

**INFORME N°1 , ANNEE 2002
IRD – BOLIVIE**



Glacier Zongo, juillet 2000, photo B. POUYAUD

**MESURES METEOROLOGIQUES, HYDROLOGIQUES ET
GLACIOLOGIQUES SUR LE GLACIER DU ZONGO**

ANNEE HYDROLOGIQUE 2000-2001

A. RABATEL (IRD)
E. BERTHIER (IRD)
A. SORUCO (IRD)
J.P. CHAZARIN (IRD)
R. GALLAIRE (IRD)
R. FUERTES (IRD)
P. RIBSTEIN (IRD)
P. WAGNON (IRD)
B. FRANCOU (IRD)
H. BALDIVIESO (COBEE)

Décembre 2002

SOMMAIRE

A. INTRODUCTION.	2
B. LE BASSIN VERSANT DU ZONGO ET SON EQUIPEMENT.	4
C. TEMPERATURE DE L'AIR.	16
C.1. Températures mensuelles.	16
C.2. Températures annuelles.	18
D. PRECIPITATIONS.	20
D. 1. Précipitations mensuelles.	20
D. 2. Précipitations annuelles.	21
E. BILAN RADIATIF.	24
E.1. Notations et données disponibles.	24
E.2. Moyennes journalières.	24
E.3. Radiation nette et albédo mensuels.	33
F. DEBITS.	35
F.1. Débits journaliers.	35
F.2. Débits mensuels.	35
F.3. Débits annuels et bilan de masse hydrologique du glacier.	37
G. PRESSION DE VAPEUR D'EAU.	38
G.1. Moyennes demi-horaires.	38
G.2. Moyennes journalières à 4750 et 5150 m.	39
G.3. Moyennes mensuelles.	40
H. VITESSE ET DIRECTION DU VENT.	41
H.1. Valeurs instantanées.	41
H.2. Valeurs journalières à 4750, 5040 et 5150 m.	45
H.3. Valeurs mensuelles à 4750 m, 5040 et 5150 m.	46
I. MESURE DE LA SONDE A ULTRASONIDO A 5150 M.	48
J. GLACIOLOGIE.	50
J.1. Le dispositif d'évaluation du bilan de masse du glacier Zongo.	50
J.2. L'accumulation mesurée en fin d'année hydrologique.	50
J.3. Le bilan de masse du glacier Zongo.	54
J.4. Comparaison entre les glaciers Zongo et Chacaltaya.	57
J.5. Topographie.	59
K. CONCLUSION.	61
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.	62

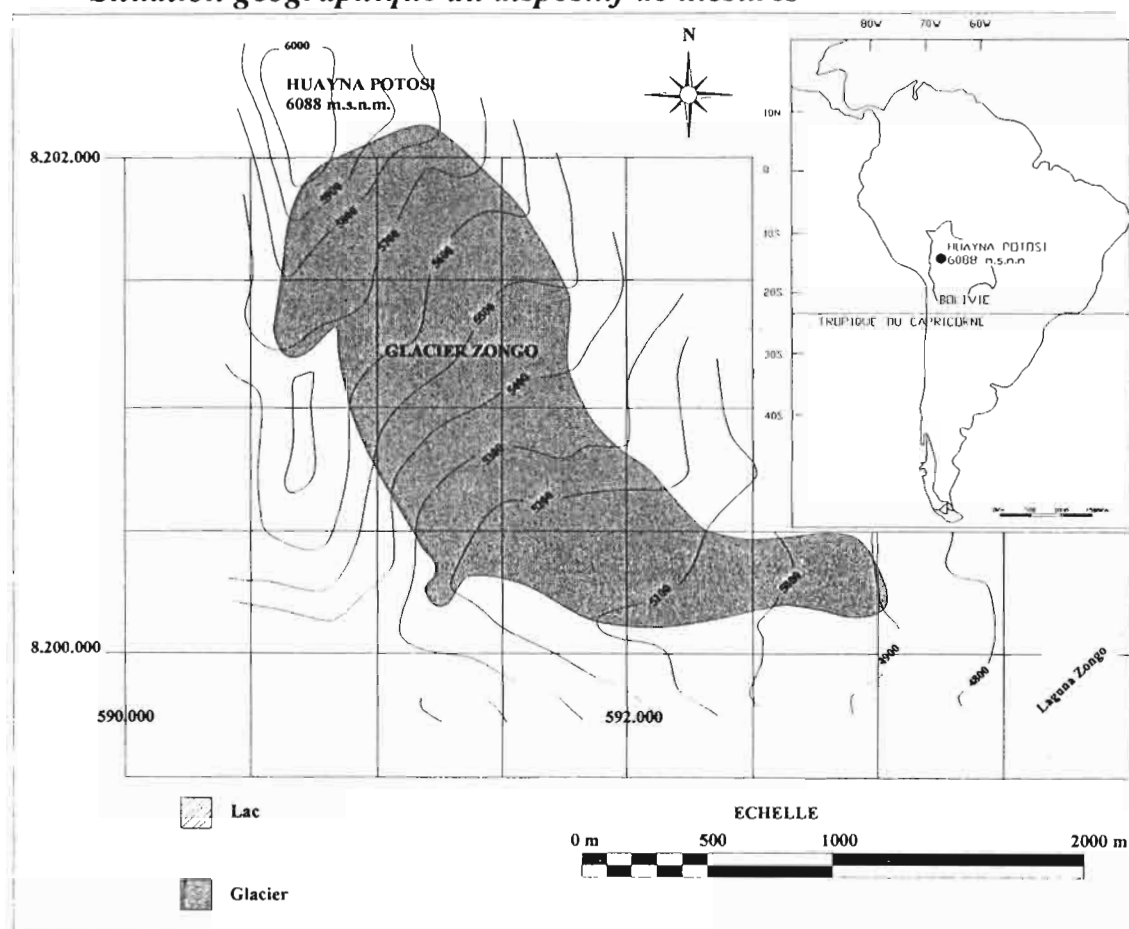
A. INTRODUCTION.

Ce rapport d'activité présente les mesures météorologiques, hydrologiques et glaciologiques effectuées dans le bassin versant du glacier du Zongo du 1^{er} septembre 2000 au 31 août 2001. Toutes les données brutes étant maintenant disponibles sur CDROM, il a été décidé de faire un rapport plus condensé que les précédents.

Le plan suivi s'inspire du rapport d'Etienne Berthier et al. (2001) intitulé « Mediciones meteorológicas, hidrológicas y glaciológicas sobre el Glaciar Zongo ; Años hidrológicos 1998-1999 y 1999-2000 ».

Ci-dessous nous présentons les caractéristiques générales du glacier Zongo et l'évolution des conditions climatiques reconstituée pour l'année hydrologique à partir des notes de terrain (Cf. Tableau A.1).

Situation géographique du dispositif de mesures



Nom du glacier : **Zongo**

Pays : **Bolivie**

Position : **Huayna Potosi - Cordillère Royale**

Coordonnées : **16°15'S 68°10'W**

Surface du bassin versant étudié : **3 km²**

Surface englacée : **2.1 km²**

Altitude du bassin : **comprise entre 6000 et 4830 mètres d'altitude.**

Exposition générale : **Sud dans la partie haute, sud-est dans la partie basse.**

Début du programme d'étude : **1991**

Evolution des conditions climatiques dans le bassin versant du glacier du Zongo.

Date	Matin	Après midi	Etat de surface du glacier à 5150m
<u>Septembre</u> 08	Beau (n=0)	Beau (n=1)	neige : gros grains sur 7cm, formation de pénitents neige : comme du sel
19	Couvert (n de 7 à 10)	\	
<u>Octobre</u> 12	Beau (n=3)	Très couvert (n=10) faibles précipitations neigeuses	25 cm de neige fraîche
24	Très couvert (n=10) un peu de neige	\	20 à 30 cm de neige en début de transformation croûte qui ne porte pas toujours
<u>Novembre</u> 10	Très couvert (n=10)	\	10 cm de neige transformée, gros grain Sale, ouverture de crevasses autour de la station
21	Très couvert (n entre 8 et 10)	\	
<u>Décembre</u> 07	Beau (n entre 0 et 2)	Très couvert (n=10), grésil, neige	15 à 25 cm de neige fraîche sur tout le glacier 5 cm de fraîche
18	½ couvert (n=4)	\	
<u>Janvier</u> 04	Très couvert (n=10)	Très couvert (n=10), neige	40 à 50 cm de neige fraîche Neige fraîche sur l'ensemble du glacier (1 m.) Neige fraîche sur glacier, très légère transformation
19	Très couvert (n=10)	Très couvert (n=10) neige	
30	Très couvert (n=10)	Très couvert (n=10) neige	
<u>Février</u> 07	Beau (n=2)	Beau (n=2)	
08	Beau (n=2-3)	Couvert (n=7)	Croûte de quelques cm qui porte 2 cm de neige fraîche de la nuit déjà transformée.
22	Couvert (n=8)	Très couvert (n=10), grésil puis neige	
<u>Mars</u> 08	Très couvert (n=10)	Très couvert (n=10) neige	Neige transformée Neige transformée assez lourde et humide Neige fraîche la matin à 8h, transformation rapide
20	Couvert à très couvert (n=4 à 10)	\	
29	Beau à ½ couvert (n de 2 à 5)	\	
<u>Avril</u> 20	Beau (n=1)	\	1 mm de grésil de la veille qui recouvre une neige à gros grain transformée Pas info, visite exceptionnelle pour vidéo M6
29	\	\	
<u>Mai</u> 17	Très couvert (n=10 puis 8)	\	Neige transformée par le vent surface en cours de transformation \
29	Beau (n=0)	Beau (n=1 à 3)	
30	Beau (n=2)	½ couvert (n=4 à 6)	
<u>Juin</u> 13	Beau (n=1 à 2)	\	Surface très rugueuse \ 25 cm de neige fraîche
15	Beau (n=0)	\	
23	Beau (n=1)	Beau (n=1)	
<u>Juillet</u> 10	Beau (n=2)	\	30 cm de neige fraîche dont 4 cm de croûte en cours de transformation Alternance de zones d'accu (30 cm de poudreuse surmontée d'une petite croûte transformée, et de zones de pénitents en formation (10 cm environ)
24	Beau (n=0)	\	
<u>Août</u> 03	Beau (n=0)	Beau (n=0)	Développement de pénitent de 10 à 15 cm de haut 2-3 cm de neige fraîche 50 cm de neige tombés durant les 5 derniers jours Environ 30 cm de neige en cours de transformation
08	Beau (n=2)	Couvert (n=8)	
21	½ couvert (n=5)	Très couvert (n=10), grésil	
29	Beau (n=0) se dégradant	Très couvert à couvert (n=10 à 6)	

Tableau A.1 : Evolution des conditions climatiques dans le bassin versant du glacier Zongo pour l'année hydrologique 2000-2001 (sept-00 à août-01).

Les observations du Tableau A.1 sont effectuées lors des visites bimensuelles de récupération des données des stations météorologiques à 5150 et 5500 m sur le glacier du Zongo. Ces observations concernent donc la situation météorologique du bassin du Zongo entre 4750 m (Plataforma) et 5150 m ou 5550 m d'altitude.

B. LE BASSIN VERSANT DU ZONGO ET SON EQUIPEMENT.

Seul le dispositif de mesures météorologiques et hydrologiques est présenté ici, le dispositif de mesures glaciologiques étant détaillé dans le chapitre J.

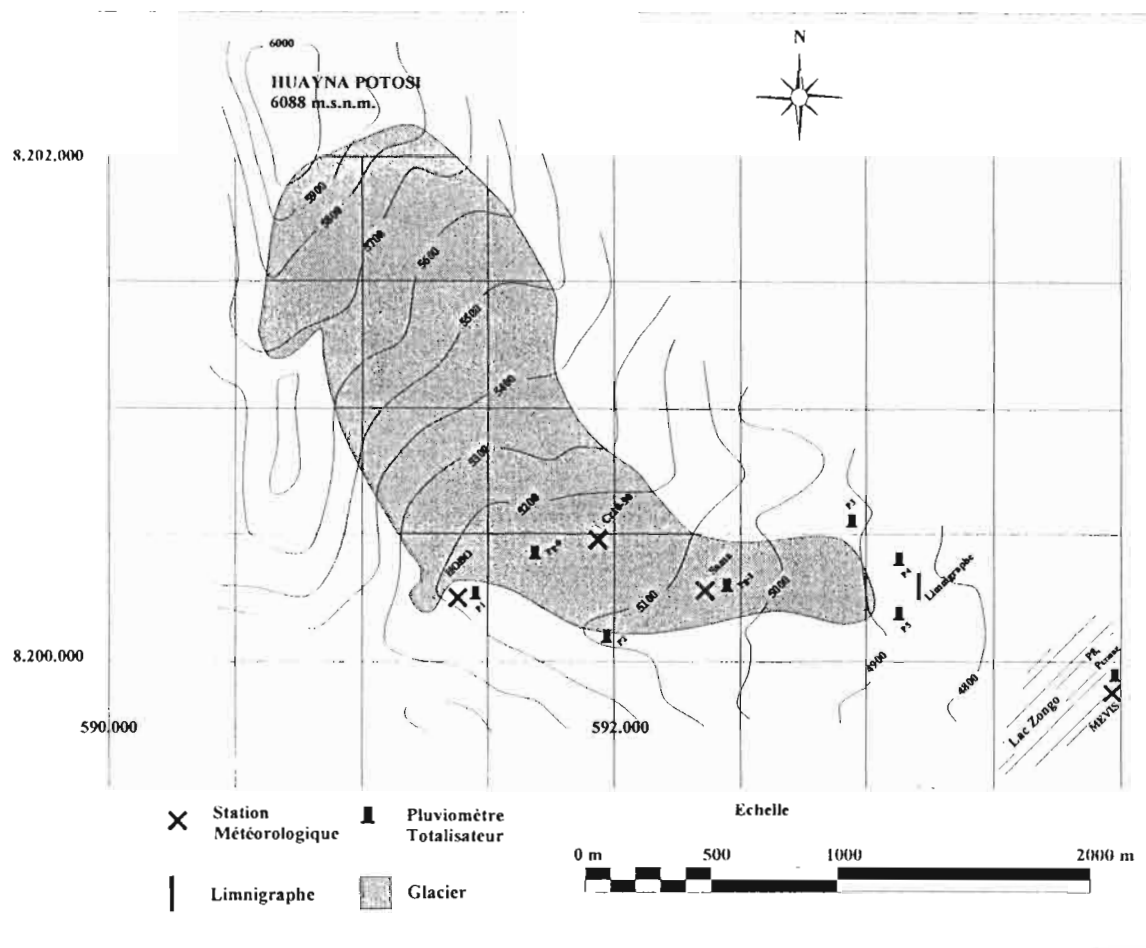


Figure B.1 : Dispositif des mesures météorologiques, hydrologiques dans le bassin versant du glacier du Zongo en 2000-2001 (d'après Sicart, 1996, modifié Soruco, Rabatel, 2002).

B. 1. Station pluviométrique à 4750 m d'altitude (Plataforma).

Nous disposons de données pluviométriques à la Plataforma Zongo située à environ 150 mètres de dénivellation sous le front du glacier.

Descriptif.

- Un pluviomètre de la COBEE (type Senamhi) relevé chaque jour par l'observateur de la COBEE. Ce relevé est effectué à 7h00 du matin, et les précipitations sont attribuées au jour précédent.
Diamètre : 19 cm.
- Un pluviomètre totalisateur relevé chaque mois.
Diamètre : 50.5 cm, hauteur : 100 cm, couleur noire.

Données recueillies.

- Pluie journalière à 4750 mètres, ainsi que des observations météorologiques (heure des précipitations, type de temps, nébulosité).
- Pluie mensuelle à 4750 mètres.

Lacunes dans les données.

Pas de lacunes cette année.

B. 2. Station météorologique Mévis à 4750 mètres (Plataforma).

Descriptif.

Il s'agit d'une station météorologique THIES-CLIMA modèle : DL15 V2.00 comportant les capteurs suivants :

- Sonde de **température** située à 190 cm du sol (marque : Thies, référence : Hygro-Thermogeber).
- Sonde d'**humidité relative** située à 190 cm du sol (marque : Thies, référence : Hygro-Thermogeber).
- **Pyranomètre** courtes longueurs d'ondes situé à 155 cm du sol, orienté vers le ciel (marque : Kipp and Zonen, référence : Pyranometer CM3, 7.1415.03.000).
- **Anémomètre** situé à 230 cm du sol (référence : Windgeber 4.3303.10.007).
- Sonde de température, Pt 100 située à un mètre de profondeur dans le sol (marque : inconnue, référence : Temperaturgeber, 2.1235.00.000).

L'alimentation en énergie est assurée par une batterie 12 V couplée à un panneau solaire (3W).

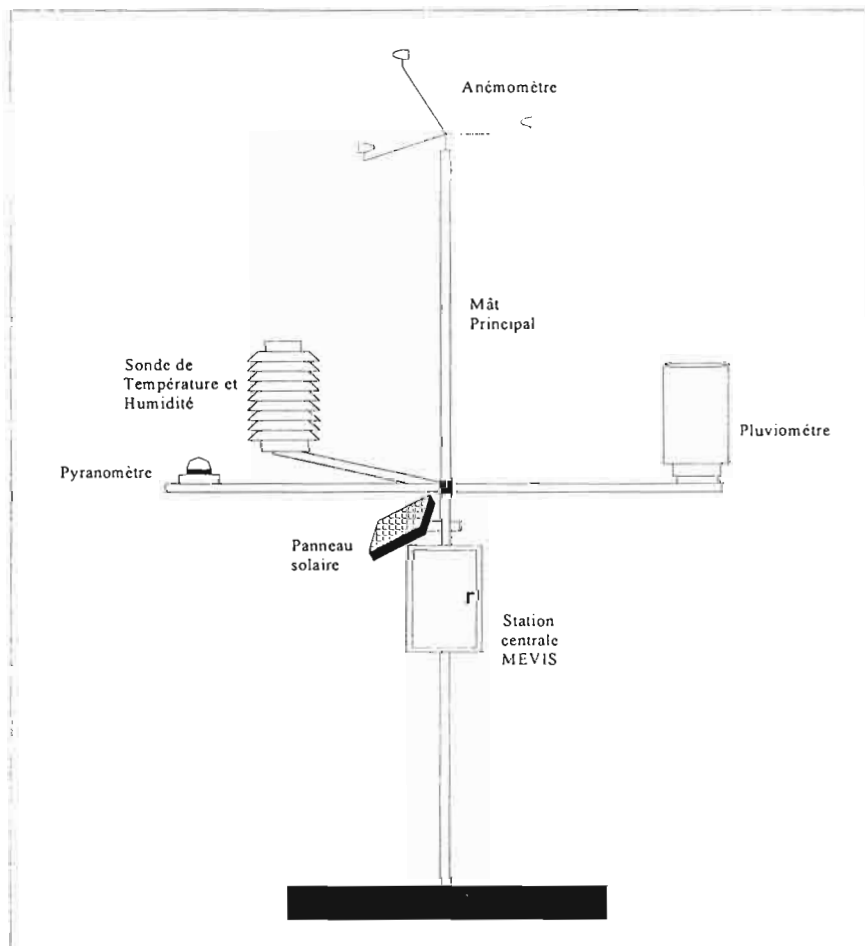


Figure B.2. Station Météorologique Mévis : 4750 m d'altitude.
(Soruco, Rabatel, 2002)

Données recueillies (moyenne demi-horaires et journalières).

- Température sèche de l'air à 190 cm du sol.
- Humidité de l'air à 190 cm du sol.
- Radiation solaire incidente.
- Vitesse du vent à 230 cm du sol.
- Température à un mètre de profondeur dans le sol.

Lacunes dans les données.

Pas de lacune dans les données.

Comme les années précédentes la présence d'eau constatée dans la coupole du pyranomètre a pu perturber la mesure.

Correction après recalibration.

Depuis l'année hydrologique 1997-98, et pour pallier à la perte du coefficient de sensibilité du pyranomètre, une correction (fondée sur une calibration réalisée du 27/08/98 au 02/09/98, cf. rapport 1997-98) est apportée aux mesures du pyranomètre de la Mévis. L'équation de calibration est la suivante :

$$SW_{\downarrow \text{Licor}} = 1,62 \times SW_{\downarrow \text{Mévis}} + 3,27$$

B. 3. Station hydrologique à 4830 m d'altitude.

Cette station est située à environ à 250 mètres en distance du front du glacier (approximativement 70 m en dénivelé sous le front).



Photo B.1 : Station limnigraphique à 4830 m (Berthier 2000).

B. 3.1. Limnigraphe.

Descriptif.

Depuis le 18 août 1999, c'est un pluvio-limni SERPE électronique alimenté par une batterie 12V reliée à un panneau solaire (12W). Les hauteurs d'eau sont mesurées par un capteur de pression CCI (SERPE).

Données recueillies.

Nous disposons de la mesure en continu des hauteurs du torrent émissaire du glacier, à partir desquelles le " V " jaugeur de la station permet d'obtenir les débits.

Lacunes dans les données.

- Du 13/11/00 au 28/12/00, les débits ont été reconstitués à partir des données COBEE Vertedero car suite à une vague de boue qui a submergée les installation, le capteurs était endommagé.

B. 3.2. Pluviomètre.

Descriptif.

Il s'agit d'un pluviomètre à augets basculeurs de marque Campbell (diamètre : 305 mm), utilisé comme pluviographe et pluviomètre totalisateur : l'eau est collectée dans un jerrican (avec un échantillonnage pour des analyses chimiques et isotopiques) et depuis le 19 août 2000 l'intensité des précipitations (en fait le basculement des augets) est enregistrée par la centrale pluvio-limni.

Lacunes dans les données.

La mesure du volume d'eau de jerrican a été faite régulièrement au début de chaque mois. En ce qui concerne le pluviographe, il existe une période de lacunes :

- août 2000.

B.4. Station météorologique à 5150 m.

Cette station Campbell Cr10-98 fonctionne depuis le 16/04/98.

Descriptif (Cf. Photo B.3 & Figure B.2).

Il s'agit d'une station de mesure fonctionnant avec une centrale de type Cr10 reliée à un multiplexeur. Sur le mât principal, un « chariot » ajustable supporte le dispositif suivant :

- A partir du 28 mars 2000, les psychromètres sont remplacés par deux **hygrothermomètres** type **vaisala** ventilés (marque : *Vaisala*, référence Campbell : *HMP45C*) mesurant :
 - ❖ Humidité relative, Rh, référence : *Vaisala HUMICAP 180*, précision : $\pm 2\%$ si $Rh < 90\%$ et 3% si $Rh > 90\%$, gamme mesurée : de 0.8 à 100 %, dépendance en T : $\pm 0,05\%$ Rh/°C.
 - ❖ Température, T référence : *Pt 100*, précision : $\pm 0,2\%$ à 20°C, gamme mesurée : de $-39,2^\circ\text{C}$ à 60°C .
- Un **bilanmètre** situé à 90 cm du sol. (marque : *REBS*, références : *Q-7 Net Radiometer*, gamme mesurée : 0.25 à 60 μm , précision : non précisée, seule indication du constructeur : une erreur de niveau de 5° entraîne une erreur de 6 % sur la mesure).
- Deux **anémomètre-girouettes** situés à 30 cm et 180 cm du sol. (marque : *Young*, référence : *05103 Wind Monitors*, précision : $\pm 0.3\text{ m s}^{-1}$ de 1 à 60 m s^{-1} pour la vitesse, $\pm 3^\circ$ pour la direction).
- Un **pyranomètre** courtes longueurs d'ondes dirigé vers le ciel, situé à 100 cm du sol. (marque : *Skye*, références : *SP1110*, précision : $< \pm 5\%$ mais typiquement $< \pm 3\%$, gamme de longueurs d'ondes mesurée : de 0.35 à 1.1 μm).
- Un **pyranomètre** courtes longueurs d'ondes dirigé vers le bas, situé à 100 cm du sol. (mêmes caractéristiques que le précédent).

L'autre mât, qui se trouve à quelques mètres, supporte :

- Deux panneaux solaires.
- Une **sonde à neige** mesurant en continu l'ablation ou l'accumulation (références : *UDG01 Ultrasonic Depth Gauge*, précision : $\pm 1\text{ cm}$ ou 0.4% de la distance mesurée, température de fonctionnement : de -25°C à $+50^\circ\text{C}$), domaine de mesure : de 0.6 à 10 mètres.
- La **centrale** d'acquisition Cr10WP avec multiplexeur AM 413.

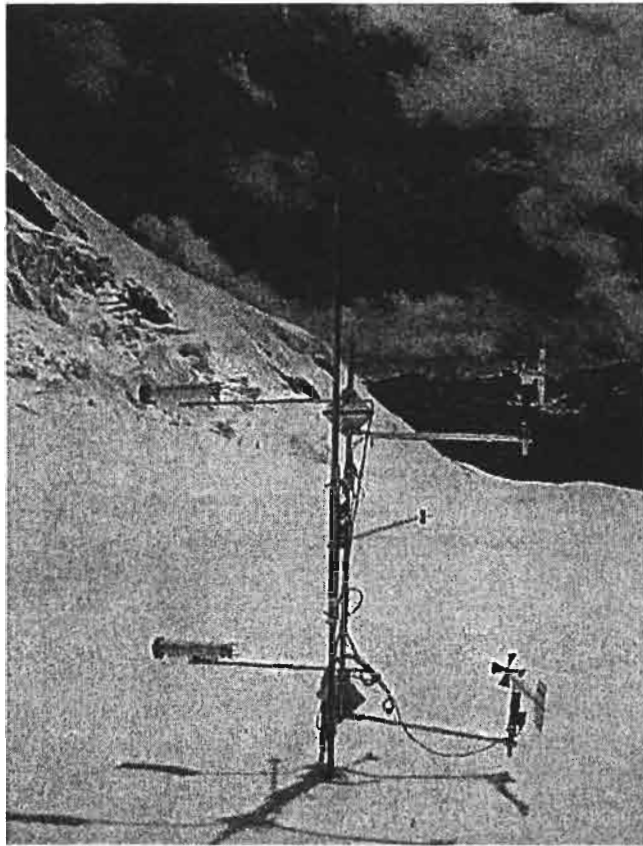


Photo B.2 : Station météorologique à 5150 m (Cr10-98).

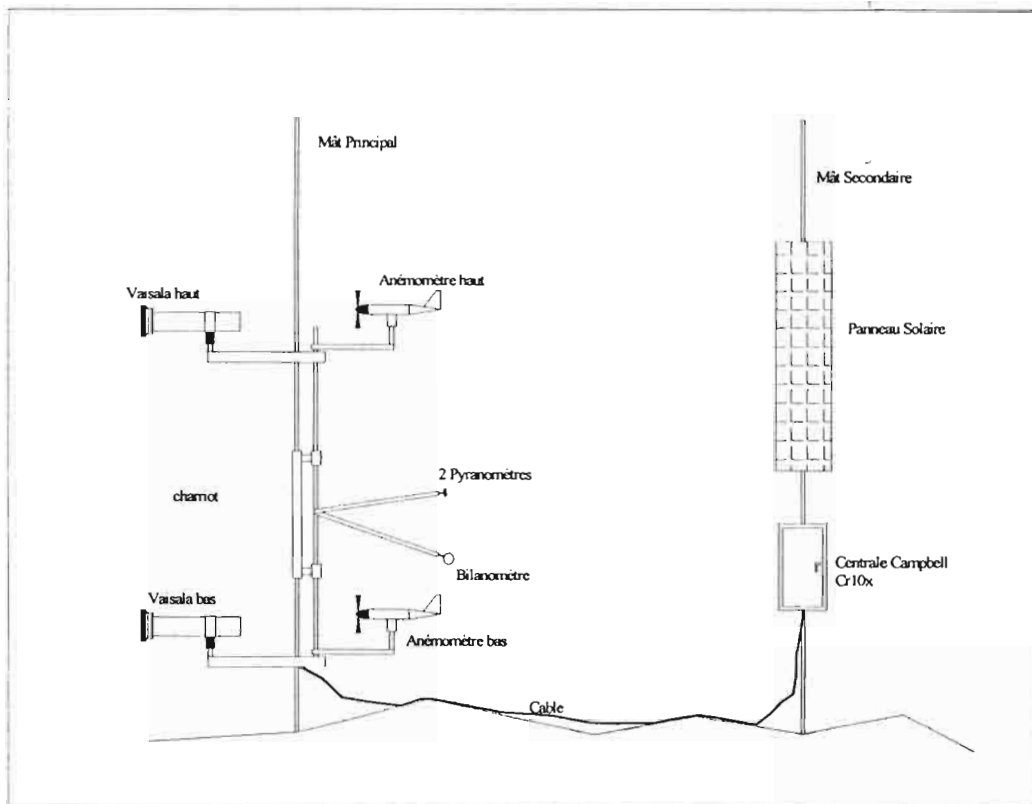


Figure B.3 : Station de référence. (Chazarin modifié Rabatel, Soruco, 2002).

Modifications survenues au cours de l'année hydrologique.

➤ Hauteurs des capteurs:

Jour		Anémo bas (cm)	Anémo ht (cm)	Vaisala bas (cm)	Vaisala ht (cm)	Bilan. (cm)	Pyranomètre (cm)	Sonde (cm)
08/09/00	Avant	34	187	36	179	111	107	118.5
	Après	-	-	-	-	-	-	-
19/09/00	Avant	34	187	62	204.5	142	139	153
	Après	-	-	-	-	-	-	-
12/10/00	Avant	84	227	74	225	152	160	169
	Après	-	-	-	-	-	-	-
24/10/00	Avant	42	196	78	215	148.5	158	163
	Après	-	-	-	-	-	-	-
10/11/00	Avant	-	-	-	-	-	-	-
	Après	-	-	-	-	-	-	-
21/11/00	Avant	117	275	124	265	187	192	125
	Après	-	-	-	-	-	-	-
07/12/00	Avant	140	285	140	283	207	217	205
	Après	65	205	65	205	132	142	-
18/12/00	Avant	48.5	203	60	203	135	128	184
	Après	73.5	228	85	228	160	153	-
04/01/01	Avant	13	166	25	163	92	87	119.5
	Après	50	203	62	200	129	124	-
19/01/01	Avant	Neige	125	Neige	123	53	47	43
	Après	68	219	100	238	150	145	103
30/01/01	Avant	55	206	70	208	111	106	66
	Après	-	-	-	-	-	-	-
08/02/01	Avant	20	172	30	170	88	80	54.5
	Après	72	224	88	228	115	107	59.2
22/02/00	Avant	22	178	23	163	72	62	34
	Après	80	230	85	225	150	141	120
20/03/01	Avant	33	183	42	185	105	95	83.4
	Après	47	197	56	199	119	109	83.4
08/03/01	Avant	12	167	21	166	87	81	90
	Après	67	225	85	227	147	140	90
29/03/01	Avant	21	170	25	170	89	80	74.3
	Après	-	-	-	-	-	-	-
20/04/01	Avant	20	170	15	158	74	66	81.9
	Après	38	170	30	158	74	66	81.9
17/05/01	Avant	22	170	7	153	90	85	67.8
	Après	46	194	40	185	130	122	-
29/05/01	Avant	40	185	35	182	118	108	69
	Après	-	-	-	-	-	-	-
13/06/01	Avant	33	190	24	173	108	97	96.5
	Après	-	-	-	-	-	-	-
23/06/01	Avant	27	182	19	163	100	96	91.7
	Après	-	-	-	-	-	-	-
10/07/01	Avant	2	155	1	149	88	84	70
	Après	40	195	39	187	127	121	-
24/07/01	Avant	51	204	60	207	136	135	75
	Après	44	197	53	200	129	128	-
03/08/01	Avant	52	200	58	206	137	135	80
	Après	45	193	49	197	123	122	-
21/08/01	Avant	17	160	17	165	94	92	54
	Après	34	174	34	182	108	106	68
29/08/01	Avant	34	174	34	182	108	106	68
	Après	-	-	-	-	-	-	-

Tableau B.1 : Evolution de la hauteur des capteurs de la station Cr10-98 (5150m).

➤ Autres modifications intervenues à la station :

- 19/09/2000. Trépieds démonté à 9h35 et re-descente de la station et des capteurs.
- 21/11/2000. Installation d'une planche horizontale sous la sonde (échantillonnage) à 10h42 à 125 cm de la sonde, et enlevée à 12h45.
- 18/12/2000. Nettoyage de la zone autour de la sonde (de son champ d'action) car l'ablation a fait apparaître de multiples déchets (tissus...) qui ont été descendus. Orientation et niveau des capteurs légèrement remontés.
- 04/01/2000. Niveau des capteurs remontés de 40 cm.
- 19/01/2000. Le ventilateur du Vaisala bas ne fonctionne plus, le polystyrène du Vaisala bas n'est plus en place.

- Orientation et niveau des capteurs : tous les capteurs bas sont enfouis sous la neige et les capteurs de radiation presque au niveau de la surface. Les capteurs bas et le cordon qui relie le mat capteur à la centrale sont dégagés.
- 30/01/2001. Le ventilateur du Vaisala bas ne fonctionne pas son moteur est descendu pour réparation, polystyrène non en place, prévoir d'en racheter.
 - 08/02/2001. L'anémomètre bas est trouvé avec la queue coincée dans la neige et donc la direction ne veut plus rien dire (et la vitesse aussi sans doute).
 - 22/02/2001. Queue de l'anémomètre bas dans la neige : direction faussée depuis le 20/02 à 8h. Moteur du Vaisala bas arrêté à cause d'un faux contact au niveau du sucre. La station est remontée d'un mètre grâce à des nouveaux mats de rallonge.
 - 20/03/2001. La station est remontée en bloc de 14 cm.
 - 29/03/2001. Problème avec l'anémomètre qui est dans la neige, donc dégagé.
 - 20/04/2001. L'anémomètre bas coincé dans la neige, donc dégagé.
 - 17/05/2001. Le Vaisala bas est une nouvelle fois remonté d'une trentaine de cm. La coupole supérieure du bilanmètre est cassée.
 - 30/05/2001. Les coupoles du bilanmètre sont changées et le polystyrène des Vaisalas est remis en place.
 - 10/07/2001. Vaisala et vent bas sont au niveau de la neige. La direction et la vitesse du vent bas sont faussées depuis le 27 juin à 16h30.
 - 03/08/2001. Problème avec le ventilateur du Vaisala bas dont l'hélice est cassée. Orientation corrigée de 5 degrés.
 - 21/08/2001. Le vent bas est coincé sous la neige et donc la station est remontée.

Données recueillies par la Cr10-98.

Un changement important de programme est intervenu le 28 mars 2000. On précise donc ci dessous les nouvelles données enregistrées après cette date.

➤ Données recueillies toute l'année :

Moyennes demi-horaires et journalières :

- Les vitesses et direction du vent à 30 et 180 cm de la surface (pour la direction du vent, c'est un échantillonnage toutes les demi-heures).
- La radiation nette, toutes longueurs d'onde confondues, à 60 cm de la surface.
- Les radiations courtes longueurs d'onde incidente et réfléchie à 100 cm de la surface.
- Albédo (données demi-horaires uniquement).
- La hauteur entre la sonde et la surface de la neige (données journalières calculées).

Maxima et minima journaliers :

- Les vitesses du vent à 30 et 180 cm (maxima seulement).
- La radiation nette toutes longueurs d'onde confondues.
- Les radiations courtes longueurs d'onde incidente et réfléchie (maxima seulement).
- L'albédo de surface (minima seulement).

➤ Données recueillies avant le 28 mars 2000 :

Moyennes demi-horaires et journalières + maxima et minima journaliers :

- La température sèche (ventilée) de l'air à 30 et 180 cm de la surface.
- La température humide (ventilée) de l'air à 30 et 180 cm de la surface.

➤ Données recueillies après le 28 mars 2000 :

Moyennes demi-horaires et journalières + maxima et minima journaliers :

- La température de l'air (ventilée) à 30 et 180 cm de la surface.
- L'humidité relative (ventilée) à 30 et 180 cm de la surface.

Correction après recalibration.

Depuis cette année, une correction (fondée sur une calibration réalisée du 8 au 23 juillet 1999, avec les capteurs Kipp & Zonen de la SAMA installée au côtés de la Cr10-98) est apportée aux mesures des pyranomètres et du bilanmètre. Les équations de correction sont les suivantes :

$$SW_{\text{corr}}^{\downarrow} = 0,954 \times SW_{\text{Cr10-98}}^{\downarrow} - 1,496 \quad (r^2=0,998 ; n=713)$$

$$SW_{\text{corr}}^{\uparrow} = 1,0125 \times SW_{\text{Cr10-98}}^{\uparrow} + 2,595 \quad (r^2=0,998 ; n=713)$$

$$Rn_{\text{corr}} = 0,93 \times Rn_{\text{Cr10-98}} - 14,46 \quad (r^2=0,974 ; n=713)$$

Lacunes dans les données.

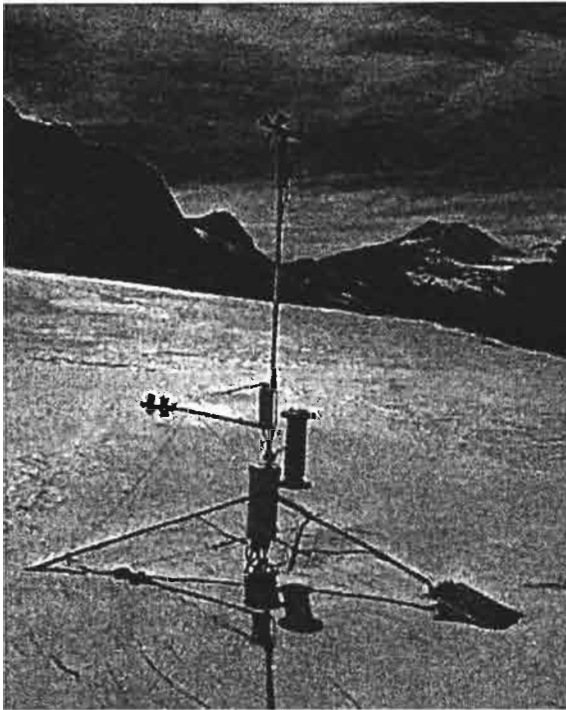
- A partir du 13/01/01 1h00 le vent bas s'arrête car il est enneigé donc l'ensemble des données (surtout des capteurs bas) peut être affecté jusqu'au 19/01/01.
- Le 19/01/01, la ventilation du vaisala bas ne fonctionne pas, moteur descendu le 29/01/01.
- Problème pour le vent bas à partir du 13/04 vers 13h par blocage du vent bas et jusqu'au 20/04.

Autres données recueillies au voisinage de la station.

➤ Pluviomètre P_{g_0} :

Le 08/09/99, un nouveau pluviomètre P_{g_0} a été installé à 50 m de la station Cr10-98 à proximité de la balise 1F. Les caractéristiques de ce pluviomètre sont les suivantes : hauteur (cm) = 85 ; diamètre (cm) = 57 ; il contient 2 litres d'huile soit 0,8 cm. Mais celui-ci a été perdu après une trop abondante chute de neige.

B.5. Station météorologique à 5040 m (SAMA).



Cette nouvelle station a été installée le 17/06/99 d'abord à 5150 m à côté de la station Cr10-98. Elle a ensuite été installée à 5040 m d'altitude pendant la mission du 22 au 28 juillet 2000 (localisation figure B.1).

Photo B.3 : Station météorologique portable à 5040 m (SAMA).

Descriptif.

- Un **anémomètre-girouette** situé à 250 cm du sol. (marque : Young, référence : 05103 Wind Monitors, précision : $\pm 0.3 \text{ m s}^{-1}$ de 1 à 60 m s^{-1} pour la vitesse, $\pm 3^\circ$ pour la direction).
- Un **radiomètre** Kipp&Zonen situé à 100 cm du sol, comprenant :
 - ❖ un pyranomètre courtes longueurs d'onde dirigé vers le ciel. (référence : CM3, gamme mesurée : de 0,305 μm à 2,8 μm).
 - ❖ un pyranomètre courtes longueurs d'onde dirigé vers le sol (cf. ci-dessus).
 - ❖ un pyrgeomètre grande longueurs d'onde dirigé vers le ciel (référence : CG3, gamme mesurée : de 5 μm à 50 μm).
 - ❖ un pyrgeomètre grande longueurs d'onde dirigé vers le sol.
 - ❖ Un capteur de température (servant à la correction de l'émission propre du capteur dans les grandes longueurs d'onde) type Pt-100.
- Un **hygrothermomètre** non ventilée type **vaisala** situé à 90 cm du sol (marque : Vaisala, référence Campbell : HMP45C) avec deux capteurs :
 - ❖ Humidité relative, Rh, référence : Vaisala HUMICAP 180, précision : $\pm 2\%$ si $Rh < 90\%$ et 3% si $Rh > 90\%$, gamme mesurée : de 0.8 à 100 %, dépendance en T : $\pm 0,05 \% \text{ Rh}/^\circ\text{C}$.
 - ❖ Température, T référence : Pt 100, précision : $\pm 0,2\%$ à 20°C, gamme mesurée : de $-39,2^\circ\text{C}$ à 60°C.

Etant donné la structure même de la station qui repose sur la neige, la hauteur des capteurs reste quasi constante d'une visite à l'autre. Seul le Vaisala a vu sa hauteur évoluer : installé d'abord à 2 m, le 7 décembre 1999 il est descendu, le capteur se situant désormais à 60 cm du sol.

Modifications survenues au cours de l'année hydrologique.

Jour		Vaisala (cm)	Anémo. (cm)	Radiom (cm)	Jour		Vaisala (cm)	Anémo. (cm)	Radiom (cm)
08/09/00	Avant	-	-	-	20/03/01	Avant	48	234	67
	Après	-	-	-		Après	60	246	90
19/09/00	Avant	-	-	-	08/03/01	Avant	32	232	27
	Après	-	-	-		Après	60	260	57
12/10/00	Avant	-	-	-	29/03/01	Avant	49	246	75
	Après	-	-	-		Après	66	263	97
24/10/00	Avant	-	-	-	20/04/01	Avant	51	248	78,5
	Après	-	-	-		Après	-	-	-
10/11/00	Avant	-	-	-	17/05/01	Avant	-	-	-
	Après	-	-	-		Après	-	-	-
21/11/00	Avant	-	-	-	29/05/01	Avant	-	-	-
	Après	-	-	-		Après	-	-	-
07/12/00	Avant	-	-	-	13/06/01	Avant	63	260	93
	Après	-	-	-		Après	-	-	-
18/12/00	Avant	52	160	71	23/06/01	Avant	-	-	-
	Après	-	-	-		Après	-	-	-
04/01/01	Avant	36	230	49	10/07/01	Avant	51	248	74
	Après	56	255	82		Après	62	259	92
19/01/01	Avant	0	206	20	24/07/01	Avant	63	197	86
	Après	50	259	73		Après	-	-	-
30/01/01	Avant	29	238	50	03/08/01	Avant	59	256	80
	Après	66	275	90		Après	-	-	-
07/02/01	Avant	-	-	-	21/08/01	Avant	25	222	48
	Après	-	-	-		Après	37	234	71
08/02/01	Avant	50	269	80	29/08/01	Avant	24	220	37
	Après	-	-	-		Après	-	-	-
22/02/01	Avant	-	-	68,5					
	Après	-	-	91,5					

Tableau B.2 : Evolution de la hauteur des capteurs de la SAMA (5040 m).

Données recueillies.

Moyennes demi-horaires et journalières :

- La température sèche de l'air à 60 cm de la surface.
- La vitesse du vent à 250 cm.
- La direction du vent (échantillonnage demi-horaire uniquement).
- L'humidité relative à 60 cm.
- Les radiations courtes longueurs d'onde incidente et réfléchie.
- Les radiations grandes longueurs d'onde émises par l'atmosphère et par la surface.
- L'albédo (échantillonnage toutes les 15 mn et moyennes demi-horaires).

Maxima et minima journaliers (et l'heure) :

- Humidité relative
- Température de l'air
- La vitesse du vent (vitesse max. uniquement).
- La radiation nette
- Les radiations courtes (uniquement les maxima) et grandes longueurs d'onde incidente et réfléchie.
- L'albédo (minima seulement).

Lacunes dans les données.

- Du 01/09/00 au 18/09/00.
- Le 19/01/01, le Kipp & Zonen est enterré dans la neige.
- Le 20/04/01, la station est descendu pour la mission au Caquella.
- Le 30/05/01, la station est réinstallée et fonctionne normalement.
- Le 21/08/01, le panneau solaire est recouvert de neige.

Pluviomètre Pg1.

Le 11 janvier 2000, Pg₁ a été installé à 20 m de la station SAMA. Les caractéristiques de ce pluviomètre sont les suivantes : hauteur (cm) = 83.5 ; diamètre (cm) = 56.5 ; il contient 2 litres d'huile soit 0,8 cm. Ce pluviomètre est relevé par Franz Quispe, observateur de la COBEE, ainsi que lors de chaque visite de terrain.

Lacunes dans les données.

- Entre début septembre et le 21 novembre 2000. Il a disparu, sûrement renversé par le vent et roulé dans une crevasse. Il est remplacé à l'identique le 21/11/00.
- Trouvé renversé le 7/12/00.
- Durant le mois d'août 2001, le pluviomètre a été perdu (recouvert par la neige).

B.6. Mesures réalisées sur la moraine.

B. 6.1. Mesures de température.

Descriptif.

Un thermomètre Omnidata (sonde platine) enregistre la température de l'air sous abri à 5165 m sur la moraine droite du glacier à environ 300 m de distance de la station météorologique Cr10-98. Le 24 mars 2000 il est remplacé par un capteur Hobo qui enregistre la température tous les quarts d'heure.

Lacunes dans les données.

Pas de lacunes.

En cours d'année hydrologique, l'Omnidata qui fonctionnait depuis l'année hydrologique 93-94 a été descendu et remplacé par un capteur Hobo (photo ci-contre). L'Hobo est installé le 24 mars 2000 et une période de recoupement avec l'Omnidata (démonté lui le 11 avril 2000 à 8h) permet une comparaison des températures des deux appareils durant 18 jours.



Photo B.4 : L'Hobo, nouveau capteur de température à 5165 m sur la moraine.

B.6.2. Mesures cumulées des précipitations.



Photo B.5 : Mesure de l'émergence du pluviomètre P1 à 5165 m sur la moraine.

Un réseau de 5 pluviomètres totalisateurs est installé sur les moraines latérales du glacier à différentes altitudes, de façon à appréhender la variabilité spatiale des précipitations. Un sixième pluviomètre totalisateur est situé à la Plataforma. (Cf. FigureB1).

Descriptif.

Nous possédons deux types de pluviomètres totalisateurs sur les moraines :

- Type I : diamètre = 50.5 cm, hauteur = 100 cm, couleur noire (P₂ et P₆).
- Type II : diamètre = 50.5 cm, hauteur = 120 cm, couleur gris/métal (P₁, P₃, P₄, P₅).

Les altitudes des pluviomètres sont les suivantes :

- Type I :
 - P₂ : 5080 m, moraine rive droite.
 - P₈ : 4750 m, Plataforma.
- Type II :
 - P₁ : 5165 m, moraine rive droite.
 - P₃ : 4945 m, moraine rive gauche (incliné).
 - P₄ : 4860 m, juste en amont de la station limnimétrique, en rive gauche.
 - P₅ : 4855 m, juste en amont de la station limnimétrique, en rive droite.

Lacunes dans les données.

Des problèmes affectent le pluviomètre totalisateur P8 de la Plataforma : il n'a pas été vidangé en début d'année hydrologique mais seulement en novembre et décembre. Ces vidanges n'ont pas été archivées dans des rapports de visite, il peut donc y avoir une erreur sur les données de celui-ci.

B. 7. Missions occasionnelles effectuées sur le glacier.

- Le 31/08/2001 : un pit d'accumulation à 5700 m, avec profil de température et prélèvement pour les isotopes.
- Le 6/09/2001 : pit d'accumulation à 5550 m au niveau de l'ancienne station météo.
 - Pit d'accumulation à 5500 m au niveau du Campo argentino (avec profil de température).
 - Balise d'accumulation à 5700 au pied de la voie des français.

B. 8. Bilan.

Récapitulatif et altitude d'enregistrement des différents paramètres :

Température de l'air sous abri.

A 4750 m : deux mesures à la Plataforma.
A 5165 m : sur la moraine.

Température de l'air.

A 5040 m (sur le glacier, non ventilée).
A 5150 m (sur le glacier, ventilée, mesures "basse" et "haute").

Humidité relative.

A 4750 m (Plataforma).
A 5040 m (sur le glacier).
A 5150 m à partir du 28/03/00 (sur le glacier).

Radiation solaire globale et réfléchie.

A 4750 m (Plataforma), radiation directe seulement.
A 5040 m (sur le glacier).
A 5150 m (sur le glacier).

Radiation nette.

A 5040 m (sur le glacier).
A 5150 m (sur le glacier).

Radiation thermique (grandes λ) de l'atmosphère et du sol.

A 5040 m (sur le glacier).

Vitesse et direction du vent.

A 4750 m (Plataforma, mesure "haute", la direction n'est pas mesurée).
A 5040 m (sur le glacier, mesure "haute").
A 5150 m (sur le glacier, mesures "basse" et "haute").

Pluie.

Hors glacier : à 4750 m deux mesures, journalière (peu fiable) et mensuelle.
 à 4830 m.
 à 5000 m.
 à 5040 m.
 à 5150 m.
 à 5165 m.
Sur le glacier : à 5040 m (à côté de la SAMA).
 à 5150 m (à côté de la Cr10-98).

Débit du torrent émissaire du glacier.

A 4830 m.

C. TEMPERATURE DE L'AIR.

Nous enregistrons la température de l'air :

- *hors du glacier* : sous abri à 4750 m (Mévis) et à 5165 m : un capteur Hobo.
- *sur le glacier* : températures ventilées à la station Cr10-98 à 5150 m (hautes et basse) et non-ventilée à la station SAMA à 5040 m.

C.1. Températures mensuelles.

C.1.1. Températures mensuelles aux différentes stations.

Le tableau C.1 recense les températures moyennes mensuelles hors et sur le glacier. Il est illustré par la figure C.1. Attention pour le capteur bas de la station Cr10-98n il manque des données d'été car celui-ci était enfoui sous la neige pendant plusieurs périodes.

	Mevis 4750m	Hobo 5165m	Cr10-98 Bas 5150m	Cr'10-98'Haut 5150m	Sama 5040m
sept-00	1,99	-0,71	-1,47	-1,02	-1,02
oct-00	1,03	-1,14	-0,43	-1,42	-0,98
nov-00	2,82	0,73	1,43	0,28	0,38
déc-00	2,15	-0,06	1,22	-0,15	0,3
janv-01	1,20	*	0,64	-0,91	-0,2
févr-01	1,76	-0,39	-0,40	-0,61	-0,1
mars-01	1,58	-0,39	-0,81	-0,46	-0,25
avr-01	2,09	-0,38	-1,52	-0,54	-0,28
mai-01	1,70	-1,04	-0,97	-1,10	-1,04
juin-01	0,95	-2,00	-2,43	-2,19	-2,1
juil-01	0,57	-2,09	-2,84	-2,25	-2,38
août-01	0,65	-2,05	-2,22	-2,33	-2,47
00-01	1,54	-0,74	-0,82	-1,06	-0,85

Tableau C.1 : Températures mensuelles de septembre 2000 à août 2001.

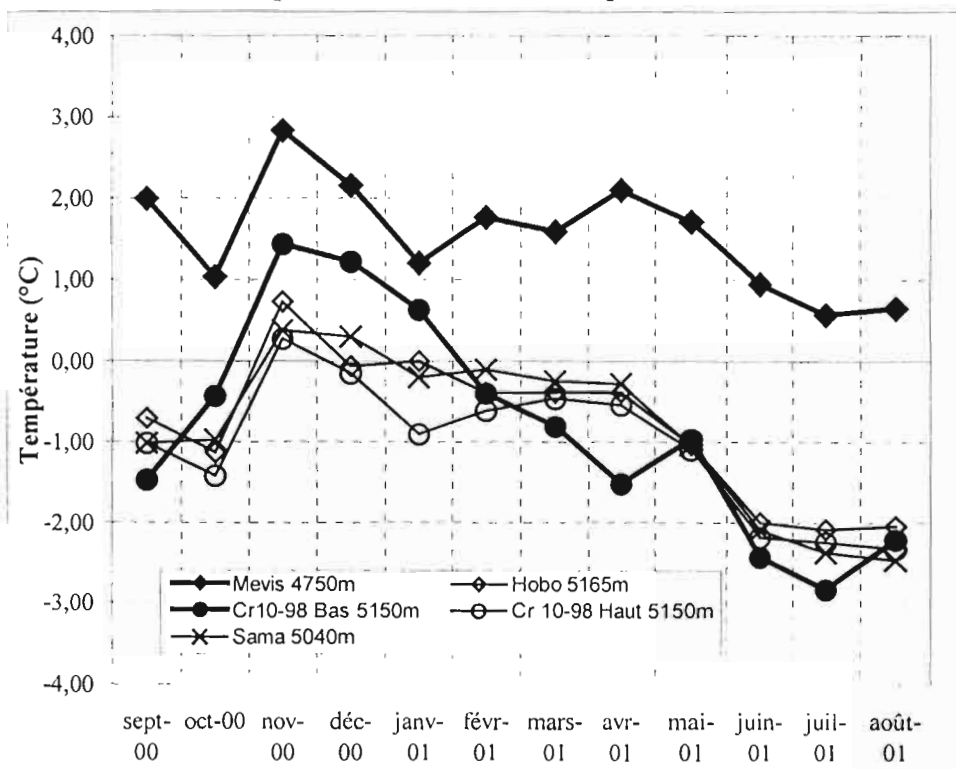


Figure C.1 : Températures mensuelles de septembre 2000 à août 2001.

C.1.2. Gradients thermiques selon l'altitude.

Disposant des moyennes mensuelles de la température en deux sites sur le glacier (5040 et 5150 m) et en deux sites hors du glacier (4750 et 5165 m), il est possible de calculer les gradients de la température avec l'altitude hors et sur le glacier.

	Gradient Mévis-Hobo	Gradient Cr10-98-Sama	Lacunes en jour pour Cr10-98-Sama
sept-00	-0,65	-0,2	12
oct-00	-0,52	0,05	
nov-00	-0,5	0,43	
déc-00	-0,53	0,21	
janv-01		0,06	
févr-01	-0,52	-0,37	
mars-01	-0,47	-0,35	
avr-01	-0,6	-0,68	19
mai-01	-0,66	0	29
juin-01	-0,71	-0,19	
juil-01	-0,64	-0,15	
août-01	-0,65	0,18	10

Figure C.2 : les gradients calculés en dépit de lacunes (leur nombre est indiqué)

Tableau C.2 : Gradient thermique (°/100m) en fonction de l'altitude en 00-01.

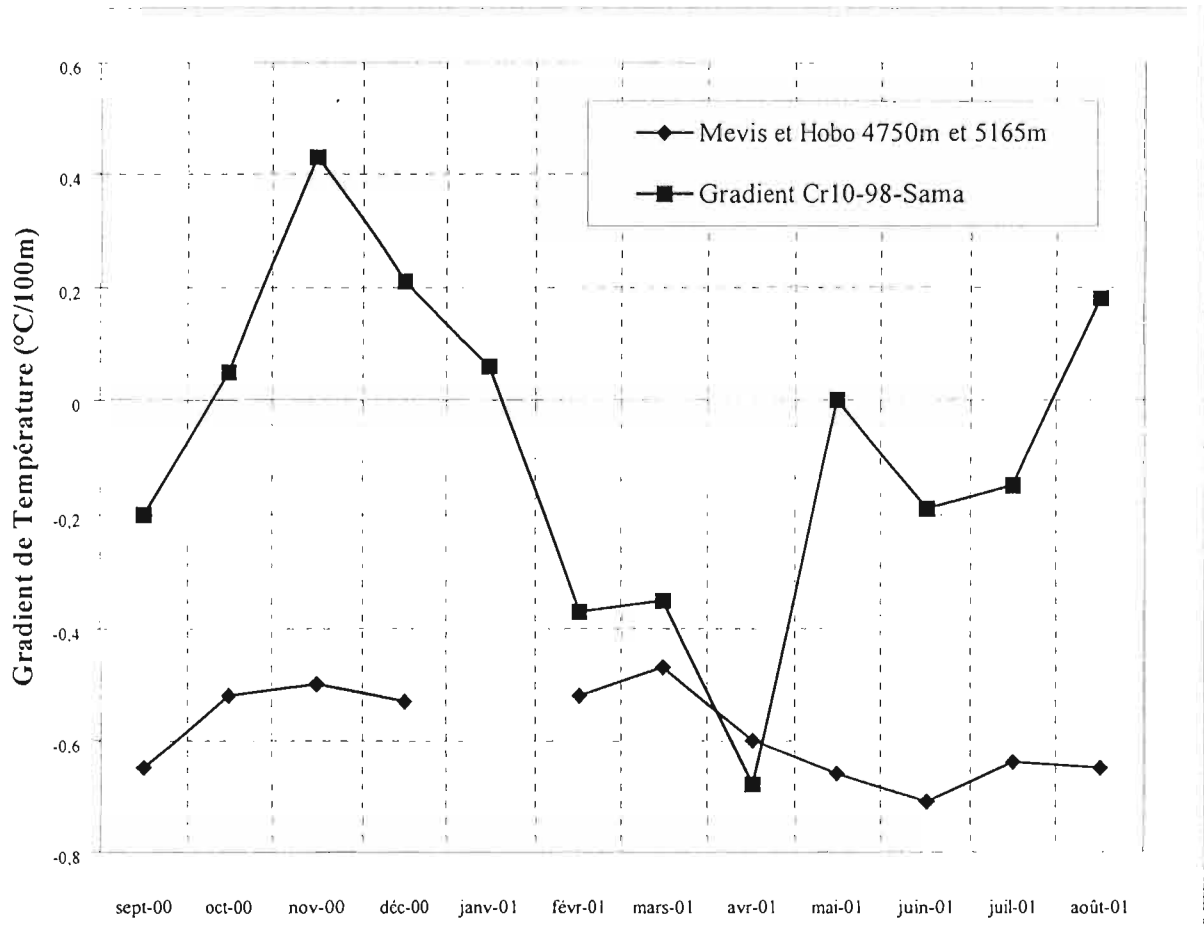


Figure C.2 : Gradient thermique (°/100m) en fonction de l'altitude de sept-00 à août-01.

C.2. Températures annuelles.

Le tableau C.3 récapitule les moyennes annuelles des températures pour les différents appareils.

	Mévis 4750	Moraine Hobo 5165	SAMA 5040	Station 5150 (T haute)	Station 5150 (T basse)	Station 5550 (T haute)
94-95	x	-0,25 [*]	X	x	x	x
95-96	1,94	-0,85	X	-3,9 ^{***}	-2,9 ^{***}	-1,4 ^{***}
96-97	1,44	-1,27	X	-2,07	-1,84	2,8 ^{***}
97-98	2,93	0,59	X	-0,55	-0,54	0,0
98-99	1,65	-0,92	X	-1,63	-1,57	-4,04
99-00	1,41	-1,13	-0,74	-1,42	-1,48	x
2000-2001	1,54	-0,74	-0,80 ^{***}	-0,82	-1,06	x

Moyennes incomplètes (en gris italique) :

^{*} : moyenne sur estimée car lacunes en mai, juin et juillet 95 (moraine 5165m)

^{***} : moyennes (sous estimées) sur les cinq derniers mois de l'année hydrologique 95-96 (5150m et 5500m)

^{***} : moyenne de novembre à janvier (5500m)

^{***} : moyenne du 27 mai 98 au 31 août 98 (5500m)

^{***} : sur estimée car manque 12 jours en septembre, 19 en avril, 29 en mai et 10 en août.

Tableau C.3 : Températures annuelles aux différentes altitudes

La variabilité inter-annuelle.

La figure C.3 permet de comparer les différentes années hydrologiques pour les trois capteurs disposant des séries les plus complètes de la Mévis, de la moraine à 5165 m et de la station 5150 m sur le glacier. La mesure annuelle en 95-96 à la station 5150 m a été éliminée car elle est largement sous estimée (elle n'inclut que les mois les plus froids de l'année, d'avril à août). Pour chaque appareil, la moyenne de la température depuis le début de son fonctionnement est calculée. Cette valeur a été soustraite des différentes moyennes annuelles (5 années complètes pour la station 5150 m, 6 années pour la moraine à 5165m et la Mévis).

Cette figure permet de mettre en évidence la caractère exceptionnel de l'année Niño 97-98 avec des températures moyennes annuelles ~1°C plus élevées que la moyenne. L'année 96-97 (Niña) est au contraire caractérisée par des températures plus faibles que la normale (environ 0.5°C d'écart). 99-00 lui ressemble (sauf pour la station 5150 m) bien que ce ne soit pas une année Niña. Les deux années : 95-96 et 98-99 sont assez proches de la moyenne. Cette année 2000-2001 (Niña) est elle aussi proche de la moyenne (avec les réserves citées plus haut pour le capteur bas de la station Cr10-98).

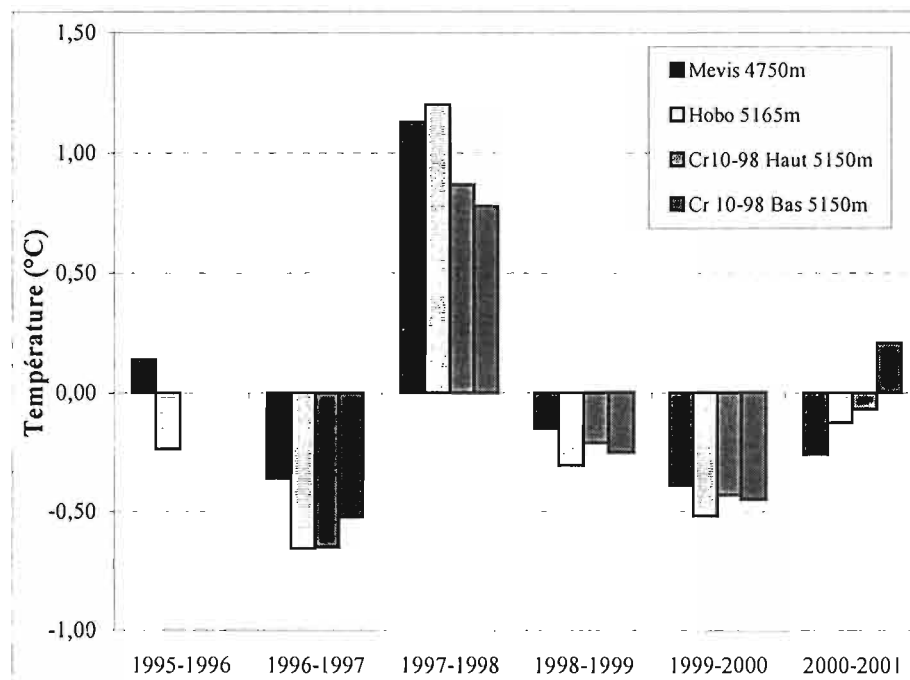


Figure C.3 : Ecart de la température moyenne annuelle de 4 stations à la température moyenne des 6 dernières années hydrologiques.

La saisonnalité aux différentes stations.

Pour étudier la saisonnalité il a été choisi comme critère l'écart entre la température moyenne des mois de saisons des pluies (décembre à mars) et celle des mois de la saison sèche (mai à août). Ces valeurs permettent de construire la figure C.4. Une fois de plus l'année 97-98 (fort El Niño) se distingue des autres : la saisonnalité y est beaucoup plus forte puisque l'écart entre température de saison humide et sèche est presque deux fois plus élevée que les autres années. Par contre, l'année 96-97 (Niña) a une saisonnalité normale. On notera la similitude des trois dernières saisons du point de vue des températures.

Deux autres observations émergent à partir de ces valeurs :

- la saisonnalité augmente avec l'altitude : elle est (légèrement) plus forte sur la moraine à 5165 m qu'à la Plataforma à 4750 m.
- la saisonnalité est plus marquée sur le glacier qu'hors du glacier (comparaison entre la station Cr10-98 et la moraine à 5165 m) sauf pour les années 99-2000 et 2000-2001. Pour la SAMA la saisonnalité apparaît plus forte, mais ceci est en grande partie du au fait que les capteurs ne sont pas ventilés comme pour la Cr10-98. Ceci est en accord avec la figure B.3 qui suggère des températures trop élevées en 99-00 à 5150 m.

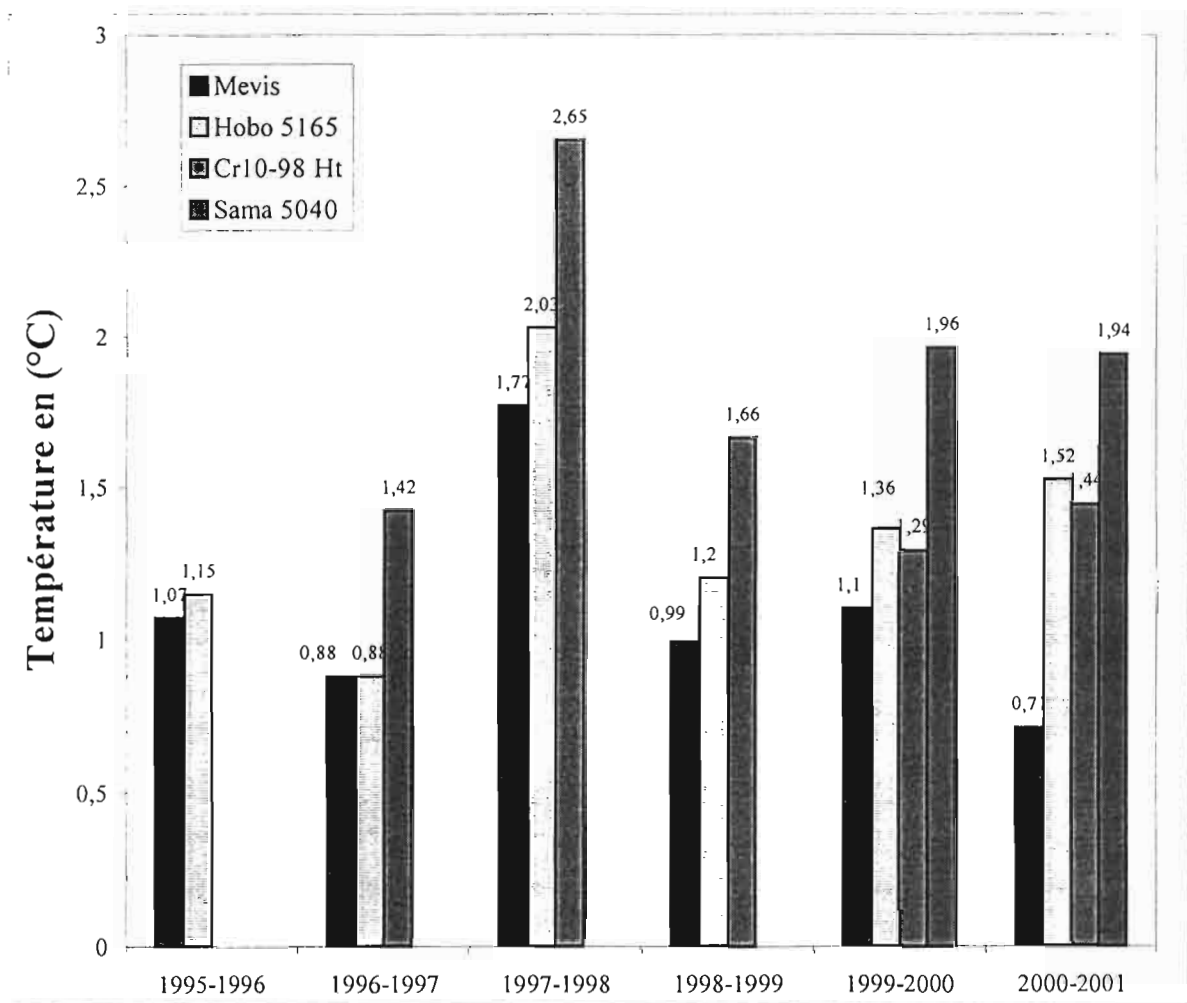


Figure C.4 : Saisonnalité de la température aux différentes stations.

Conclusion.

La dernière année hydrologique 2000-2001 présente des températures légèrement inférieures à la moyenne mais une saisonnalité semblable aux deux années précédentes. Il faut noter le caractère assez exceptionnel de l'année 97-98 où un fort événement El Niño s'est traduit par des températures moyennes annuelles plus d'1° supérieure à la moyenne.

D. PRECIPITATIONS.

D.1. Précipitations mensuelles.

Dans le Tableau D.1 sont reportées les mesures mensuelles des pluviomètres totalisateurs répartis sur le bassin versant du glacier, le total mensuel de la pluie journalière à la Plataforma (noté P4750-jour) ainsi que l'eau de pluie récupérée à la station pluvio-limnimétrique à 4830 m.. La Figure D.1 illustre ces données.

Mois	P1 5165 m	P2 5080 m	P3 4945 m	P4 4860 m	P5 4855 m	P 4830 m	P8 4750 m	P4750 Jour Cobee
Sept. 2000	35	25	30	30	35	83	40	12
Oct. 2000	125	140	105	135	130	47	110	96
Nov. 2000	10	45	52	15	77	15	60	16
Déc. 2000	275	300	273	300	248	132	330	121
Janv. 2001	155	195	200	150	155	181	185	260
Fév. 2001	160	205	200	160	175	131	245	132
Mar. 2001	150	200	190	170	170	111	111	133
Avr. 2001	50	40	40	40	50	50	30	48
Mai. 2001	10	30	40	40	50	20	25	16
Juin. 2001	20	30	40	40	40	15	30	12
Juil. 2001	0	0	0	0	0	5	0	5
août-01	23	64	40	25	45	31	0	27
TOTAL	1003,00	1274,00	1200,00	1105,00	1175,00	820,34	1166,00	876,00

Tableau D.1 : Pluies cumulées (mm) mesurées aux pluviomètres totalisateurs.

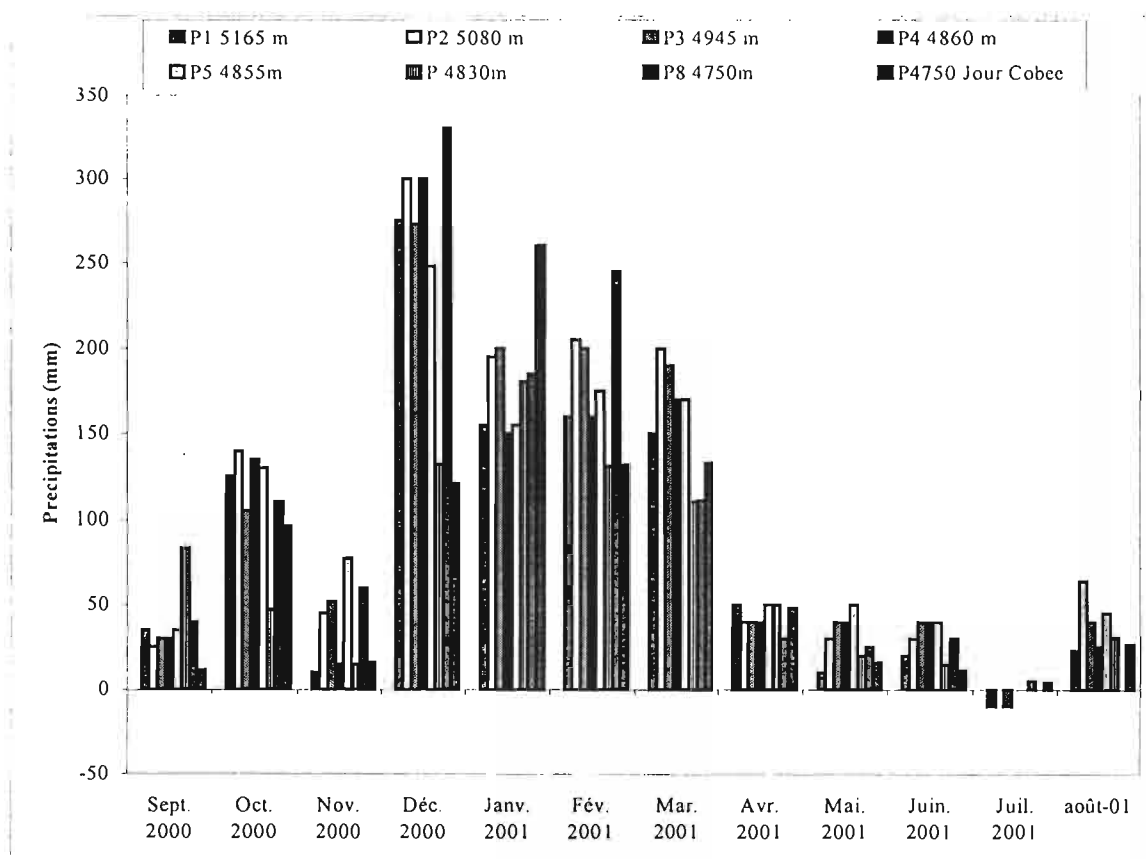


Figure D.1 : Précipitations mensuelles aux différents pluviomètres totalisateurs de septembre 2000 à août 2001.

Etude de la saisonnalité : le regroupement en saisons humide (décembre à mars), sèche (mai à août) et de transition (les autres mois) permet de quantifier la saisonnalité des pluies. (cf. Tableau D.2).

En 98-99, on enregistrerait, en moyenne sur l'ensemble des pluviomètres, 67 % des pluies en saison humide, 30 % en période de transition et 3 % en saison sèche. En 99-00, en enlevant les pluviomètres P_{g1}, P1 et P8 pour lesquels il existe des lacunes ou des incertitudes, 69 % des pluies sont tombées en saison humide, 24 % en période de transition et 7 % en saison sèche.

Pour cette année 2000-2001, on a enregistré près de 71% des pluies en saison humides et 8 % en saison sèche, soit une saisonnalité quasi identique à l'année précédente.

% de précipitations par station année hydrologique 2000-2001.										
	Pg0	P1 5165 m	P2 5080 m	P3 4945 m	P4 4860 m	P5 4855m	P 4830m	P8 4750m	P4750 Jour Cobec	Moyenne
Saison des pluies		73.8	70.6	71.9	70.6	63.7	67.6	74.7	73.2	70.8
Saison sèche		4.3	9.7	9.2	9.5	11.5	8.6	4.7	7.0	8.1
Transition		21.9	19.6	18.9	19.9	24.9	23.9	20.6	19.8	21.2
Total		100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Tableau D.2 : Saisonnalité des précipitations.

D. 2. Précipitations annuelles.

D.2.1. En 2000-2001.

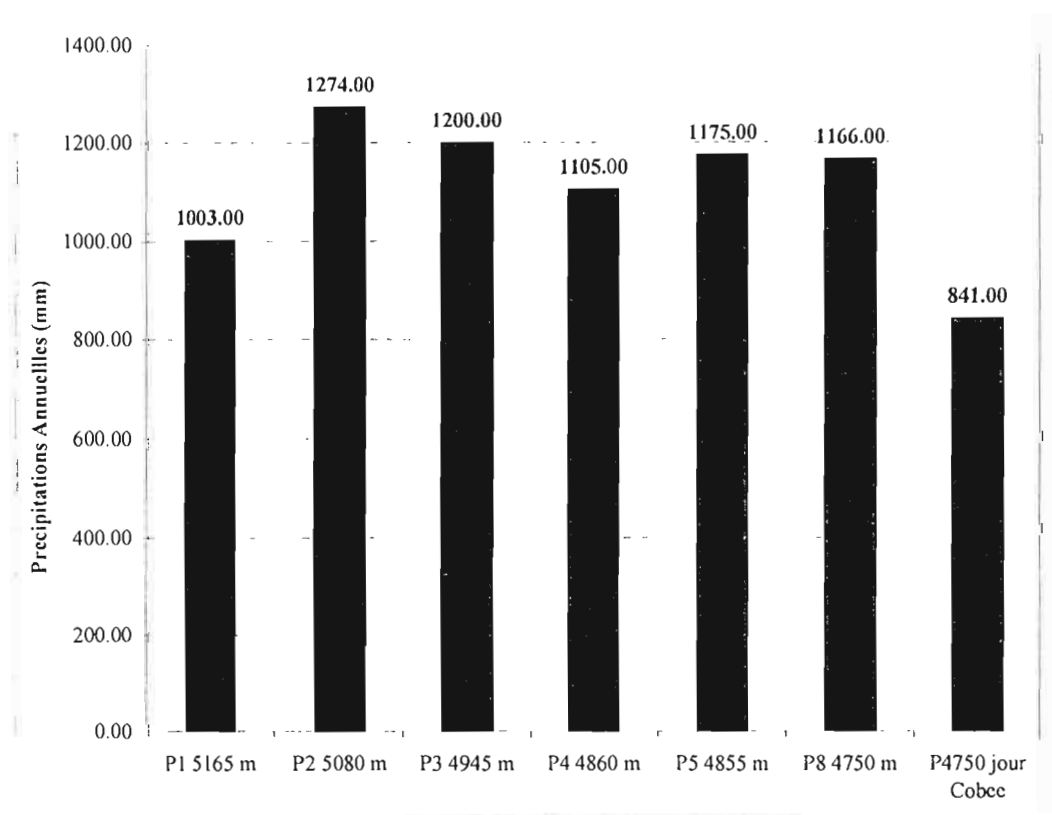


Figure D.2 : Précipitations annuelles aux différents pluviomètres totalisateurs en 2000-2001.

Cette figure confirme la grande quantité de précipitations tombées cette année. Elle met aussi en évidence les problèmes pour le pluviomètre journalier à la Plataforma dont la surface de captation est inférieure aux autres. Les différences entre les pluviomètres s'expliquent par leur altitude (donc du type de précipitation), leur exposition (fonte de la neige à l'intérieur) et leur localisation (fort effet du vent sur la captation des précipitations) cf. P1. On peut noter que les pluies sont en générales plus importantes en altitude. (Figure D.3).

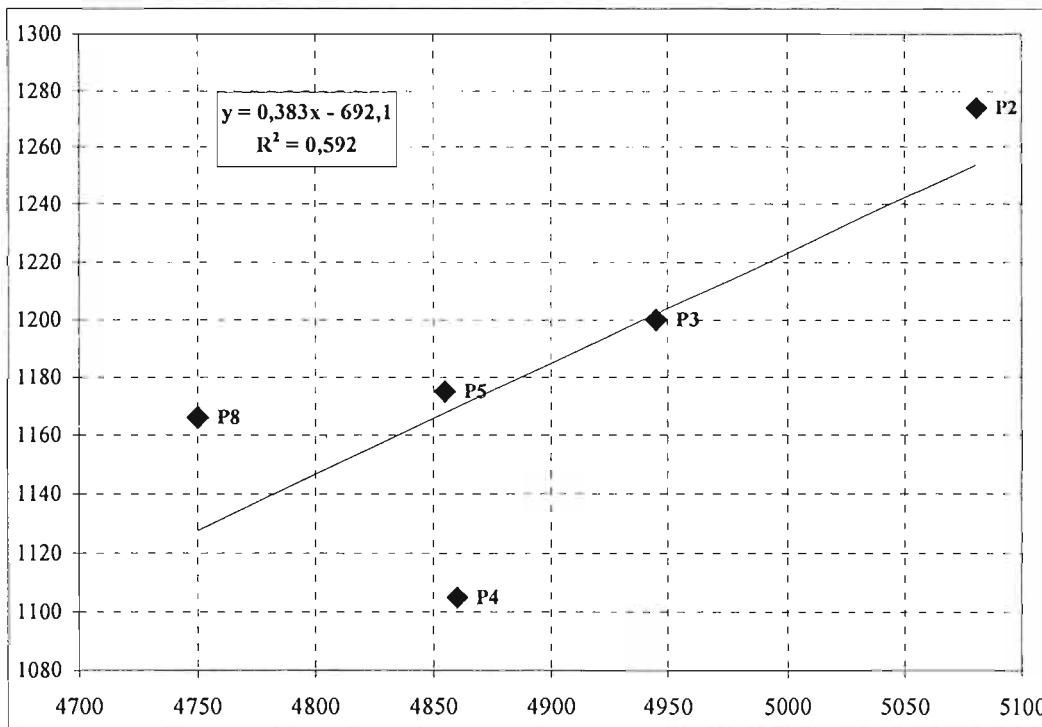


Figure D.3 : Précipitations annuelles en fonction de l'altitude.

D.2.2. Comparaison avec les cycles précédents.

Le Tableau D.3 permet la comparaison des précipitations annuelles des pluviomètres totalisateurs de 1994 à 2001. Pour l'année 94-95, n'ont été conservés que 4 pluviomètres car les autres présentaient des données incohérentes. Ce tableau est illustré par la figure D.4 qui présente l'écart de chaque pluviomètre à sa pluviosité moyenne annuelle calculée pour les 7 années hydrologiques disponibles.

Cette figure permet tout d'abord de tester l'homogénéité entre les relevés des différents pluviomètres : le pluviomètre P_{4750-jour} présente une tendance différente des autres pluviomètres. En 98-99, année pluvieuse, les précipitations y sont trop faibles alors qu'en 95-96, année plutôt sèche, les précipitations y sont plus fortes. Pour cette année 2000-2001, très pluvieuse, un déficit important est constaté sur ce pluviomètre.

Pour les autres pluviomètres la tendance est souvent la même ce qui permet de classer les années en humides ou sèches. Ainsi 94-95, 95-96 et 97-98 sont des années sèches (avec un déficit de précipitations valant respectivement 104, 119 et 139 mm), 96-97 est une année très humide (103 mm de précipitations en excès), et 98-99 et 99-00 sont des années très légèrement plus sèches que la moyenne. La dernière année apparaît comme la plus humide de toute la période d'observation avec un excès par rapport à la moyenne de près de 220 mm.

Remarque : ces écarts à la moyenne des différentes années n'incluent pas la pluviomètre P-4750 jour dont il vient d'être montré que ces données ne sont pas consistantes.

Année	P1 5165 m	P2 5080 m	P3 4945 m	P4 4860 m	P5 4855 m	P8 4750 m	P4750 jour Cobee	Moyenne Annuelle	Ecart à la moyenne
1994/1995	771.00	860.00	865.00				723.00	832.00	104
1995/1996	670.00	815.00	880.00	760.00	850.00	925.00	791.00	816.67	119
1996/1997	960.00	1110.00	1000.00	1050.00	1045.00	1070.00	951.00	1039.17	-103
1997/1998	765.00	870.00	800.00	775.00	795.00	780.00	656.00	797.50	139
1998/1999	835.00	950.00	910.00	900.00	940.00	1020.00	555.00	925.83	10
1999/2000	840.00	1080.00	937.00	880.00	912.00	925.00	786.00	929.00	7
2000/2001	1003.00	1274.00	1200.00	1105.00	1175.00	1166.00	841.00	1153.83	-218
Moyenne	834.86	994.14	941.71	911.67	952.83	981.00	757.57	936.04	

Tableau D.3 : Précipitations annuelles (mm) aux différents pluviomètres totalisateurs pour les 7 dernières années hydrologiques.

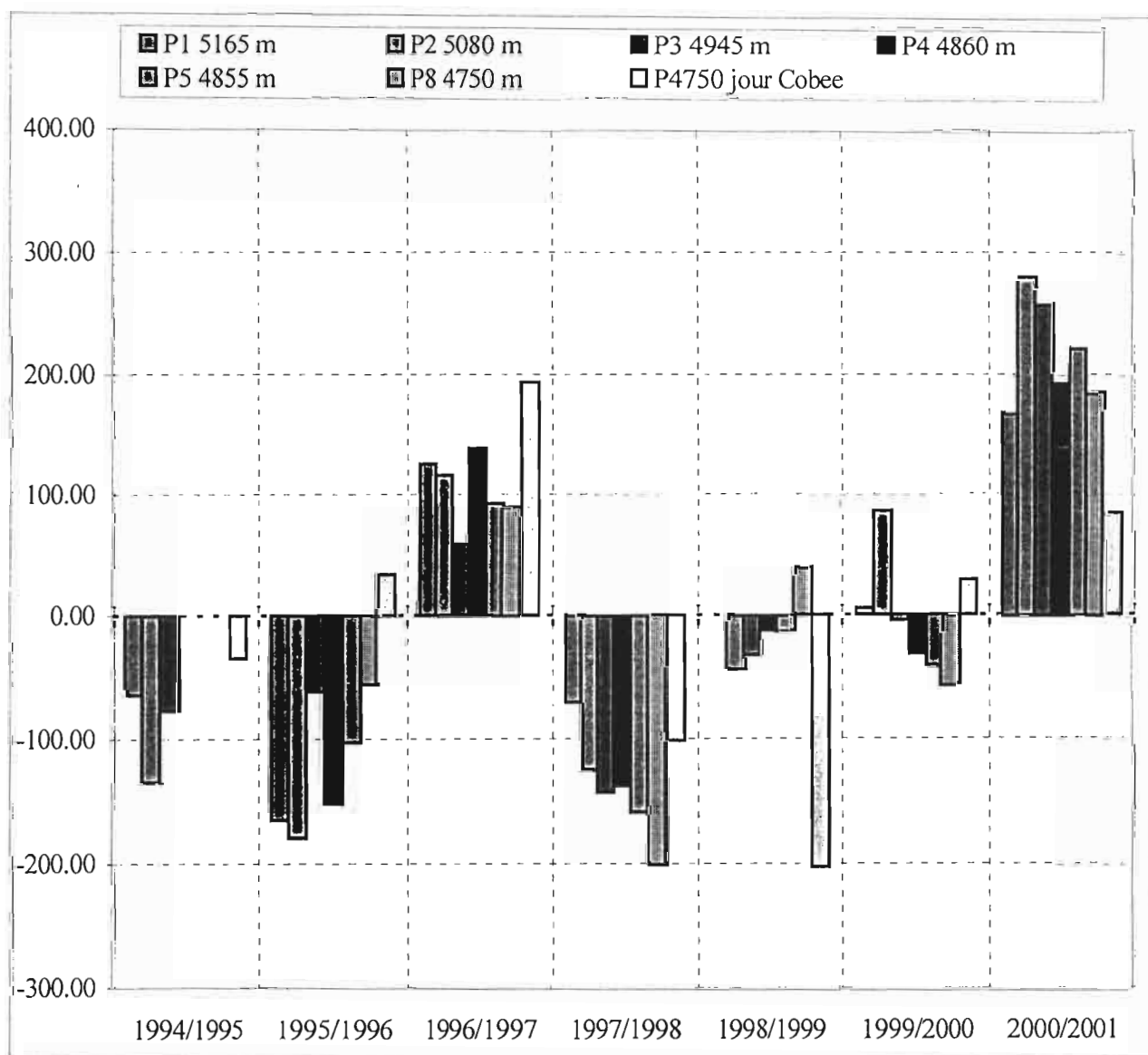


Figure D.4 : Ecart des précipitations annuelles (mm) aux différents pluviomètres totalisateurs par rapport à la moyenne calculée sur les 7 derniers cycles hydrologiques.

E. BILAN RADIATIF.

E.1 Notations et données disponibles.

Le bilan radiatif à la surface du glacier s'écrit : $R_n = SW^\downarrow - SW^\uparrow + LW^\downarrow - LW^\uparrow$

avec : R_n : radiation nette.

SW^\downarrow : radiation incidente en courtes longueurs d'ondes (ou radiation solaire directe).

SW^\uparrow : radiation réfléchie en courtes longueurs d'ondes (ou radiation solaire réfléchie).

LW^\downarrow : radiation en grandes longueurs d'ondes de l'atmosphère (ou radiation thermique incidente)

LW^\uparrow : radiation en grandes longueurs d'ondes de la surface (ou radiation thermique de la surface).

Les mesures disponibles aux différentes altitudes sont :

- 4750 m : SW^\downarrow (station Mévis à la Plataforma), corrigées grâce à une calibration.

- 5040 m : R_n , SW^\downarrow , SW^\uparrow , LW^\downarrow , LW^\uparrow (station SAMA sur le glacier)

- 5150 m : R_n , SW^\downarrow et SW^\uparrow (station Campbell sur le glacier) Toutes ces valeurs sont corrigées suite à une calibration réalisée par comparaison à la station SAMA (dont les capteurs Kipp&Zonen sont plus précis) installée plusieurs jours à côté de la station Cr10-98.

E.2 Valeurs journalières .

E.2.1 Radiation solaire incidente : maxima journaliers à 5040m et à 5150m.

Les figures E.1 et E.2 permettent de comparer les radiations solaires (SW^\downarrow) maximales à 5040 m et à 5150 m. L'expérience de calibration de la Cr10-98, à partir de la SAMA, a montré que situées côte à côte donc dans les mêmes conditions de radiation les deux stations mesurent les mêmes radiations, $r^2 = 0,9984$ ($n=716$). Les différences existant entre les deux stations peuvent donc être imputées directement aux différences entre les deux localisations : altitude, exposition, etc....

La saisonnalité est sensiblement la même au niveau des deux stations. Les radiations maximales sont souvent plus fortes que la radiation extra-terrestre maximale (surtout en saison des pluies). Cette situation correspond à des journées nuageuses où de multiples réflexions entre la surface du glacier et les nuages s'opèrent.

La corrélation entre les deux séries est correcte ($r^2=0,67$ $n=309$) et elle est constante au cours de l'année hydrologique : le coefficient de détermination est le même en saison des pluies qu'en saison sèche.

Radiation Solaire incidente à 5150m (Cr1098), maxima journaliers,
août 00 à août 01.

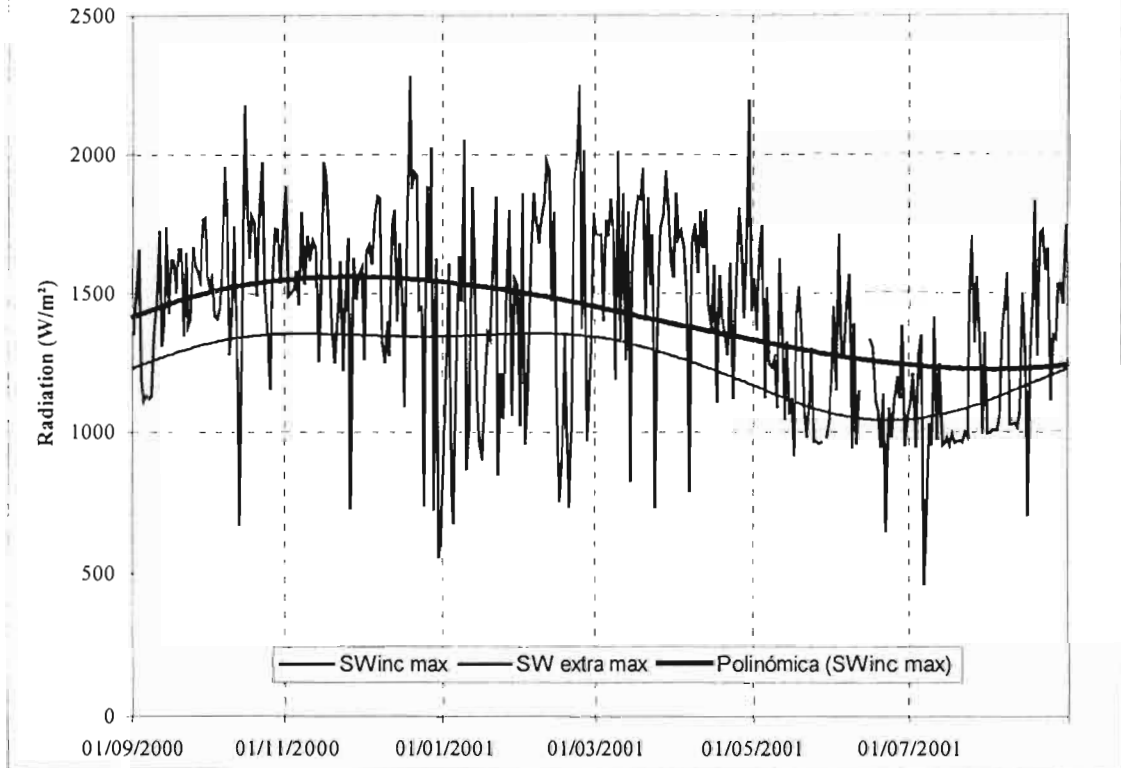


Figure E.1

Radiation Solaire incidente à 5040m (SAMA), maxima journaliers,
sept-00 à sept-01

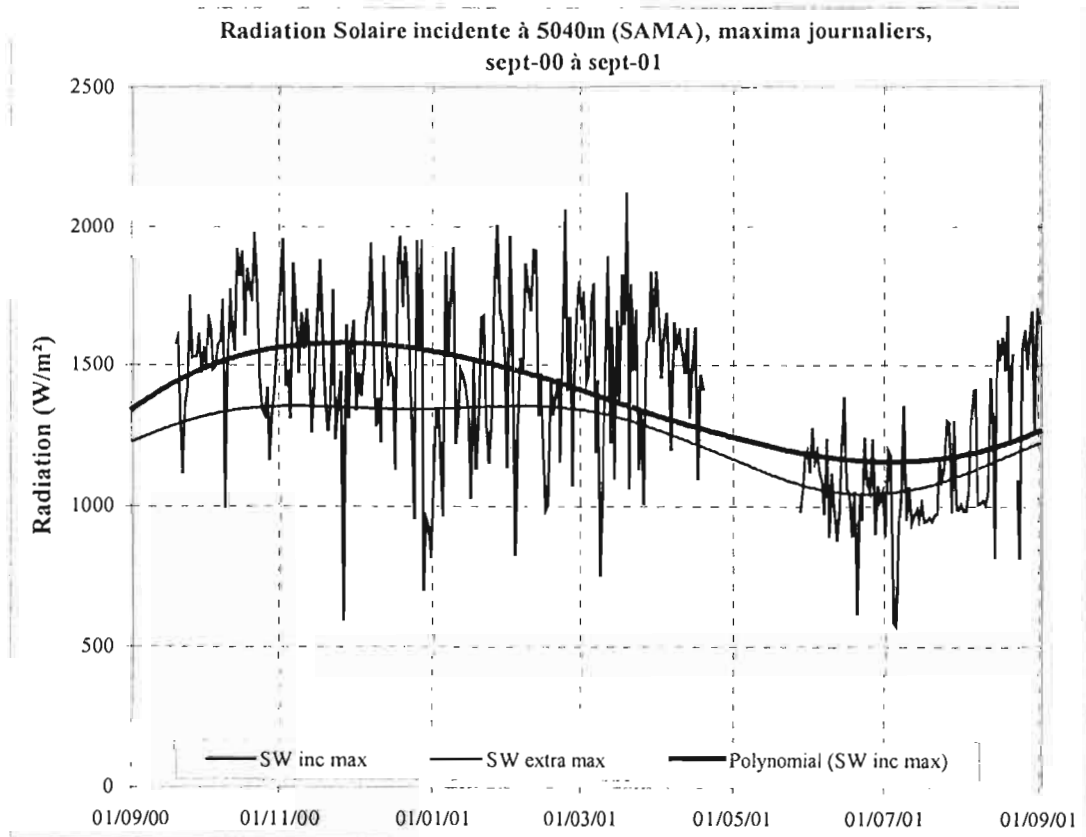


Figure E.2

Sur la figure E.3, l'écart entre les deux stations est présentée. Aucune tendance nette n'apparaît sur cette figure, puisqu'en moyenne mobile sur 30 jours les radiations des deux stations ne s'écartent pas de plus de 250 W.m⁻². Sur l'année, les radiations maximales sont légèrement supérieures à 5150 m. C'est en saison sèche (à l'exception de quelques journées) que l'écart (absolu) entre les deux stations est le plus faible.

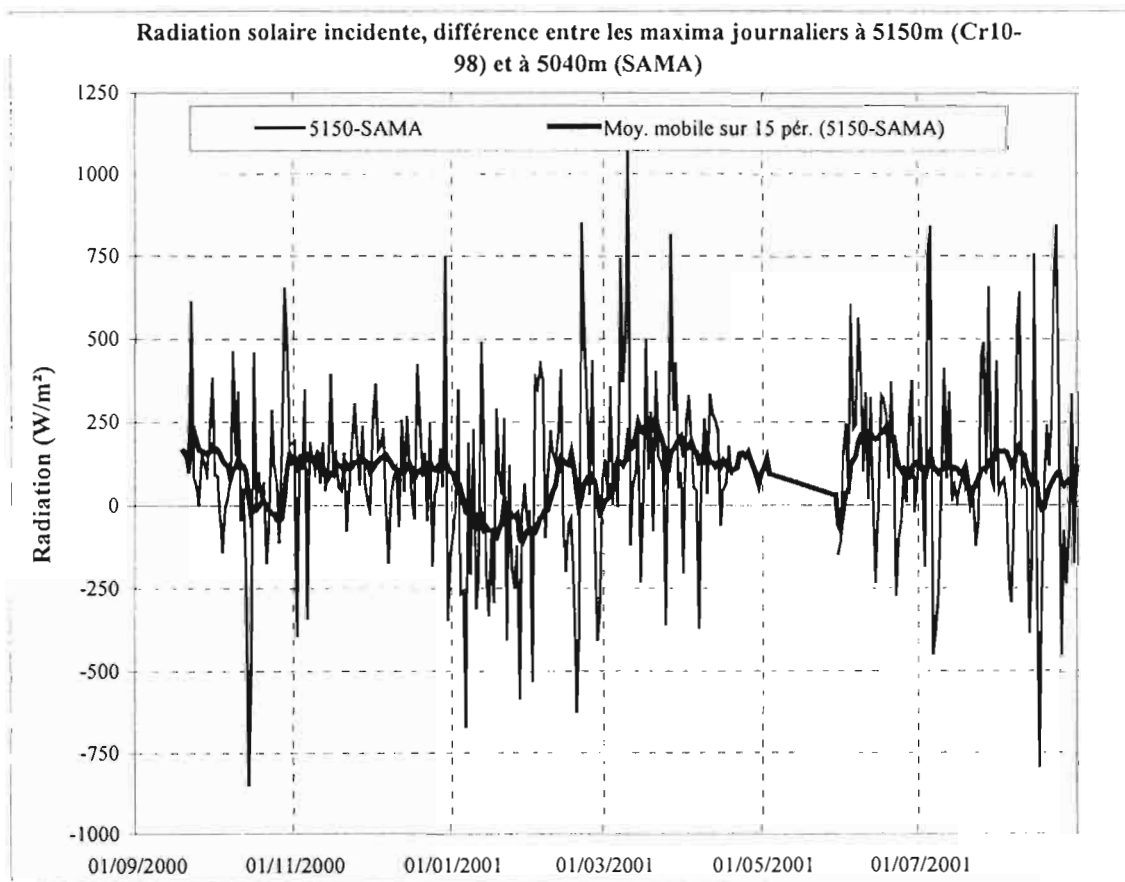


Figure E.3

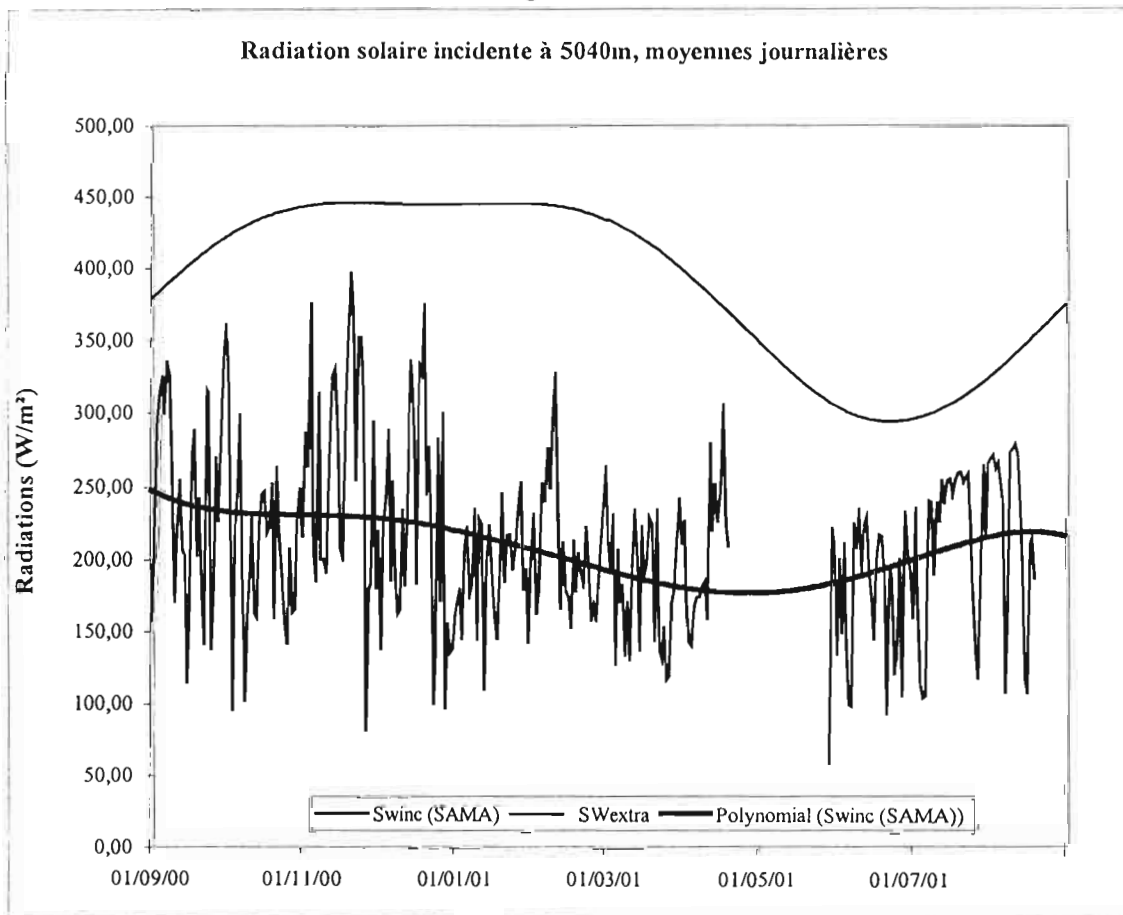
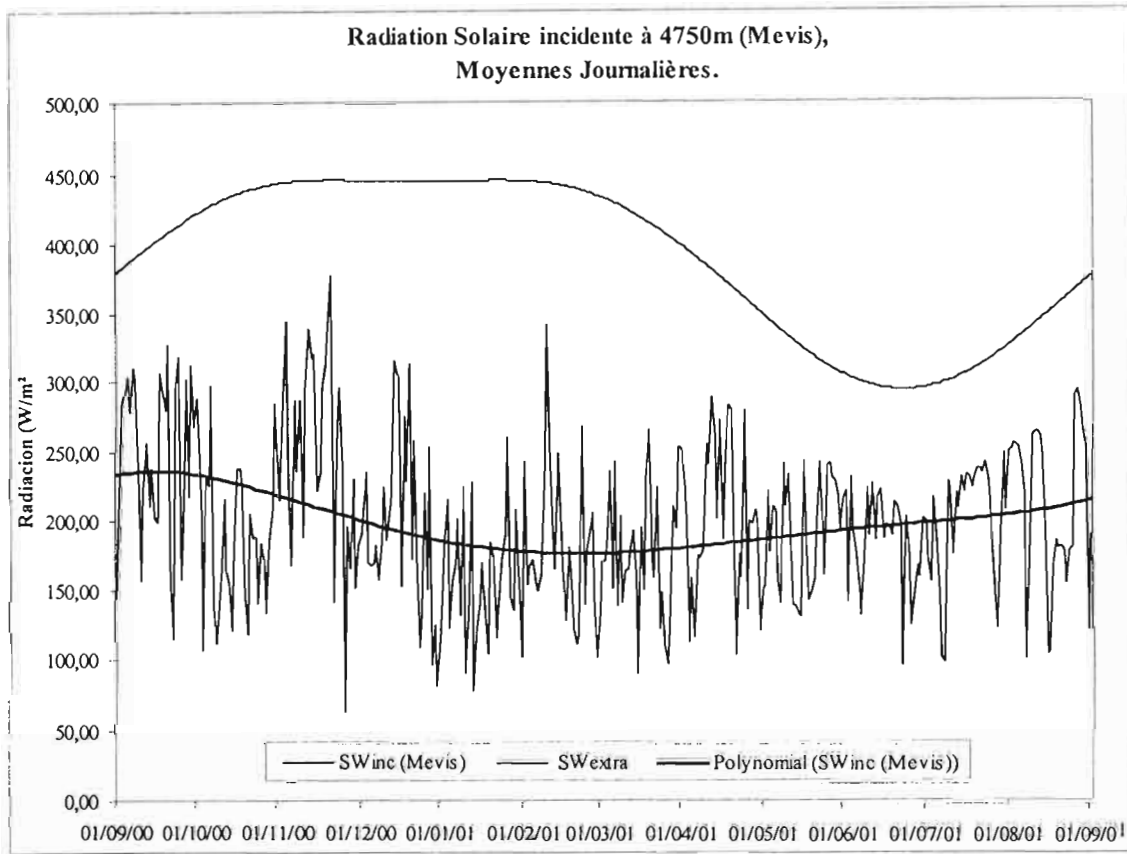
E.2.2 Radiation solaire incidente (SW^{\downarrow}), moyennes journalières à 4750, 5040 et 5150 m.

La comparaison de SW^{\downarrow} et de la radiation extra-terrestre (notée SW_{extra}) à 4750, 5040 et 5150 m est présentée par les figures E.4 à E.6.

Un lissage par des courbes de tendance polynomiale (ordre 5) met en évidence une saisonnalité très faible et presque opposée à SW_{extra} : ceci montre l'importance de la couverture nuageuse (l'albédo des nuages appartient à [0,4 ; 0,7], Dingman, 1994) qui atténue beaucoup plus la radiation solaire en saison des pluies qu'en saison sèche et modifie ainsi la saisonnalité.

L'écart moyen annuel entre SW_{extra} et SW^{\downarrow} à 4750 et 5150 m est respectivement de 192 et 171 W.m⁻² (contre 200 et 191 en 99-00, 192 et 198 W.m⁻² en 98-99 et 268 et 174 W.m⁻² en 97-98). Pour la SAMA cet écart est de 187 W.m⁻².

La corrélation entre les mesures de la SAMA (5040 m) et de la Cr10-98 (5150 m) est très bonne : $r^2=0.94$ (n=366) avec une pente de 0,988 qui suggère que la calibration de juillet 99 est toujours valable (pas de dérive des appareils). Les moyennes journalières à 5040 m et à 5150 m sont donc plus ressemblantes que les maximums journaliers. Ceci n'est pas étonnant car il suffit d'un passage nuageux pour que la radiation maximale diffère de façon importante alors qu'en moyenne sur la journée, la nébulosité ne doit pas beaucoup différer aux deux stations. En revanche, la corrélation de la Cr10-98 avec la Mévis est moins bonne : $r^2=0.78$ (n=366).



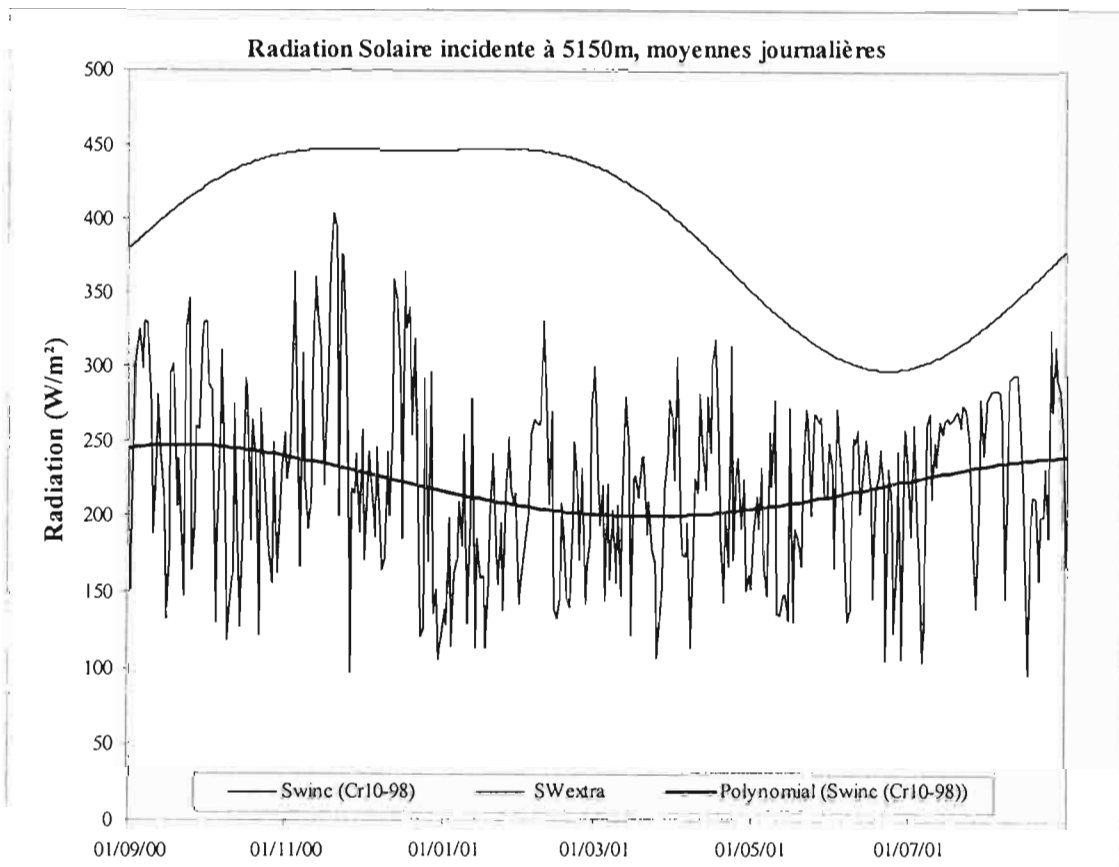


Figure E.6

E.2.3 Albédo moyen journalier à 5040 et 5150 m.

L'albédo est défini comme la fraction de l'énergie solaire incidente réfléchi vers le ciel par la surface [du glacier]. Il est donc calculé aux courtes longueurs d'ondes. Il fournit des indications (Wagnon, 1999) sur l'énergie disponible à la surface du glacier (pour la fusion et la sublimation) et s'exprime de la façon suivante :

$$\text{Albédo} = \frac{SW^{\uparrow}}{SW^{\downarrow}}$$

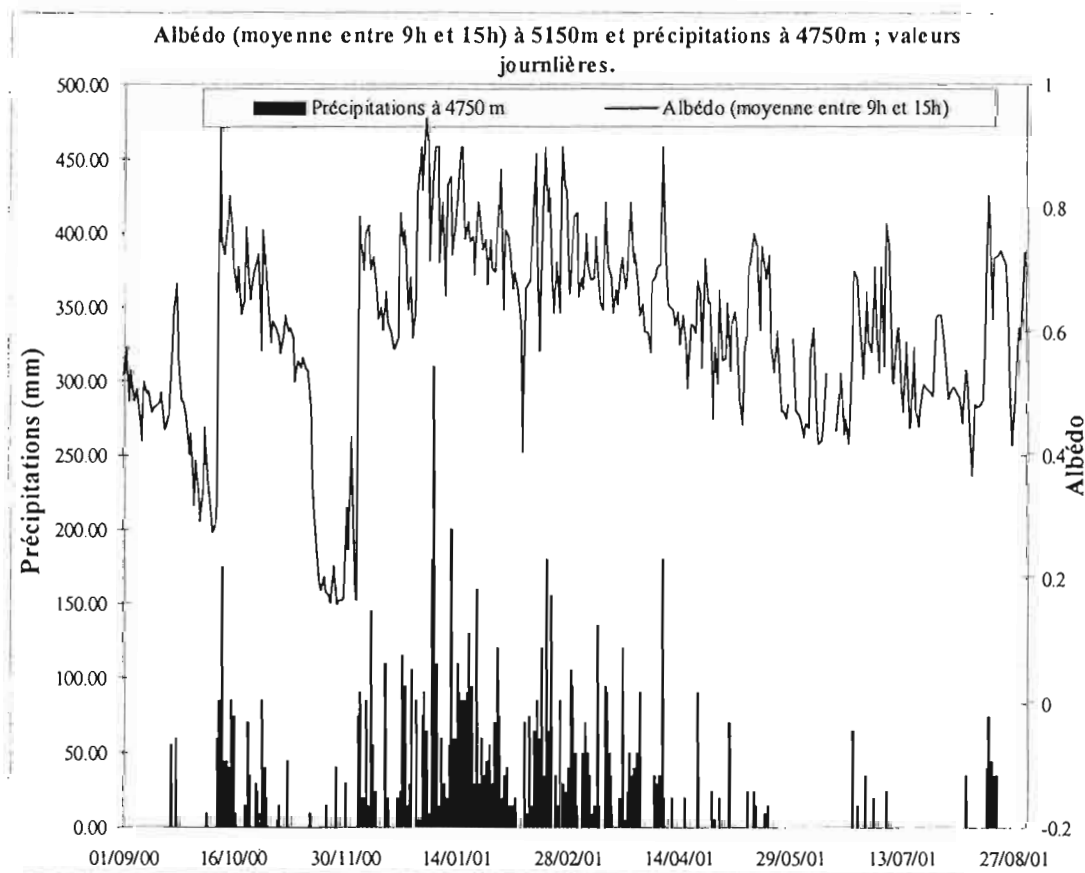
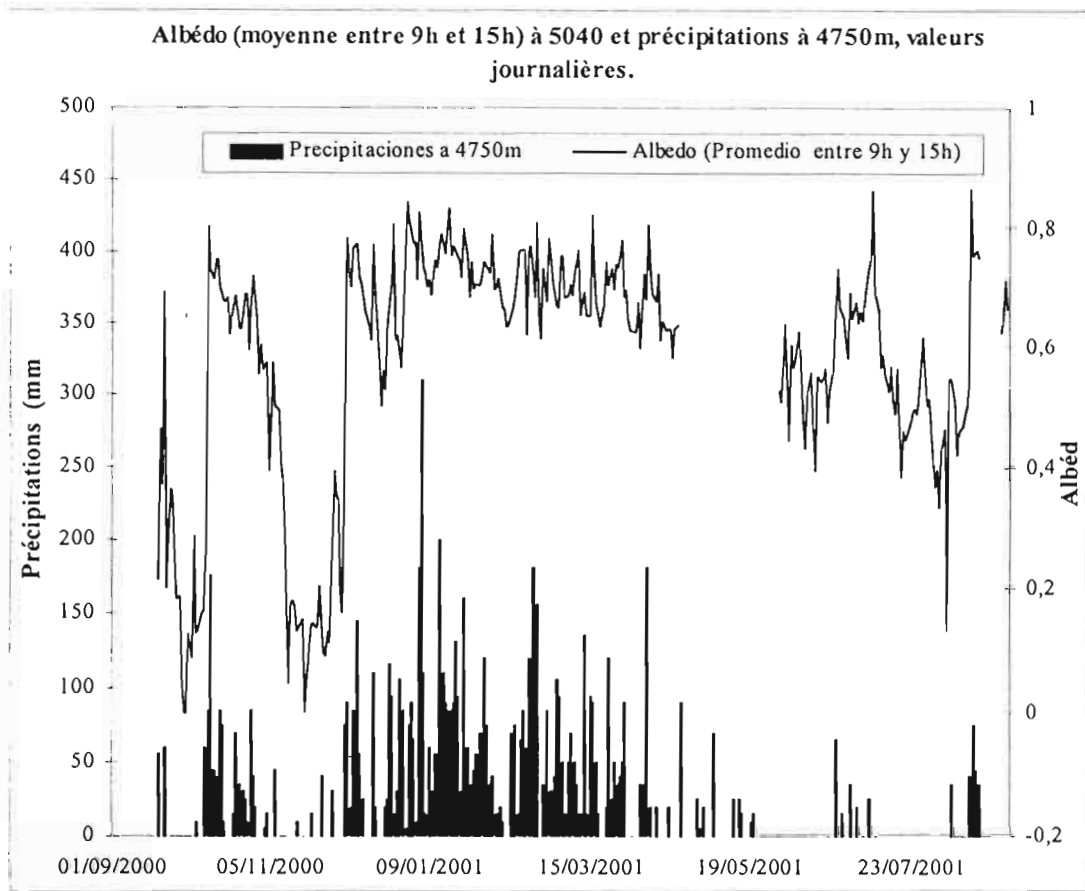
L'albédo moyen journalier est calculé à partir des moyennes demi-horaires entre 9h et 15h. Ceci permet de limiter les moments de la journée où le capteur orienté vers le ciel est recouvert puisque dans ce créneau horaire le givre ou la neige a fondu, et la station n'est pas dans l'ombre portée par la paroi rocheuse en rive droite. Les moyennes journalières sont calculées en éliminant les moyennes demi-horaires supérieures à 1 et en remplaçant les albédos supérieurs à 0,9 par 0,9 valeur maximale possible pour la neige fraîche.

Les figures E.7 et E.8 présentent les albédos à 5040 et 5150m comparés aux précipitations à 4750 m.

A 5040m, de septembre à début décembre puis début août l'albédo connaît des variations fortes et rapides avec des valeurs < 0,2. Entre ces deux périodes, l'albédo reste élevé entre 0,7 et 0,8.

La même analyse peut être faite à 5150m même si cette fois l'albédo descend rarement sous 0,4.

Cette évolution de l'albédo s'explique bien par la fréquence des précipitations journalières à la Plataforma. Jusqu'en décembre, les précipitations sont irrégulières : des périodes de plusieurs jours sans précipitations s'accompagnent de la disparition du manteau neigeux (par fusion et sublimation) et de la mise à nu de la glace sous-jacente donc l'albédo diminue jusqu'à 0,2 à 5150 m. De janvier à fin avril, les précipitations très fréquentes empêchent la transformation complète du manteau neigeux, l'albédo reste au dessus de 0,7 : on est donc en présence de névé ou de neige fraîche, la surface du glacier n'évolue presque pas. A partir du mois de mai, les précipitations sont plus sporadiques mais ce sont les températures basses (qui traduisent une énergie disponible moins importante) qui limitent la transformation du manteau neigeux. L'impact des précipitations est clairement visible durant cette période : chacune est suivie d'une brutale augmentation de l'albédo qui approche 1 puis décroît lentement.



La figure E.9 regroupe les albédos aux deux altitudes afin de faciliter la comparaison.

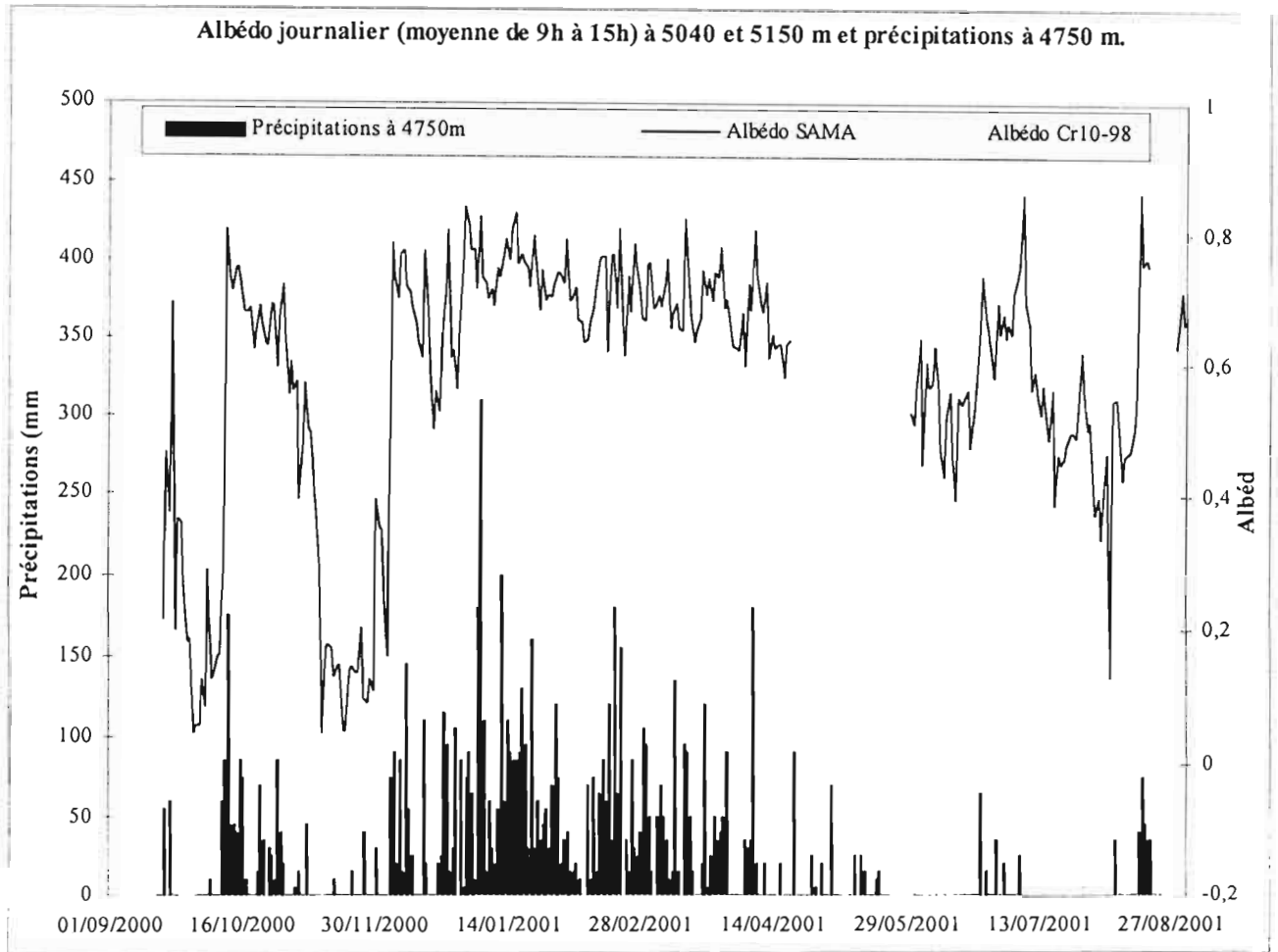


Figure E.9

En saison humide le comportement des deux sites est sensiblement identique, l'albédo variant entre 0,7 et 0,9 et étant légèrement plus élevé à 5150 m. En revanche, en saison sèche des différences importantes apparaissent. Les chutes de neige engendrent des augmentations brutales et simultanées aux deux stations. Mais l'évolution postérieure à ces chutes de neige est différente : la baisse de l'albédo est plus rapide à 5040 m qu'à 5150 m la couche de neige disparaissant plus vite.

E.2.4 Radiation thermique de la surface et de l'atmosphère à 5040 m.

Avec l'installation de la SAMA, dotée de deux pyrgéomètres Kipp&Zonen, les radiations dans le domaine de l'infra-rouge de 5 à 50 micromètres sont désormais disponibles. Ce domaine de longueur d'onde correspond à l'émission de corps dont la température d'émission maximale est comprise entre (loi en $T \sim 3000/\lambda$) 60 et 600 Kelvin.

Sur la figure E.10 sont représentées les radiations thermiques atmosphériques (LW^{\downarrow}) et de la surface (LW^{\uparrow}). Pour LW^{\downarrow} et à un degré moindre pour LW^{\uparrow} la saisonnalité est marquée avec des maxima atteints en fin de saison des pluies (février-mars).

Pour LW^{\uparrow} , une correction est préconisée par Kipp and Zonen : $LW^{\uparrow}_{réelle} = LW^{\uparrow}_{mesurée} - 2,5\% SW_{inc}$. En fait, Jean Emmanuel Sicart préconise dans sa thèse (2002) non pas 2,5% mais 2%

Si en saison des pluies les radiations grandes longueurs d'onde de l'atmosphère et de la surface sont voisines, ce n'est plus le cas en saison sèche où la radiation thermique atmosphérique est plus faible et le bilan pour les grandes longueurs d'onde à 1m de la surface (hauteur du capteur) est déficitaire.

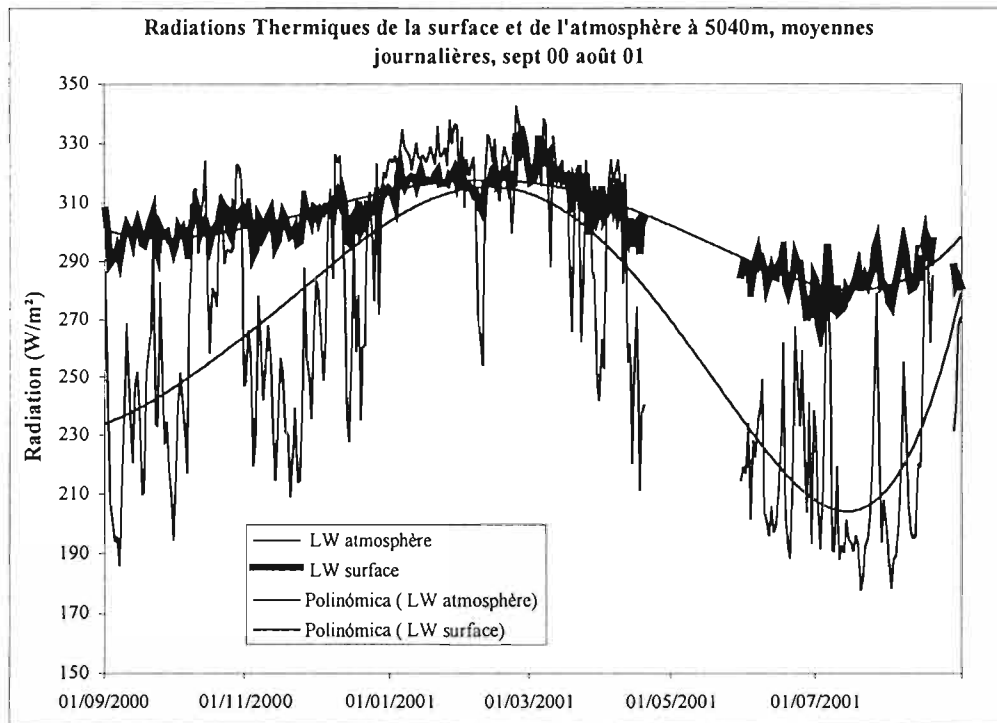


Figure E.10

A partir de LW^{\uparrow} et de l'équation d'émission du corps noir (ϵ valant l'unité), il est possible d'estimer la température de surface du glacier sous la capteur.

$$LW^{\uparrow} = \epsilon \cdot \sigma \cdot T_{surf}^4$$

Cette température est présentée sur la figure E.11. Le plus frappant est d'obtenir des températures positives alors qu'un maximum théorique est une température de 0°C . Ce problème a déjà été rencontré lors d'autres études (au Caquella, Wagon, communication personnelle), et il persiste ici malgré la correction suggérée par le constructeur (cf. Ci-dessus) qui permet de limiter cet effet mais ne l'élimine pas. La température de surface du glacier suit une saisonnalité accentuée par rapport à celle de la température de l'air sus-jacent.

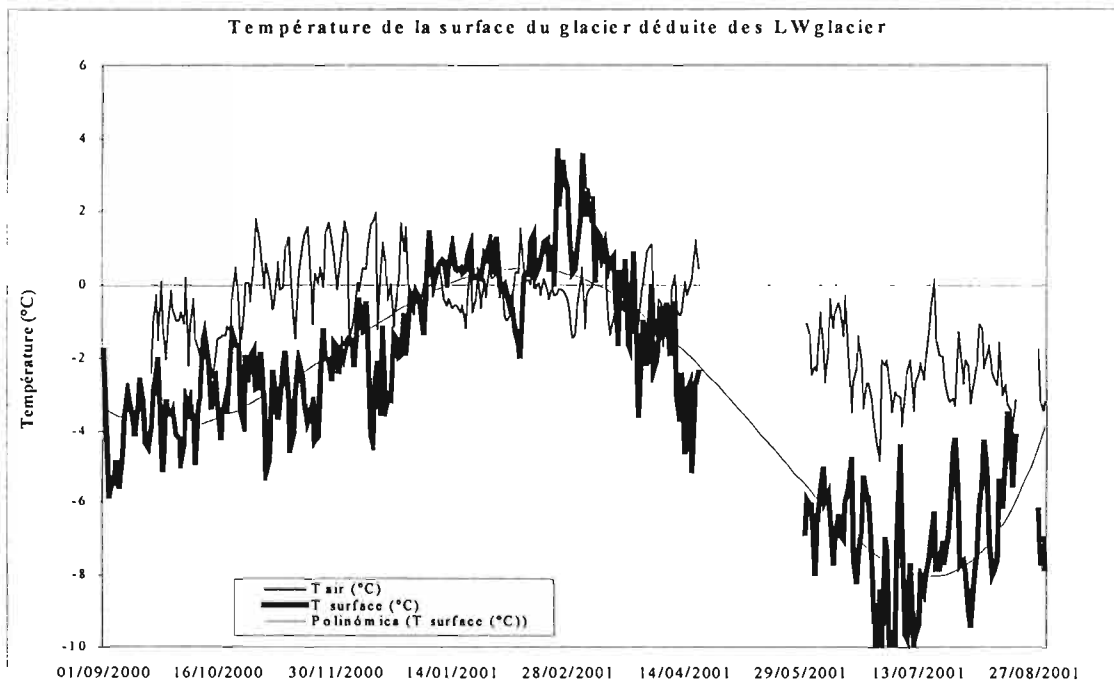


Figure E.11

E.2.5 Radiation nette journalière à 5040 et 5150 m.

Les figures E.12 et E.13 illustrent la forte relation entre la radiation nette et l'albédo à 5040 m et 5150 m. Les courbes d'albédo et de radiation nette sont symétriques. Cette symétrie est particulièrement nette durant toute la saison des pluies. A l'inverse cela est moins vrai en saison sèche. Ainsi, de mars à juillet l'albédo diminue lentement mais la radiation nette n'augmente pas corrélativement. Globalement, la relation entre l'albédo et la radiation nette est forte durant les périodes avec des précipitations neigeuses (saison des pluies).

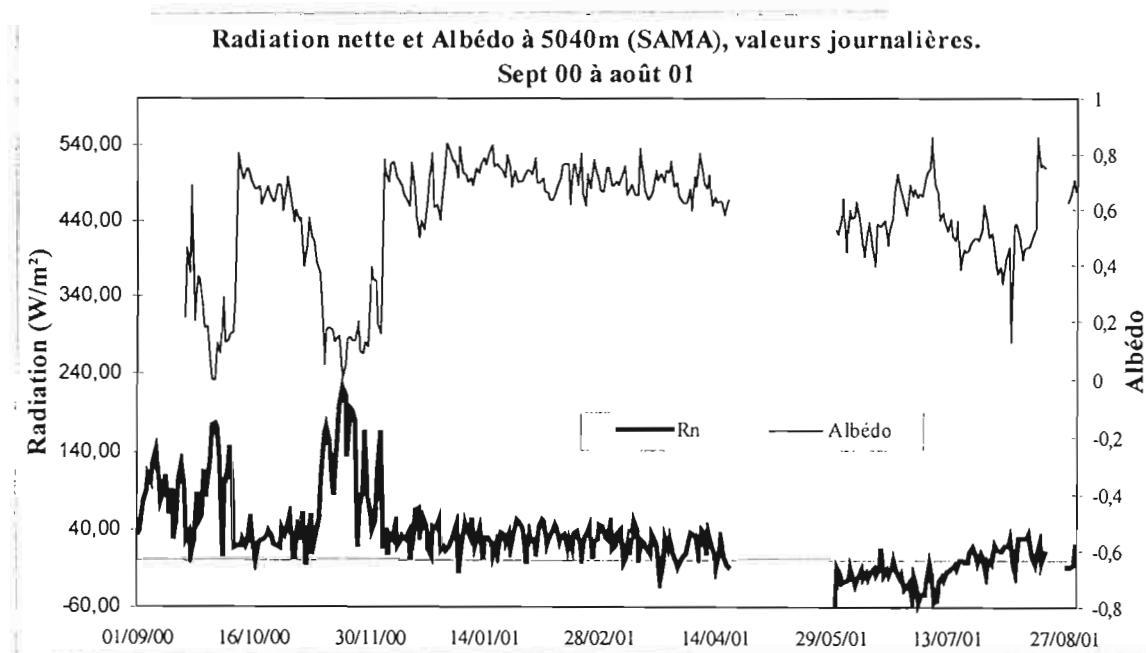


Figure E.12

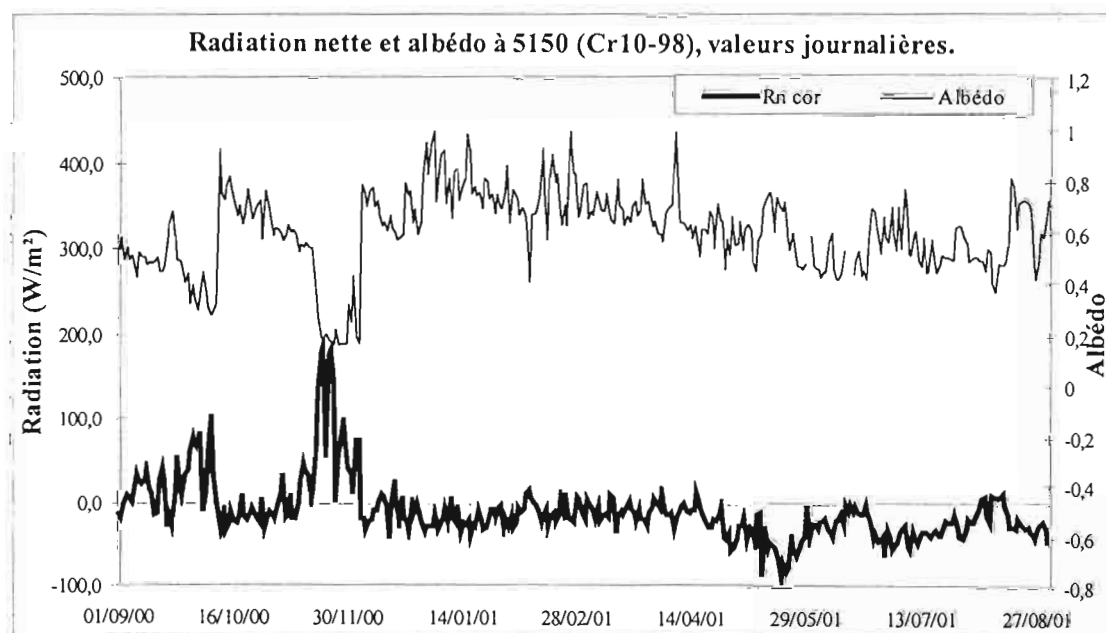


Figure E.13

La corrélation entre Rn_{SAMA} et Rn_{Cr10} est bonne cette année : $r^2=0,86$ ($n=366$). Cette corrélation doit être comparée à un coefficient de détermination de 0,97 obtenu lorsque la SAMA était installée à 5150m à côté de la station Cr10-98. Cela prouve que le bilan radiatif est assez identique cette saison entre les deux altitudes, les différences pouvant s'expliquer par des différences de couverture neigeuse ($Albédo-T_{surface}$).

E.3 Radiation nette et albédo mensuel.

E.3.1 Année 2000-2001.

Dans le tableau E.1 sont répertoriés les radiations nettes et les albédos mensuels à 5050 et 5150 m. Ce tableau est illustré par la figure E.14. Les fluctuations de l'albédo comme de la radiation nette sont de même signe mais plus fortes à 5040 m qu'à 5150 m.

	Cr10-98			SAMA		
	Rn cor	Albédo		Rn	Albédo	
sept-00	15,64	0,49		82,35	0,28	18
oct-00	2,09	0,60		49,97	0,53	
nov-00	52,94	0,40		103,54	0,26	
déc-00	-4,27	0,64		38,83	0,63	
janv-01	-19,83	0,80		29,21	0,75	
févr-01	-9,59	0,72		30,22	0,71	
mars-01	-8,98	0,69		19,28	0,70	
avr-01	-14,58	0,64		17,45	0,66	10
mai-01	-46,28	0,59	1	-33,24	0,52	29
juin-01	-24,05	0,51	2	-19,10	0,57	7
juil-01	-34,86	0,56		-12,96	0,57	
août-01	-16,99	0,57		12,44	0,54	
Moyenne	-9,06	0,60		26,50	0,56	

En italique, les moyennes calculées en dépit de lacunes (leur nombre est indiquée à côté)

Tableau E.1 : Radiation nette (W/m²) et albédo à 5150 et 5040m.

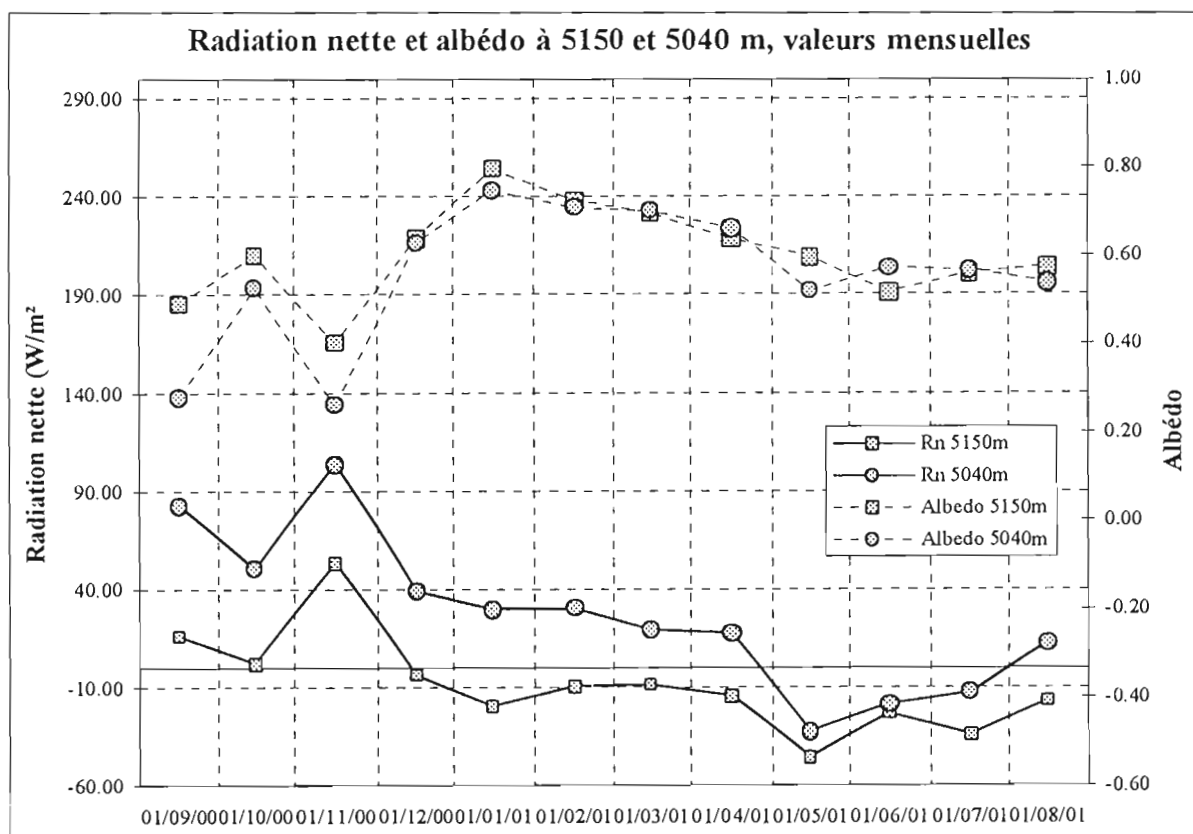


Figure E.14.

E.3.2 Comparaison aux années hydrologiques précédentes.

La figure E.15 compare l'évolution au cours des 8 dernières années hydrologiques de la radiation nette et de l'albédo.

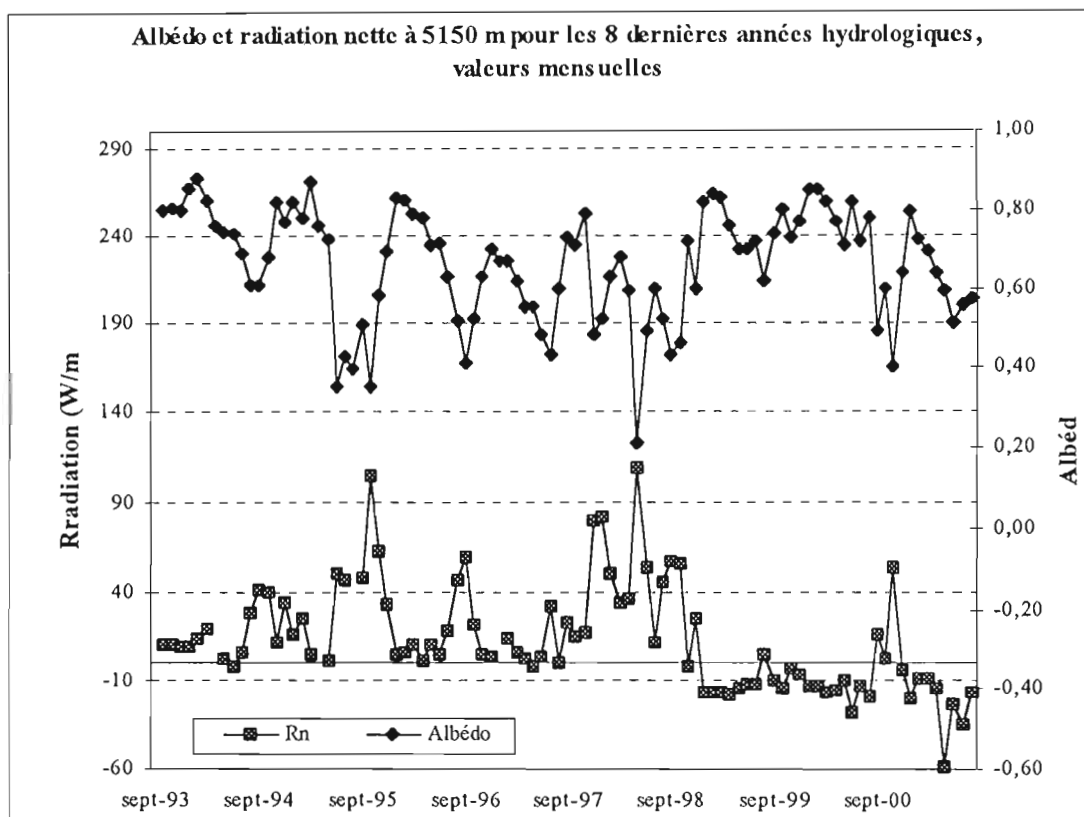


Figure E.15

Cette figure illustre l'absence de schéma répétitif (i.e. saisonnalité) pour les différentes années hydrologiques. L'albédo est souvent maximum en saison des pluies mais plusieurs années échappent à cette règle : 97-98 avec un albédo très faible en saison des pluies mais aussi 99-2000 où l'albédo demeure élevé toute l'année. La radiation nette suit toujours une évolution en miroir par rapport à l'albédo ce qui se traduit par une bonne corrélation entre les deux variables.

Conclusions.

Durant cette année 2000-2001, comme pour l'année précédente, l'existence de précipitations abondantes et régulières a maintenu un fort albédo à la surface du glacier. Ceci engendre une radiation nette pour la première année négative en moyenne annuelle ce qui explique notamment un bilan de masse du glacier positif.

F. DEBITS.

F.1. Débits journaliers.

Les débits moyens journaliers et les pluies journalières de la Plataforma (4750 m), sont présentés simultanément sur la figure F.1. Il n'apparaît pas de relation évidente entre pluies et débits ce qui est caractéristique d'un bassin versant à fort pourcentage d'englacement. Lors des périodes de déficience du limnigraphe, les débits moyens journaliers sont reconstitués par corrélation avec les hauteurs mesurées matin et soir sur un canal situé en aval du limnigraphe (Berthier, 1998).

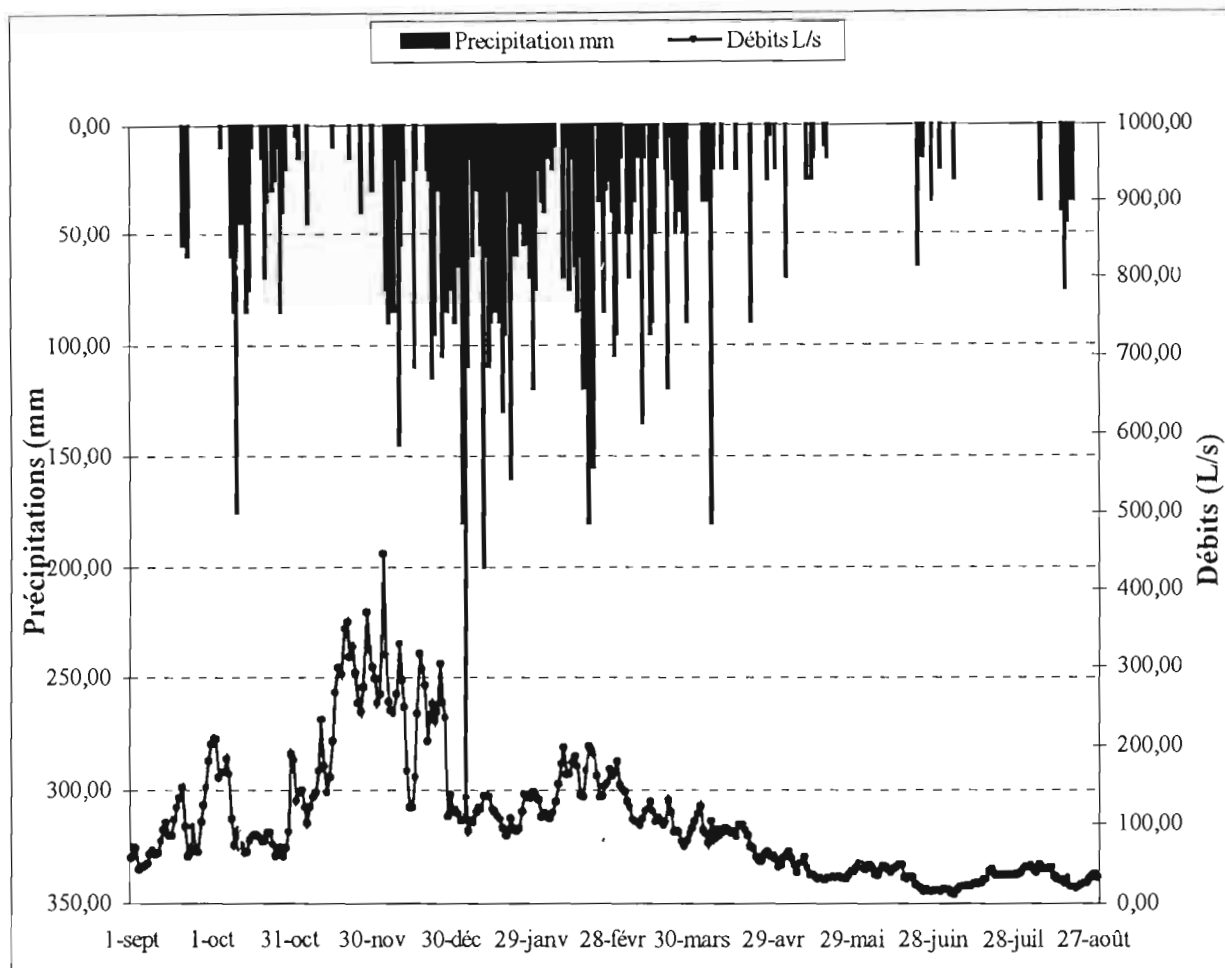


Figure F.1 : Débits journaliers à 4830 m et précipitations à la Plataforma.

F.2. Débits mensuels.

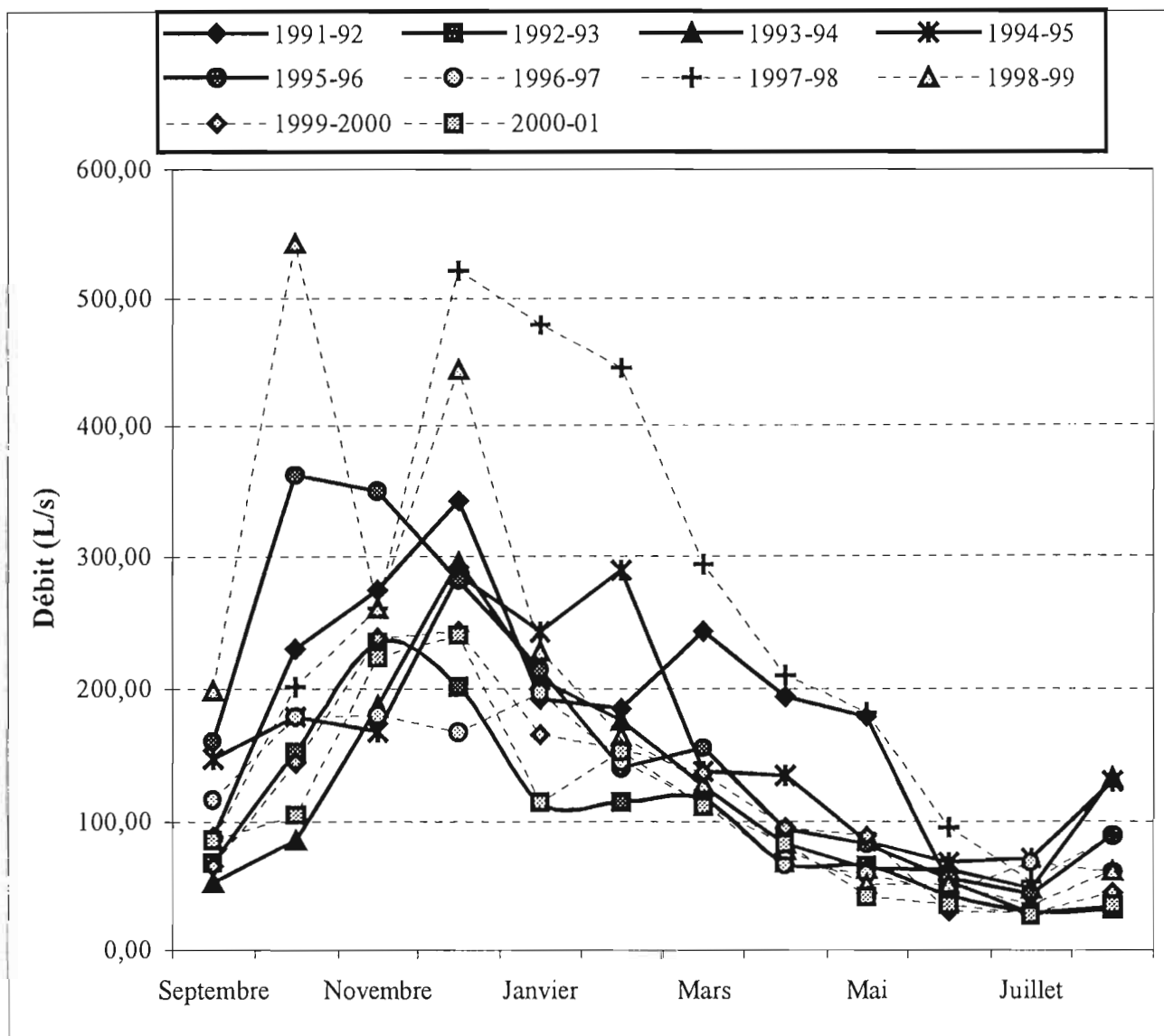
Le Tableau F.1 et les Figures F.2 et F.3 permettent de comparer la valeur mensuelle des débits de la dernière année avec les années précédentes.

L'année 2000-2001, arrive en deuxième position derrière l'année 1992-1993 du point de vue de la faiblesse des débits mensuels mesurés. Sur l'année, le module est de 104 L/s soit 45 L/s de moins que la moyenne décennale. La saison sèche présente des débits particulièrement bas, et les mois de mai et de juillet ont cette année le débit le plus faible de mois de mai et juillet de la décennie. Le reste de l'année est quasi identique à la précédente 1999-2000.

Date	1991-92	1992-93	1993-94	1994-95	1995-96	1996-97	1997-98	1998-99	1999-2000	2000-01	MOYENNE
Septembre	88.00	68.00	52.00	147.00	160.00	116.00	86.00	199.00	65.00	85.90	106.69
Octobre	230.00	152.00	85.00	179.00	362.00	179.00	201.00	543.00	144.00	104.50	217.95
Novembre	274.00	234.00	187.00	168.00	350.00	180.00	260.00	260.00	238.00	223.90	237.49
Décembre	342.00	201.00	295.00	285.00	281.00	167.00	522.00	443.00	243.00	240.00	301.90
Janvier	192.00	114.00	207.00	242.00	214.00	197.00	478.00	228.00	165.00	113.60	215.06
Février	185.00	114.00	176.00	289.00	140.00	145.00	444.00	164.00	154.00	152.30	196.33
Mars	243.00	116.00	126.00	137.00	155.00	113.00	293.00	128.00	136.00	111.40	155.84
Avril	194.00	67.00	82.00	134.00	94.00	66.00	210.00	77.00	95.00	82.40	110.14
Mai	179.00	65.00	63.00	84.00	82.00	59.00	182.00	51.00	88.00	41.20	89.42
Juin	53.00	42.00	62.00	68.00	55.00	45.00	95.00	51.00	30.00	34.60	53.56
Juillet	28.00	29.00	47.00	71.00	43.00	68.00	53.00	34.00	28.00	27.00	42.80
Août	33.00	31.00	132.00	130.00	89.00	60.00	89.00	61.00	44.00	35.06	70.41
Module (L/s)	170.08	102.75	126.17	161.17	168.75	116.25	242.75	186.58	119.17	104.32	149.80

En italique les mois comportant des débits reconstitués

Tableau F.1 : Débits mensuels des 10 dernières années hydrologiques



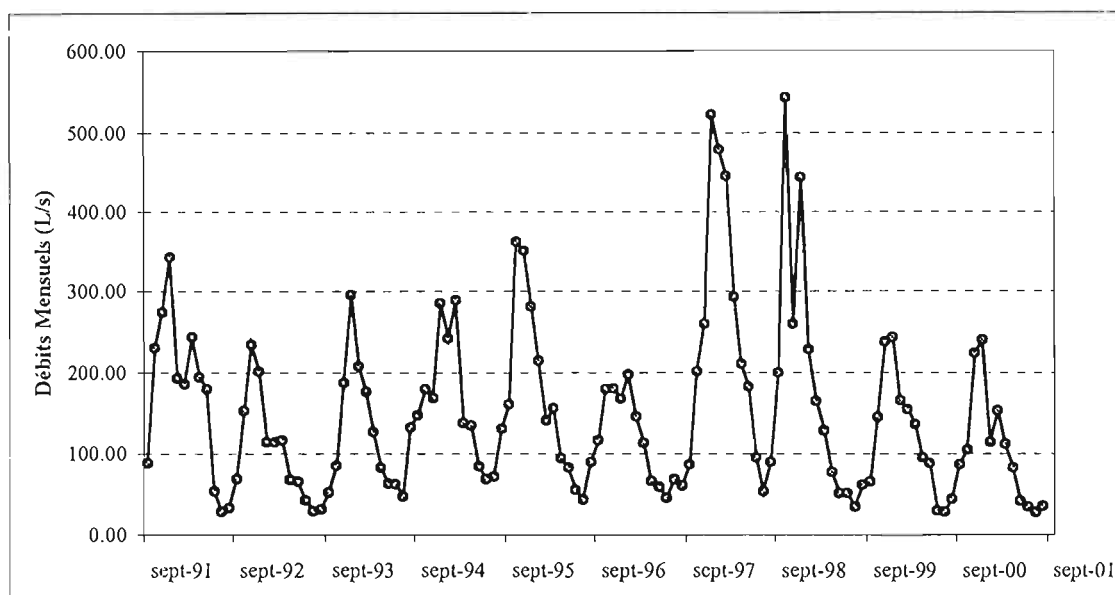


Figure F.3 : Débits des 10 dernières années.

F.3 Débits annuels et bilan de masse hydrologique du glacier.

Le bilan de masse glaciaire, établi par la méthode hydrologique est une manière indépendante d'évaluer le bilan d'un glacier. Ce bilan se calcule par la différence entre les précipitations annuelles sur le glacier (les apports) et la contribution du glacier aux débits du torrent émissaire (les pertes). Cette contribution est évaluée en soustrayant du débit total la partie due au ruissellement depuis les 0.9 km² de moraine du bassin versant.

Année	Débit moyen L/s	Précipitations moyennes mm.	Apports moraine L/s	Apports glacier L/s	Apports glacier mm/an	Bilan de masse (mm/an)	Bilan de masse cumulé (mm/an)
1991/1992	170	920	21	149	2237.5	-1318	-1318
1992/1993	102.7	1060	24.2	78.5	1179	-119	-1437
1993/1994	126.2	850	19.4	106.8	1603.8	-754	-2190
1994/1995	161.2	850	19.4	141.8	2129	-1279	-3469
1995/1996	168.75	826	18.8	149.95	2251.8	-1426	-4895
1996/1997	116.2	1051	23.99	92.21	1385	-334	-5229
1997/1998	242.8	810	18.49	224.31	3368	-2558	-7787
1998/1999	187	942	21.5	165.5	2485	-1543	-9330
1999/2000	119	952	21.73	97.27	1460	-508	-9838
2000/2001	104.32	1189	27.13	77.19	1159.20	29	-9809

Surface glacier (2.1 km²)

Surface moraine (0.9 km²)

Précipitation annuelle : moyenne annuelle des précipitations à P₂, P₃, P₄, P₅

Apport moraine : (0.8*Précipitation*surface moraine) / 1 an

Apport glacier (l.s⁻¹) : Module annuel - Apport moraine

Apport glacier (mm) : Apport glacier (l.s⁻¹)* 1an / surface glacier

Bilan de masse (mm) : Précipitation annuelle (mm) - Apport glacier (mm)

Tableau F.2 : Bilan hydrologique des 10 dernières années hydrologiques

Cette année le bilan de masse hydrologique est très légèrement positif avec un gain équivalent à 0,03 m d'eau. Une comparaison avec le bilan de masse glaciaire est réalisée dans la partie J.

G. PRESSION DE VAPEUR D'EAU.

Les pressions de vapeur d'eau sont évaluées à 4750, 5040 et 5150 par des capteurs Vaisalas.

Nous utilisons les équations psychrométriques théoriques suivantes pour calculer les pressions de vapeur à partir de températures de l'air et de l'humidité (Queney, 1974) :

$$\begin{aligned} \text{Pression de vapeur saturante :} & \quad e_{\text{sat}} = 6.1078 \text{ EXP } ((17.08085 T_{\text{sec}}) / (234.175 + T_{\text{sec}})) \\ \text{Pression de vapeur :} & \quad e = e_{\text{sat}} * \text{Hr}/100 \text{ (Hr désigne l'humidité relative).} \end{aligned}$$

G.1 Moyennes demi-horaires.

Pour étudier ces valeurs instantanées d'humidité, on calcule l'humidité pour une journée 'moyenne' (prise au hasard) de saison des pluies (15 janvier) et de même pour une journée 'moyenne' (15 juillet) de saison sèche. Les résultats de ces calculs sont présentés sur le figure G.1.

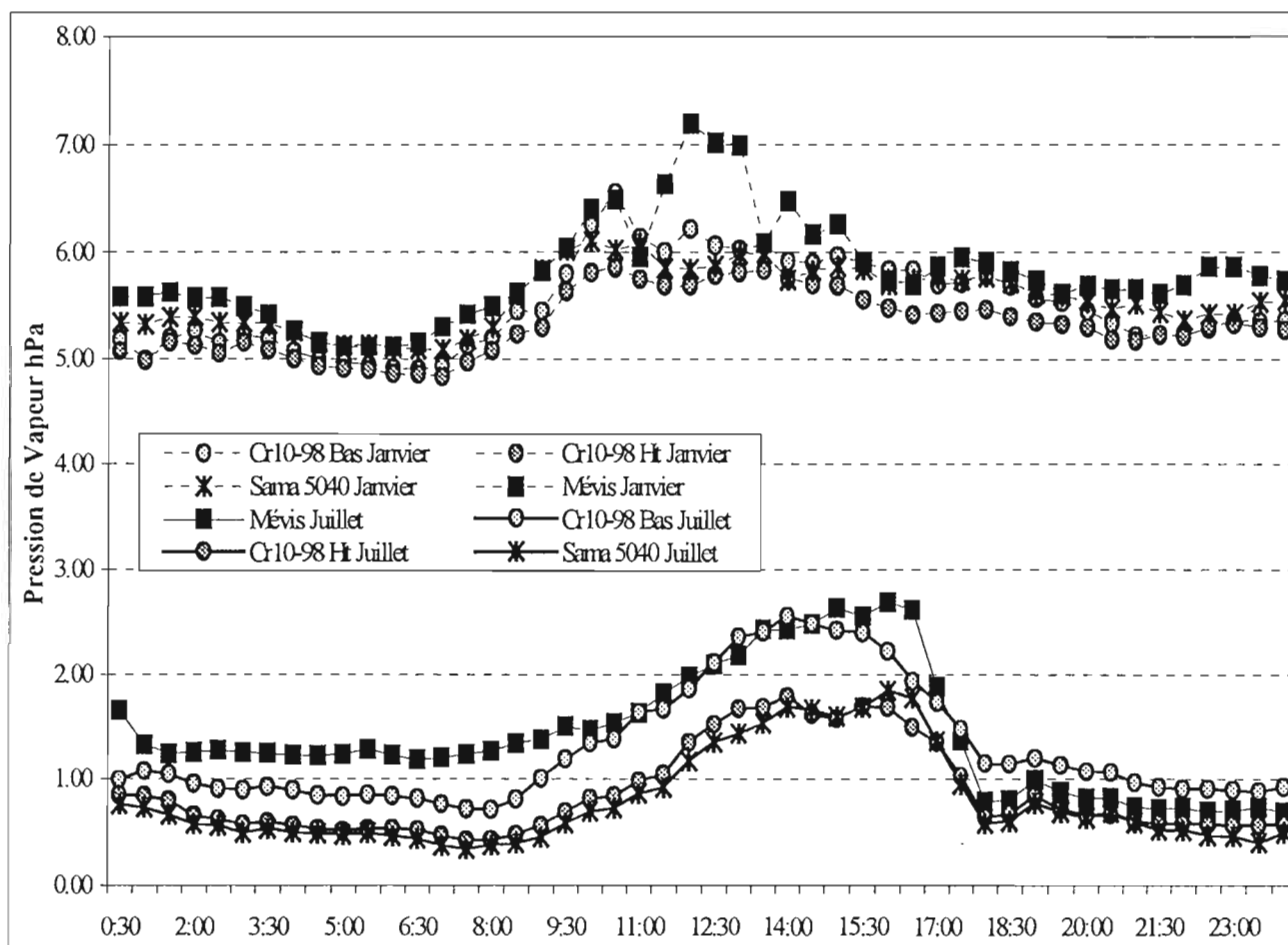


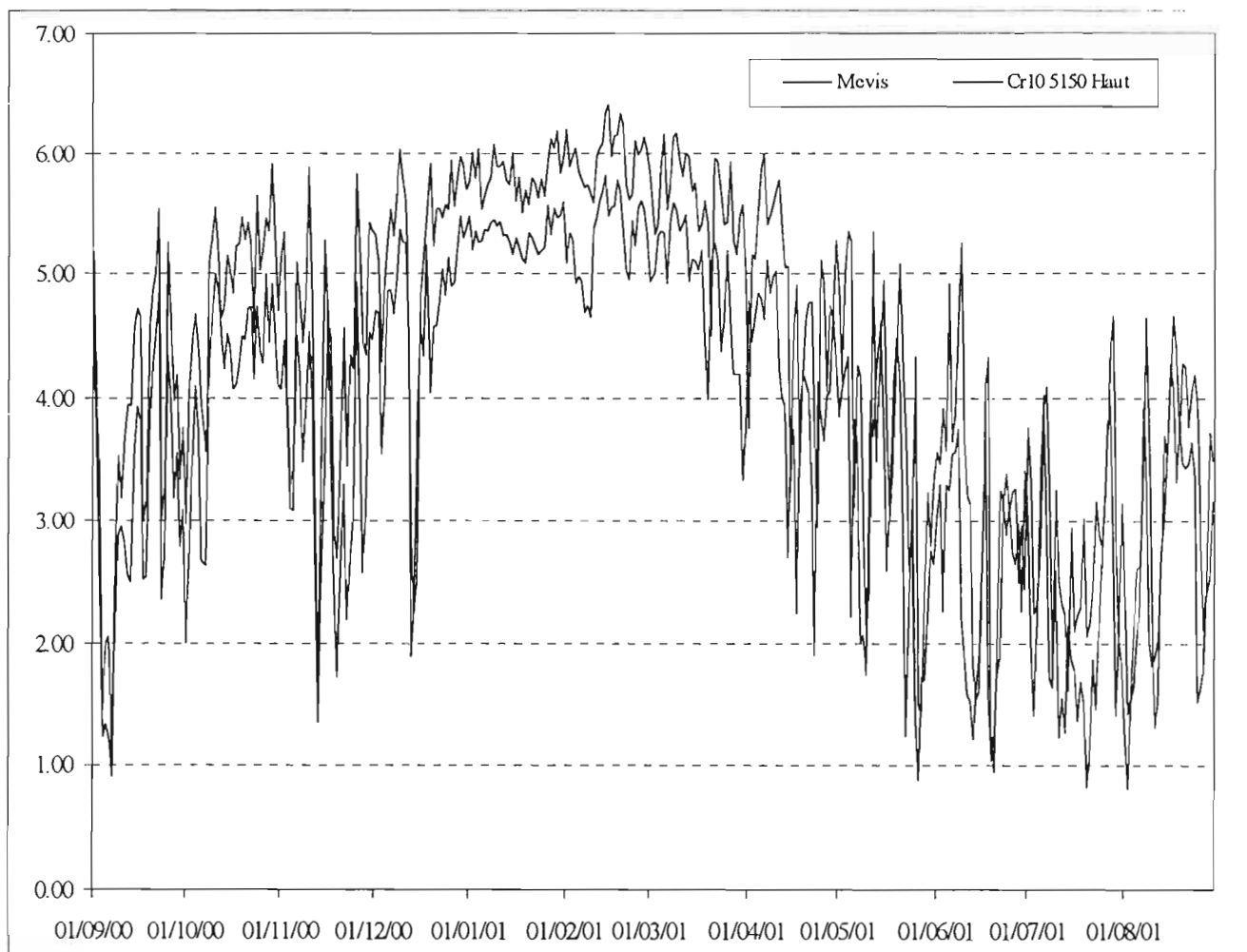
Figure G.1 : Pression de vapeur d'eau pour un jour moyen de saison sèche (courbes du bas) et de saison des pluies (courbes du haut) à 4750, 5040 et 5150 m.

Ces courbes font apparaître la forte différence entre saison sèche et humide, l'humidité variant du simple au double entre les deux.

G.2 Moyennes journalières à 4750 et 5150 m.

La Figure G.2 présente la moyenne journalière de la pression de vapeur à la station Mévis (4750 m, hors du glacier) et à la station météorologique à 5150 m sur le glacier (capteur haut). On note la très bonne corrélation entre les deux séries, avec un coefficient de corrélation de 0,89.

Figure G.2 : Pression de vapeur à 4750 et 5150 de sept-2000 à août 2001.



G.3 Moyennes mensuelles.

Le tableau G.1 regroupe les moyennes mensuelles de la pression de vapeur enregistrée aux différentes altitudes. La Figure G.3 illustre ce tableau.

La saisonnalité est forte. A partir d'avril 2000 se dessinait un gradient assez net : l'humidité diminue avec l'altitude. Ceci se confirme cette année.

Mois	Moyenne Mensuelle Cr10 5150 bas	Moyenne Mensuelle Cr10 5150 haut	Moyenne Mensuelle Mévis	Moyenne Mensuelle Sama 5040
Sept.	3.12	3.02	3.71	3.71
Oct.	4.34	4.16	4.92	4.28
Nov.	3.49	3.41	4.34	3.44
Déc.	4.80	4.61	5.16	4.77
Janv.	5.64	5.32	5.82	5.62
Fév.	5.33	5.30	5.97	5.50
Mars	4.87	4.88	5.62	4.97
Avril	4.22	4.09	4.82	4.29
Mai	3.38	3.02	3.67	2.63
Juin	2.88	2.56	3.08	2.58
Juillet	2.61	2.10	2.83	2.10
Août	2.87	2.67	3.19	2.66

Tableau G.1 : Moyennes mensuelles de la pression de vapeur.

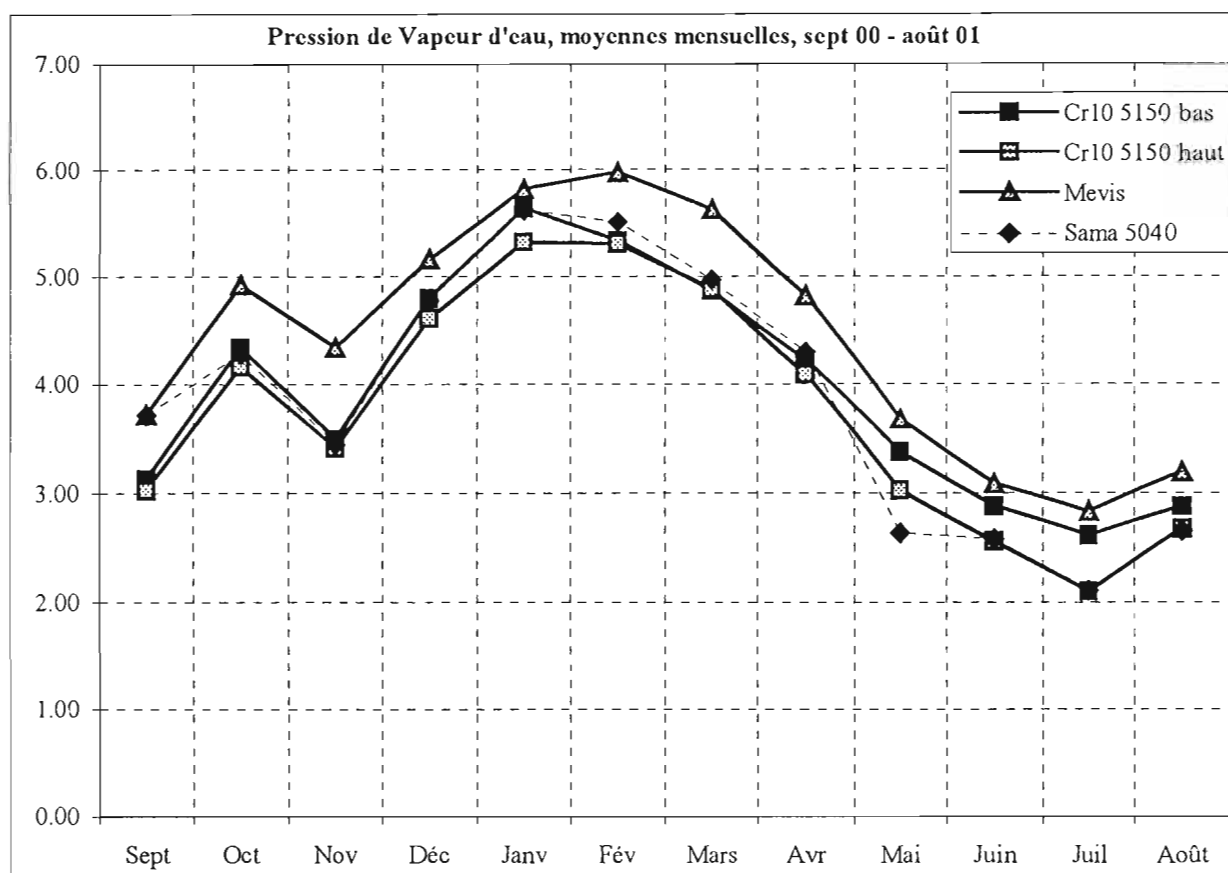


Figure G.3

H. Vitesse et direction du vent.

Mesures disponibles.

Les mesures disponibles concernent la Plataforma et le glacier :

- 1- Plataforma (station Mévis à 4750 m) : vitesse du vent à 230 cm.
- 2- Station SAMA à 5150 m : direction et vitesse du vent à 250 cm.
- 3- Station Campbell (Cr10-98 à 5150 m) : direction et vitesse du vent à 30 et 180 cm.

Du fait de ces différences de hauteur des capteurs, toutes les vitesses à 4750 (Mévis) et à 5150 m (haute) présentées dans ce chapitre sont ramenées artificiellement à la hauteur de la SAMA en supposant un profil de vitesse logarithmique :

$$V_{250\text{cm}} = V_{180\text{cm}} \times \frac{\ln(250)}{\ln(180)}$$

H.1 Valeurs instantanées.

H.1.1 Durant la saison des pluies.

La figure H.1 montre l'évolution au cours des journées du 1 au 6 janvier de la vitesse du vent (haut) à 4750, 5040 et 5150 m. Elle est similaire aux trois stations, ainsi le pic dans la nuit du 5 janvier est enregistré aux 3 sites, il est plus fort à la SAMA. Le vent bas à 5150 m (non représenté) est très bien corrélé au vent haut ($r^2 = 0,99$) et toujours inférieur au vent haut.

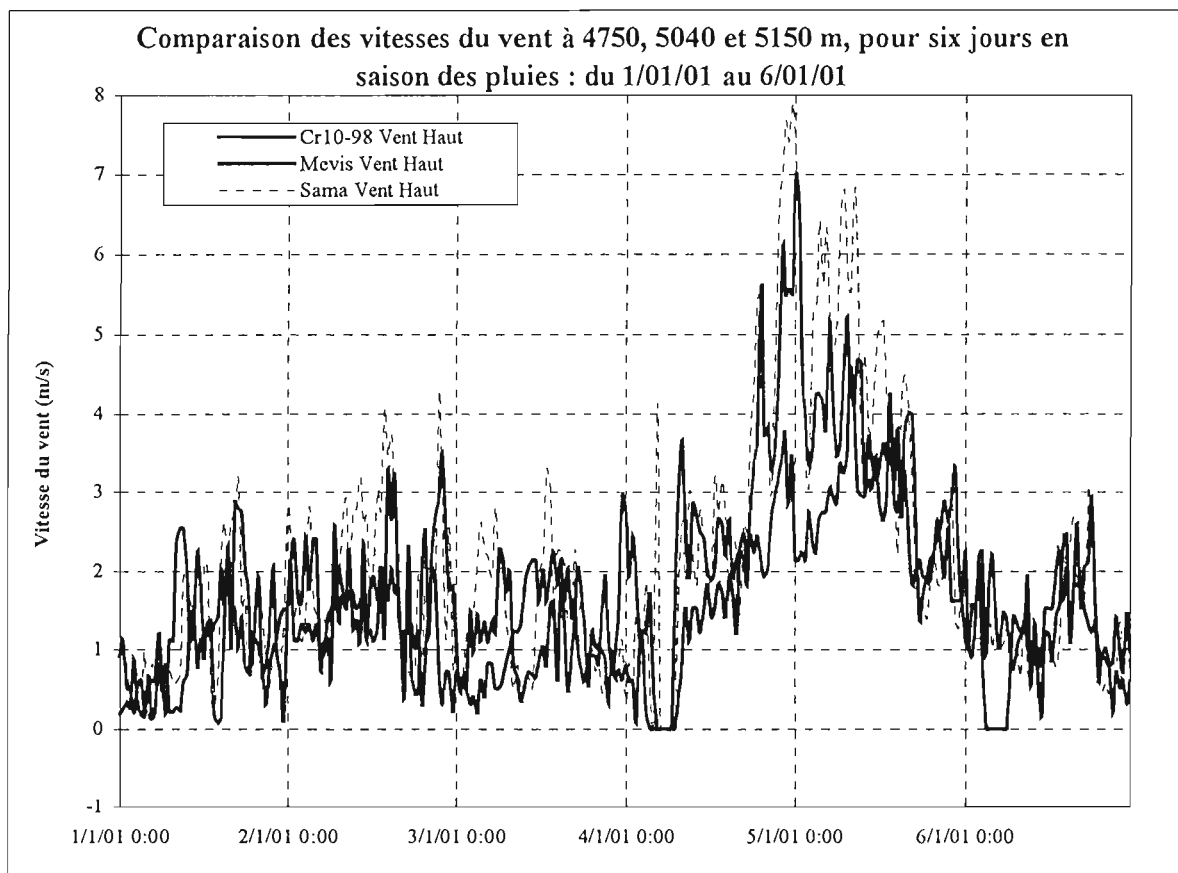


Figure H.1

La figure H.2 illustre la vitesse du vent aux trois mêmes sites au cours d'une journée moyenne de saison des pluies. A 5040 et 5150 m la vitesse est plus forte qu'à la Mévis, surtout en milieu de journée. A 5040 m, le vent est plus fort notamment le jour : le pic de vent vers 14h00 est plus d'1 m/s supérieur. Ceci s'explique par le milieu très ouvert au sein duquel se situe la SAMA, notamment par rapport au vent de vallée (prépondérant en milieu de journée).

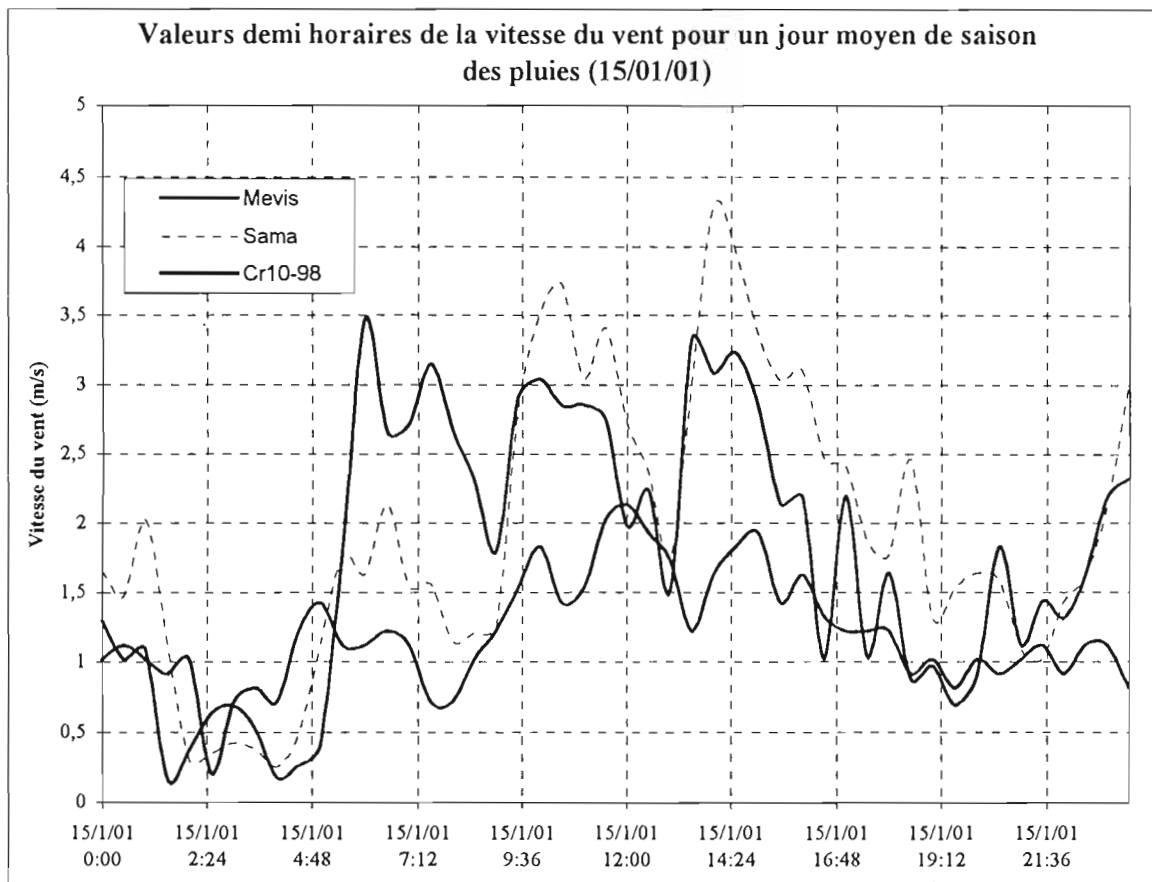


Figure H.2

Le tableau H.1 qui recense les % des mesures de direction dans chaque cadran. Il émerge une répartition assez similaire des directions entre les deux stations. La direction prépondérante est Nord-Ouest.

	Cr10-98		Sama
	Dir Basse	Dir Haute	Dir Haute
360-270	30	32	34
270-180	18	15	13
180-90	24	25	32
90-0	28	29	22
	100	100	100

Tableau H.1 : Directions du vent haut à 5040 m (station SAMA) et 5150 m en saison des pluies (en %).

H.1.2 Durant la saison sèche.

La figure H.3 montre l'évolution au cours des journées du 3 au 6 juillet de la vitesse du vent (haut) à 4750, 5040 et 5150 m. La vitesse de vent est voisine pour les deux stations sur le glacier. La bonne corrélation entre vent haut et bas (toujours inférieur) à 5150 m persiste. En revanche l'évolution à la station Mévis est très différente, notamment la nuit. Une explication possible : toutes les stations seraient sensibles au vent de vallée en journée alors que la nuit les vents catabatiques (de Nord-Ouest) descendants du sommet du Huayna Potosi se feraient plus sentir sur le glacier qu'à la Plataforma.

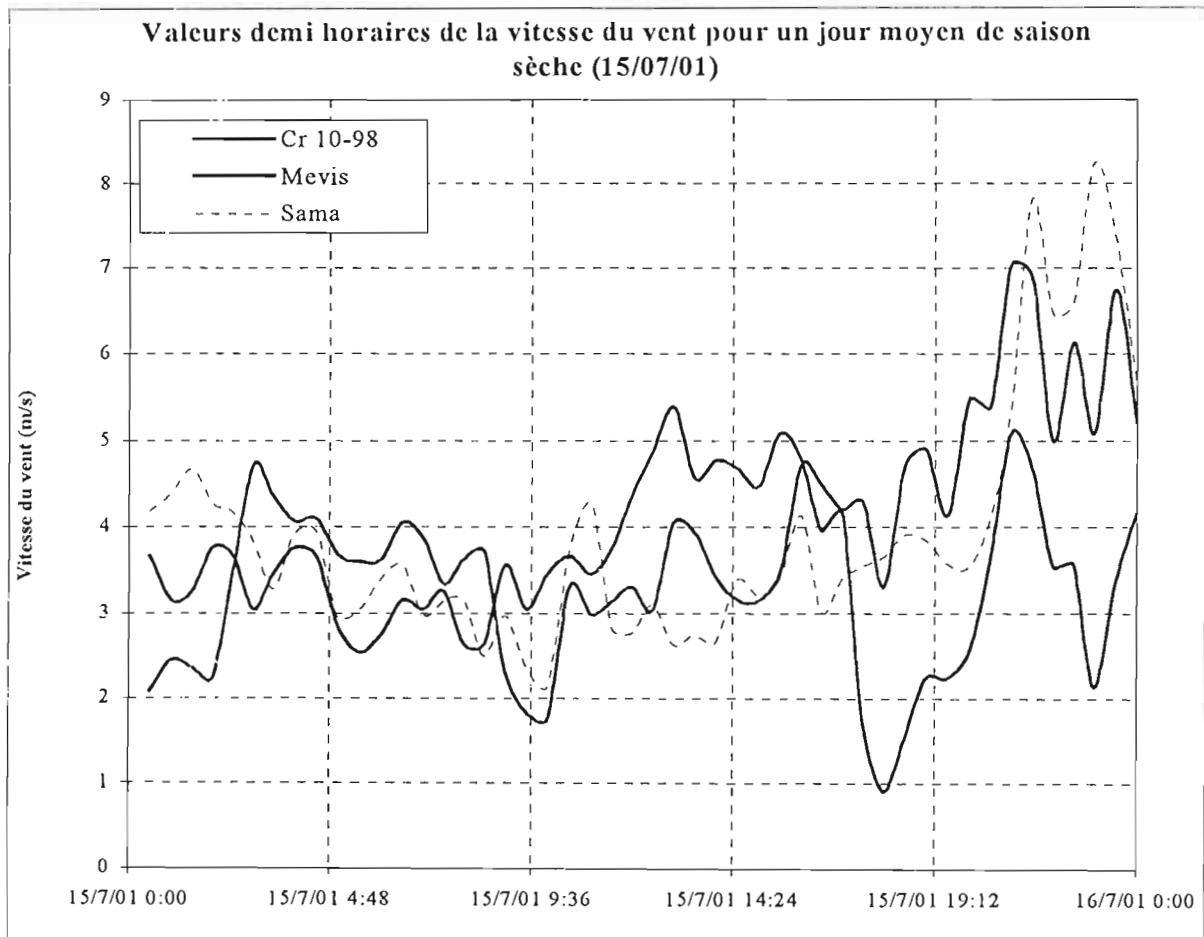


Figure H.3

La figure H.4 illustre la vitesse du vent aux trois mêmes sites au cours d'une journée moyenne de saison sèche. Les vitesses sur le glacier ont la même évolution journalière avec des vitesses supérieures à la SAMA. Pour la Mévis, les observations faites sur la figure H.3 demeurent valables pour l'ensemble de cette saison sèche puisque c'est la nuit que la vitesse diffère le plus (plus faible).

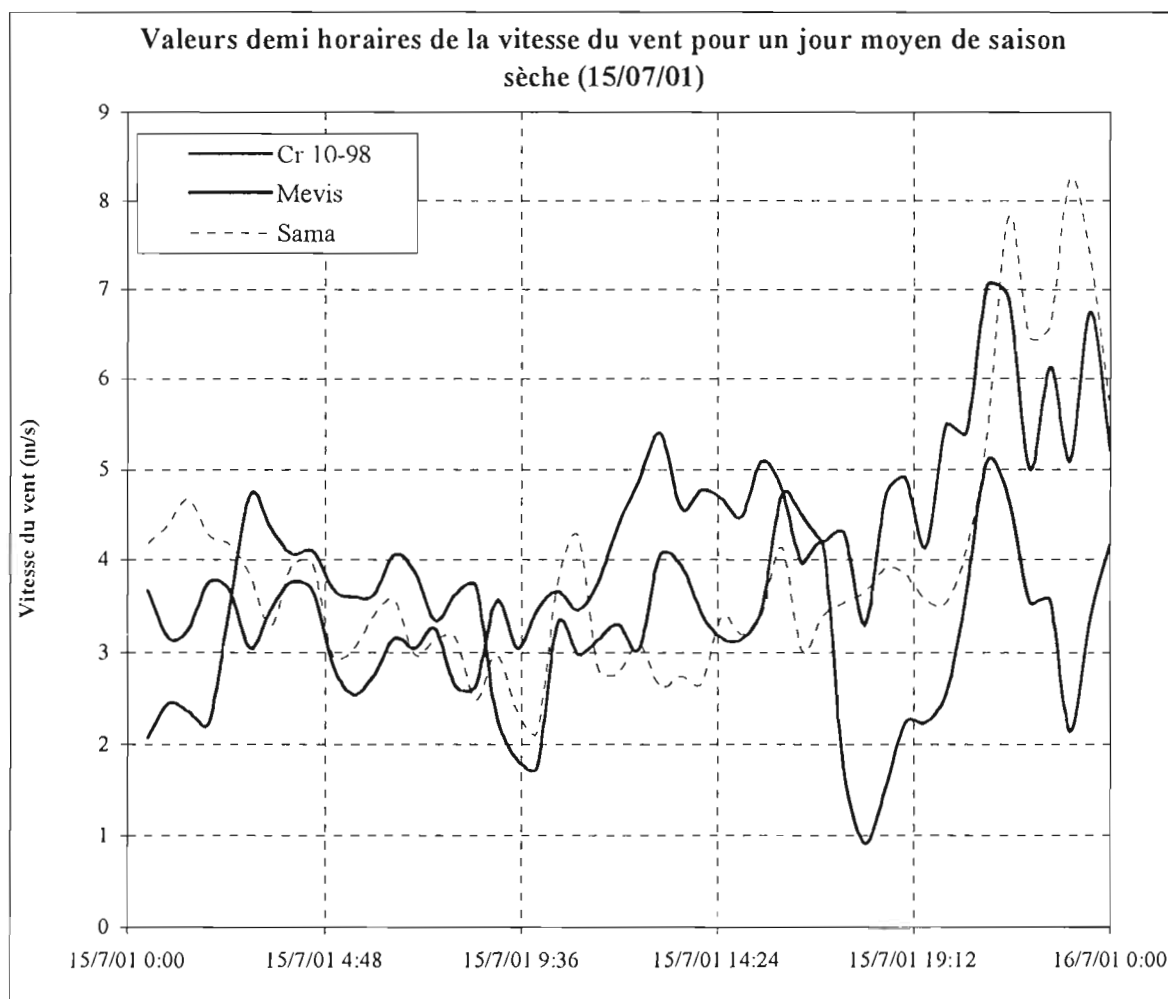


Figure H.4

Le tableau H.2 recense les % des mesures de direction dans chaque cadran. Les différences avec la saison humide sont importantes quantitativement, mais la direction prépondérante reste identique : Nord-Ouest.

	Cr10-98		Sama
	Dir Basse	Dir Haute	Dir Haute
360-270	49	40	50
270-180	14	17	14
180-90	12	20	17
90-0	25	23	19
	100	100	100

Tableau H.2 : Directions du vent haut à 5040 m (station SAMA) et 5150 m en saison sèche (en %).

H.2 Valeurs journalières à 4750, 5040 et 5150 m.

Les figures H.5 et H.6 représentent les moyennes journalières des mesures hautes 4750, 5040 et 5150 m. Nous présentons ces moyennes non pas pour toute l'année (figure confuse) mais pour deux périodes de 4 mois : de décembre 00 à mars 2001 (H.5) et de mai à août (H.6). Il faut noter des maxima très différents pour ces deux figures.

La simultanéité des maxima aux différentes stations montrent que les pics de vitesse sont synchrones et d'intensité souvent proche. Sur la figure H.6 il semble apparaître une pseudo-périodicité dans les pics du vent en saison sèche qui se reproduisent tous les 10 jours en moyenne.

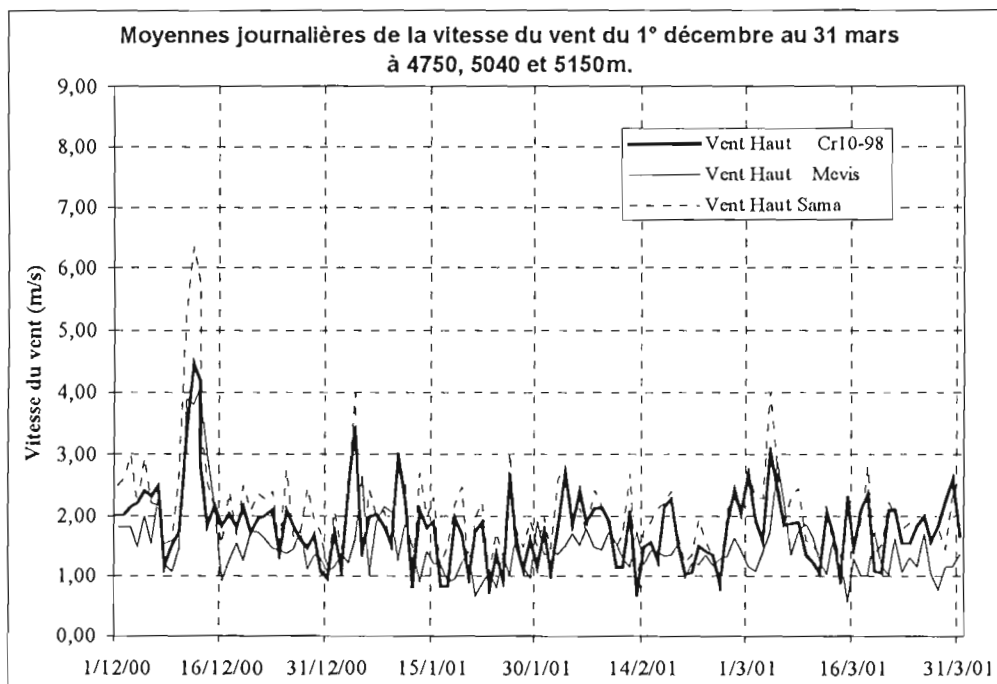


Figure H.5.

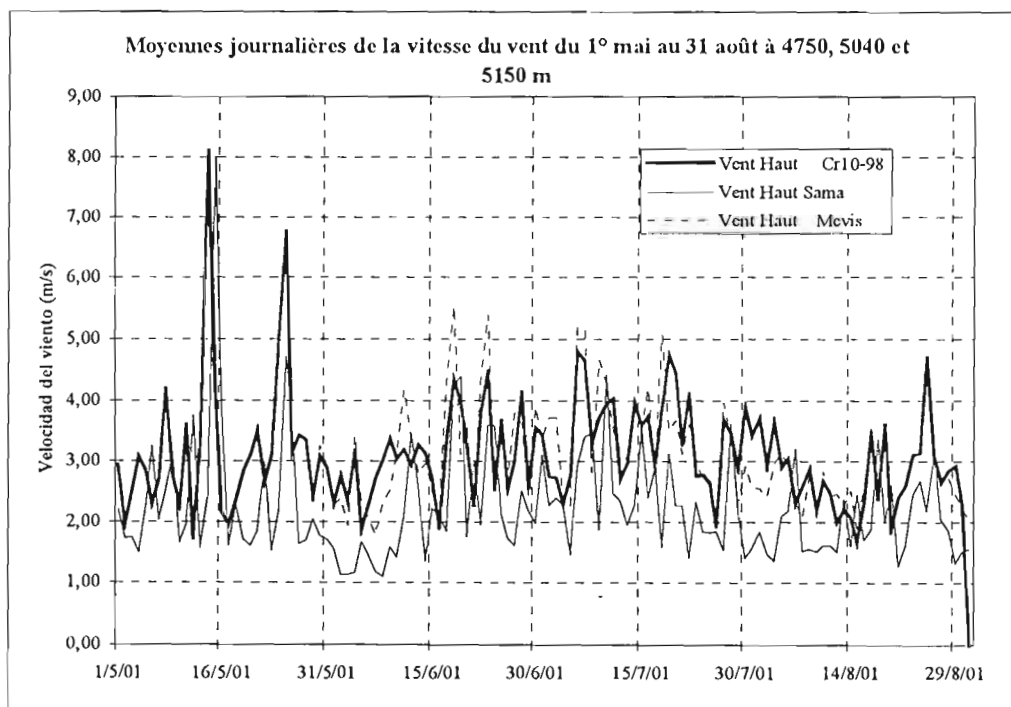


Figure H.6

H.3 Valeurs mensuelles à 4750 m, 5040 et 5150 m.

Les moyennes mensuelles des vitesses du vent à 4750, 5040 et 5150 m sont présentées dans le tableau H.3 et la figure H.7.

Date	Vent Haut Cr10-98	Vent Haut Mevis	Vent Haut Sama	Lacunes Sama
1/9/00	2.72	2.21	2.76	18
1/10/00	2.05	1.54	2.25	
1/11/00	2.38	1.98	2.67	
1/12/00	2.08	1.87	2.54	
1/1/01	1.68	1.35	1.97	
1/2/01	1.67	1.41	1.89	
1/3/01	1.84	1.37	2.01	
1/4/01	2.21	1.72	2.13	11
1/5/01	3.23	2.46	2.83	28
1/6/01	3.04	2.12	3.12	
1/7/01	3.42	2.39	3.43	
1/8/01	2.66	1.97	2.54	9
Moyenne	2.41	1.86	2.51	

Tableau H.3

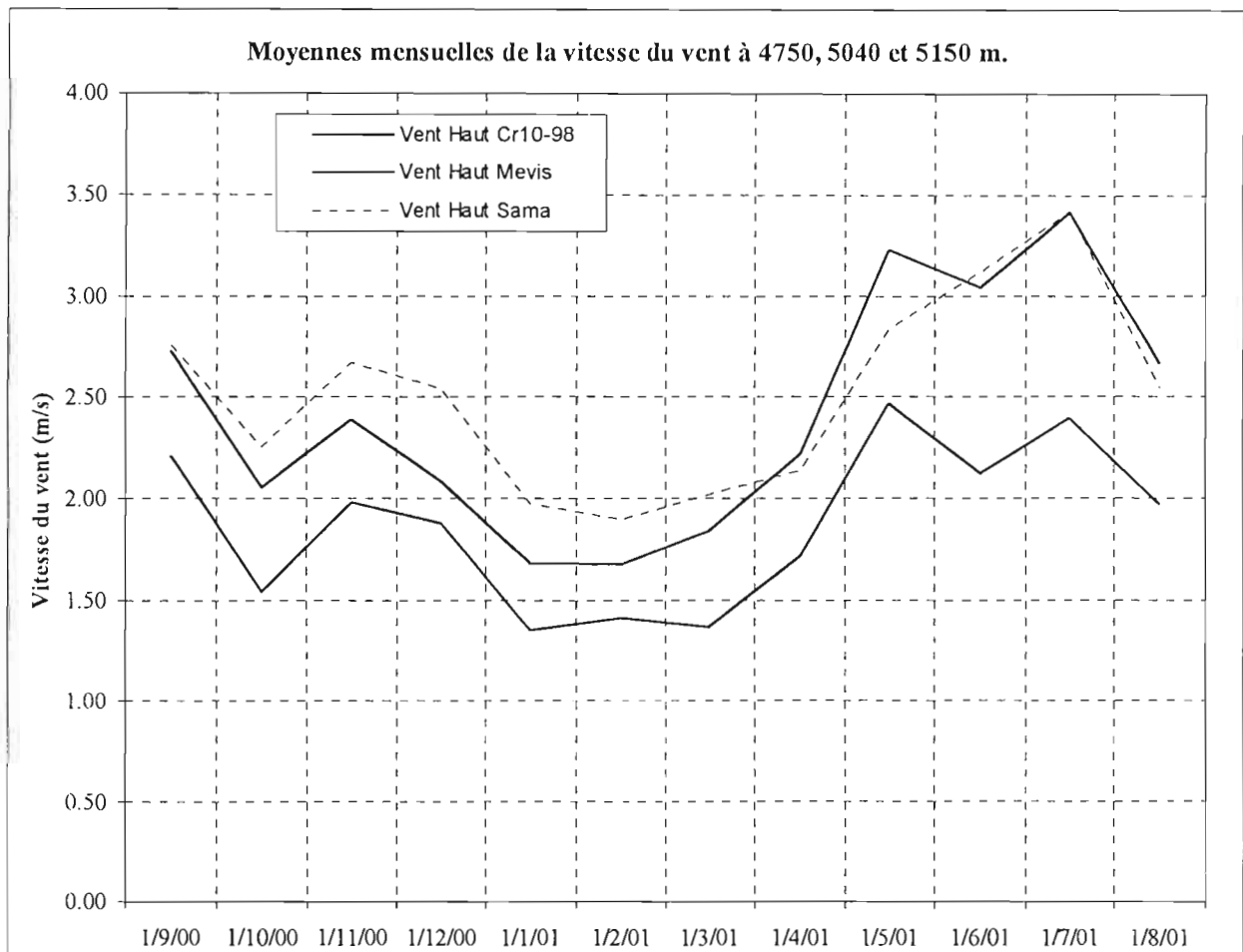


Figure H.7.

L'enregistrement de la saisonnalité du vent est très proche aux trois sites de mesure. Le vent est plus fort durant la saison sèche et sa variabilité inter journalière l'est également. Le vent à la SAMA est plus fort qu'aux autres stations (maximum des moyennes journalières 6,34 m/s contre 5,11 à 5150m et 4,71 à 4750m).

Conclusions.

Pour cette année 00-01 la mesure intermédiaire du vent (à 5040m, SAMA) entre la Mévis à 4750m et la Cr10-98 à 5150 m est toujours intéressante. Les caractéristiques essentielles de cette année sont les suivantes :

Le vent à 5040 m n'est pas intermédiaire entre celui à 4750 m et 5150 m. Il est très proche, en direction, du vent à 5150 m (les deux stations sont sur le glacier) mais plus intense. Cela s'explique sans doute par la position en milieu très ouvert de la SAMA qui la rend sensible aussi bien au vent de vallée qu'au vent catabatique venant du sommet du Huayna Potosi.

A la Plataforma, l'influence du vent de vallée est marquée, ce qui se traduit par des vitesses assez faibles la nuit (l'ascension des masses d'air amazonienne se fait de jour).

I. MESURES DE LA SONDE A ULTRASON A 5150 m.

Ce chapitre présente et analyse les mesures de la sonde à ultrason installée sur le glacier à 5150 m. La sonde échantillonne la distance entre la surface du glacier et le capteur toutes les 30 minutes.

La figure I.1 présente l'évolution de cette distance au cours de l'année hydrologique 2000-2001.

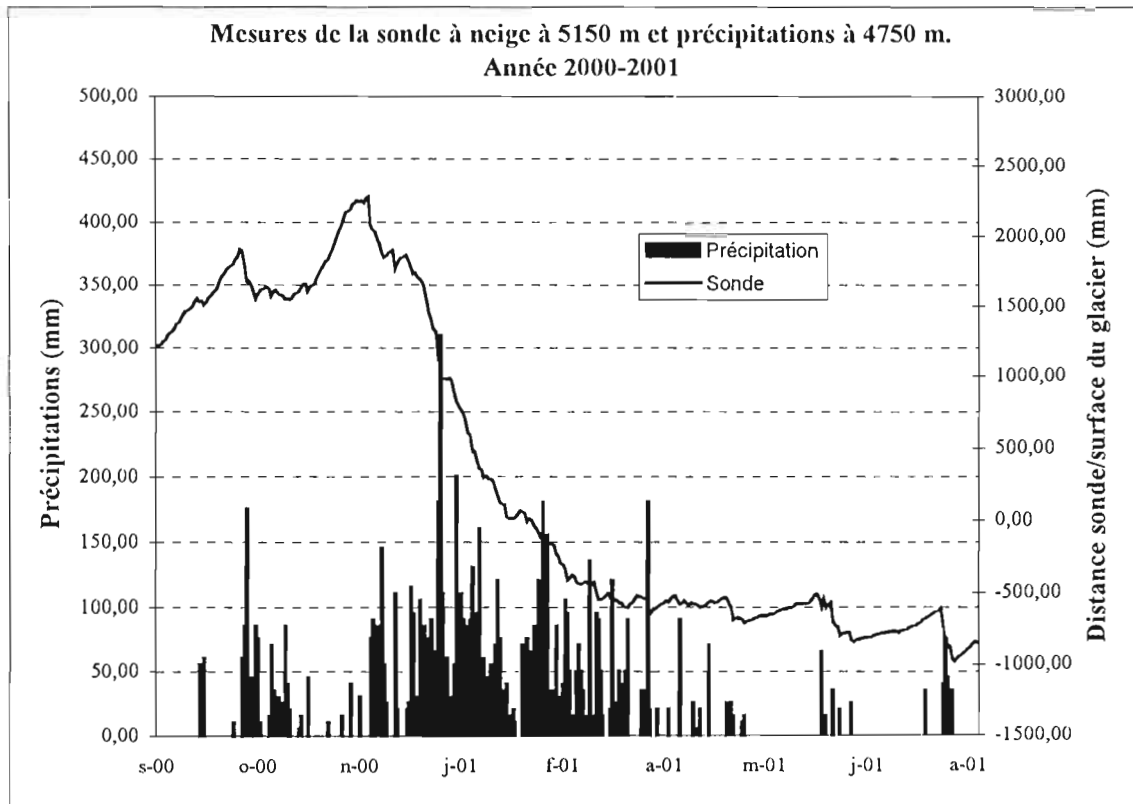


Figure I.1

La sonde traduit une très forte accumulation depuis début décembre jusqu'à mi-avril. On note aussi les deux périodes de légère accumulation au cours de la saison sèche début juillet et début août correspondant à des précipitations conséquentes peu habituelles à cette période. Il existe un bon accord entre les données de la sonde et les précipitations à la Plataforma au niveau qualitatif par contre il n'existe pas de corrélation significative entre les deux séries.

La Figure I.2 présente la variation journalière de la distance sonde/surface : elle permet de distinguer les jours d'ablation nette de ceux d'accumulation nette.

Une caractéristique assez claire sur cette figure est la simultanéité des jours de forte accumulation et des jours de forte 'ablation'. En effet les journées de plus forte 'ablation', en général suivent directement des jours de forte chute de neige. En fait plutôt qu'une forte ablation, cette simultanéité correspond au tassement de la neige fraîche dans les jours qui suivent sa chute.

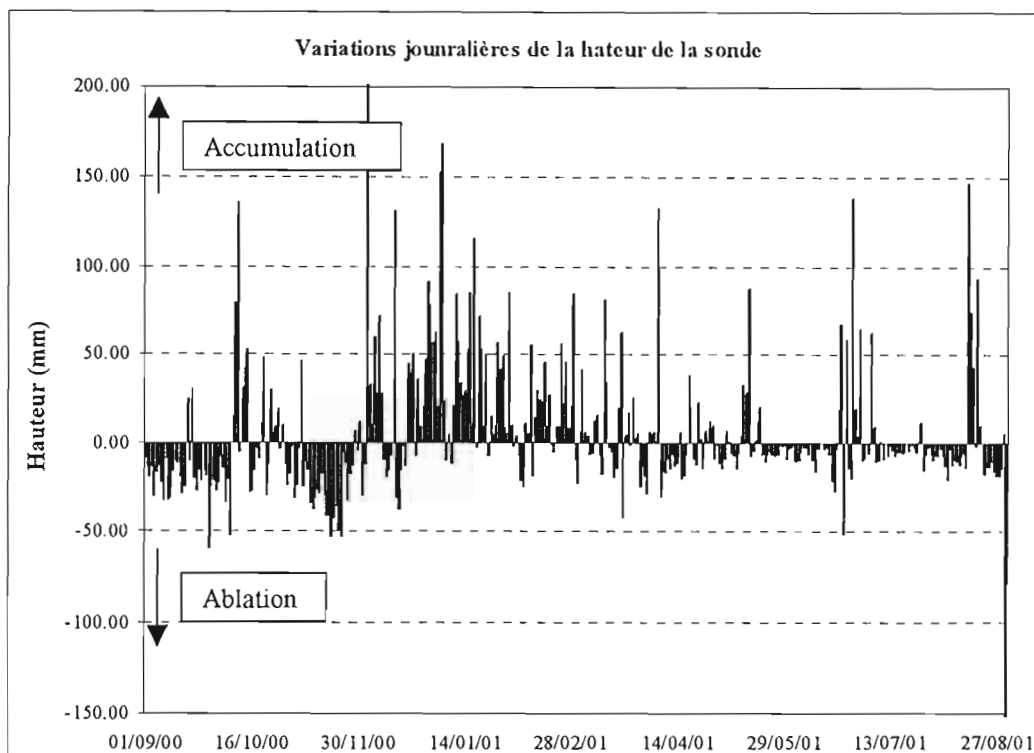


Figure I.2

Comparaison à l'année 99-00.

La figure I.3 compare les moyennes journalières des deux enregistrements.

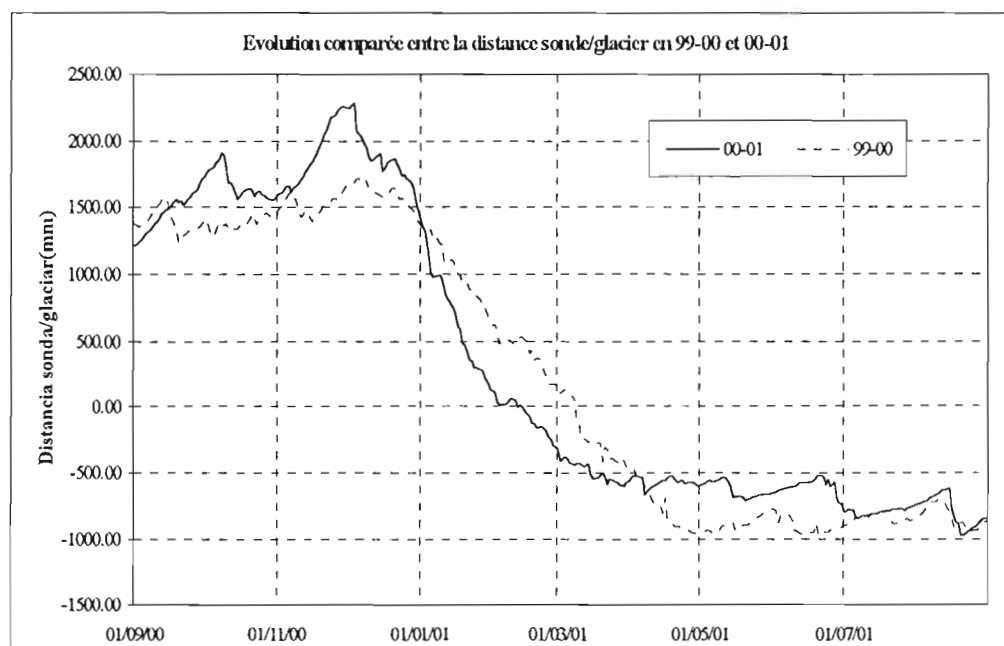


Figure I.3

Globalement la saisonnalité est la même puisque fin août, les deux enregistrements sont presque confondus. L'ablation nettement plus forte jusqu'à début décembre est compensée par les fortes précipitations de cette année 2000-2001.

On notera les différences qui apparaissent dans le détail mois par mois en saison sèche : en juillet et août 2001 il y a deux phases d'accumulation importante. Cette différence s'explique bien par les précipitations plus forte en 2001.

J. GLACIOLOGIE.

J.1. Le dispositif d'évaluation du bilan de masse du glacier Zongo.

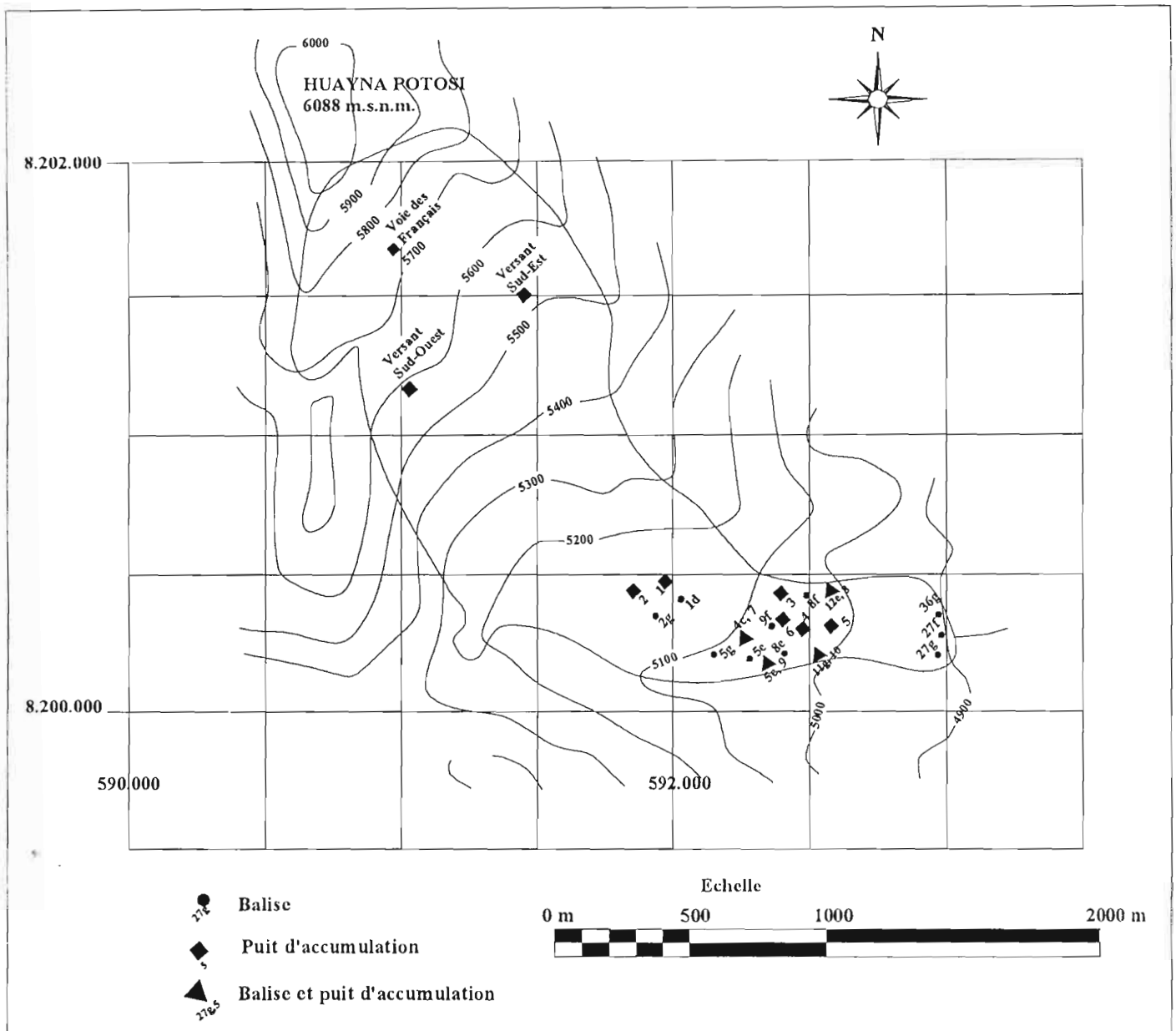


Figure J.1

Sur la carte ci-dessus (Figure J.1) est localisé l'emplacement des balises d'ablation mesurées, ainsi que les puits réalisés lors des missions de fin août en haut et sur la langue du glacier. Ces sondages permettent de mesurer le bilan net pour l'année hydrologique écoulée de la zone d'accumulation : sondage n°1 (5700 m, pente sud du Sommet Sud, au pied de la voie des français), sondage n°2 (5500 m, au niveau du camp des argentins), sondage n°3 'simplifié' (5550 m, vers l'emplacement de l'ancienne station Campbell).

J.2. L'accumulation mesurée en fin d'année hydrologique.

Il s'agit du bilan net estimé à la fin de l'année hydrologique 00-01 par forages et mesures densimétriques dans la partie haute du glacier qui correspond à la zone d'accumulation.

J.2.1. Résultats des différents sondages.

Les résultats des sondages réalisés cette année sont consignés dans les tableaux J.1, J.2 et J.3 illustrés par les figures J.2, J.3 et J.4 : à différentes profondeurs des carottes de neige sont pesées et nous permettent de calculer la densité à ces profondeurs. Ceci fournit une densité moyenne sur la profondeur totale. Cette densité moyenne est traduite en tranche d'eau qui correspond au bilan net de la tranche d'altitude considérée.

➤ **Sondage n°1 : Pied de la voie des Français, 5700 m**

Mesure	L (cm)	D(g/cm ³)	mm d'eau
1	33,00	0,20	67,30
2	31,00	0,30	94,40
3	32,00	0,33	105,40
4	30,00	0,34	103,60
5	27,00	0,40	106,00
6	33,00	0,36	120,60
7	31,00	0,44	136,60
8	34,00	0,42	141,70
9	9,00	0,42	37,50
10	77,00	0,46	357,20
11	19,00	0,51	96,60

Tableau J.1 : Sondage 1 : altitude : 5700 m ; site : pied de la Voie des Français (pente sud du Sommet Sud) S 16°16'3.3" ; W 68°9'4.4".

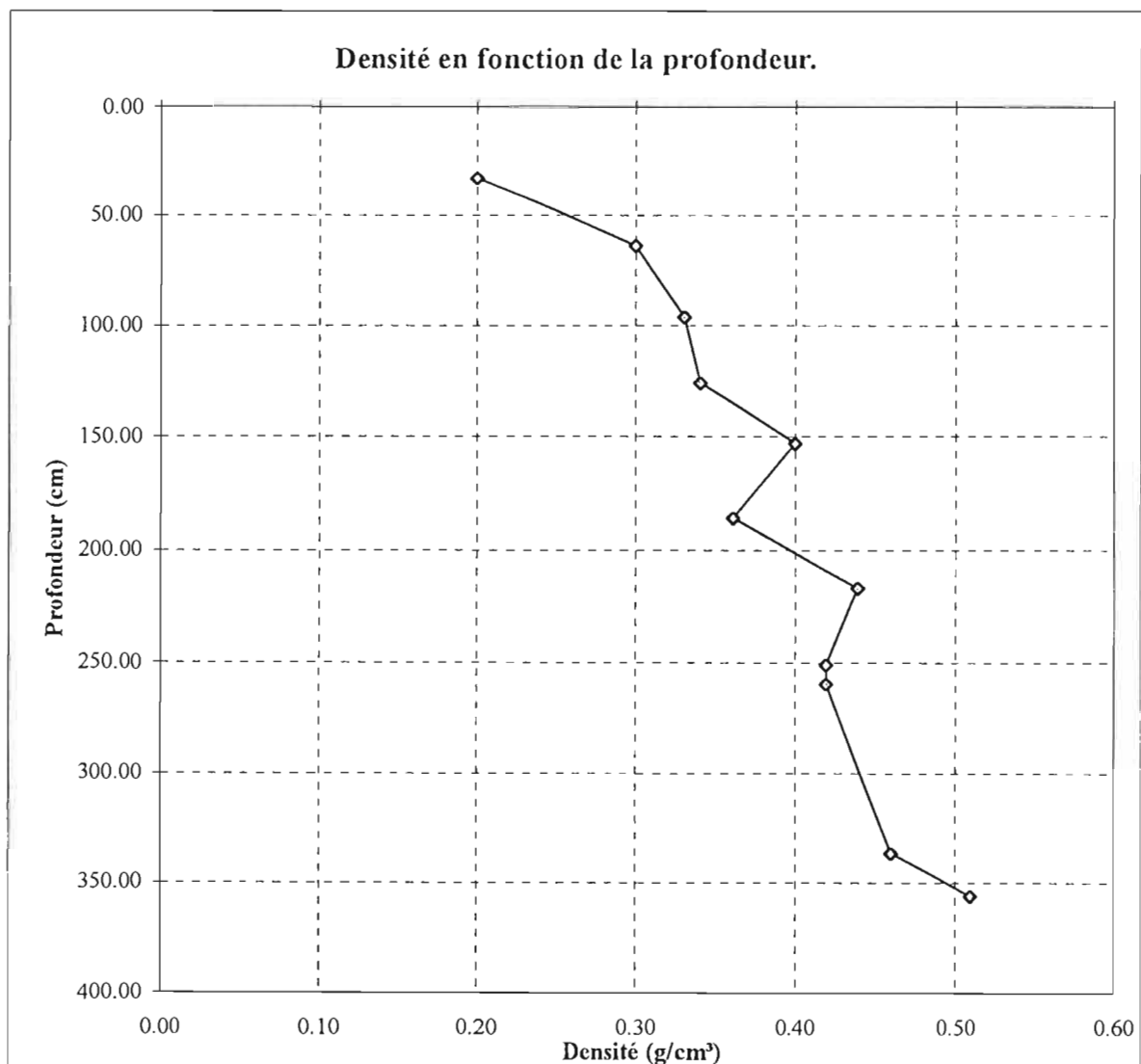


Figure J.2

➤ Sondage n°2 : près de l'ancienne station météorologique, 5550 m

Mesure	L (cm)	D(g/cm³)	mm d'eau
1	16,50	0,26	43,00
2	16,50	0,28	47,00
3	16,50	0,24	40,00
4	16,50	0,28	47,00
5	17,00	0,33	54,00
6	16,00	0,41	70,00
7	16,50	0,49	79,00
8	16,50	0,47	77,00
9	15,50	0,50	77,00
10	5,00	0,50	25,00
11	82,00	0,45	368,90
12	65,00	0,40	260,00
13	37,00	0,42	155,30
14&15	56,50	0,48	271,90
16	31,00	0,51	157,10

Tableau J.2 : Sondage 2, Altitude, 5550 m, S 16°16'7.9" ; W 68°8'49.6".

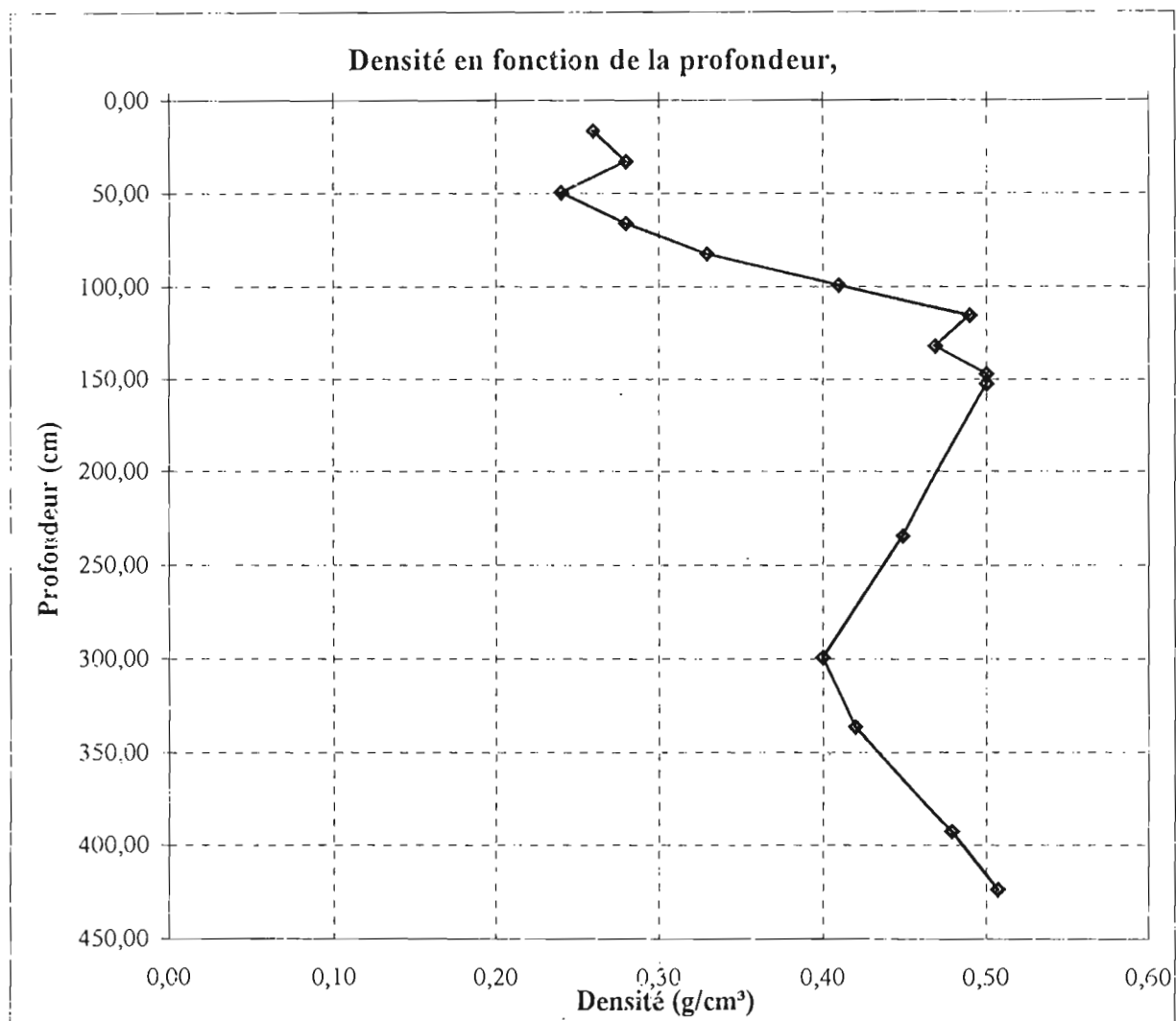


Figure J.3

➤ Sondage n°3 : Combe Est, 5500 m

Mesure	L (cm)	D(g/cm ³)	mm d'eau
1	16,50	0,21	35,00
2	16,50	0,22	36,00
3	17,00	0,25	42,00
4	17,00	0,26	45,00
5	16,00	0,30	48,00
6	17,50	0,31	55,00
7	16,50	0,31	51,00
8	16,00	0,33	54,00
9	16,50	0,33	54,00
10	15,50	0,33	51,00
11	16,50	0,36	59,00
12	15,50	0,38	59,00
13	17,00	0,38	64,00
14	15,00	0,44	66,00
15	30,00	0,41	124,00
16	60,00	0,40	240,00
17	50,00	0,43	216,00
18	22,00	0,45	99,00
19	53,00	0,41	218,00

Tableau J.3 : Sondage 3, Altitude, 5500 m, S 16°16'13.4"; W 68°8'56.1".

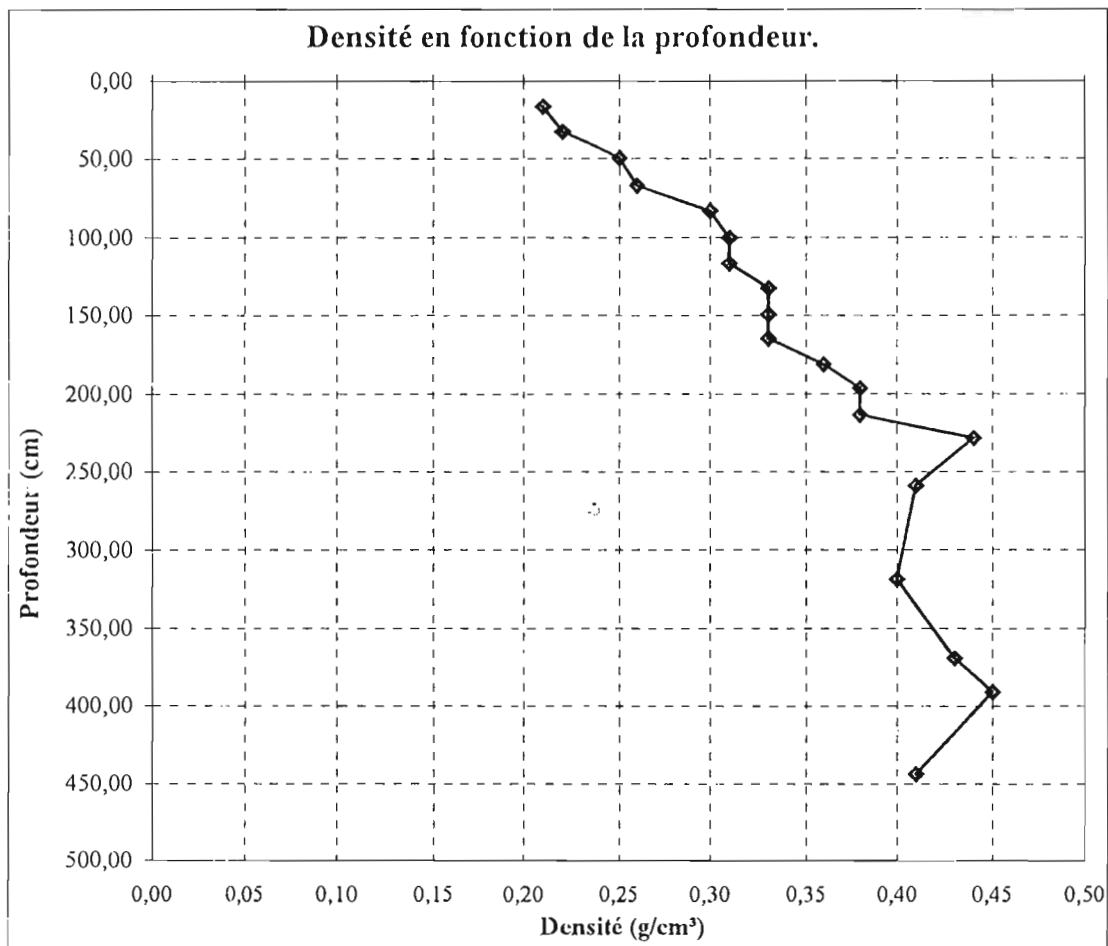


Figure J.4

Site		1995-96	1996-97	1997-98	1998-99	1999-00	2000-01
5700m	Densité (g/cm ³)	0,39	0,42	0,39	0,41	0,45	0,38
	mm d'eau	965	1225	692	943	1098	1367
5520m	Densité (g/cm ³)	0,49		0,43	0,46	0,5	0,37
	mm d'eau	572		334	822	1058	1693

Tableau J.4 : Synthèse des densités moyennes et des accumulations nettes relevées sur les sites de la zone supérieure du Glacier de Zongo au cours des six dernières années.

J.2.2. RESUME DES BILANS ENTRE 5500 ET 6000 M

Tranche d'altitude	Altitude	Bilan (mm d'eau)
5500-5600	5550	1693
5600-5700	5650	1569
5700-5800	5750	1367
5800-5900	5850	1367
5900-6000	5950	1367

Tableau J.5 : Bilan de masse (mm d'eau) dans la zone d'accumulation.

J.3. Le bilan de masse du glacier Zongo.

J.3.1. Bilan en fonction de l'altitude, détermination de l'altitude de la ligne d'équilibre.

Comme chaque année, la détermination de l'altitude de la ligne d'équilibre (ELA) pour l'année hydrologique se fait à partir de la courbe représentant le bilan net selon l'altitude. Cette courbe est construite de la manière suivante : à l'altitude z correspond la valeur du bilan de la tranche : $[z-50 \text{ m} - z+50 \text{ m}]$ (Tableau J.6 et Figure J.6). L'altitude de ELA est déterminée analytiquement et correspond graphiquement à l'intersection de la courbe $z = f(bn)$ et de l'axe des abscisses ($Bn=0$). Cette année elle se situe à 5120 m.

alt.(m)	B91-92	B92-93	B93-94	B94-95	B95-96	B96-97	B97-98	B98-99	B99-00	B00-01
4950	-3265	-3265	-5403	-6680	-6420	-3291	-7500	-7506	-6188	-4713
5050	-2976	101	-1123	-2820	-2416	-231	-5580	-1866	-655	-474
5150	-2330	358	-140	-1640	-1830	768	-4332	-905	-180	58
5250	-1640	497	11	-1080	-1175	918	-3151	-446	108	467
5350	-950	635	162	-530	-521	1068	-1970	13	395	876
5450	-267	774	313	-25	133	1218	-789	471	683	1284
5550	420	913	464	580	788	1371	392	930	980	1693
5650	569	1148	747	980	848	1371	692	961	1065	1569
5750	571	1239	832	970	965	1371	692	992	1150	1367
5850	571	1239	832	970	965	1371	692	992	1150	1367
5950	571	1239	832	970	965	1371	692	992	1150	1367

Tableau J.6. : Bilan (mm d'eau) en fonction de l'altitude depuis sept-91.

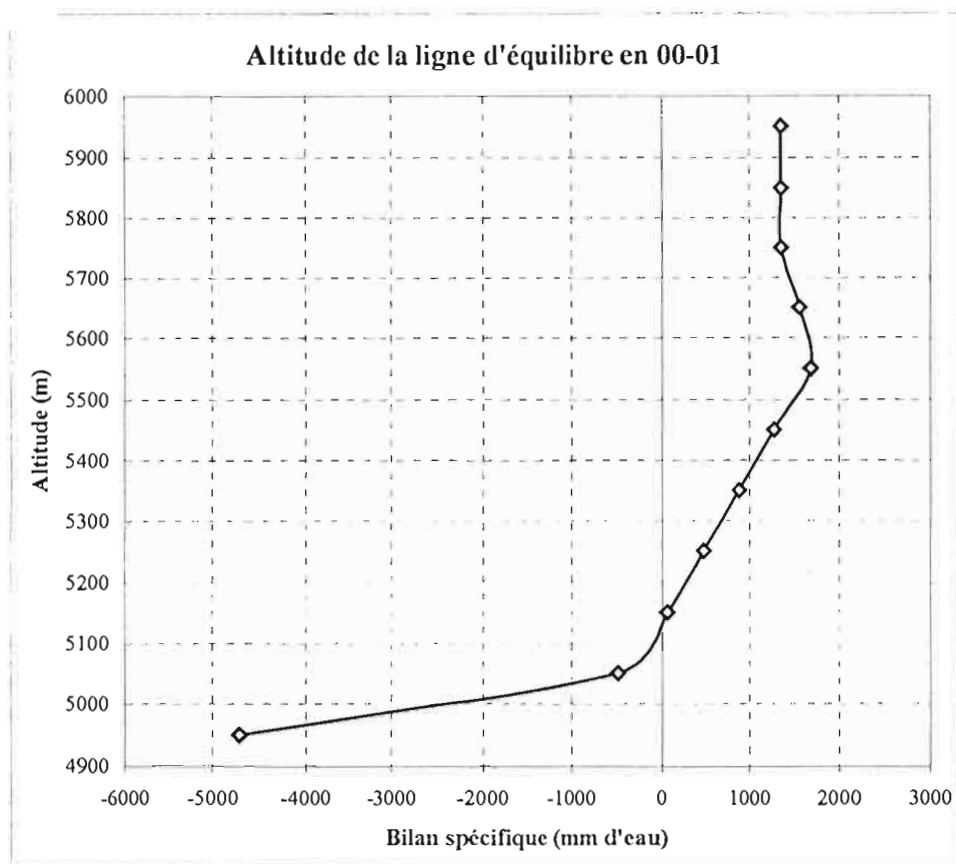


Figure J.6

J.3.2. Bilan des données glaciologiques depuis 1991-92.

Le tableau J.7 récapitule les données glaciologiques du glacier du Zongo depuis 1991, il est illustré par les figures J.7, J.8 et J.9.

Année	Bn (1) mm	Sb (2) mm	P (3) mm	A (4) mm	Q (5) mm	Q-A	ELA (6) m	AAR (7) %	Bn hydro (8) (mm)
1991-92	-900	-900	920	1820	2240	420	5489,13	39,8	-1324
1992-93	516	-384	1060	544	1180	636	5047,03	91,0	-123
1993-94	-88	-472	850	938	1590	652	5243,33	64,7	-744
1994-95	-703	-1175	850	1553	2130	577	5454,92	43,7	-1286
1995-96	-675	-1850	867	1542	2293	751	5430,00	46,5	-1481
1996-97	797	-1053	1068	271	1398	1127	5073,00	89,0	-338
1997-98	-1962	-3015	813	2775	3368	593	5516,95	36,6	-2568
1998-99	-333	-3348	942	1275	2921	1646	5347,83	54,7	-1551
1999-00	116	-3232	952	836	1793	957	5212,00	57,9	-513
2000-01	577	-2655	1188	611	1159	548	5139,00	80	30
Moyenne	-265		951	1216	2007		5295,32	60	-990

Tableau J.7. Glacier du Zongo, récapitulatif depuis 1991.

- (1) Bilan net spécifique
- (2) Bilan net spécifique cumulé
- (3) Précipitations " autour du glacier " (expression reprise des rapports précédents), pour le Zongo : moyenne des mesures des pluviomètres P_2 , P_3 , P_4 et P_5 pour toutes les années, sauf en 94-95 où est représentée la moyenne des pluviomètres P_1 , P_2 , P_3 , P_4 et P_5 à cause de fuites dans P_4 et P_5 (rapport n°49, p.48).
- (4) Ablation spécifique ($A=P-Bn$)
- (5) Lame d'eau au torrent émissaire relatif au glacier
- (6) Altitude de la ligne d'équilibre (E L A)
- (7) Proportion de la superficie de la zone d'accumulation par rapport à la superficie totale (Accumulation Area Ratio)
- (8) Bilan de masse glacier calculée par la méthode hydrologique

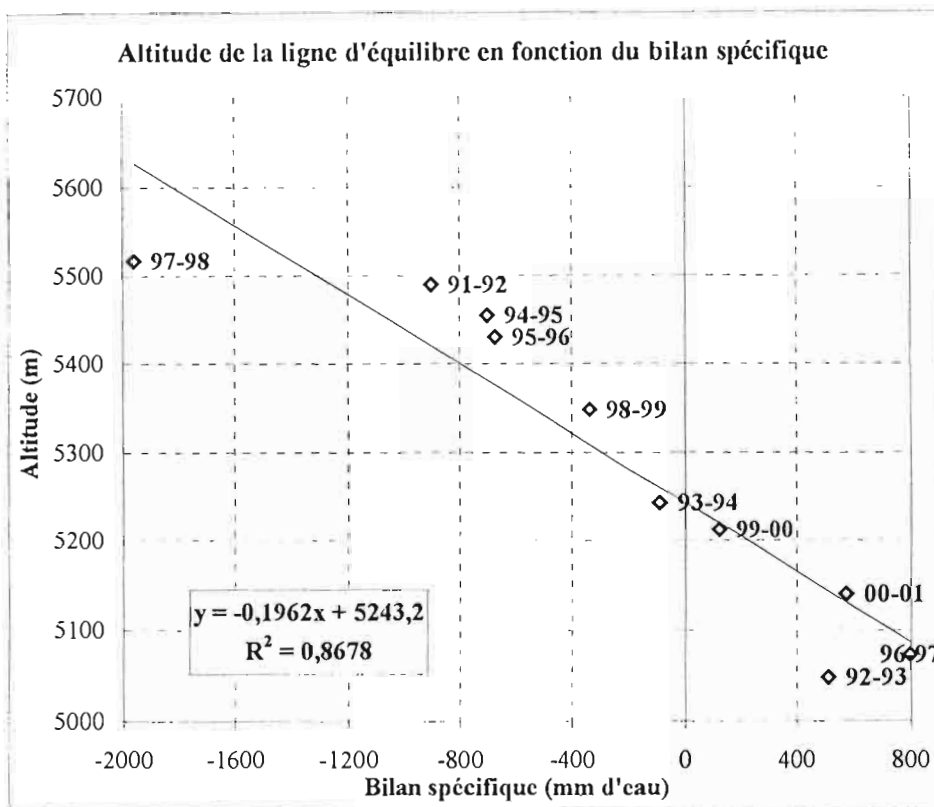


Figure J.7

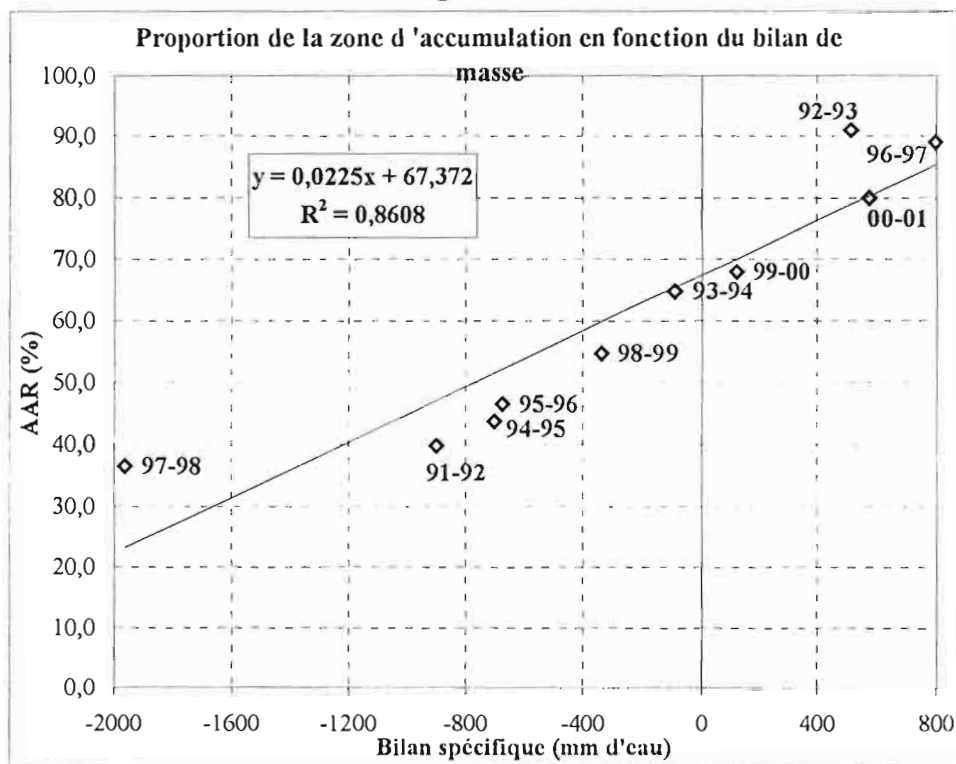


Figure J.8

L'année 2000-2001 constitue sur les 10 années de suivi, la quatrième avec un bilan de masse positif. Ce bilan s'explique par une pluviométrie forte et un albédo qui est resté élevé toute l'année.

Cette année encore le bilan de masse du glacier évalué par la méthode hydrologique est inférieur aux bilans de masse glaciologiques. Par contre, il existe une bonne corrélation entre les 2 méthodes sur les 10 années de mesures disponibles ($r^2=0,90$; $\beta_{\text{hydro}} = 0,911 \cdot \beta_{\text{glacio}} - 748,06$; toutes grandeurs en mm). Cf. Figure J.9.

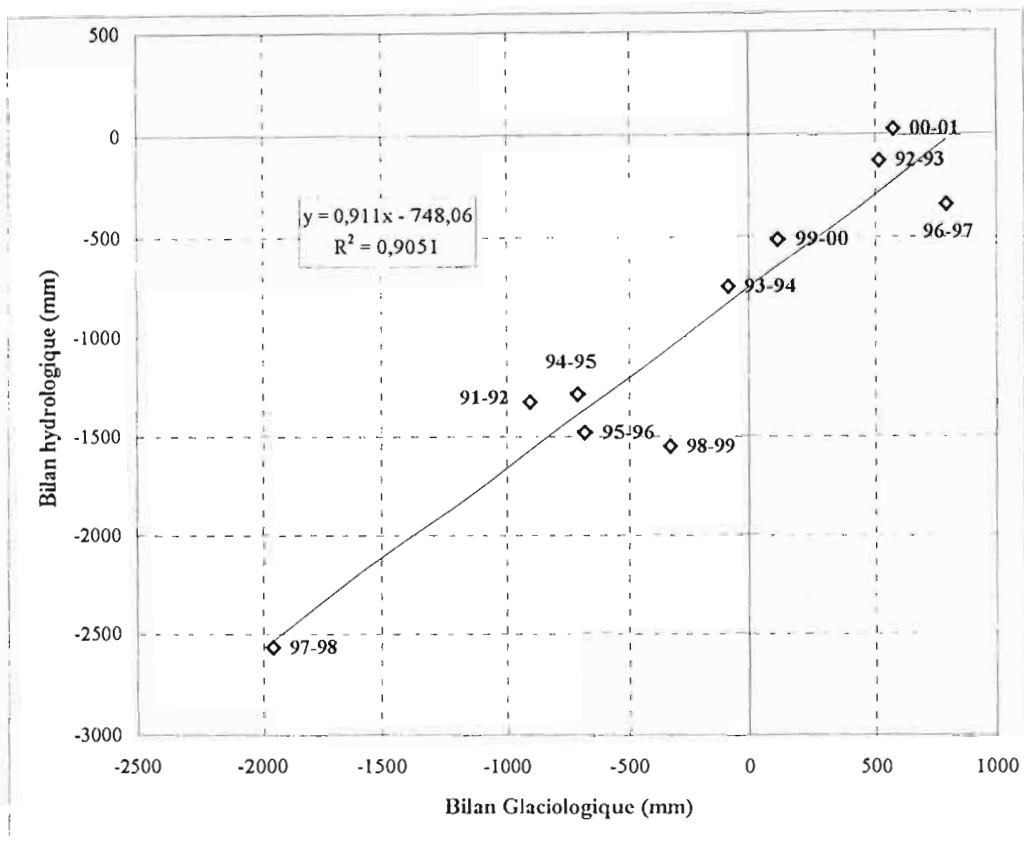


Figure J.9.

J.4. Comparaison entre les glaciers Zongo et Chacaltaya.

Les tableaux et figures suivants comparent les bilans glaciologiques pour les glaciers Zongo et Chacaltaya. Ce dernier, également situé dans la Cordillère Royale, est beaucoup plus petit que le Zongo (0,082 km² contre 2,1 km²) et son altitude plus faible puisqu'il s'étend entre 5125 et 5375 m (Francou et al., 1998).

Année	Bn (1) mm	Sb (2) mm	P (3) mm	A (4) mm	ELA (6) m	AAR (7) %	Front (m)
1991-92	-1166	-1166			5371	0,0	X
1992-93	277	-889			5180	83,0	-0,50
1993-94	-1080	-1969	723	1790	5359	3,0	X
1994-95	-1470	-3439	693	2160	5368	2,0	-24,20
1995-96	-1874	-5313	625	2489	5454	0,0	X
1996-97	-659	-5972	778	1459	5322	10,0	-36,40
1997-98	-3584	-9556	701	4375	5525	0,0	-72,00
1998-99	-1968	-11524	718	2693	5395	0,0	-73,10
1999-00	-945	-12469	779	1724	5435	0,0	-75,10
2000-01	-354	-12823					
Moyenne	-1282			2384	5379	11	

Tableau J.8. Glacier de Chacaltaya, récapitulatif depuis 1991.

Cette année encore le bilan de masse du glacier est nettement moins déficitaire que les 2 années précédentes (Figure J.10). Si le bilan est positif pour le glacier Zongo (577 mm de gain de masse) celui du glacier de Chacaltaya reste cependant négatif puisque le glacier a perdu un peu plus de 350 mm d'eau. La tendance à l'augmentation des écarts des bilans entre les deux glaciers, qui avait été constatée entre 1994 et 1999 continue à s'atténuer.

Il est intéressant d'estimer la corrélation entre les bilans annuels des deux glaciers (cf. Figure J.11). Elle est correcte, $r^2 = 0,79$ et l'équation de régression reliant les bilans s'écrit :

$$Bn_{Chacaltaya} = 1,12 \times Bn_{Zongo} - 984$$

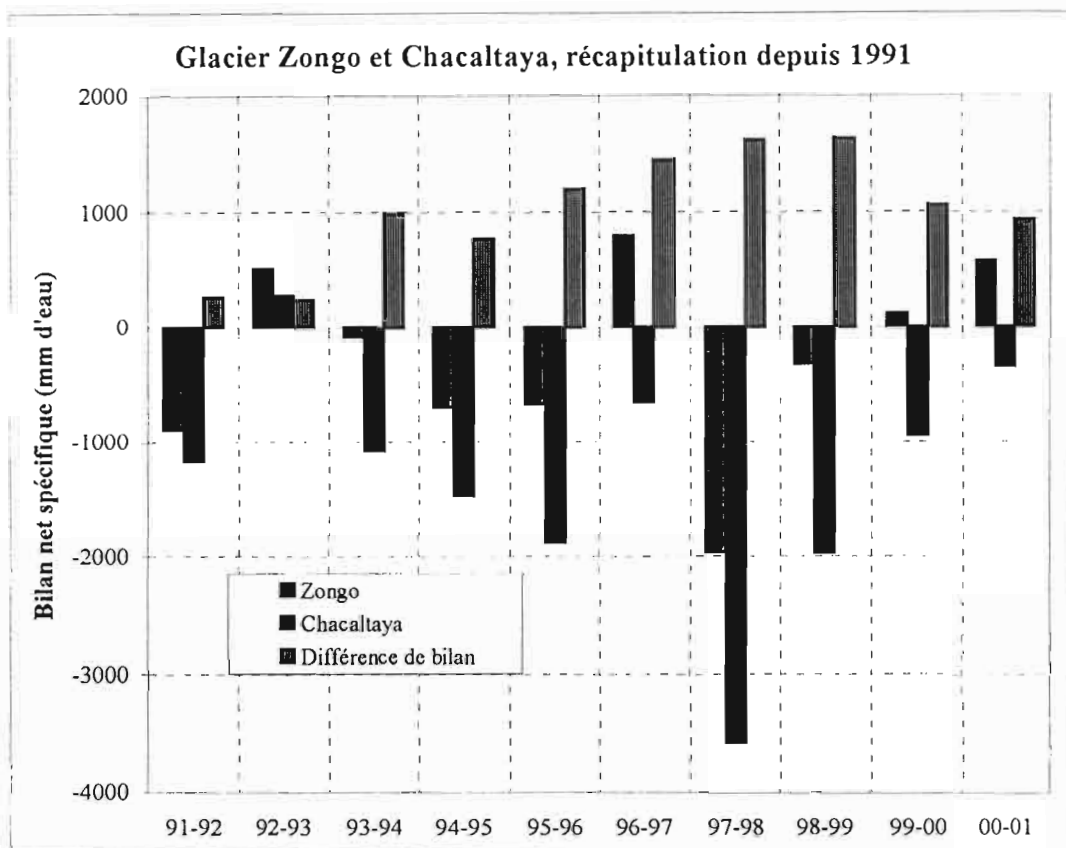


Figure J.10.

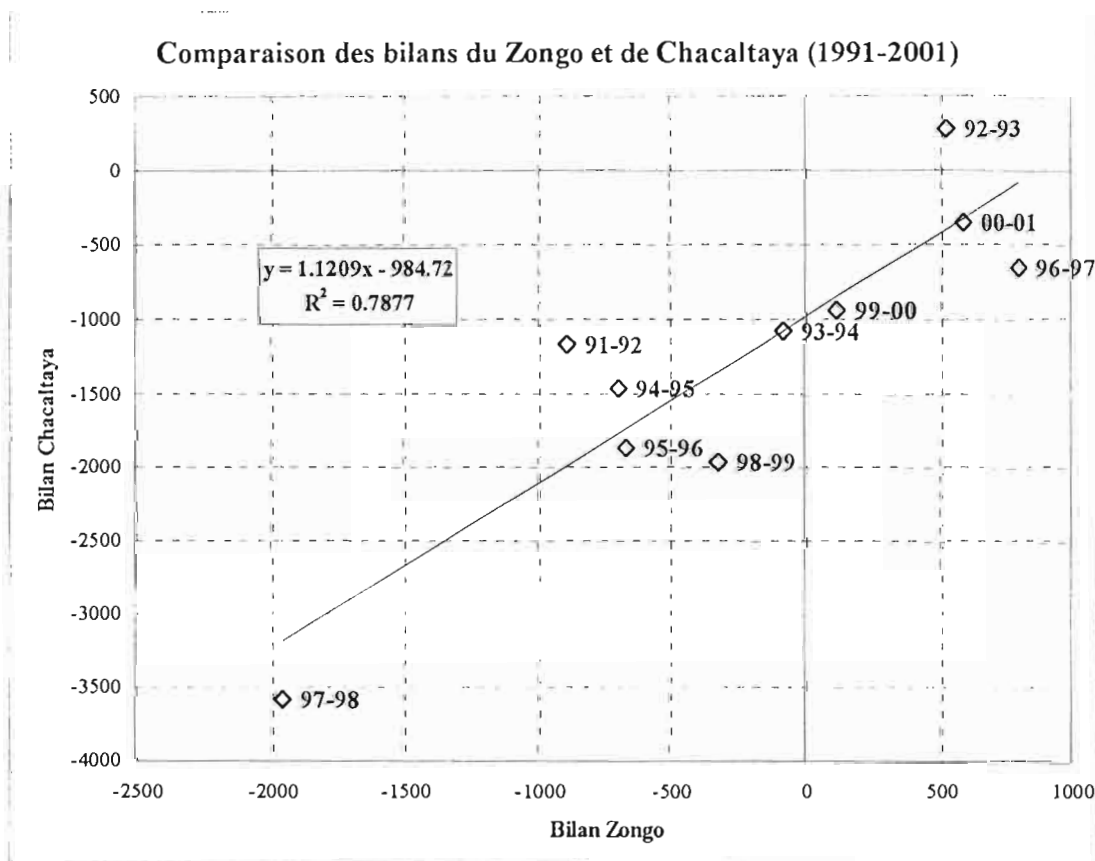


Figure J.11.

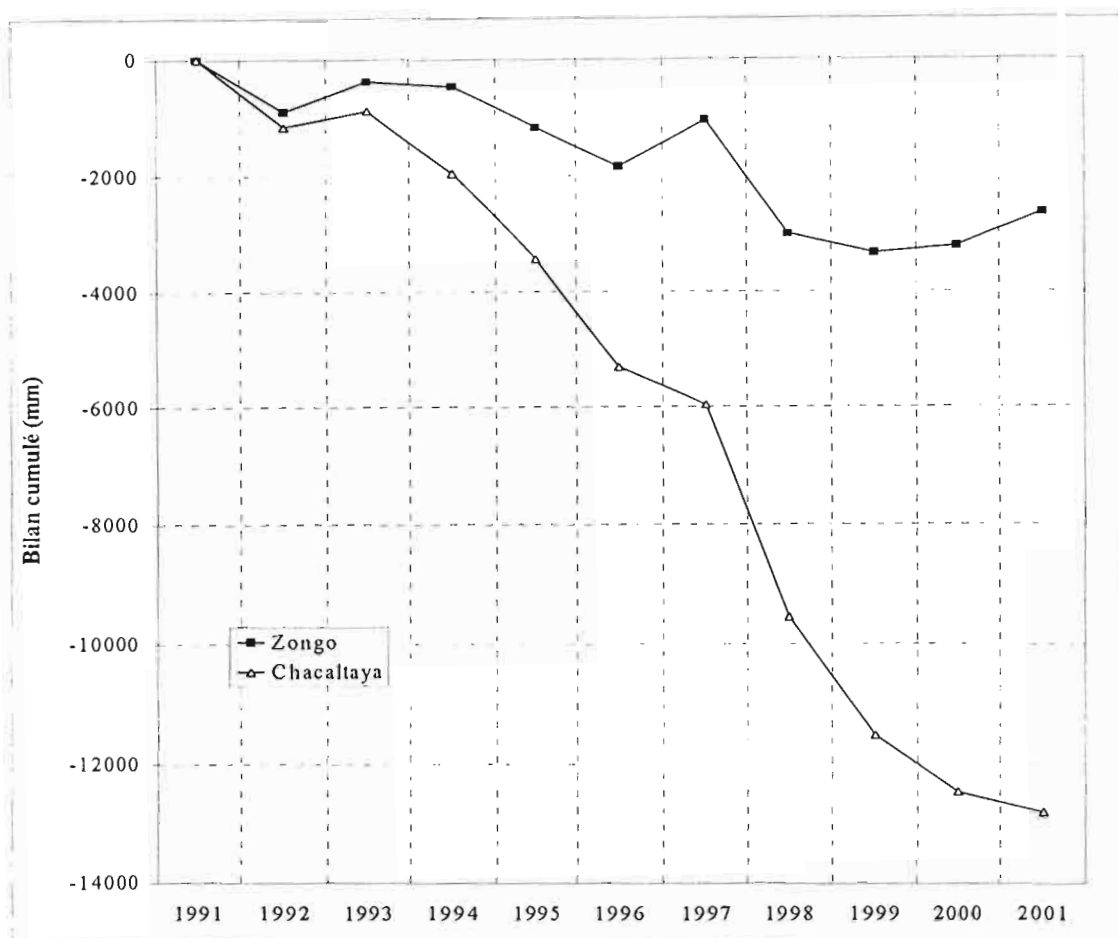


Figure J.12.

J.4. Topographie.

Comme les autres années la topographie a été réalisée par le cabinet *Jaime Cari Silva* (financement de la COBEE).

Les points d'appui de la polygonale sont les suivants (tableau J.9):

POINTS	Nord (m)	Est (m)	Cote (m)	Support
Z-1	8200080.464	591795.352	5113.816	rocher
Z-2	8200080.464	591795.352	5113.816	rocher
BM-3A	8200051.142	592568.348	5005.752	monticule
BM-3	8200230.774	593083.306	4855.555	monticule
BM-4A	8200558.763	592822.634	4915.653	monticule
BM-4	8200504.962	592948.246	4891.456	monticule
V-7	8200181.490	593701.194	4758.470	pylône de HT
V-6	8199307.515	593421.669	4765.338	pylône de HT

Tableau J.9. : Coordonnées des points de la polygonale du Glacier du Zongo.

- Le recul du glacier (1991-2001).

Les fluctuations du front du glacier sont estimées à partir de la carte au 1/2500 sur laquelle sont reportées les mesures topographiques de la limite inférieure du glacier à la fin de l'année hydrologique précédente et de cette année. Sur cette carte, 14 segments ont été tracés le long du front du glacier, perpendiculairement à la limite du front et de façon équidistante. La moyenne des longueurs de ces segments entre la limite du front actuel du glacier et la limite de l'année dernière nous donne la fluctuation de l'année.

Les relevés topographiques ont été effectués en août 2001. Le recul du front du glacier atteint désormais près de 124 m depuis le début des mesures topographiques.

Le recul enregistré cette année alors que le bilan de masse est quasiment équilibré confirme ce qui était proposé l'année dernière (Berthier et al., 2001) : les mouvements du front du glacier sont le résultat de l'intégration de plusieurs années de bilan de masse du glacier.

Année	Fluctuation Annuelle (m)	Cumulée (m)
1991-1992	-12	-12
1992-1993	1	-11
1993-1994	-10	-21
1994-1995	6	-28
1995-1996	-12	-40
1996-1997	-16	-55
1997-1998	-25	-80
1998-1999	-27	-107
1999-2000	-12	-119
2000-2001	-5	-124
Moyenne	-11,2	

Tableau J.10. : Mouvements du front du Glacier du Zongo depuis août 1991.

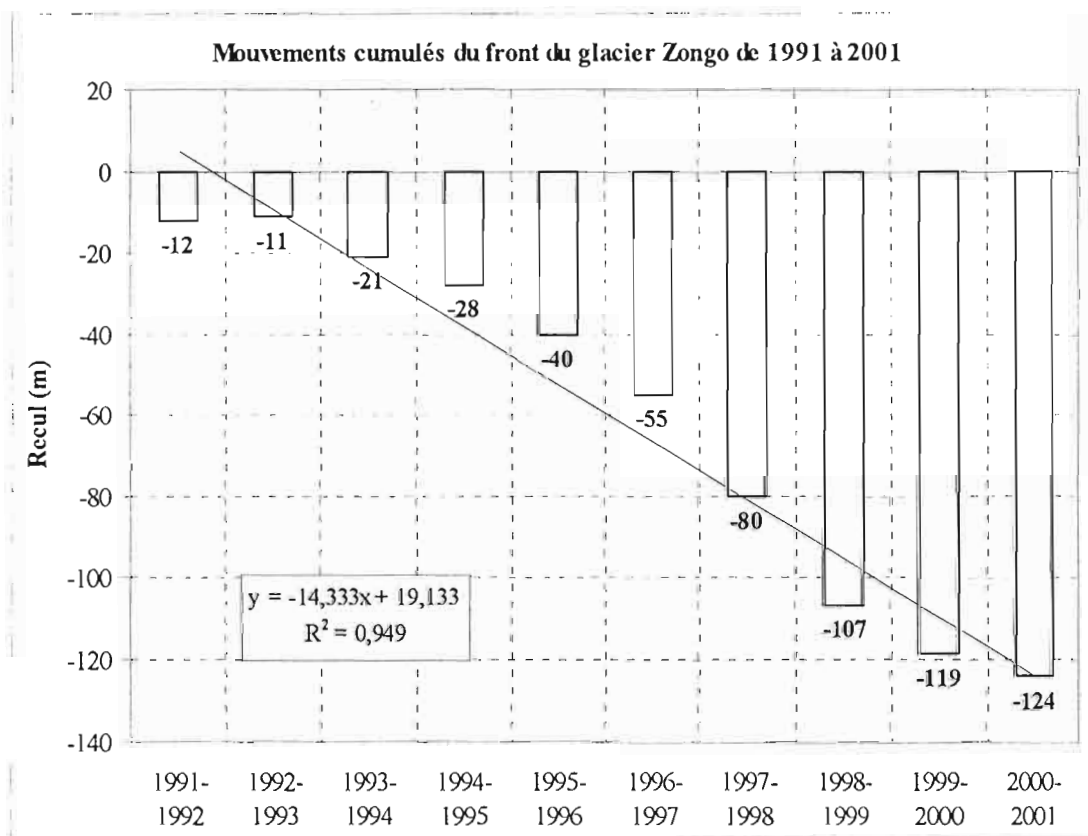


Figure J.13.

K. Conclusion.

Durant la dernière année hydrologique (de septembre 2000 à août 2001) ce sont des conditions Niña (indice SOI positif) qui règnent sur l'ensemble du Pacifique pendant les premiers mois de l'année hydrologique, puis on voit apparaître l'arrivée d'une phase Niño en fin de période (indice SOI négatif). (figure K.1)

L'influence des conditions Niña en première partie d'année hydrologique se font ressentir avec des quantités de précipitations très importantes (les plus importantes depuis 1994). Et donc un apport de neige régulier et suffisant sur le glacier pour maintenir un albédo élevé. Ceci a permis pour la première année d'avoir une moyenne annuelle négative pour la radiation nette, d'où une quantité d'énergie disponible pour la fusion et la sublimation très faible ce qui explique que le limniographe sur le torrent émissaire du glacier ait enregistré des débits faibles toute l'année. Une autre conséquence importante est un bilan net spécifique largement positif pour le glacier (577 mm de gain en eau ce qui correspond au deuxième meilleur bilan de la décennie après l'année hydrologique 1996-1997).

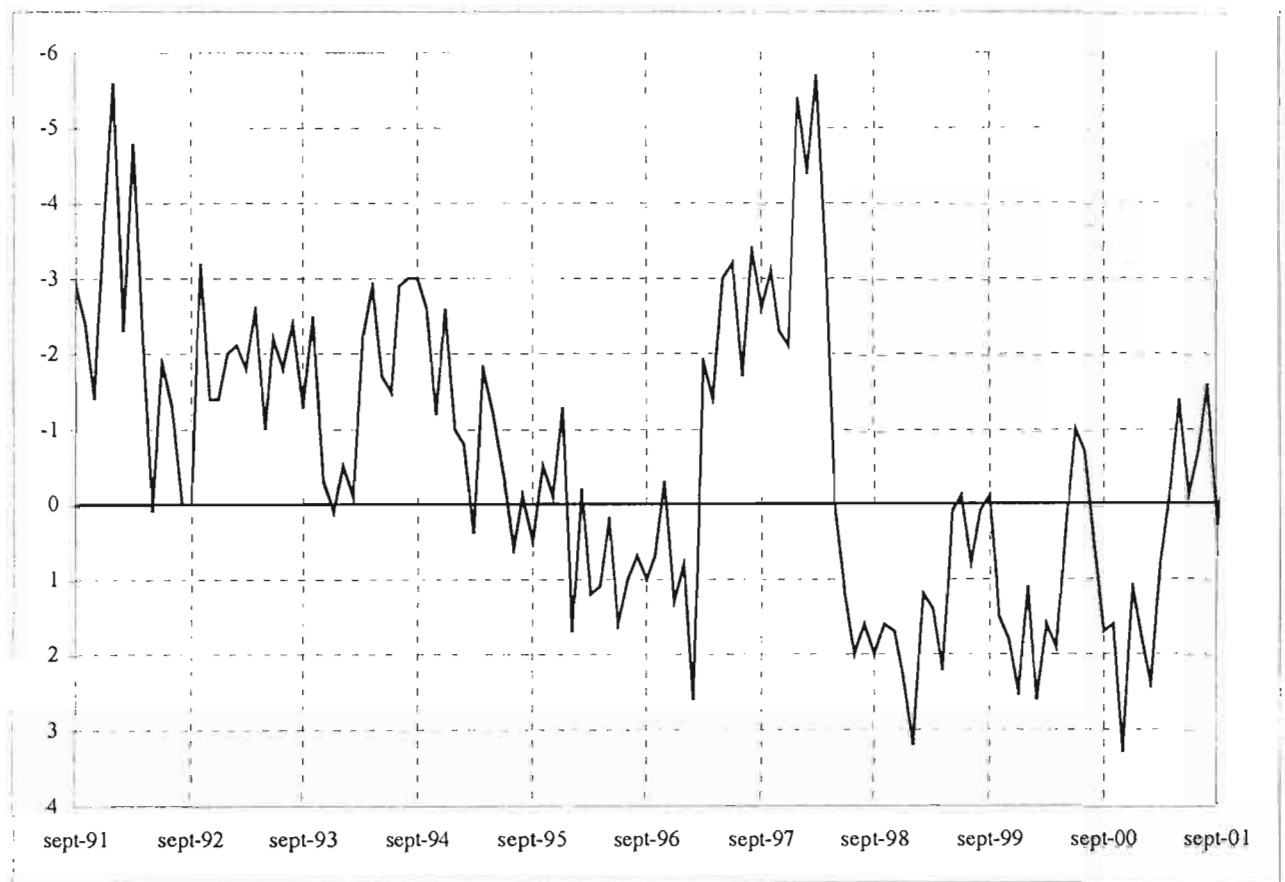
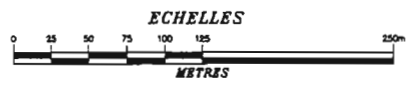
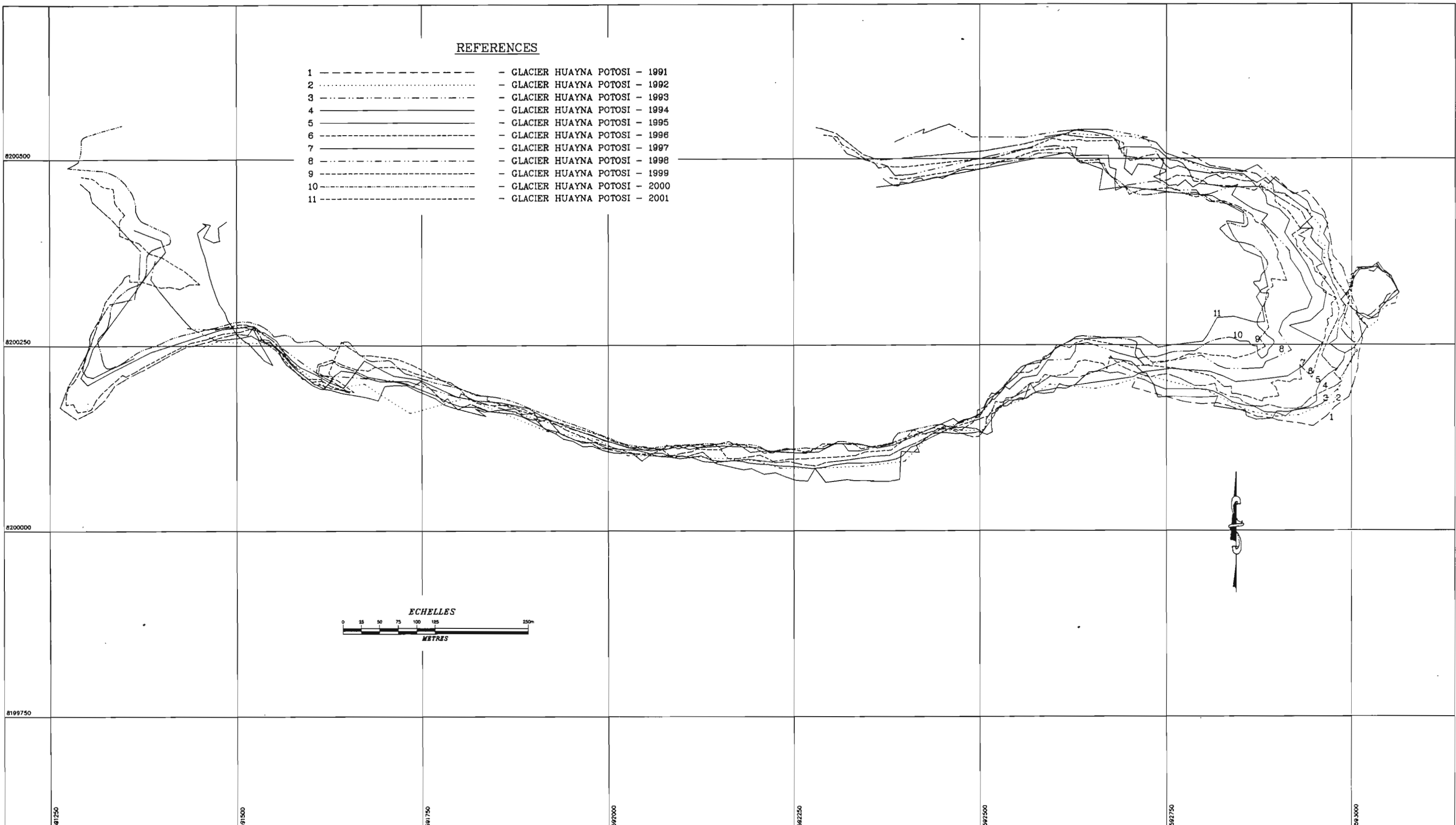


Figure K.1 : Indice SOI (South Oscillation Index) entre août-91 et septembre-2001.

REFERENCES

- 1 - - - - - GLACIER HUAYNA POTOSI - 1991
- 2 GLACIER HUAYNA POTOSI - 1992
- 3 - - - - - GLACIER HUAYNA POTOSI - 1993
- 4 _____ GLACIER HUAYNA POTOSI - 1994
- 5 _____ GLACIER HUAYNA POTOSI - 1995
- 6 - - - - - GLACIER HUAYNA POTOSI - 1996
- 7 _____ GLACIER HUAYNA POTOSI - 1997
- 8 - - - - - GLACIER HUAYNA POTOSI - 1998
- 9 - - - - - GLACIER HUAYNA POTOSI - 1999
- 10 - - - - - GLACIER HUAYNA POTOSI - 2000
- 11 - - - - - GLACIER HUAYNA POTOSI - 2001



IRD
INSTITUT DE RECHERCHE
POUR LE DEVELOPPEMENT



COMPANIA BOLIVIANA DE ENERGIA ELECTRICA
BOLIVIAN POWER COMPANY
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA

PROJET :
ESTUDES GLACIOLOGIQUES
IRD

CARTE TOPOGRAPHIQUE
GLACIER HUAYNA POTOSI
ANCS: 1991 - 1992 - 1993
1994 - 1995 - 1996
1997 - 1998 - 1999
2000 - 2001

A. RABATEL (IRD)
A. SORICCO (IRD)
E. BEKTERER (IRD)
E. GALLARDO (IRD)
E. FUKSBERG (IRD)
J.P. CHAZARIN (IRD)
B. FRANCOU (IRD)
E. BALDIVIESO (COBEE)

OBSERVATIONS :
1) COORDONNEES ABSOLUTES ET RELATIVES AU SYSTEME DE L'UNITE GEOGRAPHIQUE METRIQUE - I.G.M.

ECHELLE :
1: 5000
MESURES EN METRES

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Berthier (E.) y al., 2001 a, *Mediciones meteorológicas, hidrológicas y glaciológicas sobre el glaciar del Zongo, años glaciológicos 1998-1999 y 1999-2000*. IRD-Bolivia, Informe n° 2, Septiembre 2001, 31 p.

Berthier (E.) et al., 2001 b, *Mesures météorologiques, hydrologiques et glaciologiques sur le glacier du Zongo, année hydrologique 1999-2000*. IRD-Bolivia, Informe n°3, novembre 2001, 91 p.

Franco (B.), Ramirez (E.), Mendoza (J.), Guereca (J.), Miranda (G.), Noriega (L.), 1998, *El Glaciar de Chacaltaya, investigaciones glaciológicas (1991-1997)*. ORSTOM-Bolivia, Informe n°56, janvier 1998. 90 p.

Montes de Oca (I.), 1997, *Geografía y Recursos Naturales de Bolivia*. La Paz, Bolivia, 3ra. Edición 614p.

Queney (P.), 1974, *Eléments de Météorologie*. Masson, Paris.

Sicart J.E., 2002. *Contribution à l'étude des flux d'énergie, du bilan de masse et du débit de fonte d'un glacier tropical : le Zongo, Bolivie*. Thèse de Doctorat. Université de Paris : 325p.

Wagnon (P.), 1999, *Analyse du bilan d'énergie d'un glacier tropical, application à la relation glacier – climat*. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble, 199 p.