andines. 24 (3): 707-714.
- Pouyaud, B., Ribstein, P., Gallaire, R., Chevallier, P., Caballero, Y., Berthier, E. - 1999. Régimes hydrologiques des hauts bassins nivo-glaciaires boliviens et variabilité pluviométrique des vallées andines en conditions El Niño et La Niña. Manaus'99, Hydrological and geochemical Processes in Large Scale River Basins. nov. 15-19, 1999. vol:
- Queney, R. - 1974. Eléments de météorologie. Paris,

- Ramirez, E., Mendoza, E., Ribstein, P. - 1995. Regimen espacial y temporal de las precipitaciones en la Cuenca de La Paz. *Bulletin de l'Institut français d'études Andines*. 24 (3): 391-401.
- Ribstein, P., Tiriau, E., Francou, B., Saravia, R. - 1995. Tropical climate and glacier hydrology : a case study in Bolivia. *Journal of Hydrology*. 165: 221-234.
- Roche, M.-A., Aliage Riviera, A., Campos, J., Pena Mendez, J. - 1990. Hétérogénéité des précipitations sur la Cordillère des Andes Boliviennes ,In *Hydrologie in mountainous regions 1.hydrological measurements:the water cycle. IAHS publications*. 381-386.
- Ronchail, J. - 1989. Advections polaires en Bolivie.
- Sevruk, B. & Lejeune Y. - 2002. Communications orales lors du Workshop WCRP. Workshop on determination of solid precipitation in Cold climate regions. Workshop Fairbanks, Alaska 2002.
- Vuille, M. - 1999. Atmospheric circulation over the Bolivian Altiplano during dry and wet period and extreme phases of the Southern Oscillation. *International Journal of Climate*. (19): 1579-1600.
- Vuille, M. - 2000. Interannual climate variability in the Central Andes and its relation to Tropical Pacific and Atlantic forcing. *Journal of Geophysical Research*. 105 (12): 447-460.
- Wagnon P. - 1999. Analyse du bilan d'énergie d'un glacier tropical. Application à la relation glacier-climat. Thèse, Université Joseph Fourier, Grenoble I.
- Wood, E. F., Lettenmaier, D. P., Liang, X., Lohmann, D., Boone, A., Chang, S., Chen, F., Dai, Y., Dickinson, R. E., Duan, Q., Ek, M., Gusev, Y. M., Habets, F., Irannejad, P., Koster, R., Mitchell, K. E., Nasonova, O. N., Noilhan, J., Schaake, J., Schlosser, A., Shao, Y., Shmakin, A. B., Verseghy, D., Warrach, K., Wetzel, P. J., Xue, Y., Yang, Z. L., Zeng, Q. - 1998. The project for intercomparison of land-surface parametrization schemes (PILPS) phase 2(c) Red-Arkansas River basin experiment: 1. Experiment description and summary intercomparisons. *Global & Planetary Change*. 19: 115-135.

## 10.2 Matériel

- Campbell Scientific, INC. (1993) Dataloggers and data acquisition systems for Environmental and Water Resources. CR10 Measurement and Control Module, Operator's Manual. 148 p.  
(<http://www.campbellsci.co.uk>, <http://www.campbellsci.com> )
- Campbell Scientific, INC. (2000) CR23X Micrologger, Operator's Manual. 200 p.
- Geonor AS. (1995) Precipitation gauge T-200B ; User manual. Roa, Norway. 33 p.  
(<http://www.geonor.com/leakage.html> )
- Hukseflux (1999) Hukseflux Thermal Sensor (<http://www.hukseflux.com> )
- Hobo, Société Onset : ([http://www.onsetcomp.com/Products/3648\\_event.html](http://www.onsetcomp.com/Products/3648_event.html) )
- Kipp & Zonen : CNR1, Net Radiometer (<http://www.kippzonen.com/product/cnr1.html> )
- Schenk Dual Pyranometer & Pyrriometer : (<http://www.schenk.co.at/schenk/> )
- Vaisala Measuring the environment : (<http://www.vaisala.com/> )

## 11 Annexes

### 11.1 Annexe 1 : Exemple de compte rendu de visite à la station Charquini (page 1 / 2)

**Visite stat. PNRH, mar 22/01/2002 (n°17) jourJulien : 22**

Heure d'arrivée à la station = 9h50                      Heure de départ      11h55

Participants : Yann L'Hôte et Rolando Fuertes

#### 1. Description de la couverture neigeuse

➤ Dans l'enclos

hauteur de neige s'il y en a : 3 cm

Homogénéité de la répartition de la neige : recouvrement à 50% environ

Caractère représentatif de l'enclos par rapport à l'ensemble du BV : OUI, bien qu'il y ait toujours un peu plus de neige dans l'enclos (pente plus faible) qu'à l'extérieur.

Etat de la neige, degré de transformation : humide

Il y a 2cm environ de neige sur les 2 Fluxmètres 383 et 384 (repérés par des morceaux de fil électrique plantés à proximité).

➤ Sur l'ensemble du bassin versant

Estimation de l'altitude de la limite de la neige : il y a de la neige à la Plataforma

Répartition de la neige (asymétrie versants N-E & N-W) : il y a plus de neige sur versant NE

#### 2. Conditions météorologiques :

➤ Nébulosité (échelle de 1 à 10) : 10/10, brouillard, visibilité assez éloignée : 600 mètres à 1km.

➤ Altitude de la limite inférieure des nuages (s'ils sont au niveau des montagnes) : sans objet

➤ Vent, direction et vitesse : NW à NE, faible voire calme à l'arrivée ; Idem au départ

➤ - Arrivée à la Plataforma à 09h10 ; déplacement à la station sous chute de neige : flocons légers, puis de + en + "lourds" ; arrêt chute de neige vers 09h55.

#### 3. Etat des capteurs de mesure :

Ventilation du Vaisala fonctionne normalement : OUI

La hauteur des capteurs est normale : sans objet

Les horloges des deux stations sont synchrones : voir CR du 15-01-2002

➤ Centrale Cr10 (programme Sa-Pnrh1) ; scrutation des valeurs : OK, début à 10h00

1- batterie (V) = 12.61

2- Vit vent (m/s) = 0.935

3- Dir vent (°) = 300

4- Humidité relative (%) = 94.5

5- Tempé air ventilée (°C) = 0.87

6- SW<sup>↓</sup> incid. (W.m<sup>-2</sup>) = 316.5

7- SW<sup>↑</sup> réfl. (W.m<sup>-2</sup>) = 71.2

8- Albédo (%) = 0.22

9- LW<sup>↓</sup> incid. (W.m<sup>-2</sup>) = 382.5

10- LW<sup>↑</sup> émis (W.m<sup>-2</sup>) = 377.3

11- Rn (W.m<sup>-2</sup>) = 632.1      [Calcul : 250]

Données Cr10 récupérées sur Storage Module (SM) (oui, non) : OUI

T.S.V.P

## Annexe 1 (fin) : Compte rendu de visite à la station Charquini (page 2 / 2)

➤ Centrale Cr23X (programme PNRH-02d) ; scrutation des valeurs : OK, début à 10h05

1- Batterie (V) = 12.4	6- Tempé air non ventilée = 1.28
2- Géonor (mm) = 469.6	7- T_0 (flux 383) (°C) = 1.71
3- Sonde (mm) = 1155.4	8- T-10 (°C) = 1.79
4- Flux 383 (W.m <sup>-2</sup> ) = -34.54	9- T-20 (°C) = 2.14
5- Flux 384 (W.m <sup>-2</sup> ) = -43.17	10- T-50 (°C) = 2.76
	11- T_0b (flux 384) (°C) = 0.92

Données Cr23 récupérées sur Storage Module (SM) (oui, non) : OUI

### 4. Travaux effectués à la station :

- Dégagement neige sur les panneaux solaires (2cm en cours de fonte)

#### CALIBRAGE ET VIDANGE DU GEONOR :

Vérification du tarage : n'ayant pas d'éprouvette, nous prenons un fond de bouteille d'eau minérale en plastique avec marque ; arrivé au bureau cette quantité d'eau versée est mesurée (4 essais) à 425 cm3, soit 21.14mm de pluie sur une bague de 201.06cm2 (21.3 sur 200 cm2).

- Avec 2 relevés sur la centrale Cr23x avant et après vidage des 425cc dans le Géonor, on lit : 20.56mm de pseudo pluie.

- Le rapport des 2 mesures est de :  $21.14 / 20.56 = 1.028$  ; il faudrait multiplier les relevés du Géonor par cette valeur. Toutefois celle-ci est négligeable (2.8%) devant nos défauts d'expérimentation (bouteille plastique) et ne doit évidemment pas être prise en considération.

Quoi qu'il en soit, la question de la différence de mesure du GEONOR et du HOBO reste entière : le HOBO donne 25% de pluie en plus que le GEONOR.

#### Vidange et remplissage du Géonor :

Avec une lecture à 470mm de pluie, nous trouvons le niveau des produits (huile surnageant) à environ 5cm du bord du seau (Oyonnax). Il est temps de changer les produits antigels + huile.

----> Après vidange, dans un bidon qui sera rapporté à La Paz pour essayer de trouver un service (Université) qui saura nous guider pour le retraitement, on lit sur la centrale Cr23x :

- 37.40 pseudos millimètres de pluie (seau non en place).

----> Remplissage des deux alcools : méthanol (1litre) et éthylène glycol (0.7 litre), soit une possibilité de descendre à environ -6 à -7°C. On lit alors sur la centrale :

+ 72.90 pseudo millimètres de pluie

----> Remplissage d'environ 450cm3 d'huile 5W30. On lit alors (moyenne de 7 lectures) :

+ 89.90 pseudo millimètres de pluie. C'est à cette valeur que va débiter le cumul des pluies réelles.

### 5. Lors de la prochaine visite :

Après vérification des horaires des photos au bureau : remettre l'appareil photo à l'heure.

Rédacteur : Yann L'Hôte

\*\*\*\*\*

## 11.2 Annexe 2 : Fiches descriptives des planches à neige

Voici d'ouest en est (Cf. Figure 18), les noms et les situations des planches à neige d'après une première description faite lors de leurs poses, puis par des mesures au GPS<sup>8</sup> le 9 avril 2002, enfin une description topographique des sites et quelques remarques d'exploitation si nécessaire :

- Planche à neige « Huayna Potosi »

- A l'ouest (270°) de la station météorologique<sup>9</sup>, à 260 mètres en suivant le Canal Prado et à une altitude d'environ sept mètres en dessous du canal.
- Situation au GPS : 16° 17' 11,6" Sud et 068° 06' 38,7" Ouest, altitude 4796 m
- Cette planche est installée en rive droite d'un petit versant affluent du torrent sortant du Glacier Charquini. La pente du sol mesurée à la planche est de 17° avec une orientation ouest. Le versant local sur la partie amont de la planche a une pente de 25°.
- Volée à une date comprise entre le 20 mars et le 3 avril 2003 ; la planche a été remplacée le 9 avril 2003 avec un écriteau expliquant sa fonction ; ce dernier semble avoir été lu et compris puisqu' aucun vol ultérieur n'a été à déplorer.

- Planche à neige « station PNRH »

- Elle a été installée initialement à l'extérieur de l'enclos de la station météorologique sur le prolongement de la terrasse (pente de l'ordre de 5% vers le nord-ouest), à deux mètres du grillage, coté Nord-Ouest.
- Après avoir été volée à une date comprise entre le 20 mars et le 3 avril 2003, elle a été remplacée le 9 avril 2003 à l'intérieur de l'enclos, à environ 1,50 mètre à gauche de la porte d'entrée.
- Situation au GPS (identique à la station météorologique) : 16° 17' 11,3" Sud et 068° 06' 32,0" Ouest, altitude 4795 m.

- Planche à neige « Charquini »

- Implantée au sud-sud-est (154°) de la station météorologique, à 60 mètres de celle-ci, en suivant le chemin menant au Glacier. Elle se trouve à une altitude d'environ 12 mètres au dessus de la station, sur une petite terrasse d'orientation nord-ouest et de pente d'environ 5 à 7%.
- Situation au GPS : 16° 17' 12,8" Sud et 068° 06' 30,7" Ouest, altitude 4812 m.

- Planche à neige « Maman Kota »

- Elle est située au nord (5°) de la station météorologique, à 170 mètres de celle-ci, sur le sommet d'une petite ondulation de pente moyenne de 5° vers l'ouest.
- Situation au GPS : 16° 17' 06,0" Sud et 068° 06' 32,0" Ouest, altitude 4783 m.

---

<sup>8</sup> Rappelons que le GPS utilisé est rattaché au système géodésique WGS 84. Les coordonnées lues sur la carte au 1/50 000ème sont donc différentes ; Cf. note de bas de page du § 4.1.

<sup>9</sup> Le pluviographe Géonor est pris comme référence.

### 11.3 Annexe 3 : Relevés de trois des quatre planches à neige, le 04 février 2002

Site : Station PNRH					
Date:	02-02-04 / 11 :15	(02-mm-jj / hh :mn)	Observateurs:	PE	
Carottage vertical sur la planche (carottier 25 cm <sup>2</sup> )					
Hauteur de neige moyenne :	2.3	cm	Min :	/	Max :
Nombre de carottes	6				
Poids total des carottes	120 g				
Equivalent en eau moy. ; masse vol. moy.	8	mm	348 kg/m <sup>3</sup>		
Couverture neigeuse sur le site					
Fraction des surfaces enneigées	20 %				
HTN moyenne si fraction > 50%	/ cm				
Nature des surfaces enneigées	Végétation rase				
Sondage effectué sur site	NON				
Commentaires, observations...					

Site : Laguna Mama Kota (Nord)					
Date:	02-02-04 / 10 :35	(02-mm-jj / hh :mn)	Observateurs:	PE, YLe	
Carottage vertical sur la planche (carottier 25 cm <sup>2</sup> )					
Hauteur de neige moyenne :	2,7	cm	Min :	/	Max :
Nombre de carottes	6				
Poids total des carottes	115 g				
Equivalent en eau moy. ; masse vol. moy.	7,7	mm	285 kg/m <sup>3</sup>		
Couverture neigeuse sur le site					
Fraction des surfaces enneigées	60 %				
HTN moyenne si fraction > 50%	cm				
Nature des surfaces enneigées	Végétation rase				
	Sols sableux				
Sondage effectué sur site	NON				
Commentaires, observations...					
Sur le site les surfaces inondées étaient déneigées					

Site : Huayna Potosi (Ouest)					
Date:	02-02-04 / 11 :40	(02-mm-jj / hh :mn)	Observateurs:	PE	
Carottage vertical sur la planche (carottier 25 cm <sup>2</sup> )					
Hauteur de neige moyenne :	1.8	cm	Min :	1.6	Max :
Nombre de carottes	6				
Poids total des carottes	98 g				
Equivalent en eau moy. ; masse vol. moy.	6.5	mm	361 kg/m <sup>3</sup>		
Couverture neigeuse sur le site					
Fraction des surfaces enneigées	30 %				
HTN moyenne si fraction > 50%	/ cm				
Nature des surfaces enneigées	Végétation rase				
Sondage effectué sur site	NON				
Commentaires, observations...					

## 11.4 Annexe 4 : Inventaire des mesures de densité de la neige

lieu : planche ou station	date-heure début mesure	hauteur moyenne neige sur planche (cm)	équivalent en eau (mm)	DENSITE mesurée (kg/m <sup>3</sup> )	% recouvrement sol alentour	observations	opérateurs	A la station météo	
								T° air ventilée lors des mesures hh:mn et °C	date-heure fin neige au Géonor
stat. météo	18/1/02 9:50	6,0	13,2	220	90%	au sol, 2 couches	YLh	10:00 0.5	18/1/02 9:30
pl M. Kota	4/2/02 10:35	2,7	7,7	285	60%		PE & YLe	10:30 1.6	4/2/02 8:30
pl. PNRH	4/2/02 11:15	2,3	8,0	348	20%		PE	11:00 1.9	4/2/02 8:30
pl Huayna	4/2/02 11:40	1,8	6,5	361	30%		PE	12:00 2.7	4/2/02 8:30
pl Charquini	4/2/02 12:15	1,4	5,1	364	3%		PE	12:30 3.2	4/2/02 8:30
pl. PNRH	3/3/02 12:10	5,4	20,0	370	50%		YLh PC JN	12:00 3.3	3/3/02 8:00
pl M. Kota	3/3/02 12:30	3,9	15,0	385	35%		YLh PC JN	12:30 2.2	3/3/02 8:00
pl Charquini	3/3/02 13:00	4,4	14,6	333	25%		YLh PC JN	13:00 1.3	3/3/02 8:00
pl Huayna	3/3/02 13:30	4,8	17,4	363	70%		YLh PC JN	13:30 1.6	3/3/02 8:00
pl Huayna	5/3/02 9:50	1,6	6,8	436	0%	(fonte - regel)	YLh & RG	10:00 3.0	4/3/02 15:00
pl. PNRH	5/3/02 10:20	1,3	8,0	615	0%	(fonte - regel)	YLh & RG	10:00 3.0	4/3/02 15:00
pl M. Kota	5/3/02 10:40	0,9	4,0	444	0%	(fonte - regel)	YLh & RG	10:30 2.4	4/3/02 15:00
pl M. Kota	11/4/02 11:10	2,5	9,8	391	70%	Granizo*	YLh & JArgo	11:00 3.6	10/4/02 15:30
pl Charquini	11/4/02 11:30	3,6	21,8	605	60%	Gr* + fonte-regel	YLh & JArgo	11:30 3.3	10/4/02 15:30
pl M. Kota	18/4/02 10:57	1,6	6,3	394	50%	(fonte - regel)	YLh & PW	11:00 2.7	18/4/02 9:00
pl Huayna	26/4/02 7:47	1,0	1,3	126	50%	neige fraîche	YLh	8:00 (-0.15) **	26/4/02 4:30
pl. PNRH	26/4/02 8:10	0,9	1,2	138	35%	neige fraîche	YLh	8:00 (-0.15) **	26/4/02 4:30
pl M. Kota	26/4/02 8:40	0,35	0,9	252	10%	Fonte - regel	YLh	8:30 (+0.5) **	26/4/02 4:30

\* grêle, grêlons de diamètres variant entre 0,2 et 1,0 cm.

\*\* (-0.15) température de l'air non ventilée, la T° ventilée n'étant pas mesurée.

## 11.5 Annexe 5 : Relevés des masques solaires ; angles donnés en degrés

<b>Masques solaires sur sites planches</b>				
azim ut	site			
	Station PNRH	Mama Cota	Charquini	Huayna Potosi
0	2	4	2	2
10	5	6	5	3
20	7	9	7	6
30	9	10	8	9
40	10	12	10	18
50	10	11	10	16
60	11	11	14	17
70	14	13	16	19
80	18	19	19	14
90	23	19	24	17
100	27	20	28	18
110	26	24	25	21
120	25	25	23	19
130	22	22	22	30
140	21	20	21	40
150	21	20	20	44
160	21	19	21	43
170	31	18	23	43
180	29	19	24	44
190	34	18	24	44
200	31	20	25	40
210	26	19	24	44
220	22	18	23	45
230	19	17	20	33
240	19	16	19	42
250	17	14	19	42
260	17	13	14	49
270	13	11	11	44
280	9	8	9	28
290	11	12	11	27
300	13	14	13	23
310	14	12	14	20
320	11	11	11	16
330	3	3	3	14
340	2	2	0	10
350	0	4	1	2
360	2	4	2	2

## 11.6 Annexe 6 : Description et analyses de la fosse pédologique sur le site PNRH

*Date* : 3/3/02 entre 14h00 et 15h30.

*Temps* : couvert, très humide (faibles précipitations pluvieuses par moment).

*Pente* : moins de 5°.

*Végétation* : herbes et mousse rases couvrant moins de 30% de la surface.

*Localisation de la fosse* : dans l'enclos de la station climatologique à environ 30 cm des capteurs de température enterrés et à proximité de la base du pluviographe Géonor ; profondeur maximum 35 cm atteignant un niveau saturé en eau à 27 cm

*Type de sol retenu* : ranker, peu évolué, peu épais, à gley de profondeur, hydromorphe. Les marbrures en profondeur témoignent de transferts latéraux d'eau.

0 < 2 cm	Couleur : 5YR 2,5/1 (noir). Echantillon (1) pour analyse granulométrique Horizon organique avec forte concentration racinaire. Présence d'une croûte en surface : pellicule horizontale de type MOPS avec petits points blancs
2 < 10 cm	Couleur : 5YR 3-4/3 (brun rougeâtre). Echantillon (2) pour analyse granulométrique Horizon humifère de transition, très riche en racines Sol à porosité élevée : dimension macropores entre 1 – 2 mm Présence de sables grossiers Présence d'une couche à faible cohésion contenant des grains de sable grossier (Couleur : 5YR 8 / 1 - blanc)
10 < 27 cm	Couleur : 10YR 6/4 (brun légèrement jaunâtre) - présence de marbrures de couleur 5YR 6/6 (jaune rougeâtre) Echantillon : boîte (3a) entre 10 et 15 cm : analyses et densité apparente si possible. Echantillon : boîte (3b) entre 19 et 23 cm. Sol argileux – sableux avec racines jusqu'à 20 cm Porosité plus faible que couche 2
27 cm	Niveau de zone saturée

NB : les couleurs sont à rapporter au Code Munsell et sont prises sur des échantillons humides.

*Autres relevés de couleurs* :

- Sous emplacement Kipp and Zonen : 5YR 2,5/2 (brun rougeâtre sombre)
- Au-dessus du capteur flux sol 384 : 5YR 2,5/2 (brun rougeâtre sombre)
- Au-dessus du capteur flux 383 : 10YR 7/2 (gris léger) et 10YR 3/4 (brun jaunâtre sombre)

Analyses effectuées par le Laboratoire d'analyses du CIRAD – AMIS / Agronomie de Montpellier :

N° d'échantillon	1	2	3a	3b
profondeur (cm)	0 – 2	2 - 10	10 - 15	15 - 23
Granulométrie standard, en %				
Argiles ( < 2 µm)	12.8	4.6	1.0	1.0
Limons fins ( 2 à 20 µm)	15.1	12.4	11.4	11.9
Limons grossiers (20 à 50 µm)	12.0	10.5	10.8	11.9
Sables fins (50 µm à 0,2 mm)	19.5	19.9	22.3	25.9
Sables grossiers (0,2 à 2 mm)	40.7	52.6	54.5	49.2
somme	100.1	100.0	100.0	99.9
Matière organique, en %				
Matière orga. (perte au feu à 480°C)	32.69	2.91	0.71	0.41
Carbone organique analyseur <sup>10</sup>	18.96	1.69	0.41	0.24

<sup>10</sup> Analyseur de marque Thermoquest

## 11.7 Annexe 7 : Description et analyses de la fosse pédologique « planche à neige Huayna Potosi »

Date : 5/3/02 entre 10h00 et 11h30

Temps : couvert, sans précipitation, restes épars de neige

Pente : de l'ordre de 10 à 15°

Végétation : couvrant de 50 à 60% de la surface totale. Mousse + herbe rase (quelques centimètres), massif de petits arbustes (espèces à fleurs ou sans fleurs) de 40 à 50 cm de hauteur avec environ un plan pour 2 à 3 m<sup>2</sup>

Localisation de la fosse : environ 2 m de la planche à neige (en direction de l'ouest) ; profondeur maximum 50 cm

Type de sol retenu : ranker, bien drainé, colluvial, sableux.

0 < 2 cm	Couleur : 5YR 2,5/2 (brun rougeâtre sombre). Echantillon (5) pour analyses. Sol humifère riche en MO ; beaucoup de racines.
2 < 10 cm	Couleur : 2,5YR 3/2 (rouge foncé). Echantillon (6) pour analyse granulométrique. Beaucoup de racines très fines, plus rouge que l'horizon précédent. Quelques graviers blancs. Sable grossier. Macroporosité importante de taille millimétrique.
10 < 20 cm	Couleur : 10R 3/2 (rouge foncé). Echantillon : boîte (7) entre 10 et 18 cm pour analyse granulométrique et éventuellement densité apparente (présente un gravier de plusieurs centimètres qui risque d'être perturbateur). Matrice plus compacte que l'horizon précédent (porosité apparente bcp plus fine). Densité de racines beaucoup plus faible, mais de tailles plus grosses.
20 < 40 cm	Couleur : 5YR 3/1 (gris très sombre). Echantillon (8) pour analyse granulométrique. <i>Idem</i> précédent. Profondeur max des racines 40 cm. Avec gravillons plus gros atteignant jusqu'à 2 cm.
> 40 cm	Couleur : 5YR 3/1 (gris très sombre) Boîte (9) entre 40 et 45 cm pour analyse granulométrique et densité apparente. Gravillons grossiers. Texture très sableuse avec macroporosités. Structure moins compacte.

NB : les couleurs sont à rapporter au Code Munsell et sont prises sur des échantillons humides.

Analyses effectuées par le Laboratoire d'analyses du CIRAD – AMIS / Agronomie de Montpellier :

N° d'échantillon	5	6	7	8	9
profondeur (cm)	0 – 2	2 - 10	10 - 20	20 - 40	> 40
Granulométrie standard, en %					
Argiles (< 2 µm)	11.7	11.7	9.7	12.1	7.5
Limons fins (2 à 20 µm)	19.2	19.3	18.3	16.7	22.1
Limons grossiers (20 à 50 µm)	12.1	11.7	11.9	11.8	12.2
Sables fins (50 µm à 0,2 mm)	18.7	18.5	17.8	15.5	16.2
Sables grossiers (0,2 à 2 mm)	38.1	38.7	42.3	44.0	42.1
somme	99.8	99.9	100.0	100.1	100.1
Matière organique, en %					
Matière orga. (perte au feu à 480°C)	13.81	9.64	12.38	7.91	4.81
Carbone organique analyseur <sup>11</sup>	8.01	5.59	7.18	4.59	2.79

<sup>11</sup> Analyseur de marque Thermoquest

## 11.8 Annexe 8 : Exposé détaillé et algorithmique de la méthode d'évaluation des phases des précipitations pour les cas difficiles

### Paramètres déterminants :

Sont considérés comme *paramètres déterminants* :

Le flux de sol **flux383** et sa variation entre la fin et le début du pas de temps  $\Delta\text{flux383}$ .

L'intensité de la précipitation **IntRR**.

La radiation de grandes longueurs d'ondes émise par la surface **LW↑** et sa variation entre la fin et le début du pas de temps  $\Delta\text{LW↑}$ .

La température de surface du sol **T0** et sa variation entre la fin et le début du pas de temps  $\Delta\text{T0}$ .

L'albédo seuillé **alb** et sa variation entre la fin et le début du pas de temps  $\Delta\text{alb}$  (albédo non encore seuillé à 1).

La température de l'air **T<sub>air</sub>** et sa variation entre la fin et le début du pas de temps  $\Delta\text{T}_{\text{air}}$ .

**NB** : Initialement, la température de l'air n'avait pas été retenue comme paramètre déterminant des cas difficiles. Par la suite, afin d'améliorer l'estimation, il a été essentiel de tenir compte des valeurs prises par la température de l'air dans la plage  $[-1^{\circ}\text{C}, +3^{\circ}\text{C}]$  ainsi que de ses variations sur le pas de temps.

### Schéma algorithmique :

#### 1) *Incrémentation des compteurs filtres*

##### • 1.1) *Pas de précipitation ou pluie au pas de temps précédent*

*poidsmaxinitial* = 15

##### a) *filtre absolu*

*filtre absolu* = 0

Flux de sol :	si <b>flux383</b>	≤	20 W/m <sup>2</sup>	<i>filtre absolu</i> = <i>filtre absolu</i> + 1,5
$\Delta$ Flux de sol :	si <b><math>\Delta\text{flux383}</math></b>	<	-15 W/m <sup>2</sup>	<i>filtre absolu</i> = <i>filtre absolu</i> + 1,0
Intensité de la RR	si <b>IntRR</b>	≥	0,5 mm	<i>filtre absolu</i> = <i>filtre absolu</i> + 0,5
Température sol :	si <b>T0</b>	≤	1,5°C	<i>filtre absolu</i> = <i>filtre absolu</i> + 1,0
$\Delta$ Température sol :	si <b><math>\Delta\text{T0}</math></b>	<	-1,5°C	<i>filtre absolu</i> = <i>filtre absolu</i> + 1,0
Radiation LW↑ :	si <b>LW↑</b>	≤	319 W/m <sup>2</sup>	<i>filtre absolu</i> = <i>filtre absolu</i> + 2,0
$\Delta$ Radiation LW↑ :	si <b><math>\Delta\text{LW↑}</math></b>	≤	-15 W/m <sup>2</sup>	<i>filtre absolu</i> = <i>filtre absolu</i> + 1,0
$\Delta$ Albedo :	si <b><math>\Delta\text{alb}</math></b>	>	0,1	<i>filtre absolu</i> = <i>filtre absolu</i> + 2,0

##### b) *filtre majorant*

*filtre majorant* = 0

Albedo :

si <b>alb</b>	>	1	<i>filtre majorant</i> = <i>filtre majorant</i> + 4,0
sinon			<i>poidsmaxinitial</i> = <i>poidsmaxinitial</i> - 4,0

$\Delta\text{T}_{\text{air}}$  (pour  $\text{T}_{\text{air}} \in ]+1,5^{\circ}\text{C}, +3^{\circ}\text{C}[$ )

si <b><math>\Delta\text{T}_{\text{air}}</math></b>	≤	-1,5°C	<i>filtre majorant</i> = <i>filtre majorant</i> + 1,0
sinon			<i>poidsmaxinitial</i> = <i>poidsmaxinitial</i> - 1,0

##### c) *filtre sélectif*

*filtre sélectif* = 0

Température de l'air :

si <b>T<sub>air</sub></b>	<	0°C	<i>filtre sélectif</i> = <i>filtre sélectif</i> + 2,5
si <b>T<sub>air</sub></b>	∈	[0°C, +2°C]	<i>filtre sélectif</i> = (-3,5/2) T <sub>air</sub> + 2,5
si <b>T<sub>air</sub></b>	>	+2°C	<i>filtre sélectif</i> = <i>filtre sélectif</i> - 1

• **1.2) Neige ou pluie et neige mêlées au pas de temps précédent**

$poidsmaxinitial = 14$

**a) filtre absolu**

$filtre\ absolu = 0$

Flux de sol :	si flux383	≤	0 W/m <sup>2</sup>	$filtre\ absolu = filtre\ absolu + 1,5$
Intensité de la RR	si IntRR	≥	0,5 mm	$filtre\ absolu = filtre\ absolu + 0,5$
Température sol :	si T0	≤	0,5°C	$filtre\ absolu = filtre\ absolu + 1,0$
Radiation LW↑ :	si LW↑	≤	319 W/m <sup>2</sup>	$filtre\ absolu = filtre\ absolu + 1,0$

**b) filtre majorant**

$filtre\ majorant = 0$

$\Delta$ Température sol pour T0(h et h-30) ≤ 0,5°C :

si $\Delta T0$	<	-0,5°C	$filtre\ majorant = filtre\ majorant + 1,0$
sinon			$poidsmaxinitial = poidsmaxinitial - 1,0$

$\Delta$ Radiation LW↑ pour LW↑(h et h-30) ≤ 319 W/m<sup>2</sup> :

si $\Delta LW\uparrow$	≤	-10 W/m <sup>2</sup>	$filtre\ majorant = filtre\ majorant + 1,0$
sinon			$poidsmaxinitial = poidsmaxinitial - 1,0$

Albedo :

si alb	>	1	$filtre\ majorant = filtre\ majorant + 4,0$
sinon			$poidsmaxinitial = poidsmaxinitial - 4,0$

$\Delta$ Albedo pour alb(h et h-30) ≤ 1:

si $\Delta alb$	>	0,05	$filtre\ majorant = filtre\ majorant + 2,0$
sinon			$poidsmaxinitial = poidsmaxinitial - 2,0$

$\Delta$ Flux de sol :

si $\Delta flux383$	<	-10 W/m <sup>2</sup>	$filtre\ majorant = filtre\ majorant + 1,0$
sinon			$poidsmaxinitial = poidsmaxinitial - 1,0$

$\Delta$ Tair (pour tair ∈ ]+1,5°C,+3°C[

si $\Delta T_{air}$	≤	-1,5°C	$filtre\ majorant = filtre\ majorant + 1,0$
sinon			$poidsmaxinitial = poidsmaxinitial - 1,0$

**c) filtre sélectif**

$filtre\ sélectif = 0$

Température de l'air :

si T <sub>air</sub>	<	0°C	$filtre\ sélectif = filtre\ sélectif + 2,5$
si T <sub>air</sub>	∈	[0°C,+2°C]	$filtre\ sélectif = (-3,5/2) T_{air} + 2,5$
si T <sub>air</sub>	>	+2°C	$filtre\ sélectif = filtre\ sélectif - 1$

**2) Ratio filtre final / poidsmax et détermination de la phase**

$$filtre\ final = filtre\ absolu + filtre\ majorant + filtre\ sélectif$$

Si :  $filtre\ final / poidsmax < 1/4 \Rightarrow$  phase = pluie

Si :  $filtre\ final / poidsmax > 2/3 \Rightarrow$  phase = neige

Sinon :  $\Rightarrow$  phase = pluie et neige mêlées (50% pluie + 50% neige).

