

INFORME N° 1, ANNEE 2000
IRD – BOLIVIE



Camp à 5100 m sur le Glacier du Zongo (juillet 1999)

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

ANNEE HYDROLOGIQUE 1997-98

J.M. LEBLANC (IRD)
J.E. SICART (IRD)
R. GALLAIRE (IRD)
J.P. CHAZARIN (IRD)
P. RIBSTEIN (IRD)
B. POUYAUD (IRD)
B. FRANCOU (IRD-CNRS)
H. BALDIVIESO (COBEE)

JANVIER 2000

SOMMAIRE

A.	INTRODUCTION	1
B.	INVENTAIRE DE L'EQUIPEMENT DU GLACIER	5
	<i>B.1. Station pluviométrique à 4750 m</i>	5
	<i>B.2. Station météorologique à 4750 m</i>	5
	<i>B.3. Station hydrologique à 4830 m</i>	7
	<i>B.4. Stations météorologiques à 5150 m</i>	8
	<i>B.5. Station météorologique à 5500 m</i>	14
	<i>B.6. Mesures réalisées sur la moraine</i>	16
	<i>B.7. Mesures réalisées lors des missions ponctuelles sur le glacier</i>	17
	<i>B.8. Conclusion</i>	17
C.	TEMPERATURES DE L'AIR	19
	<i>C.1. Températures instantanées</i>	19
	C.1.1. Températures de l'air à 5150 m, sur et hors du glacier	19
	<i>C.2. Moyennes journalières</i>	25
	C.2.1. Températures journalières sous abri, non-ventilées à 4750 m	25
	C.2.2. Températures journalières ventilées à 5150 et 5500 m	27
	C.2.3. Températures journalières non-ventilées à 4750 et 5165	29
	C.2.4. Récapitulatif des gradients hors et sur glacier	30
	<i>C.3. Températures minimales et maximales journalières</i>	32
	C.3.1. Minima et maxima à 4750 m	32
	C.3.2. Minima et maxima à 5150 m, sur glacier	34
	C.3.3. Minima et maxima à 5550 m, sur glacier	35
	<i>C.4. Températures mensuelles et annuelles</i>	38
	C.4.1. Valeurs mensuelles	38
	C.4.2. Valeurs annuelles	40
D.	PRECIPITATIONS	42
	<i>D.1. Valeurs journalières à 4750 m</i>	42
	<i>D.2. Valeurs mensuelles et annuelles</i>	44
	D.2.1. Pluviomètres totalisateurs, Plataforma et station pluviométrique	44
	D.2.2. Comparaison avec les cycles précédents	46
E.	BILAN RADIATIF	50
	<i>E.1. Notations et données disponibles</i>	50
	<i>E.2. Valeurs journalières</i>	50
	E.2.1. Radiation solaire incidente maximale journalière à 5150 et 5500 m	50
	E.2.2. Albédo moyen journalier à 5150 et 5500 m	51
	E.2.3. Radiation solaire incidente, moyennes journalières	54
	E.2.4. Radiation nette journalière à 5150 et 5500 m	56
	<i>E.4. Valeurs mensuelles</i>	58
	E.4.1. Radiation nette et albédo mensuel	58

F.	DEBITS	61
	<i>F.1. Débits instantanés</i>	61
	<i>F.2. Débits journaliers</i>	61
	<i>F.3. Débits mensuels et annuels</i>	64
	F.3.1. Débits mensuels	64
	F.3.2. Débits annuels	65
	<i>F.4. Reconstitution statistique des débits</i>	66
	F.4.1. Corrélations avec les paramètres climatiques	66
	F.4.2. Corrélation hydrologique avec le Tubo	67
G.	PRESSION DE VAPEUR D'EAU	68
	<i>G.1. Moyennes journalières</i>	68
	<i>G.2. Moyennes demi-horaires</i>	70
	<i>G.3. Moyennes mensuelles à 5150 m</i>	73
H.	VITESSE ET DIRECTION DU VENT	75
	<i>H.1. Mesures disponibles</i>	75
	<i>H.2. Vitesse et direction du vent à 5150 m (valeurs instantanées)</i>	75
	<i>H.3. Valeurs journalières à 4750, 5150 et 5500 m</i>	79
	<i>H.4. Valeurs mensuelles à 4750, 5150 et 5500 m</i>	80
I.	MESURES DE LA SONDE A ULTRASON	81
J.	GLACIOLOGIE	84
	<i>J.1. L'accumulation</i>	84
	Résultats des différents forages	85
	Résumé des bilans entre 5500 et 6000 m	88
	<i>J.2. Le bilan de masse du glacier</i>	89
	Bilan spécifique mensuel dans la zone d'ablation depuis 1991	89
	Bilan cumulé dans la zone d'ablation depuis 1991	90
	Bilan en fonction de l'altitude, détermination de la ELA	90
	Récapitulatif des données glaciologiques du Zongo et de Chacaltaya	92
	<i>J.3. Comparaison entre le bilan net spécifique et débit spécifique</i>	95
	<i>J.4. Topographie</i>	96
L.	CONCLUSION	99
	<i>Bibliographie</i>	100

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 1997 au 31 août 1998. Le plan suivi est similaire aux rapports des années 1993-94 (Rigaudière et al., 1995), 1994-95 (Wagnon et al., 1995), 1995-96 (Berton et al., 1997) et 1996-97 (Sicart et al., 1998).

Ci-dessous, à la suite de la localisation géographique du dispositif de mesures réparti dans le bassin versant du glacier (Cf. Figure A.1), nous présentons l'évolution générale des conditions climatiques reconstituée pour l'année hydrologique à partir des notes de terrain (Cf. Tableau A.1).

Par la suite, on présente d'une manière détaillée le dispositif de mesures utilisé et les modifications intervenues pour cette année hydrologique ainsi que les mesures de chacun des paramètres enregistrés sous forme de tableaux et graphes. L'analyse des données sera développée à partir de comparaisons avec les années précédentes.

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 4830 et 6000 mètres d'altitude**

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

Début du programme d'étude : **1991**

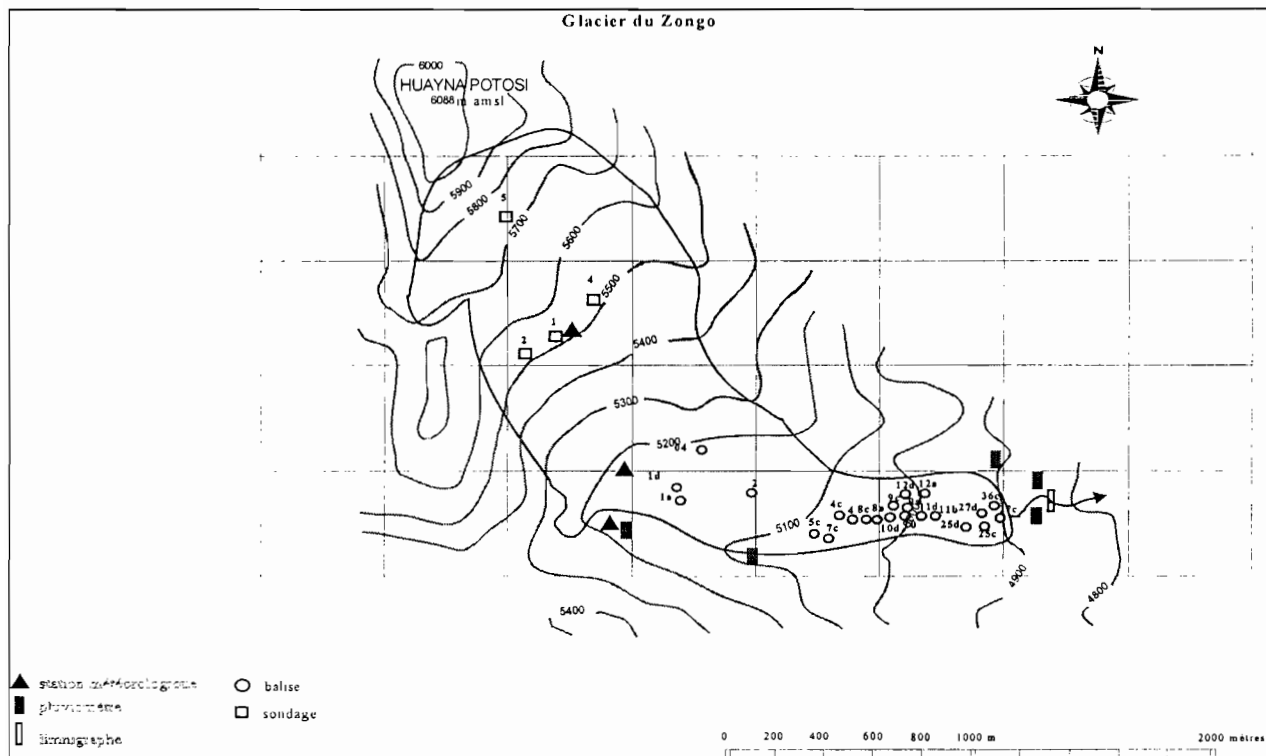


Figure A.1 : Dispositif de mesures météorologiques, hydrologiques et glaciologiques dans le bassin versant du glacier du Zongo en 1998 (d'après Sicart, 1996, modifié).

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

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.

Date	Matin	Après midi	Etat de surface du glacier à 5150m
Septembre			
03	beau	beau	neige transformée
04	beau	beau	neige transformée
10	beau	couvert	neige transformée
17	beau	couvert	neige transformée
19	couvert	précipitations	neige fraîche
30	précipitation	précipitation	neige fraîche
Octobre			
07-16*	couvert, précipitations, grésil	couvert, nombreux épisodes neigeux, orages, alternance ½ couvert/beau	neige transformée, puis neige fraîche
17	couvert	couvert	neige fraîche
Novembre			
05	couvert	précipitations	neige fraîche
07	précipitations	précipitations	neige fraîche
21	½ couvert	½ couvert	neige transformée
26	beau	beau	neige transformée
Décembre			
04	beau	couvert	neige transformée
09	½ couvert	couvert, grésil	neige transformée
16	couvert	couvert précipitations	neige transformée
21	couvert, grésil	couvert, grésil	
Janvier			
08	couvert	couvert	neige transformée
15	beau	beau	glace
21	couvert	couvert	neige transformée
23	couvert	couvert	neige transformée
Février			
11	couvert, faibles précipitations	couvert, faibles précipitations	neige transformée
Mars			
04	½ couvert	couvert	neige transformée
11	couvert, précipitations	couvert, précipitations	neige fraîche
26-31*	après quelques jours de beau, dégradation, couvert, de nombreux épisodes neigeux		nombreuses chutes de neige rapidement transformée, glace parfois apparente
Avril			
1-16*	Cf. fin mars	Cf. fin mars	Cf. fin mars
07	½ couvert	couvert	10 à 15 cm de neige transformée (tombée la veille)
Mai			
06	beau	beau	pénitents de glace (5 à 10 cm)
22	beau	beau	glace grise
23	beau	beau	pénitents de glace (20 cm)
27	beau	beau	
29	beau	beau	pénitents de glace (20 cm)
Juin			
05	beau	beau	pénitents de glace (20 à 30 cm)
22	couvert	couvert	fine couche de neige fraîche
Juillet			
07	beau	beau	neige transformée
10	beau	beau	neige transformée
29	beau	beau	pénitents de neige (10cm), et glace
31	beau	beau	pénitents de neige (10cm)
Août			
19	beau	couvert, grésil	glace
21	couvert	couvert, précipitations	neige transformée, glace parfois apparente

* : missions effectuées à proximité des stations météorologiques à 5150 m d'altitude.

Remarques : La limite pluie/neige se situe vers 5000 m d'altitude tout au long de l'année, soit au-dessus du front du glacier du Zongo.

Tableau A.1

Cette année, la saison des pluies s'installe en septembre. L'évolution journalière en saison des pluies correspond au schéma habituel, soit une matinée dégagée ou couverte suivie d'une dégradation l'après midi amenant des précipitations neigeuses sur le glacier.

La saison sèche débute vraiment fin mars, après une période de transition. Quelques précipitations interviennent aux mois de juin et août.

Au vue de l'évolution du "Southern Oscillation Index" (SOI), très négatif cette année, 1998 est considérée en situation "El Niño" avec l'indice le plus négatif depuis 1948.

B. INVENTAIRE DE L'EQUIPEMENT DU GLACIER

Nous présentons ici le dispositif de mesures météorologiques et hydrologiques dont nous avons disposé sur le glacier du Zongo durant l'année hydrologique 97-98. Le dispositif de mesures glaciologiques est présenté dans le chapitre J.

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

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

Descriptif

Le dispositif de mesure est le suivant :

- Un pluviomètre de la Cobee relevé chaque jour par Franz Quispe, l'observateur de la compagnie. 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 par le même opérateur
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)
- Pluie mensuelle à 4750 mètres

Lacunes dans les données

Pas de lacunes cette année.

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

Egalement situé à la Plataforma, ce dispositif de mesures météorologiques est constitué d'un thermographe à bande papier et d'une station météorologique Mévis de fabrication allemande.

B. 2.1. Thermographe à bande papier

Descriptif

Appareil Jules Richard et Pekly.

Données recueillies

La température de l'air est enregistrée en continu. Pour trois mois pris au hasard le dépouillement des bandes se fait par saisie de la température toutes les deux heures, et pour l'ensemble de l'année par saisie des extrêmes journaliers (minimum et maximum). L'équation de corrélation simple reliant les moyennes journalières calculées à partir des valeurs toutes les 2 heures à celles calculées à partir des extrêmes $((\min + \max) / 2)$, permet d'obtenir les moyennes journalières de l'ensemble de l'année hydrologique à partir des extrêmes journaliers.

Lacunes

Lacunes du 01/09/97 au 10/09/97 et du 05/08/98 au 20/08/98 dues à un changement tardif de la bande papier.

B. 2.2. Station Mévis

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).

Données recueillies

Nous disposons des moyennes demi-horaires et journalières suivantes :

- 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

Les données du 1^{er} au 10 septembre 97 ne sont pas disponibles à cause de problèmes de récupération qui nous ont fait perdre toutes les mesures à partir de la fin janvier 97 (cf. Informe 57, Année hydrologique 96-97). A partir du 10 septembre 97, la méthode de récupération des données a été simplifiée par l'utilisation d'une carte magnétique et d'un logiciel de communication (Procomm).

D'autre part, la présence d'eau dans la coupole du pyranomètre perturbe sans doute les mesures. Cette perturbation persiste dans la mesure où cette coupole ne peut être démontée (il faudrait peut-être changer l'ensemble du capteur).

On observe aussi une perte du coefficient de sensibilité du pyranomètre. Une calibration a donc été effectuée du 27/08/98 au 02/09/98, à partir d'un Licor que l'on considère comme correct, bien que grossièrement calibré, placé à côté du pyranomètre de la Mévis. On présente ci-dessous la figure de calibration (Figure B.1). L'équation de la droite de corrélation est la suivante (n = 298 points) :

$Licor = Pyr_{Mévis} * 1.62 + 3.27$. Il faut donc apporter cette correction aux résultats actuels.

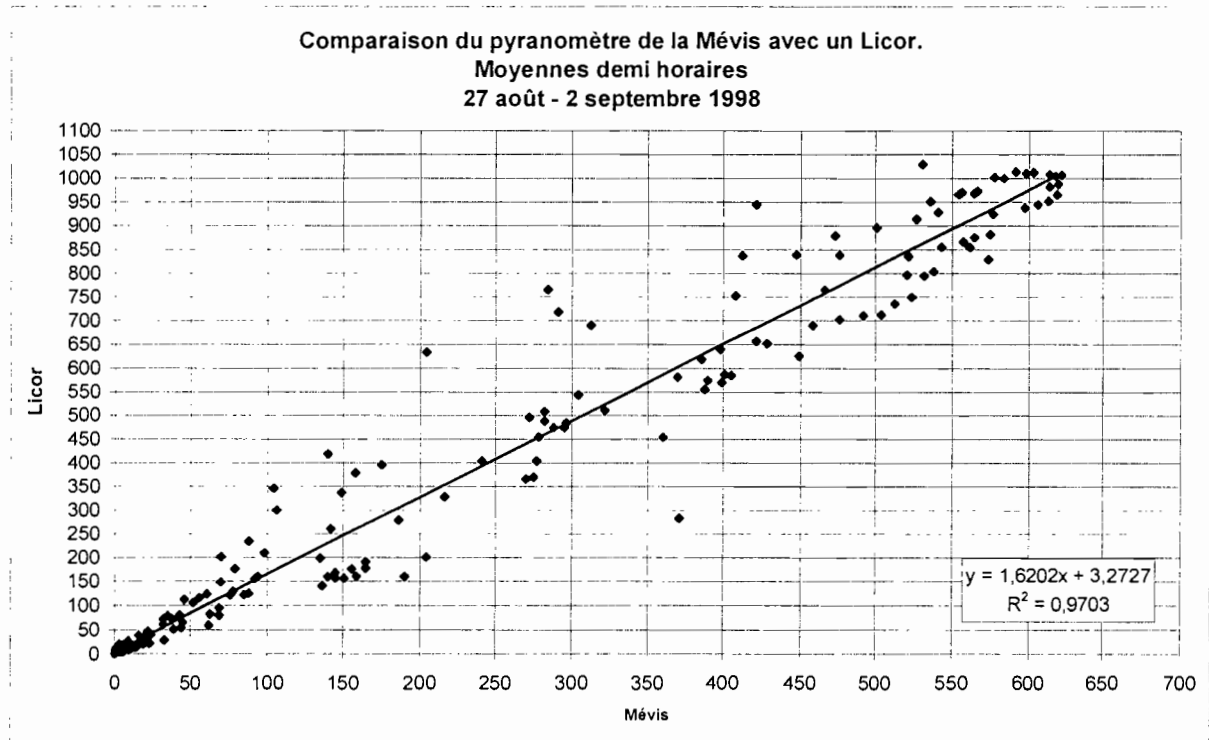


Figure B.1

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).

B. 3.1. Station limnigraphique

Descriptif

Limnigraphe à bande papier (marque : A. OTT, modèle : R20).

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

Lacunes dues à un dysfonctionnement de l'appareil :

- 01/09/97 au 10/09/97
- 16 et 17/09/97
- 02/03 au 11/03/98

Du 28/07 au 10/08/98 : travaux de la Cobee pour rehausser le mur du déversoir : cours d'eau dévié. Ces travaux permettent d'éviter les fuites en rive gauche observées par grands débits auparavant.

B. 3.2. Pluviomètre

Descriptif

Il s'agit d'un pluviomètre à augets basculeurs de marque Campbell (diamètre : 305 mm), mais utilisé comme un pluviomètre totalisateur depuis le vol de la station en février 95. L'eau est récupérée dans un jerrican. Le volume d'eau est mesuré lors des visites de routine (environ tous les 15 jours) et un échantillon d'eau est prélevé sur le volume mensuel du jerrican à fin d'analyses isotopiques et chimiques.

Lacunes dans les données

Pas de lacunes.

B. 4. Stations météorologiques à 5150 m d'altitude

A cette altitude, nous disposions jusqu'en avril 98 de deux centrales d'acquisition de mesures météorologiques : la station Campbell 21X (installée le 06/09/95), arrêtée le 16/04/98 et la station Campbell Cr10 (installée le 26/03/96) arrêtée le 15/04/98. A partir de cette date, une nouvelle station météorologique a été installée 50 m en amont des anciennes centrales 21X et Cr10 qui ont été démantelées. La centrale 21X a été transférée sur le glacier de Chacaltaya et la centrale Cr10 a été installée sur la nouvelle station pour gérer l'ensemble des capteurs (Cf. B.4.3).

B. 4.1. Station Campbell 21X

Descriptif

Il s'agit d'une station de mesure 21X - CAMPBELL (GB) qui comprend les capteurs suivants :

- Un hygromètre situé à 30 cm du sol. (références : 207 Temperature & RH probe, précision : $< 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour la température et $< 3\%$ pour l'humidité relative)
- Un hygromètre situé à 180 cm du sol (*mêmes caractéristiques que le précédent*)
- Un bilanmètre situé à 100 cm du sol. (marque : REBS, références : Q-6 net radiometer)
- Un pyranomètre courtes longueurs d'ondes dirigé vers le ciel, situé à 100 cm du sol. (marques : LICOR, références : Li-200sz, 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*)
- Un anémomètre situé à 30 cm du sol (marque : Met One, références : 014 Met One, précision : $\pm 1.5\%$, seuil de mesure : 0.45 ms^{-1})
- Un anémomètre situé à 180 cm du sol (marque : Wales)
- 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 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$)
- Deux thermocouples de type T (Cuivre/Constantan) placés initialement à 50 et 100 cm de profondeur, mais sortis de la glace en Nov. 95. Ils ont été laissés à la surface, et sont donc restés tout le reste de l'année à l'interface neige/glace
- Deux sondes Platine de température située à 30 et 180 cm du sol. (références : 107 température probe, précision : $< \pm 0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Les mesures sont effectuées toutes les 15 secondes. Son alimentation en énergie est assurée par une batterie 12V/6Ah couplée avec un panneau solaire d'une puissance de 3 W, qui recharge la batterie pendant la journée. Ainsi la centrale est autonome en énergie électrique.

Modifications survenues au cours de l'année hydrologique

Hauteur des capteurs :

La hauteur des capteurs est réajustée lors des visites bimensuelles (Tableau B.1).

Jour	Bilanmètre (cm)	Pyranomètre (cm)	Hygro-thermomètre bas (cm)	Anémomètre bas (cm)	Thermomètre haut (cm)	Hygro-thermomètre haut	Anémomètre haut (cm)	Hauteur Sonde (cm)
10/09/97	Avant : 170 Après : 160	Avant : 165 Après : 150	Avant : 85 Idem	Avant : 85 Idem	Avant : 210 Après : 195	Avant : 240 Après : 200	Avant : 220 Après : 190	
30/09/97	125	117	50	40	170	170	160	
08/10/97	Mise en place d'un nouveau mât							
09/10/97	Après : 125	Après : 120	Après : 52	Après : 40	Après : 205	Après : 205	Après : 185	
14/10/97	120	115	47	35	200	200	180	
05/11/97	Avant : 135 Après : 135	Avant : 130 Après : 150	Avant : 62 Après : 82	Avant : 50 Après : 70		Avant : 215 Après : 235	Avant : 195 Après : 215	
21/11/97	Avant : 150 Après : 135	Avant : 145 Après : 130	Avant : 77 Après : 62	Avant : 65 Après : 50		Avant : 230 Après : 215	Avant : 210 Après : 195	
04/12/97	Avant : 175 Après : 135	Avant : 156 Après : 120						
16/12/97	Avant : 152 Après : 134	Avant : 136 Après : 126						
08/01/98	Avant : 140 Après : 117	Avant : 128 Après : 105						
15/01/98	128	125						140
21/01/98	127	120						130
23/01/98	Avant : 136 Après : 102	Avant : 130 Après : 100						141
11/02/98	106	96						140
04/03/98	90	85						130
27/03/98	91	76						110
07/04/98	Avant : 71 Après : 94	Avant : 60 Après : 83						91
11/04/98	96.5	88						96
16/04/98	Installation de la nouvelle station Cr10-98							

Tableau B.1 : Evolution de la hauteur des capteurs de la station 21X (5150m)

Autres :

- .. 08/10/97 : mise en place du nouveau mat vertical mobile qui va porter tous les appareils
- .. 09/10/97 : Rciel et Rglacier ont été inversés. Correction prise en compte dans les fichiers de données

Données recueillies

Nous disposons des moyennes demi - horaires et journalières suivantes :

- La température de l'air non ventilée à 30 et 180 cm de la surface
- L'humidité relative de l'air à 30 et 180 cm de la surface
- La vitesse du vent à 30 et 180 cm de la surface
- Les radiations courtes longueurs d'onde incidente et réfléchie à 100 cm de la surface
- La radiation nette toutes longueurs d'onde à 100 cm de la surface
- La température à l'interface neige/glace

D'autre part, la station enregistre une mesure de la sonde à neige chaque demi-heure.

Nous disposons des maxima journaliers suivants :

- Les températures non ventilées de l'air à 30 et 180 cm
- L'humidité relative à 30 et 180 cm
- Les vitesses du vent à 30 et 180cm
- La radiation nette toutes longueurs d'onde confondues
- Les radiations courtes longueurs d'onde incidente et réfléchie

Nous disposons des minima journaliers suivants :

- Les températures non ventilées de l'air à 30 et 180 cm
- L'humidité relative à 30 et 180 cm
- L'albédo de surface (courtes longueurs d'onde)

Lacunes dans les données

La sonde à neige ne fonctionne plus depuis le 11 avril 1997 et jusqu'au démantèlement de la station.

Entre le 09/10/97 et 10/10/97, Rglacier et Rciel sont inversés et l'albédo min est faux.

A partir du 09/10/97, 14h30, jusqu'au démantèlement de la station, pas de vitesse pour vent haut et bas.

Aucunes données du 23/01/98 au 12/02/98, et du 04/03/98, 11h30 au 07/03/98 raison inconnue.

B. 4.2. Station Campbell Cr10

Cette station météorologique a été installée le 26/03/96 à environ 6 mètres en amont de la station 21X. Les capteurs et la centrale d'acquisition des données ne sont pas installés sur le même mât. Le mât supportant tous les capteurs se trouve à 10 mètres d'un second mât supportant la centrale et les panneaux solaires. Cette configuration permet d'éviter une perturbation du milieu lors de la récupération des données (état de surface de la neige en particulier), ainsi qu'une perturbation thermique due au boîtier de la centrale.

Descriptif

Il s'agit d'une station de mesure Cr10 - Campbell (GB), couplée à un multiplexeur afin d'augmenter le nombre de voies de mesures. Les mesures sont effectuées toutes les 15 secondes. Elle possède les capteurs suivants :

- Un psychromètre ventilé à 30 cm du sol (*prototype INRA - Bordeaux*)
- Un psychromètre ventilé à 180 cm sol (*mêmes caractéristiques que le précédent*)
- Des thermocouples type T (Cuivre/Constantan) dans la neige à 20, 30, 50 et 70 cm de profondeurs et dans la glace à 100, 150 et 270 cm de profondeurs
- Un bilanmètre situé à 55 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)

Les thermocouples installés dans la neige à -20, -30, -50 et -70 cm de profondeur ont été placés au centre d'un cylindre métallique (diamètre : 30 cm, longueur : 40 cm), peint en blanc et placé horizontalement. Ce cylindre sert à protéger les capteurs des radiations pouvant traverser le manteau neigeux. De plus, de petites plaques métalliques peintes en blanc (2 cm * 3 cm) ont été placées sur les capteurs afin d'accroître leur inertie thermique.

L'alimentation en énergie de la centrale d'acquisition des données est assurée par un panneau solaire de 3W en parallèle avec une batterie de 12V/6Ah, l'autonomie est ainsi illimitée. Un

panneau solaire de 43 W couplé avec une batterie de 12V/100Ah a été installé le 12 septembre 96 pour alimenter en continu les moteurs de ventilation des psychromètres.

Modifications survenues au cours de l'année hydrologique

Hauteurs des capteurs :

Comme pour la Campbell 21X, la hauteur des capteurs est réajustée lors des visites sur le terrain (Tableau B.2).

Jour	Psychromètre bas (cm)	Psychromètre haut (cm)	Anémomètre bas (cm)	Anémomètre haut (cm)
10/09/97	50	180	60	200
30/09/97	avant : 0 après : 50	avant : 160 après : 180	avant : 0, bloqué après : 50	avant : 150 après : 170
08/10/97	avant : 75 après : 35	180	avant : 75 après : 35	180
14/10/97	avant : 39 après : 55	avant : 200 après : idem	avant : 20 après : 40	avant : 185 après : idem
05/11/97	avant : 76 après : 45	avant : 215 après : 190	avant : 70 après : 40	avant : 200 après : 180
21/11/97	avant : 70 après : 50	avant : 210 après : 190	avant : 60 après : 40	avant : 190 après : 180
04/12/97	avant : 78 après : 58	avant : 220 après : 180	avant : 60 après : 40	avant : 205 après : 190
16/12/97	avant : 80 après : 40	avant : 215 après : 175	avant : 70 après : 35	avant : 206 après : 180
08/01/98	avant : 70 après : 68	avant : 200 après : 180	avant : 56 après : 35	avant : 190 après : 168
15/01/98	78	200	82	190
21/01/98	68	197	64	190
23/01/98	avant : 80 après : 52	avant : 205 après : 175	avant : 70 après : 38	avant : 200 après : 168
11/02/98	50	175	44	170
04/03/98	avant : 43 après : 46	avant : 170 après : 185	avant : 25 après : 38	avant : 160 après : 180
27/03/98	37	184	35	180
07/04/98	28	172	25	170
16/04/98	Nouvelle station Cr10-98			

Tableau B.2 : Evolution de la hauteur des capteurs de la station Cr10 (5150m)

Autres:

- Le 08/10/97, on a retrouvé le ventilateur du psychromètre bas avec toutes les pales cassées. Changement de mat avec un nouveau ventilateur
- 05/11/97 : ventilateur du haut changé
- 04/12/97 : bouchons du psychromètre changés : ils sont blancs maintenant
- 16/12/97 : réorientation des références Nord des deux girouettes

Données recueillies

Nous disposons des moyennes demi - horaires et journalières suivantes :

- La température sèche de l'air à 30 et 180 cm de la surface
- La température humide de l'air à 30 et 180 cm de la surface
- La température à 20, 30, 50, 70, 100, 150 et 270 cm de profondeur (mesurées lors de l'installation) dans la neige (pour les quatre premières) et dans la glace (pour les trois dernières)
- Les vitesses du vent à 30 et 180 cm de la surface

- Les directions du vent à 30 et 180 cm de la surface
- La radiation nette, toutes longueurs d'onde confondues, à 60 cm de la surface

Ainsi que les extrêmes journaliers suivants :

- Maxima et minima des températures sèches et humides de l'air à 30 et 180 cm de la surface
- Maxima des vitesses du vent à 30 et 180 cm de la surface

Lacunes dans les données

Lacune le 04/03/98 à 11h30.

A partir du 21/11/97, on arrête la mesure des températures en profondeur.

B. 4.3. Nouvelle Station Campbell Cr10-98, station de référence.

Cette station météorologique a été installée le 16/04/98 au cours d'une mission de quelques jours.

Descriptif (Cf. 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 :

- Un psychromètre ventilé à 30 cm du sol (prototype INRA - Bordeaux)
- Un psychromètre ventilé à 180 cm sol (mêmes caractéristiques que le précédent). Les turbines sont alimentées par une alimentation électrique solaire indépendante
- Un bilanmètre situé à 55 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 : LICOR, références : Li-200sz, 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)

Sur l'autre mât qui se trouve à quelques mètres du mât support, on a :

- 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

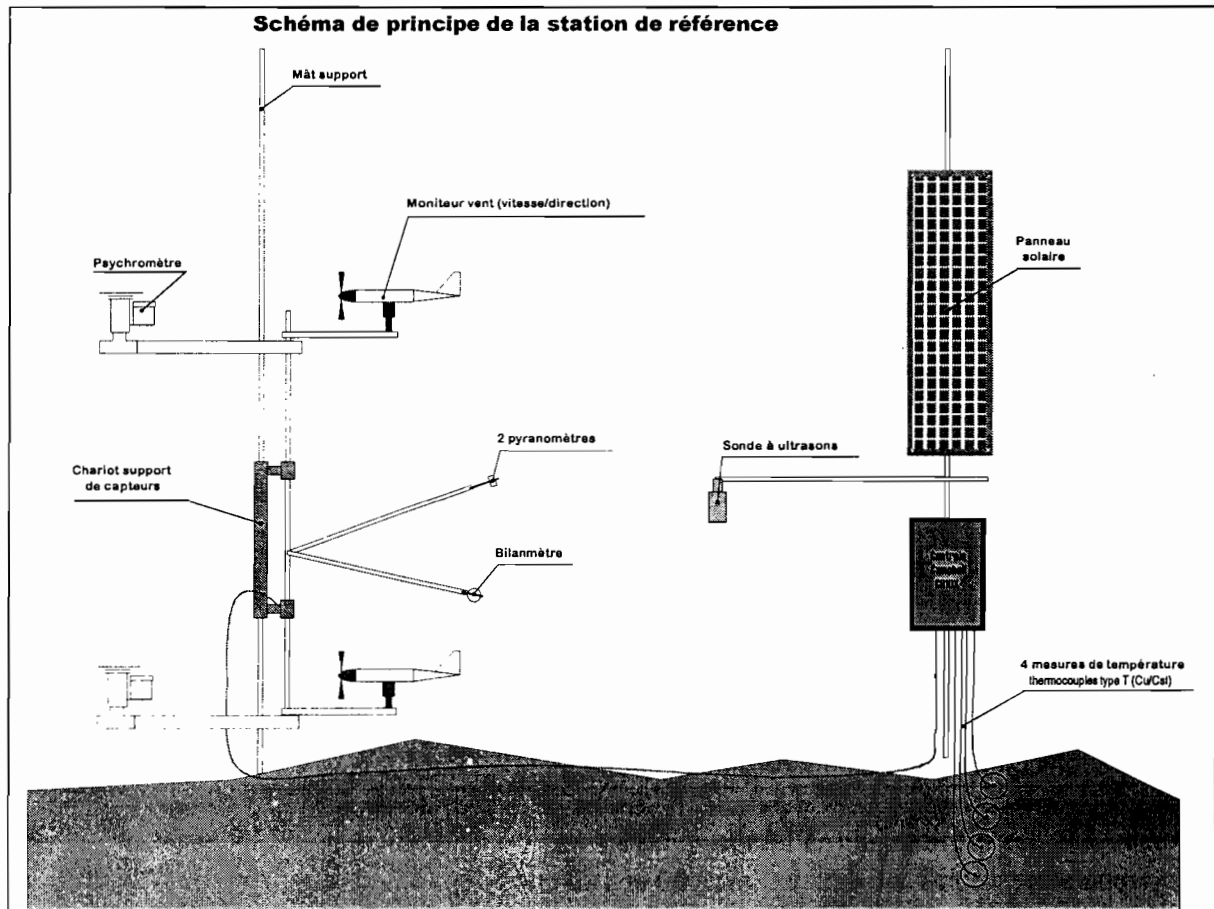


Figure B.2 : Station de référence. (Plan et conception d'après J.P. Chazarin)

Modifications survenues au cours de l'année hydrologique

Hauteurs des capteurs:

Les hauteurs réajustées des capteurs sont les suivantes (Tableau B.3).

Jour	Psychromètre bas (cm)	Psychromètre haut (cm)	Anémomètre bas (cm)	Anémomètre haut (cm)	Bilanmètre (cm)	Pyranomètre (cm)	Hauteur sonde (cm)
16/04/98	34	180	36	188	90	89	133.4
06/05/98	avant : 60 après : 35	avant : 207 après : 185	avant : 46 après : 37	avant : 206 après : 193	avant : 124 après : 88	avant : 119 après : 92	avant : 143 après : 139
23/05/98	avant : 83 après : 44	avant : 232 après : 190	avant : 74 après : 41	avant : 229 après : 191	avant : 142 après : 100	avant : 146 après : 105	173
05/06/98	avant : 63 après : 40	avant : 213 après : 198	avant : 54 après : 35	avant : 211 après : 186	avant : 120 après : nm	avant : 128 après : 104	avant : 208 après : 208
22/06/98	avant : 55 après : 40	avant : 200 après : 185	avant : 34 après : 20	avant : 190 après : 160	avant : 125 après : 109	avant : 118 après : 105	avant : 223 après : 223
07/07/98	avant : 16 après : 30	avant : 165 après : 179	avant : 12 après : 32	avant : 170 après : 182	avant : 84 après : 100	avant : 83.5 après : 103	après : 182.7
29/07/98	avant : 50 après : 30	avant : 196 après : 180	avant : 50 après : 35	avant : 200 après : 185	avant : 124 après : 105	avant : 125 après : 106	195
21/08/98	avant : 32 après : 50	avant : 178 après : 200	avant : 30 après : 48	avant : 183 après : 203	avant : 99 après : 120	avant : 101 après : 127	avant : 216

Tableau B.3 : Evolution de la hauteur des capteurs de la station Cr10-98 (5150m)

Autres:

- Le 06/05/98, les capteurs ont tourné de 90° sur les mâts ; le gel les a fixés sur les mâts
- 23/05/98 : les capteurs ont tourné de 90° sur les mâts : mâts laissés en place
- Depuis le 07/07/98, on ne sait pas si la batterie des psychromètres fonctionne. Elle est changée le 21/08/98

Données recueillies

Nous disposons des moyennes demi-horaires et journalières suivantes :

- La température sèche de l'air à 30 et 180 cm de la surface
- La température humide de l'air à 30 et 180 cm de la surface
- Les vitesses du vent à 30 et 180 cm de la surface
- Les directions du vent à 30 et 180 cm de la surface
- 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

Nous disposons des maxima journaliers suivants :

- Les températures non ventilées de l'air à 30 et 180 cm
- L'humidité relative à 30 et 180 cm
- Les vitesses du vent à 30 et 180 cm
- La radiation nette toutes longueurs d'onde confondues
- Les radiations courtes longueurs d'onde incidente et réfléchie

Nous disposons des minima journaliers suivants :

- Les températures non ventilées de l'air à 30 et 180 cm
- L'humidité relative à 30 et 180 cm
- L'albédo de surface (courtes longueurs d'onde)

Lacunes dans les données

Pas de lacunes pour cette année hydrologique depuis l'installation le 16/04/98.

B. 5. Station météorologique à 5500 m d'altitude (Station d'altitude)

Les mesures à cette altitude ont été effectuées par une autre station Cr10 dont le descriptif suit.

Descriptif

Il s'agit d'une station de mesure Campbell (GB) de type Cr10 qui possède les capteurs suivants :

- Un bilanmètre situé à 1 m 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)
- 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 pyranomètre courtes longueurs d'onde situé à 120 cm du sol, dirigé vers le ciel. (marque : SKYE, référence : SP1110 Pyranometer Sensor, précision : inférieur à ± 5 , gamme mesurée : de 0.35 μm à 1.1 μm)
- Un pyranomètre courtes longueurs d'onde situé à 120 cm du sol, dirigé vers le bas. (marque : SKYE, référence : SP1110 Pyranometer Sensor, précision : inférieur à ± 5 , gamme mesurée : de 0.35 μm à 1.1 μm)
- Un psychromètre ventilé à 30 cm du sol (marque : prototype INRA - Bordeaux)

Les mesures sont effectuées toutes les 15 secondes. L'alimentation en énergie de la centrale est

assurée par une batterie, rechargée par un panneau solaire, et une batterie de camion.

Modifications survenues au cours de l'année hydrologique

Hauteurs des capteurs (Tableau B.4) :

Jour	Psychromètre bas (cm)	Pyranomètre (cm)	Bilanmètre (cm)	Psychromètre haut (cm)	Anémomètre (cm)
03/09/97	40^	90	120		210
19/09/97	avant : 55 après : 45	avant : 100 idem	avant : 130 idem		
07/11/97	avant : 25 après : 45	avant : 80 idem	avant : 110 après : 120		210
26/11/97	40	78	120		
09/12/97	Après : 50	Après : 100	Après : 102	Après : 185	Après : 235
11/02/98	Après : 40	Après : 88	Après : 90	Après : 170	Après : 233
11/03/98	Avant : 50	Avant : 103	Avant : 104	Avant : 190	
10/07/98	avant : 20 après : 40	avant : 52 après : 69	avant : 60 après : 73	avant : 165 après : 185	avant : 195 après : 200
31/07/98	38	75	85	185	220

Tableau B.4 : Evolution de la hauteur des capteurs de la station Cr10 (5500m)

Autres

A partir de décembre 1997 la station est complétée par une ventilation continue et une température haute.

Données recueillies

Nous disposons des moyennes demi - horaires et journalières suivantes :

- Les températures humides et sèches de l'air à 30 cm de la surface
- La radiation courtes longueurs d'onde directe à 120 cm de la surface
- La radiation courtes longueurs d'onde réfléchie à 120 cm de la surface
- La radiation nette toutes longueurs d'onde à 1 m de la surface
- La vitesse et la direction du vent à 250 cm de la surface
- L'albédo (moyennes demi-horaires seulement)

Ainsi que les maxima journaliers :

- Des températures humides et sèches de l'air à 30 cm de la surface
- De la radiation nette à 1 m de la surface
- De la radiation courtes longueurs d'onde directe à 120 cm de la surface
- De la radiation courtes longueurs d'onde réfléchie à 120 cm de la surface
- De la vitesse du vent à 250 cm de la surface

Et les minima journaliers :

- Des températures humides et sèches de l'air à 30 cm de la surface
- De la radiation nette à 1 m de la surface
- De l'albédo

Lacunes dans les données

Lacunes : du 16 au 19/09/97 (batterie hors d'usage).

Lacunes : du 21 au 31/10/97 (batterie hors d'usage).

Du 1er au 7 novembre (batterie déchargée).

Du 26/11/97 au 09/12/97 la station a été descendue : pas de données sur cette période.
Les lignes aberrantes et les lacunes du 19 janvier au 11 février 1998 proviennent sans doute d'un faux contact dû à l'humidité.
Programme non chargé entre le 11 mars et le 27 mai 1998.

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 mètres d'altitude sur la moraine droite du glacier à environ 300 m de distance de la station météorologique Cr10-98 du glacier.

Données recueillies

Cet appareil enregistre les moyennes bi-horaires de la température de l'air sous abri.

Lacunes dans les données

Lorsque la mémoire est saturée, le dépouillement des données nécessite un arrêt du thermomètre. Les lacunes de cette année hydrologique correspondent à ces inévitables périodes d'interruption :

- du 05/11/97, 12h00 au 07/11/97, 12h00
- du 21/01/98, 10h00 au 23/01/98, 8h00
- du 27/05/98, 12h00 au 29/05/98, 12h00
- du 19/08/98, 10h00 à la fin de l'année hydrologique : une des pattes du circuit mémoire, retrouvée pliée, est à l'origine de données aberrantes.

B. 6.2. Mesures cumulées des précipitations

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. Figure A.1)

Descriptif

Nous possédons deux types de pluviomètres totalisateurs :

- 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
 - ✓ P₆ : 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

Données recueillies

Les mesures sont effectuées chaque début de mois.

Lacunes dans les données

Pas de lacunes.

B. 7. Mesures réalisées lors de missions ponctuelles sur le glacier.

En complément du dispositif de mesure permanent, deux missions ponctuelles ont été réalisées sur le glacier à 5150m d'altitude du 7 au 16 octobre 1997 et du 26 mars au 16 avril 1998. Les objectifs étaient les mêmes que lors des missions des années précédentes, c'est à dire faire des mesures complémentaires à celles des stations en place et de disposer d'observations météorologiques précises et complètes. Les méthodes de mesures sont détaillées dans les rapports précédents.

- mesures de sublimation
- mesures de fusion
- mesures des températures de l'air et de la neige à la surface du glacier
- mesures de la densité de la neige
- mesures de la teneur en eau liquide de la neige
- mesures d'émergence de balises
- observations météorologiques et observations de l'évolution de la surface du glacier

B. 8. Conclusion

Récapitulatif et altitude d'enregistrement des différents paramètres :

Température de l'air sous abri

à 4750 m (deux mesures à la Plataforma)

à 5165 m (sur la moraine)

Température sèche ventilée de l'air

à 5150 m (sur le glacier, mesures " basse " et " haute ")

à 5500 m (sur le glacier, mesure " basse ")

Température humide ventilée de l'air

à 5150 m (sur le glacier, mesures " basse " et " haute ")

à 5500 m (sur le glacier, mesure " basse ")

Humidité relative

à 4750 m (Plataforma)

Radiation solaire globale et réfléchi

à 4750 m (Plataforma, radiation directe seulement)

à 5150 m (sur le glacier)

à 5500 m (sur le glacier)

Radiation nette

à 5150 m (sur le glacier)

à 5500 m (sur le glacier)

Vitesse et direction du vent

- à 4750 m (Plataforma, la direction n'est pas mesurée)
- à 5150 m (sur le glacier, mesures " basse " et " haute ")
- à 5500 m (sur le glacier, mesures " basse " et " haute ")

Pluie

- à 4750 m (deux mesures)
- à 4830 m
- à 5000 m
- à 5165 m

Débit du torrent émissaire du glacier

- à 4830 m

C. TEMPERATURES DE L'AIR

Nous enregistrons la température de l'air à différents endroits :

- *hors du glacier* : sous abri à 4750 m (Mévis) et à 5165 m (Omnidata)
- *sur le glacier* : températures ventilées des stations à 5150 m et 5500 m

Rappel : influence de la ventilation sur les températures à 5150m et 5500m.

Les conclusions des années précédentes ont mis en évidence la nécessité de maintenir la ventilation des psychromètres jours et nuits, quel que soit le temps, pour prévenir l'apparition d'un pic artificiel de température dû à la radiation solaire.

Les mesures non ventilées sont celles issues des hygrothermomètres de la station 21X à 5150m, les mesures ventilées celles issues des psychromètres de la station Cr10 (5150m). Pour les périodes considérées, la ventilation des psychromètres est permanente jour et nuit grâce à une batterie 12 V/ 100 Ah couplée à un panneau solaire de 43 W. Sur la nouvelle station Campbell Cr10-98, les mesures sont ainsi ventilées jour et nuit quel que soit le temps.

C.1. Températures instantanées

Les valeurs instantanées considérées dans ce paragraphe correspondent aux moyennes demi-horaires issues des stations météorologiques Campbell à 5150 m sur le glacier (stations 21x et Cr10 jusqu'au 16.04.98 puis station Cr10-98), et les moyennes bi-horaires de l'Omnidata à 5165 m sur la moraine.

C.1.1. Température de l'air à 5150 m, comparaison des séries sur et hors du glacier

Valeurs instantanées

Nous disposons des mesures de température de l'air sur le glacier à 5150m et hors du glacier à 5165m. Pour cette comparaison, la mesure sur le glacier est celle du thermomètre ventilé haut de la station Cr10 jusqu'au 16.04.98 puis celle du thermomètre haut ventilé de la Cr10-98. La mesure hors du glacier est celle de l'enregistreur Omnidata.

Nous présentons ici quatre périodes de 15 jours sans lacunes importantes : période du 16/11/97 au 30/11/97 et du 01/02/98 au 15/02/98 représentatives des conditions de la saison des pluies, du 01/07/98 au 15/07/98 représentant les conditions de la saison sèche et enfin du 01/04/98 au 15/04/98 représentative de la période de transition entre la saison des pluies et la saison sèche (Figures C.1, C.2, C.3 et C4).

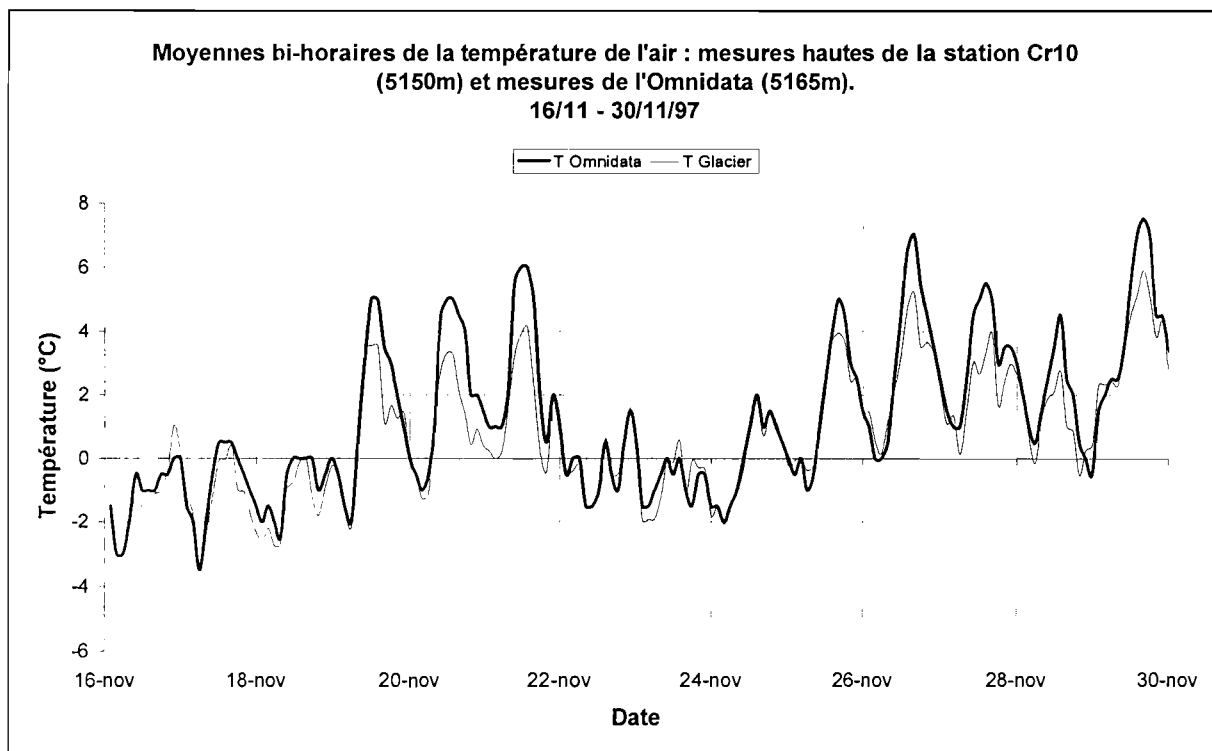


Figure C.1

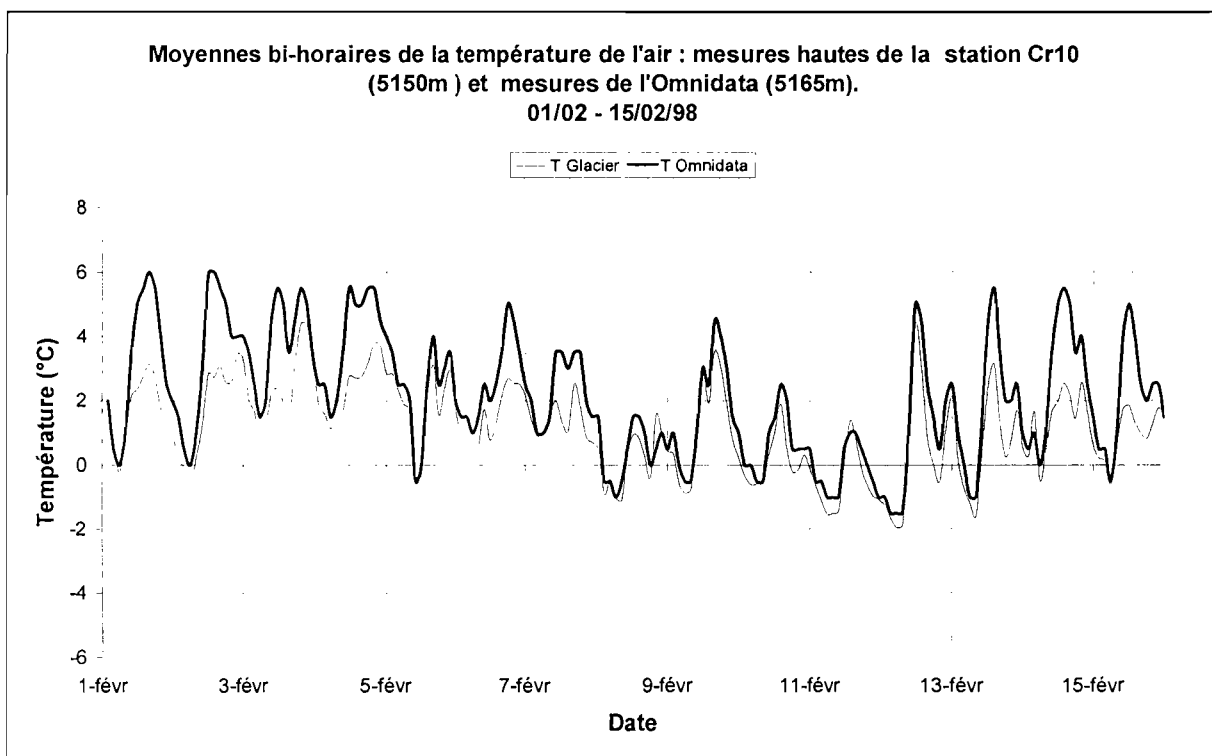


Figure C.2

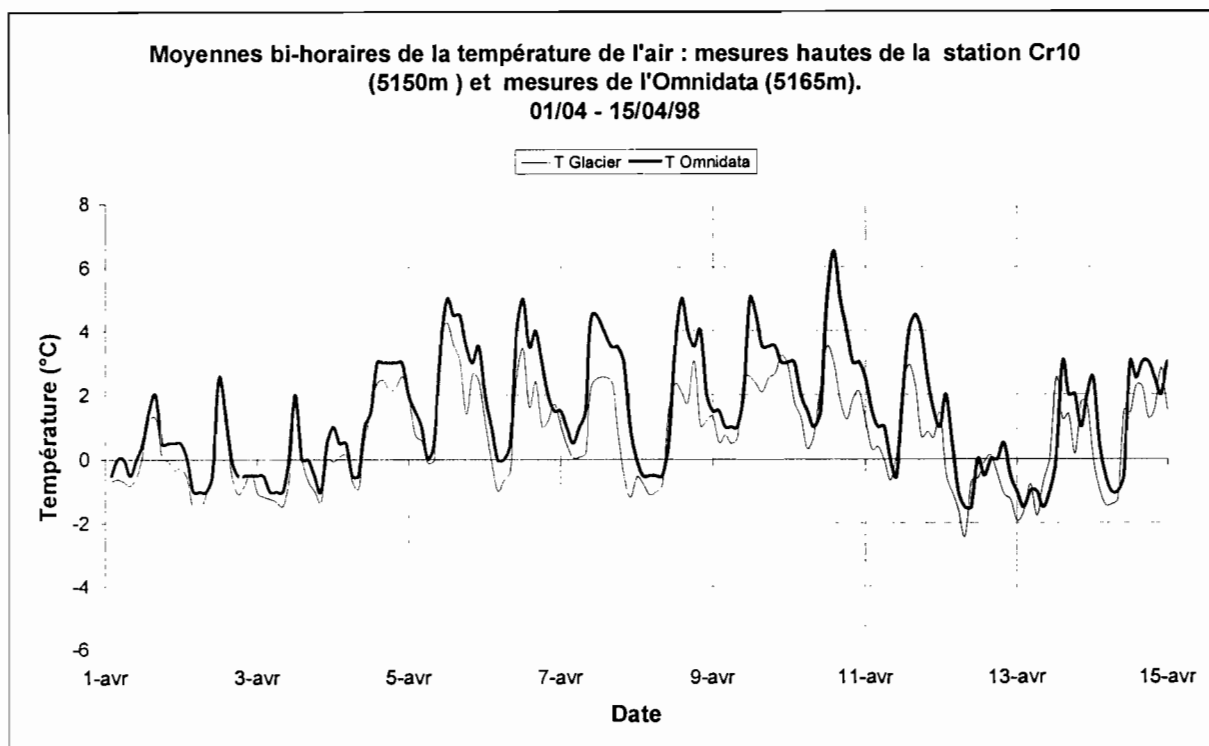


Figure C.3

Lacunes du 07/04/98, 14h00 pour la Cr10 et l'Omnidata. Lacunes du 15/04/98, 18h00 au 16/04/98, 00h00 pour la Cr10.

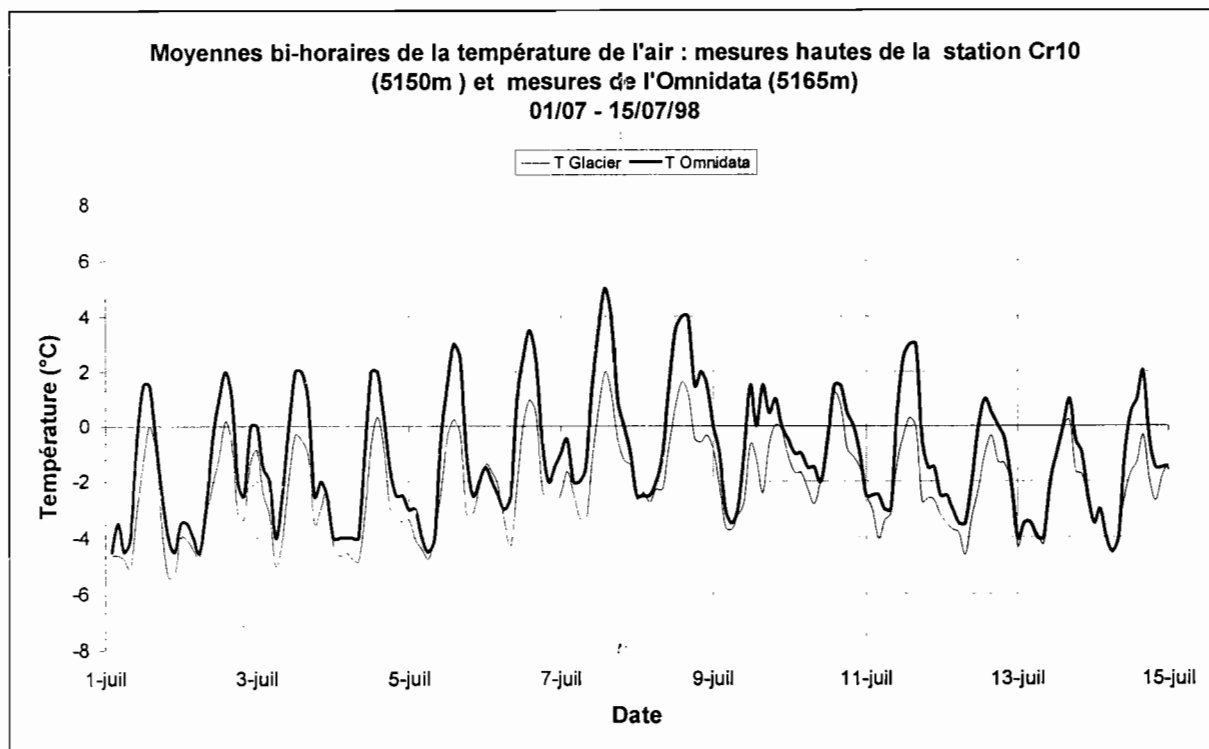


Figure C.4

Toutes les températures traitées dans ce chapitre cette année sont ventilées. Les températures sur la moraine sont systématiquement supérieures à celles relevées sur le glacier (Figures C.1, C.2, C.3 et C.4).

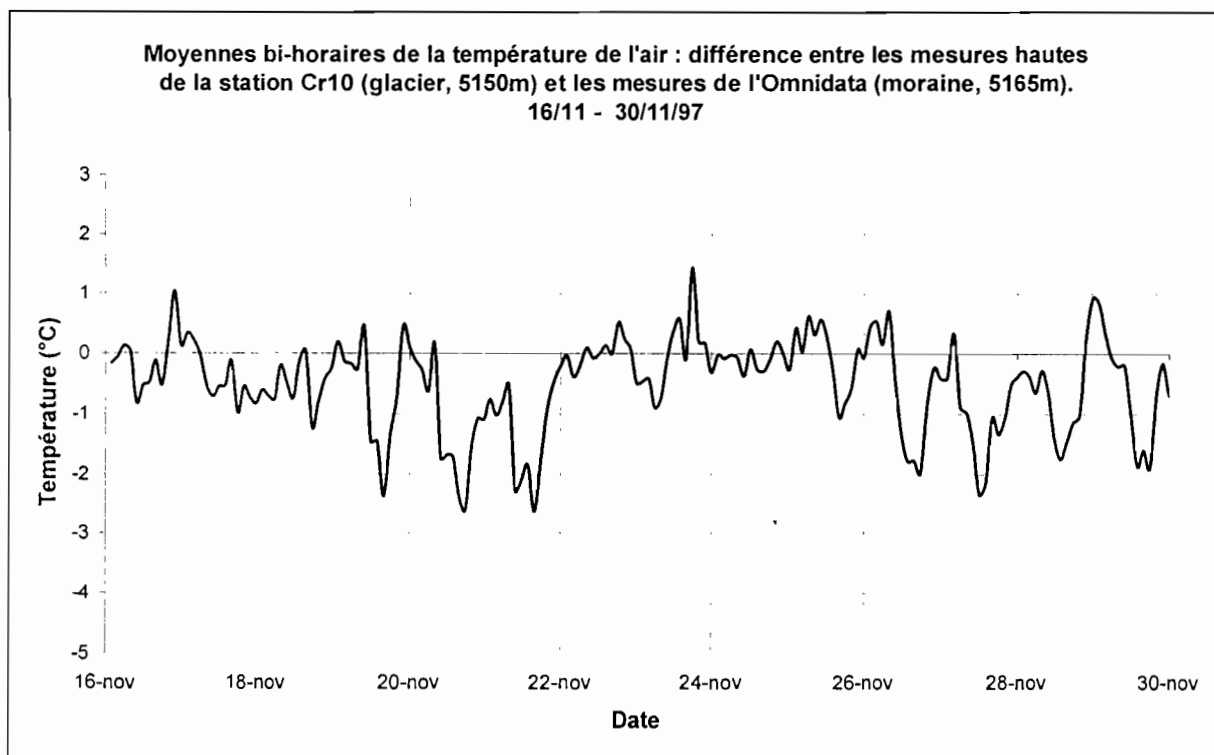


Figure C.5

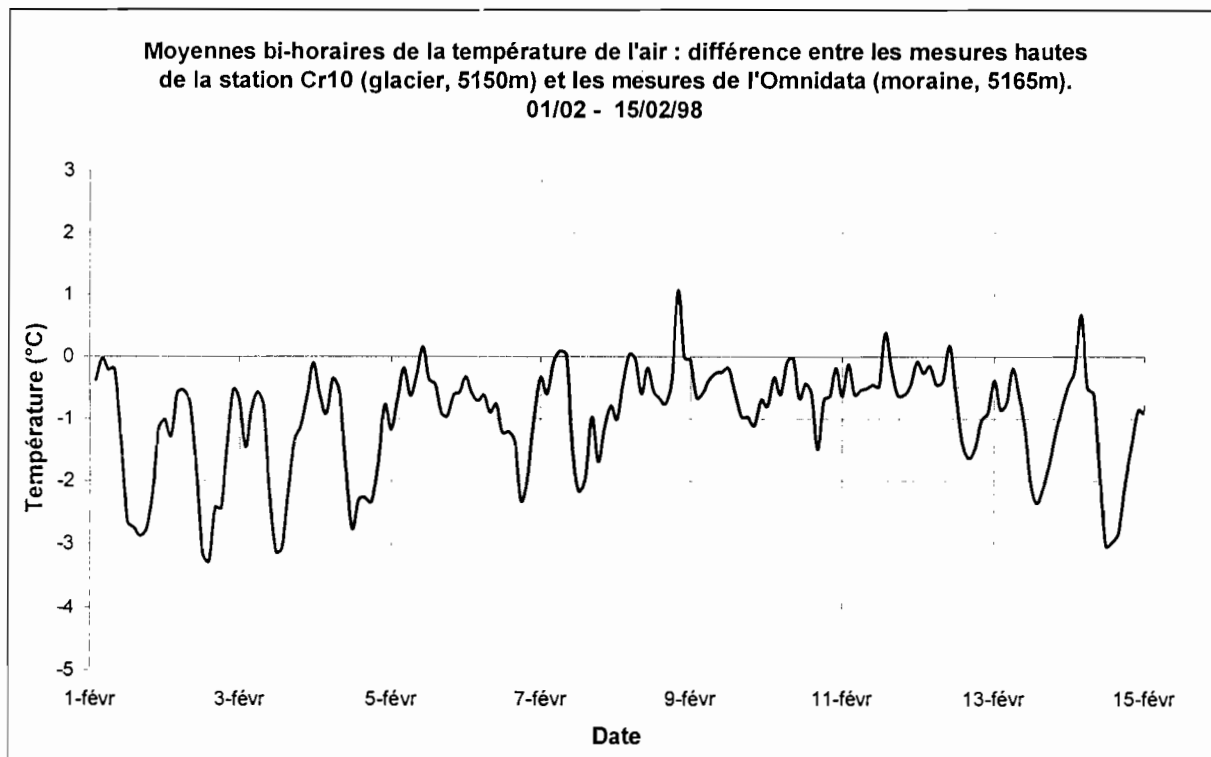


Figure C.6

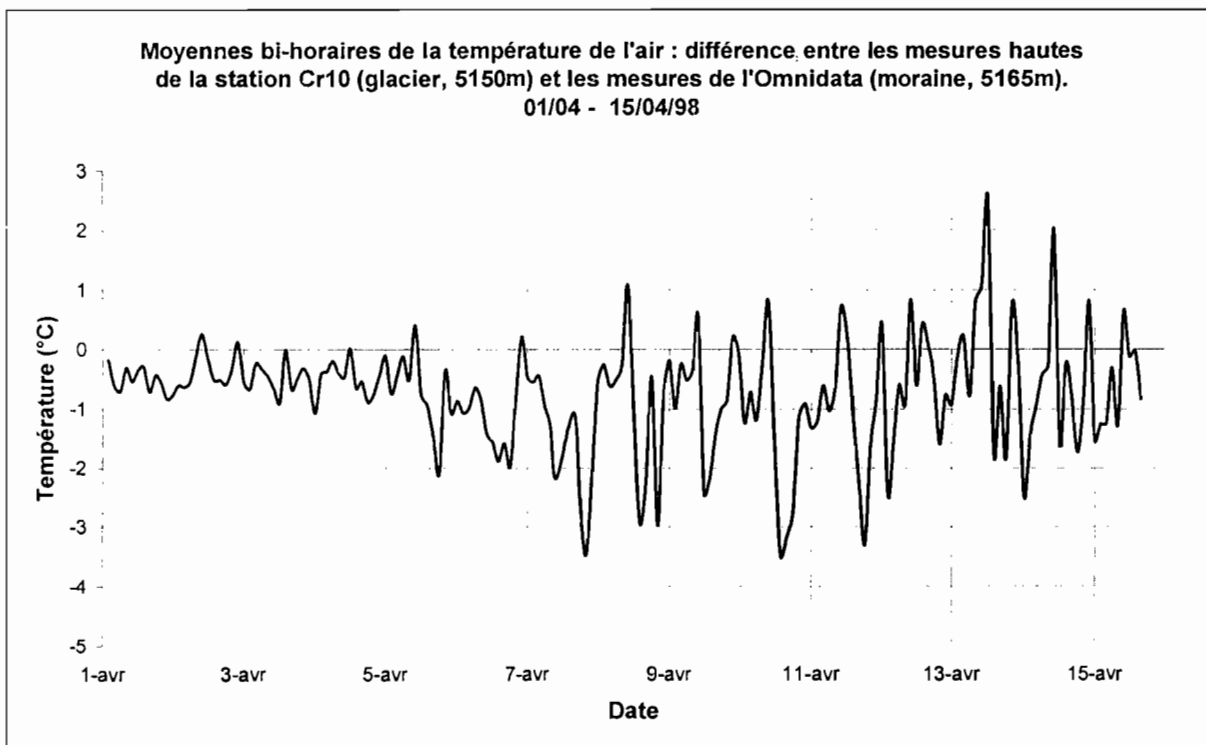


Figure C.7

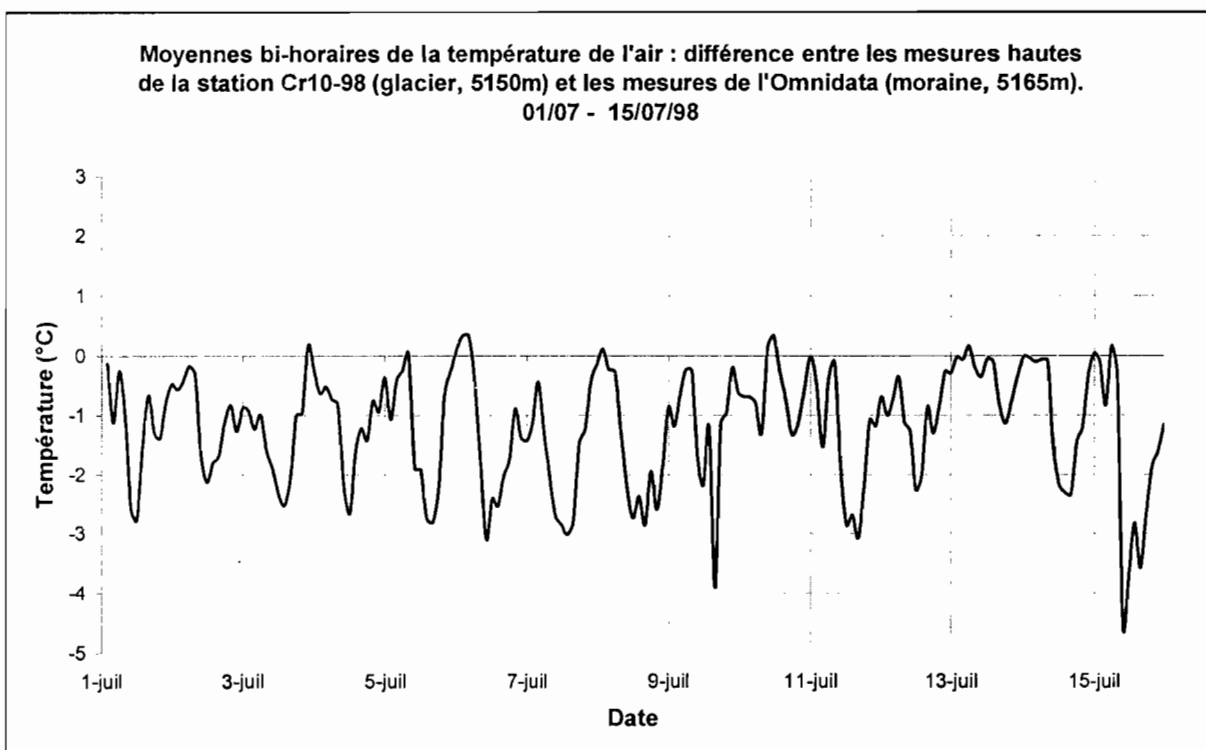


Figure C.8

Les graphes C.5, C.6, C.7 et C.8 montrent la différence entre la température sur le glacier et celle sur la moraine. La nuit, cette différence est plus faible qu'en journée : les températures aux deux endroits sont plus proches la nuit que le jour avec $T_{\text{moraine}} > T_{\text{glacier}}$. Les résultats sont similaires à ceux de l'année dernière et cette différence a été expliquée dans l'Informe n°57 (Sicart et al., 1998).

Corrélations

Les coefficients de détermination obtenus entre les séries de mesures sur le glacier et sur la moraine sont très semblables à ceux obtenus l'année dernière où les mesures étaient déjà ventilées : coefficients allant de 0.74 à 0.92 cette année (Cf. Figures C.9 à C.12), de 0.83 à 0.87 l'année précédente. Les équations des droites de régression sont proches pour les quatre périodes considérées : coefficient directeur compris entre 0.65 et 0.78.

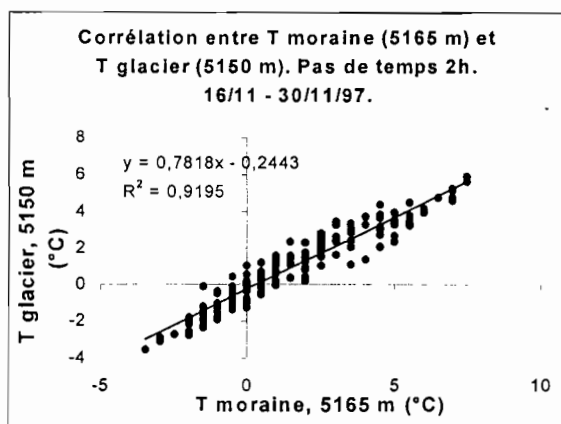


Figure C.9

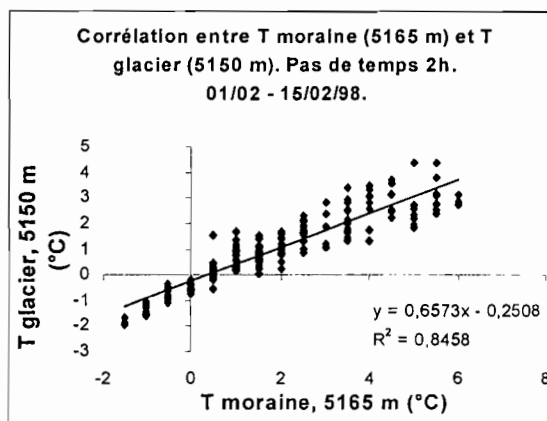


Figure C.10

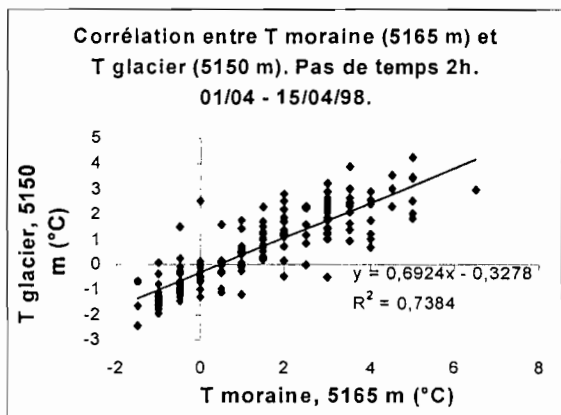


Figure C.11

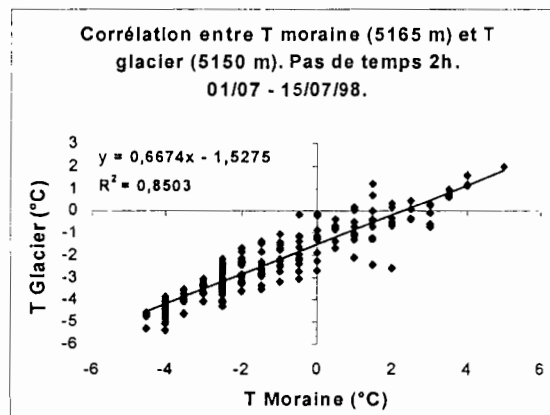


Figure C.12

C.2. Moyennes journalières

On recueille les moyennes journalières des températures :

- à 4750 m : station Mévis et thermographe (Plataforma)

- à 5150 m et à 5500 m d'altitude (stations Campbell)

NB : les moyennes journalières du thermographe sont calculées par corrélation entre la moyenne des extrêmes journaliers et la moyenne journalière des moyennes toutes les deux heures de la température.

Nous présentons ici les comparaisons des mesures issues des différents appareils. Des gradients thermiques selon l'altitude sur et hors du glacier ont été calculés.

C.2.1. *Températures journalières non ventilées et sous abri à la Plataforma, comparaison des séries issues de la station Mévis et du thermographe*

Sur la Figure C.13, on remarque que la température enregistrée par le thermographe papier est supérieure à celle enregistrée par la station Mévis. Ces deux thermomètres de conceptions différentes sont au même endroit. Le coefficient de détermination entre ces deux séries de mesures est très médiocre : $R^2 = 0.54$ ($n = 339$ points). Il est très inférieur à celui de l'année dernière ($R^2 = 0.64$, $n = 145$ points) mais presque identique à celui de l'année hydrologique 95-96 ($R^2 = 0.52$, $n = 320$ points). Les moyennes annuelles sont élevées : 6.27°C pour le thermographe et 2.99°C pour la station Mévis, contre respectivement 3.31 et 1.83°C l'année dernière. Les valeurs du thermographe sont surestimées par rapport à celles de la Mévis qui sont plus cohérentes.

Comme on le remarque depuis quelques années, les différences entre les deux appareils ne sont pas dues à un problème d'exposition au rayonnement solaire puisqu'un écart entre les deux courbes est également observé la nuit (Figure C.14). En fait, ces différences ne peuvent pas se rapporter uniquement à des effets locaux - les abris sont placés à une dizaine de mètres d'écart, exposés à une ventilation similaire... - mais sont sans doute dues à des différences de calibrage des appareils, qui depuis leur installation n'ont jamais été contrôlés ni révisés.

On gardera donc la conclusion des années précédentes : la Mévis est plus fiable que le thermographe.

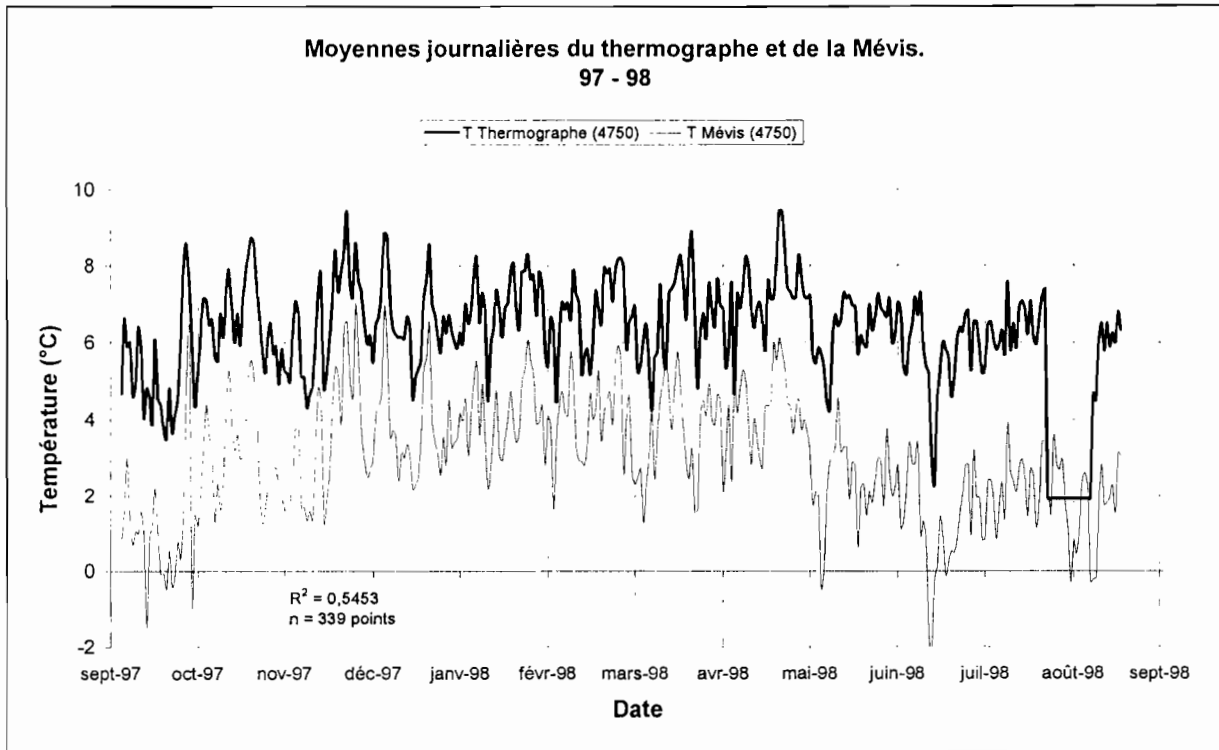


Figure C.13

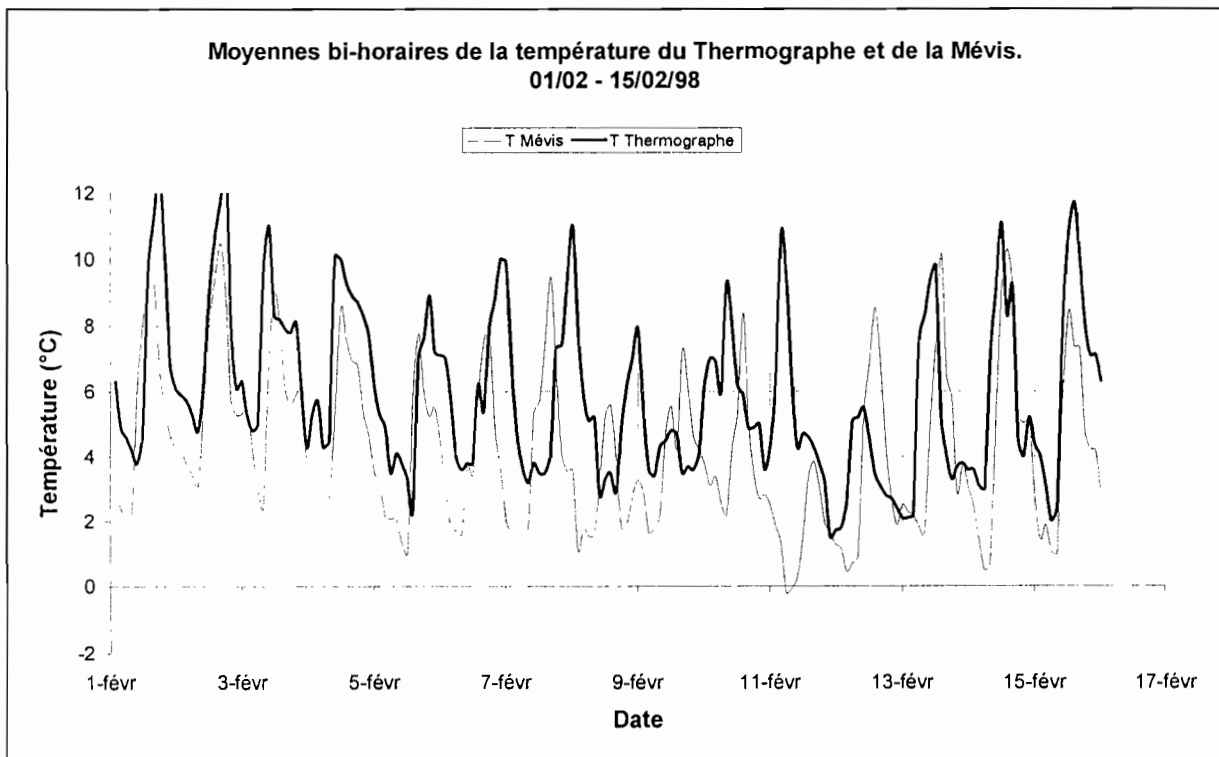


Figure C.14

C.2.2. *Températures journalières ventilées à 5150 et à 5500 m. Estimation du gradient selon l'altitude*

Pour l'année hydrologique 97-98, les températures basses et hautes ventilées à 5150 m (Cr10 jusqu'au 14/04/98 puis Cr10-98) sont sans lacune.

Les données de températures basses pour 5500 m, où la ventilation intervient seulement en journée jusqu'en décembre 1997, sont, elles, peu nombreuses (problèmes de batterie, capteurs enfouis dans la neige, station descendue... cf. Inventaire, partie B.5) et une partie de la série existante présente des aberrations inexplicables : de septembre à fin octobre, les températures à 5500 m sont supérieures d'environ 5°C aux températures à 5150 m. A partir de décembre 1997, on dispose d'une ventilation continue et d'une température haute (180 cm) à 5500m. Finalement seule la période de fin mai à fin août est retenue pour les T_{bas} et les T_{haut} , le reste de l'année ayant connu trop de lacunes ou d'aberrations.

Températures basses

Sur cette période (fin mai à fin août), les séries de données pour les températures basses à 5150 et 5500 m sont assez bien corrélées : $R^2 = 0.77$; la différence $T_{5150m} - T_{5500m}$ est régulière et comprise entre 1.5 et 4.7°C, pour une moyenne des différences de 3.10°C (Cf. Figure C.15). On a ainsi une estimation du gradient thermique : - 0.89 °C pour 100 m de dénivelé, ce qui est du même ordre de grandeur que pour l'année 95-96 (Berton et al., 1997) à une même période (-0.8 °C/100 m entre le 23/04/96 et le 31/08/96). L'année dernière, compte tenu des lacunes de données, le gradient thermique n'a été calculé qu'entre novembre 96 et janvier 97 : il était de - 0.65 °C/100 m. On remarque la saisonnalité des gradients de températures : période *transition/saison des pluies* où le gradient est plus faible en valeur absolue qu'en *saison sèche* où les écarts thermiques sont plus marqués.

Températures hautes

Le coefficient de détermination de ces deux séries pour les températures hautes sur cette même période est : $R^2 = 0.64$ (Cf. Figure C.16). La différence $T_{5150m} - T_{5500m}$ varie entre 1.38 et 4.1°C et reste assez régulière : moyenne de 2.90°C, d'où un gradient thermique de - 0.83°C/100 m.

Pas de comparaison possible puisque c'est la première année où l'on relève des températures hautes à 5500 m. Par contre, les écarts $T_{5150m} - T_{5500m}$ des températures hautes et basses sont très proches sur la période retenue.

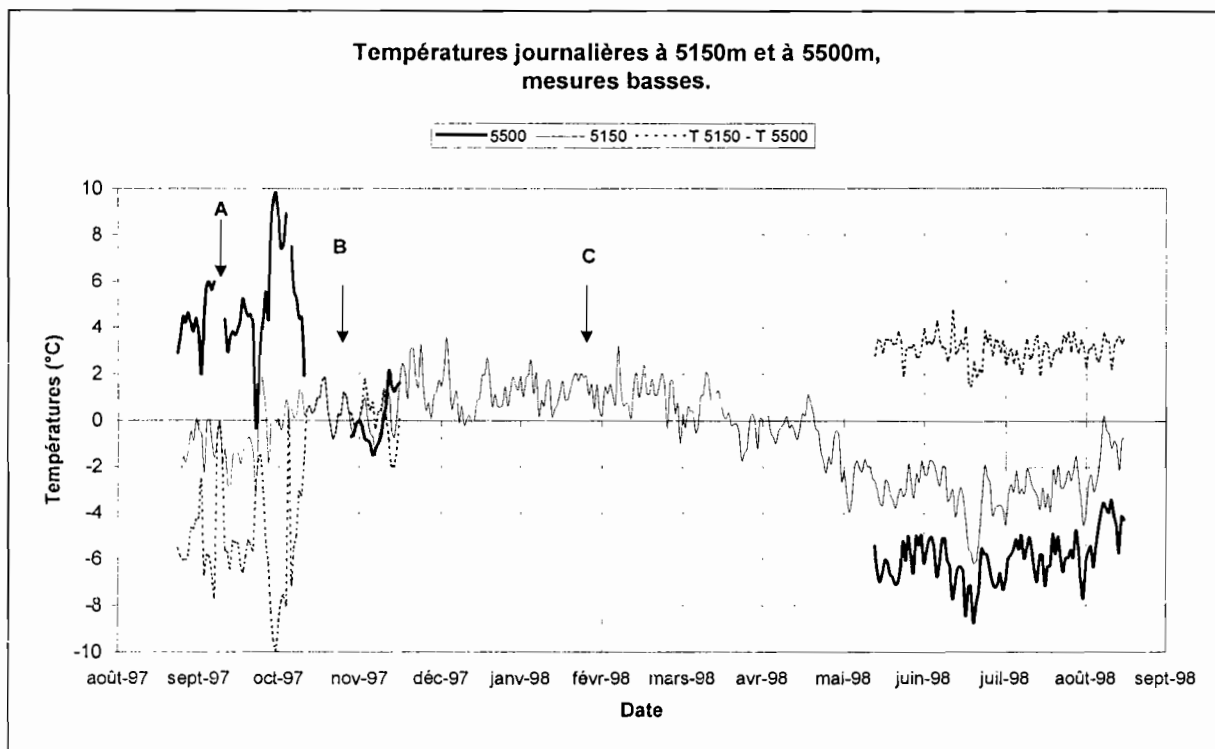


Figure C.15

Lacunes à 5500 m :

A : Du 15 au 19 septembre 97, batterie déchargée.

B : Du 21 octobre au 07 novembre, batterie déchargée.

C : Lacunes du 9 décembre au 27 mai, dues à des problèmes de faux contacts et au programme non chargé du 11 mars au 27 mai.

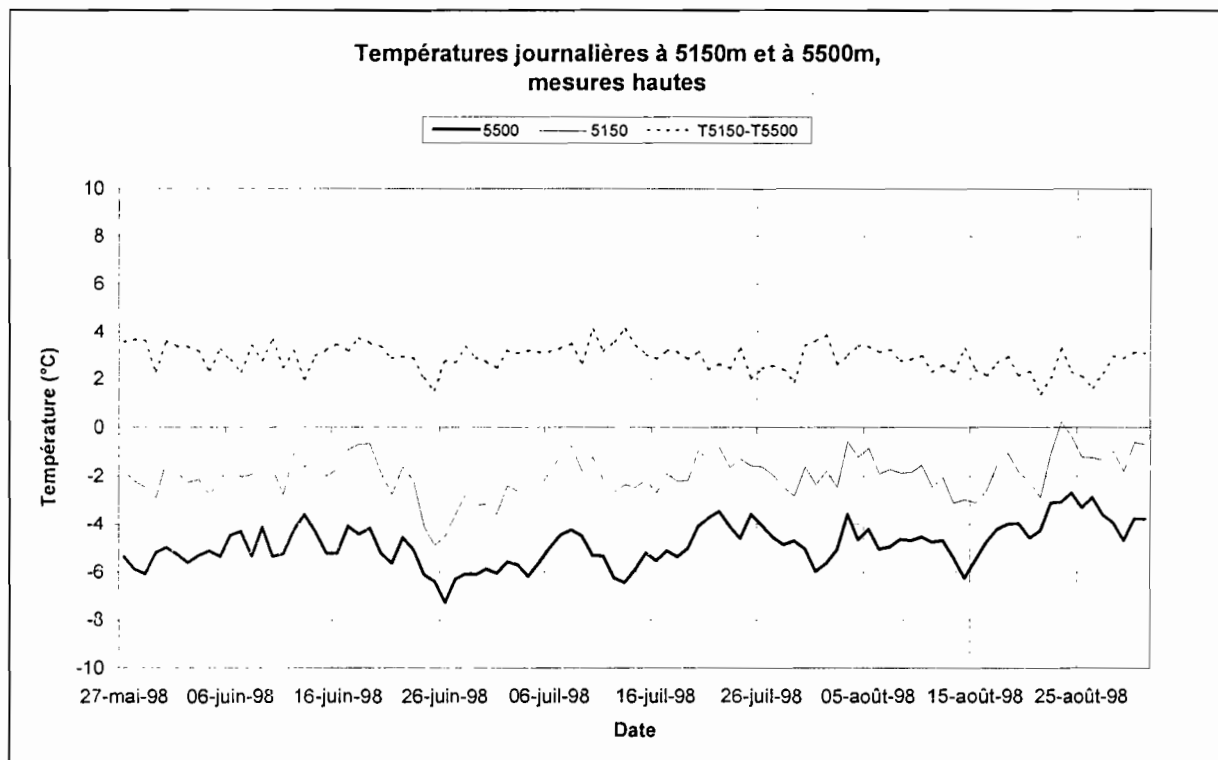


Figure C.16

C.2.3. Températures journalières non ventilées sous abri à 4750 et à 5165 m. Estimation du gradient selon l'altitude hors du glacier

Les mesures enregistrées à la Plataforma (station Mévis) et sur la moraine (thermomètre Omnidata) permettent d'estimer le gradient thermique hors du glacier entre 4750 et 5165 m d'altitude. Les mesures sont réalisées sous abri et sans ventilation.

A 4750 m on ne traite que les résultats de la Mévis puisque depuis quelques années les enregistrements du thermographe sont surévalués et incorrects. Il faudrait donc l'étalonner de nouveau.

Comparaison entre les mesures enregistrées par la station Mévis (4750 m) et par Omnidata (5165 m)

Après suppression des jours de lacunes correspondant aux périodes de dépouillement ou à un mauvais fonctionnement des appareils, la corrélation obtenue entre les mesures de l'Omnidata et de la Mévis est bonne : $R^2 = 0.85$, $n = 345$ points (Cf. Figure C.17). La différence $T_{\text{Mévis}} - T_{\text{Omnidata}}$ est comprise entre 0.13 et 5.71°C , avec une moyenne de 2.35°C (Cf. Figure C.18). Le gradient thermique moyen obtenu est de $-0.57^\circ\text{C}/100$ m.

Les résultats de cette année sont semblables à ceux de l'année dernière : $R^2 = 0.86$ ($n = 331$ points), moyenne de la différence $T_{\text{Mévis}} - T_{\text{Omnidata}}$ de 2.7°C et un gradient de $-0.68^\circ\text{C}/100$ m. Par contre cette année la différence $T_{\text{Mévis}} - T_{\text{Omnidata}}$ évolue : de septembre à mars elle diminue globalement alors que d'avril à août elle augmente. Une saisonnalité est très faiblement marquée.

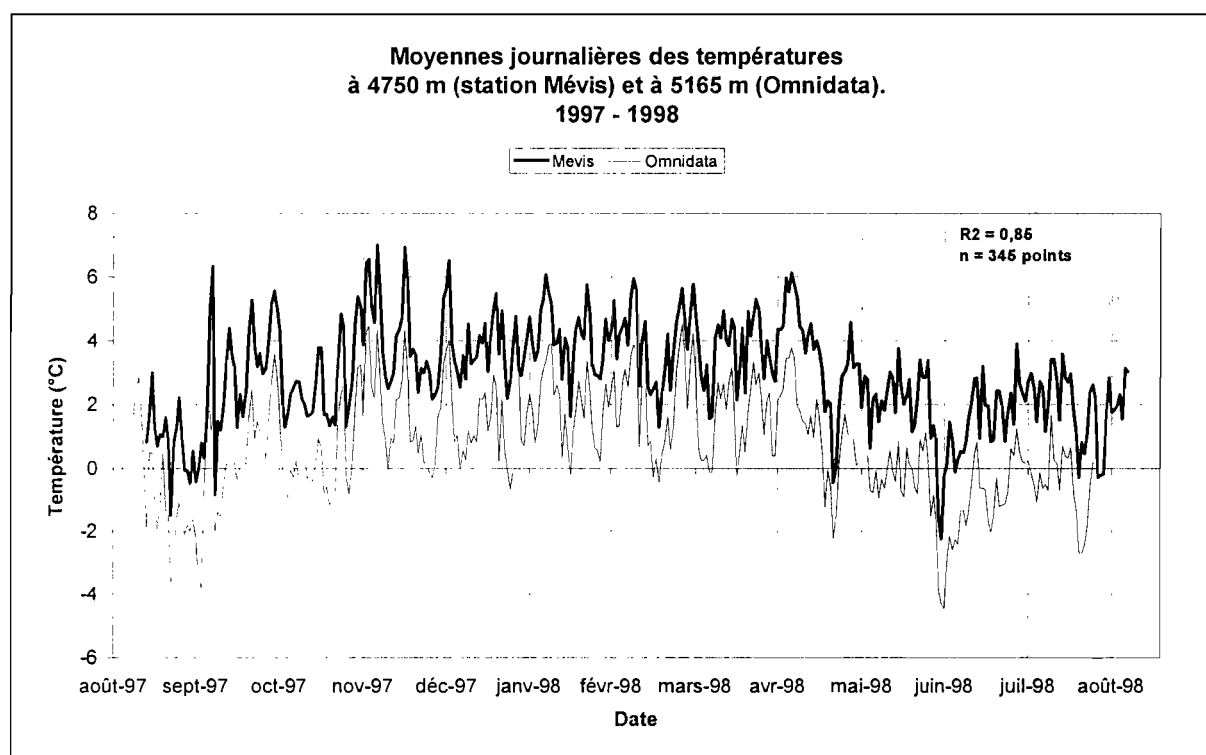


Figure C.17

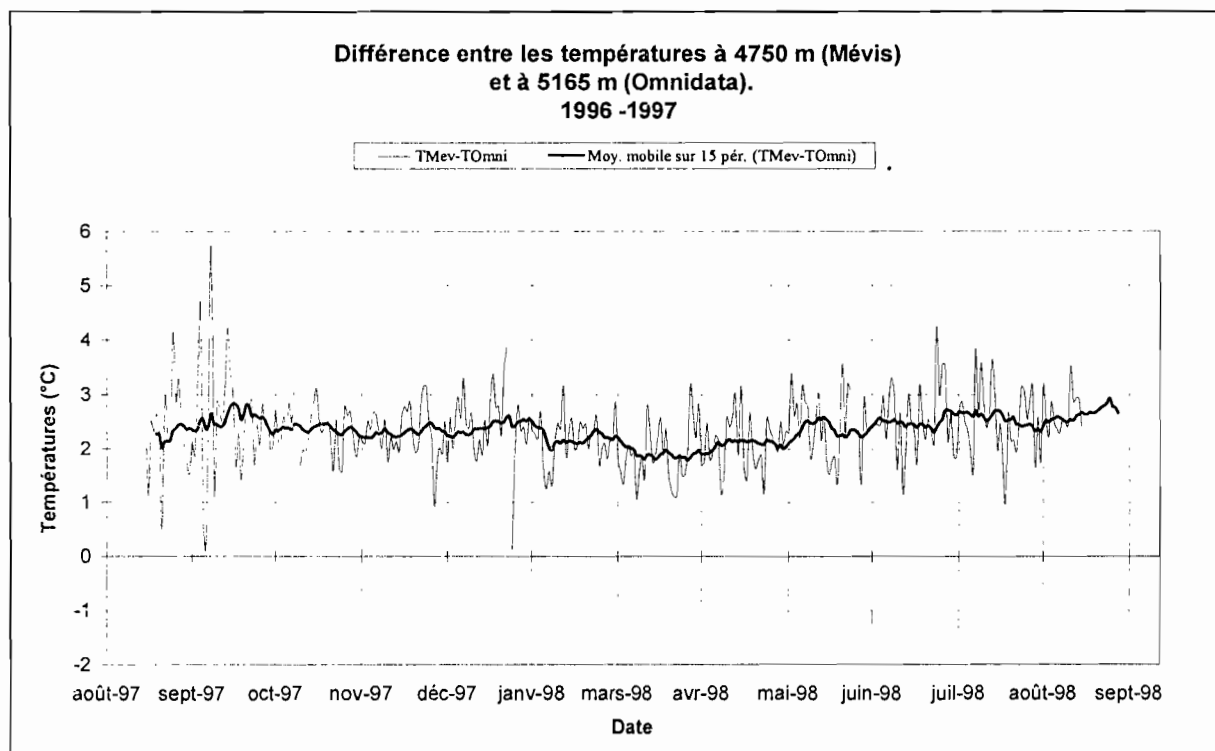


Figure C.18

C.2.4. *Récapitulatif des gradients hors et sur glacier*

Les résultats obtenus cette année pour les corrélations des différentes séries et les gradients thermiques vont dans le même sens que ceux des années passées.

A 4750 m les données complètes de la Mévis sont retenues comme seules fiables, en attendant une recalibration du thermographe.

Pour la station Campbell à 5500 m, les lacunes restent importantes comme les années précédentes : le gradient thermique en fonction de l'altitude sur le glacier n'est calculé que pour 4 mois ce qui reste insuffisant pour une comparaison avec les gradients thermiques hors glacier 4750_{Mévis}/5165_{Omni}data. Les comparaisons avec les années précédentes sont elles aussi limitées puisque l'on n'a pas réellement de période de recoupement des données. La nouveauté de cette année est le gradient thermique des températures hautes sur le glacier, lequel se rapproche beaucoup de celui des températures basses sur la même période.

Evolution des gradients selon l'altitude

Le gradient sur le glacier est plus élevé que hors glacier ; quand la surface de glace est en fusion sa température "tamponne" la température de l'air et on s'attend à des gradients sur le glacier plus faibles que sur la moraine, effet évoqué dans les rapports précédents.

Evolution mensuelle des gradients

On n'observe pas d'évolution mensuelle des gradients Mévis/Omni. Sur le glacier, l'évolution mensuelle semble faible, mais l'on ne dispose que de peu de mois de données (Cf. Tableau C.1 et Figure C.19).

	4750/5165m Mévis et Omnidata (°C/100m)	5500/5150m températures basses Stations Campbell (°C/100m)	5500/5150m températures hautes Stations Campbell (°C/100m)
Sept	-0.57		
Oct	-0.61		
Nov	-0.56		
Dec	-0.56		
Jan	-0.59		
Fev	-0.52		
Mar	-0.46		
Avr	-0.51		
Mai	-0.58		
Juin	-0.62	-0.94	-0.84
Juil	-0.61	-0.82	-0.86
Août	-0.62	-0.90	-0.76
Moyenne annuelle	-0.57	-0.89*	-0.83*

* Moyenne sur la période allant du 27 mai 98 au 31 août 98.

Tableau C.1 : Gradient thermique en fonction de l'altitude

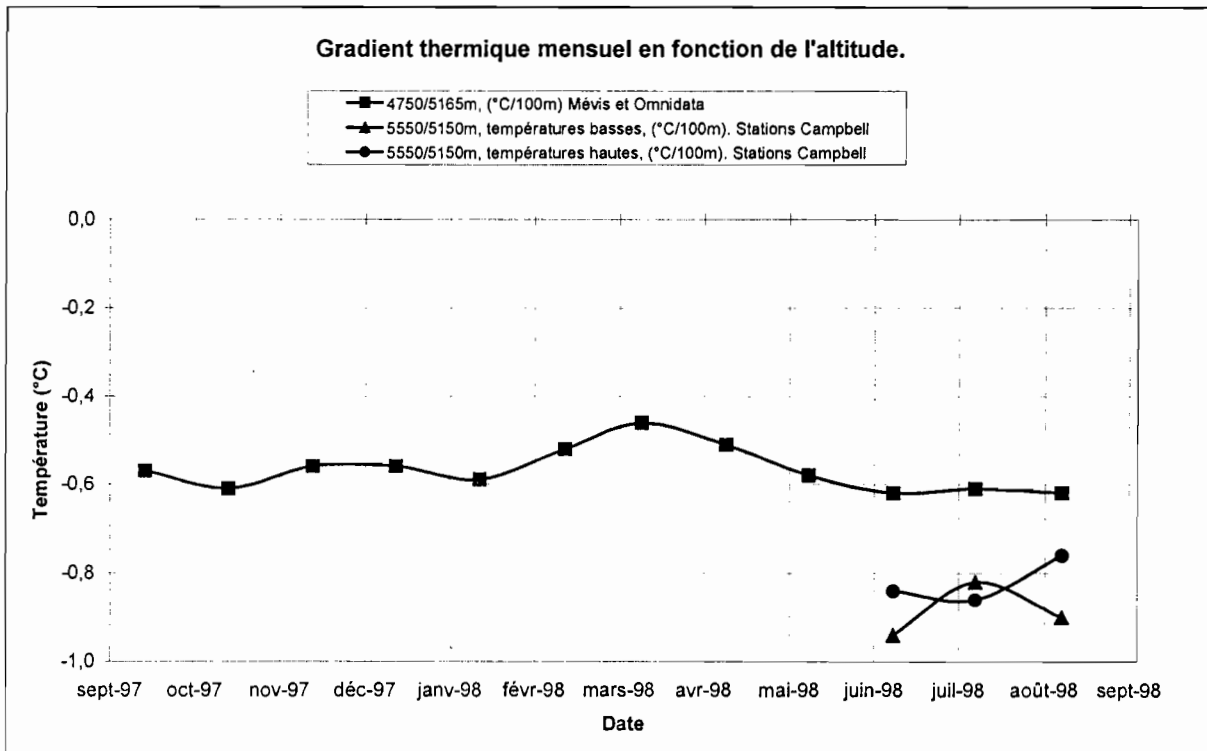


Figure C.19

Année	4750/5165m Mévis et Omnidata (°C/100m)	5500/5150m, températures basses Stations Campbell (°C/100m)	5500/5150m, températures hautes Stations Campbell (°C/100m)
95/96	-0.68	-0.78*	Non mesuré
96/97	-0.64	-0.65	Non mesuré
97/98	-0.57	-0.89**	-0.83**

* Moyenne sur la période mars-août 1996

** Moyenne sur la période allant du 27 mai 98 au 31 août 98

Tableau C.2 : Comparaison des moyennes annuelles des gradients thermiques

Le Tableau C.2 résume pour comparaison les différents gradients thermiques relevés au cours des trois dernières années hydrologiques. On remarque que le gradient 4750_{Mévis}/5165_{Omnidata} reste très constant. Le gradient 5500/5150 m pour les températures basses est lui plus fluctuant. A noter que les gradients 4750_{Mévis}/5165_{Omnidata} sont des moyennes sur les années hydrologiques entières, ce qui n'est pas le cas pour les gradients sur le glacier qui ne correspondent qu'aux moyennes des mois où l'on a des données. Cette année les gradients sur le glacier sont des moyennes sur la saison sèche : le gradient thermique en valeur absolue est plus élevé en atmosphère sèche qu'en atmosphère humide, c'est pourquoi ces valeurs sont supérieures aux moyennes sur l'année hydrologique entière.

C.3. Températures minimales et maximales journalières

C.3.1. Minima et maxima à 4750 mètres d'altitude, mesures de la station Mévis

En ce qui concerne les enregistrements de la Mévis : moyenne des minima journaliers : -0.56°C, moyenne des maxima journaliers : +8.98°C (Figure C.20). Ces valeurs sont supérieures à celles de l'année dernière. La moyenne de l'amplitude thermique journalière est de +9.55°C (Figure C.21). La saisonnalité apparaît aussi : l'amplitude atteint son minimum en saison humide. Par rapport aux années passées, ces résultats contrastent quelque peu : la saisonnalité est beaucoup plus marquée, notamment pour les maxima, et ceci est vraisemblablement imputable au fort épisode Niño de cette année.

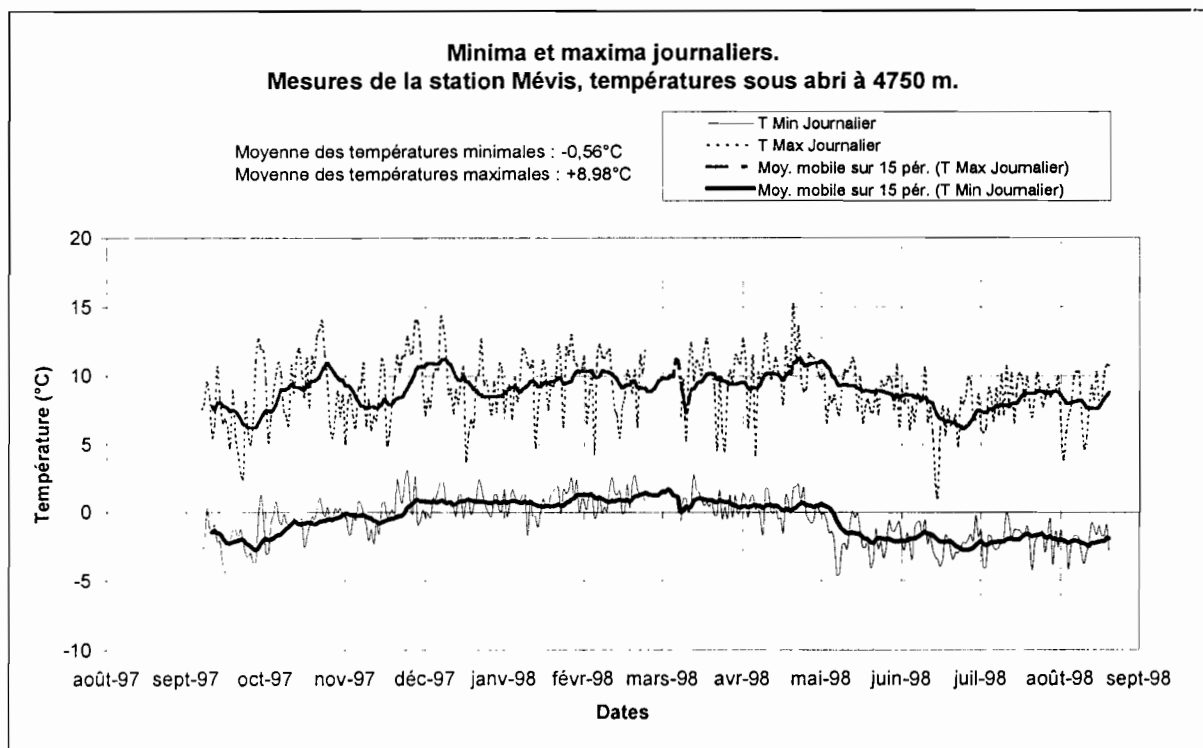


Figure C.20

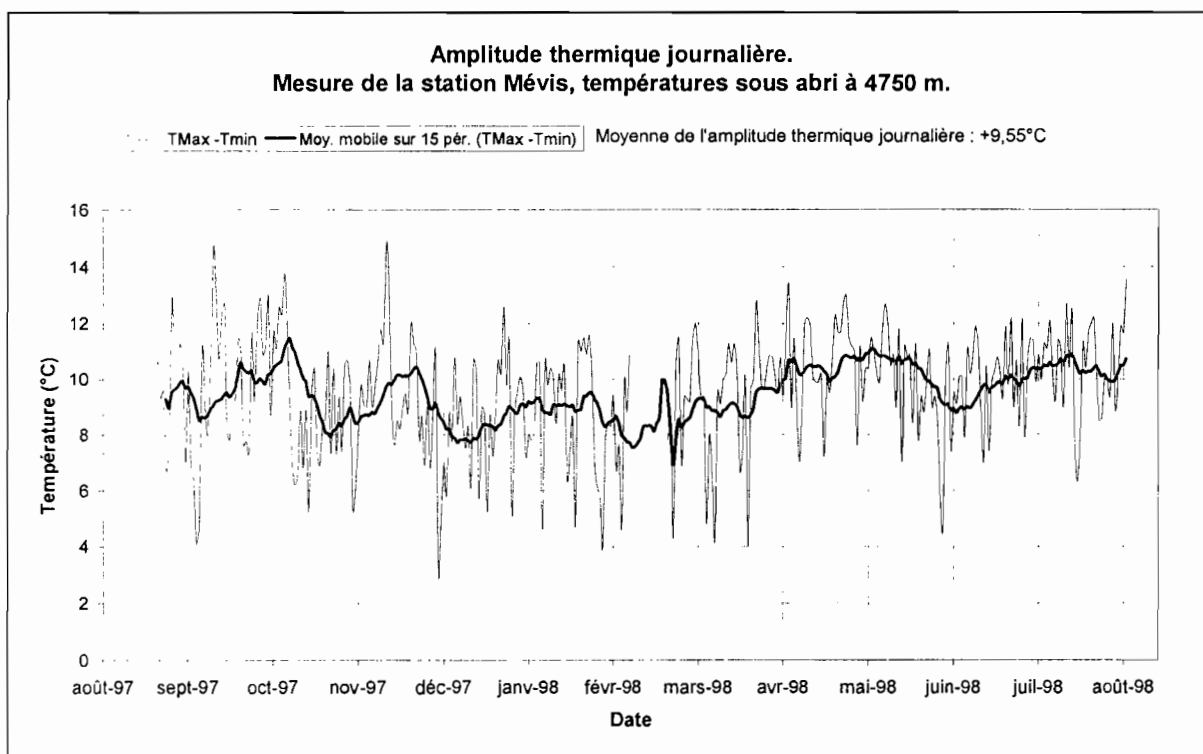


Figure C.21

C.3.2. *Minima et maxima à 5150 mètres d'altitude, températures hautes ventilées*

Ici également la saisonnalité est bien marquée pour les extrêmes (Figure C.22), ce qui contraste avec les observations faites l'année dernière. En saison humide, les extrêmes sont plus forts qu'en saison sèche. La moyenne des températures minimales est de -3.29°C et celle des maxima $+3.65^{\circ}\text{C}$: c'est supérieur aux valeurs de 96-97. En ce qui concerne l'amplitude thermique, aucun effet saisonnier n'apparaît nettement. La moyenne annuelle est de $+6.94^{\circ}\text{C}$ (Figure C.23).

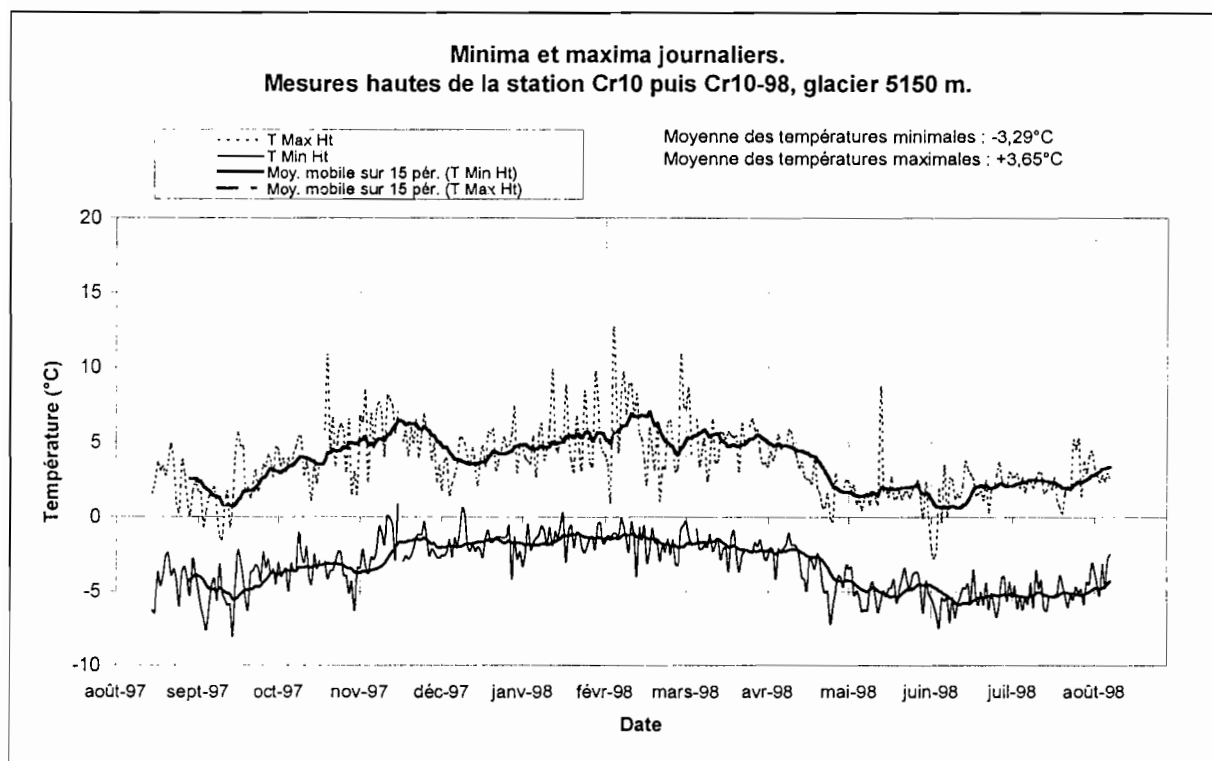


Figure C.22

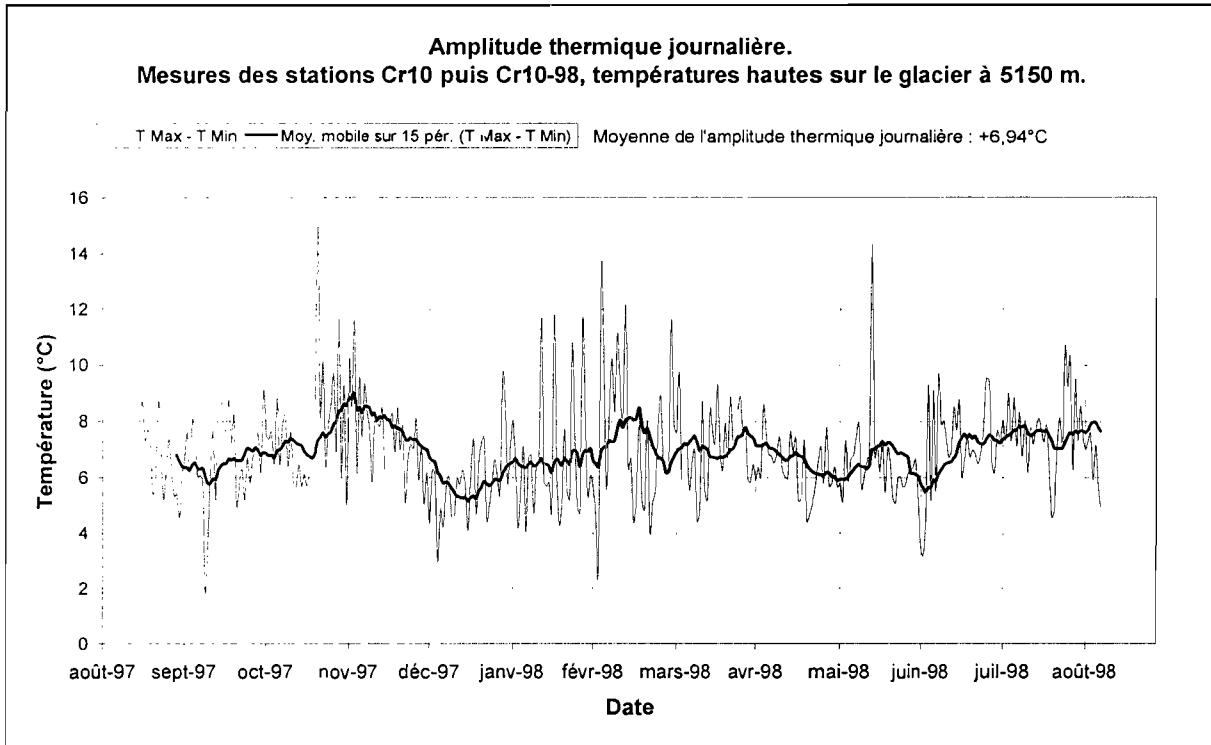


Figure C.23

C.3.3. Minima et maxima à 5500 m d'altitude, températures basses et hautes ventilées

Nous avons déjà vu que la période de fiabilité pour les mesures de la station Cr10 à 5500 m d'altitude n'allait que du 27 mai 98 au 31 août 98.

Sur cette courte période, on présente les résultats pour les températures basses et hautes. Pour les extrêmes journaliers, l'évolution est la même qu'à 5150 m : les valeurs sont plus élevées pendant la saison des pluies que pendant la saison sèche. Les moyennes des minima sont respectivement pour les températures basses et hautes : -11.73 et -8.03°C, et pour les maxima : -2.04 et -2.00°C (Figures C.24 et C.26). Par contre, en ce qui concerne l'amplitude journalière, on a deux évolutions différentes pour les températures basses et hautes (Figures C.25 et C.27). La période de données est trop courte pour pouvoir expliquer cette différence qui est sans doute très localisée dans le temps.

Les comparaisons avec les années passées sont impossibles puisque l'on n'a pas de période de recoupement.

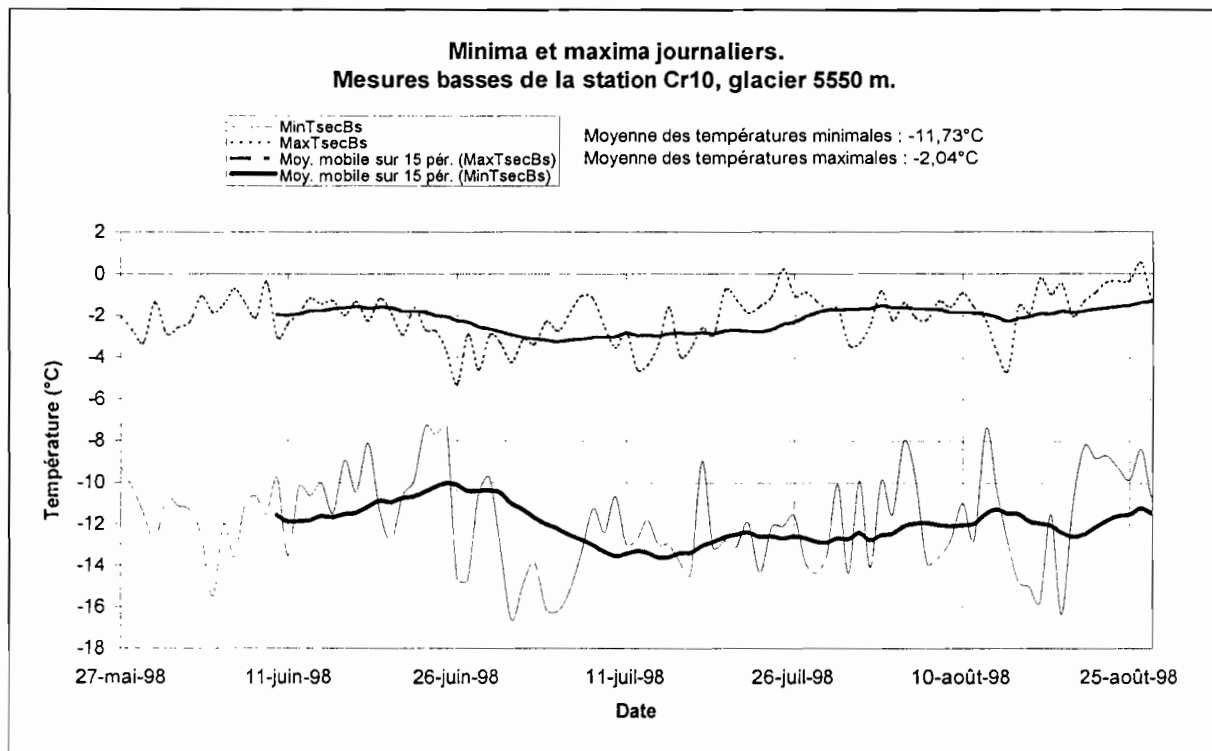


Figure C.24

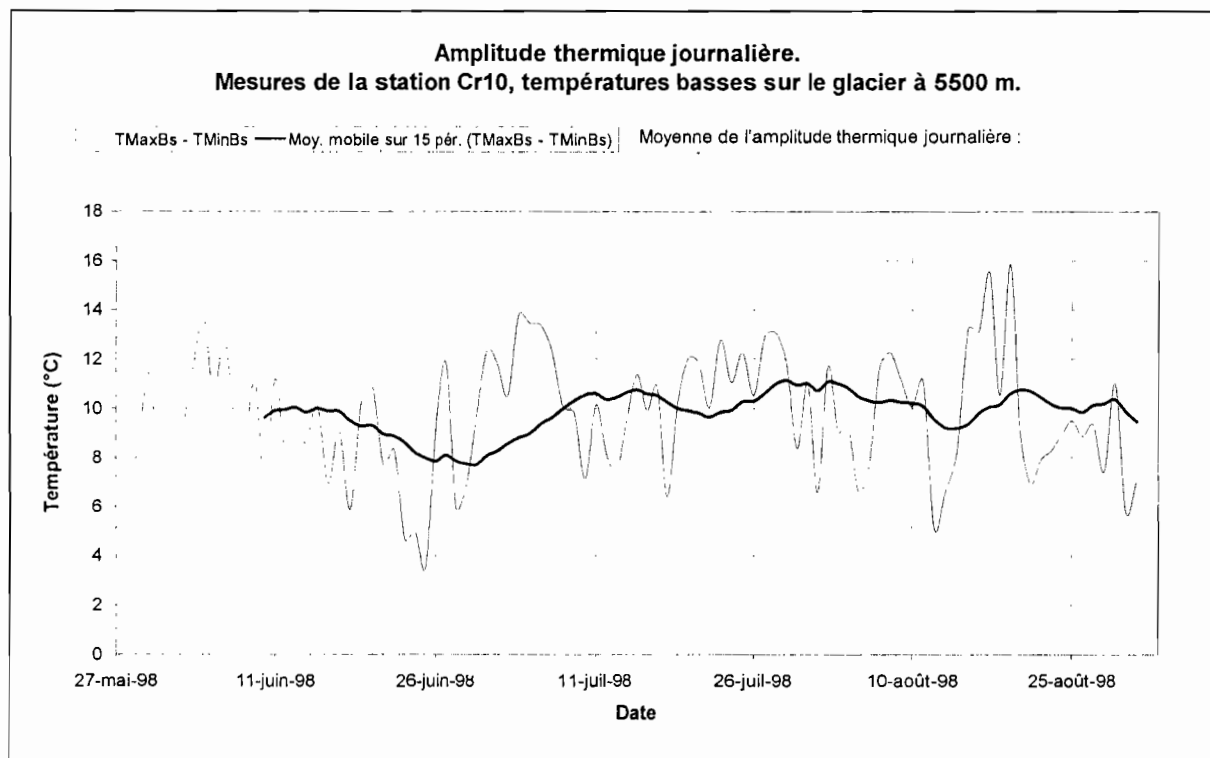


Figure C.25

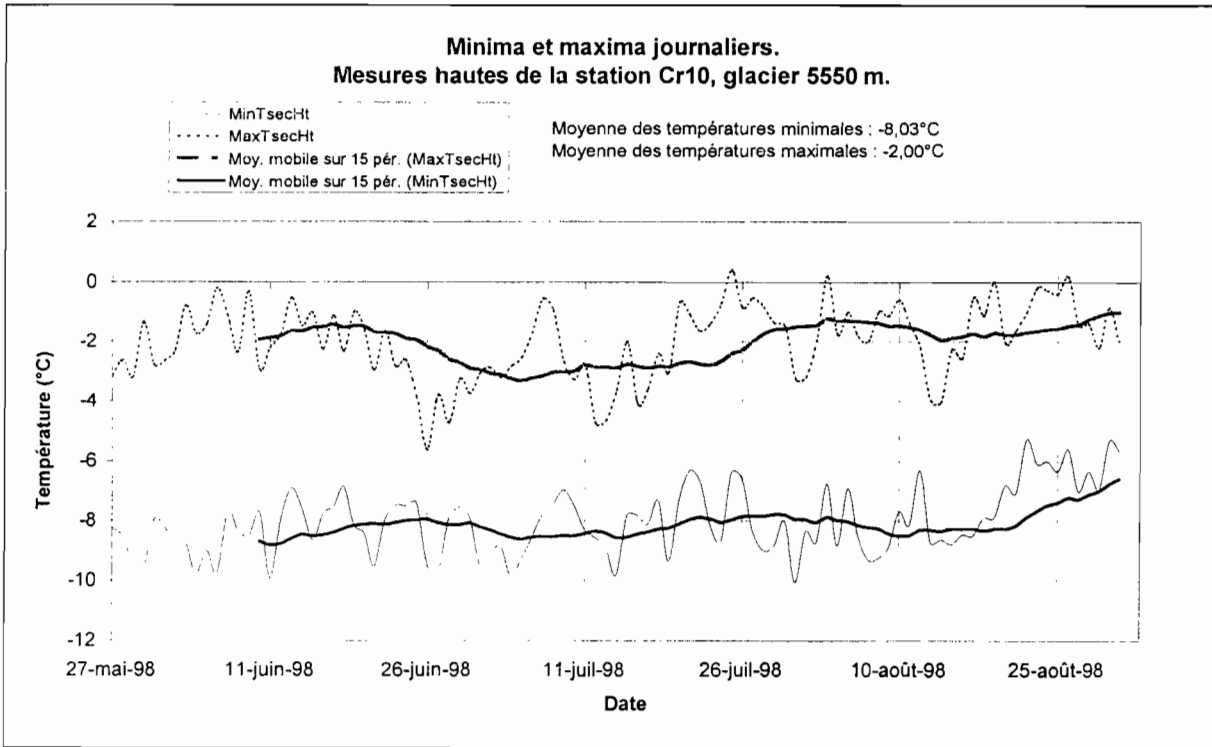


Figure C.26

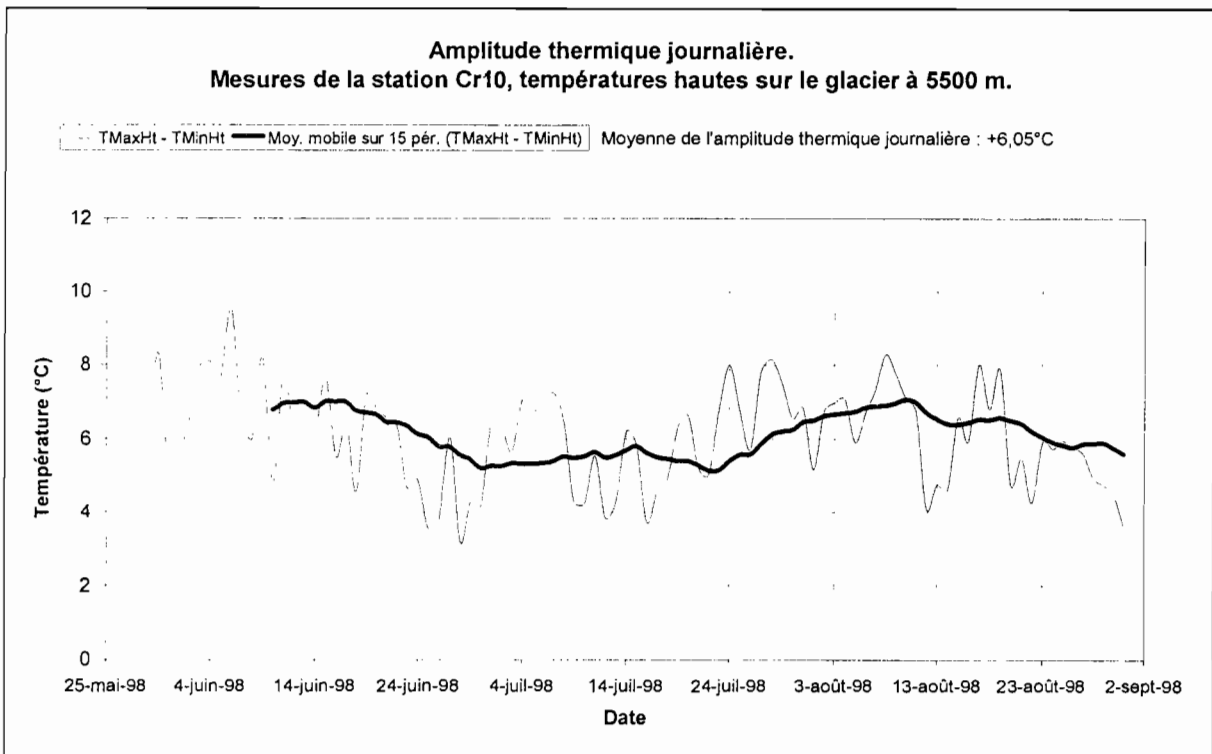


Figure C.27

C.4. Températures mensuelles et annuelles

C.4.1. Valeurs mensuelles

La Figure C.28 présente toutes les moyennes mensuelles disponibles (Tableau C.3). Les seules lacunes importantes concernent la station Cr10 à 5500m. Pour les autres mesures, les lacunes ne correspondent qu'aux courtes périodes de dépouillement des données.

Pour toutes ces mesures, la saisonnalité est marquée : températures plus élevées pendant les mois de la saison des pluies, février et mars, les minima correspondant aux mois de la saison sèche, juin ou juillet (cf. Tableau C.3). Les températures en saison des pluies sont supérieures aux moyennes annuelles de 1.2°C pour la Mévis, 1.33°C pour l'Omniadata et de 1.88°C pour les températures basses de la station Campbell à 5150m.

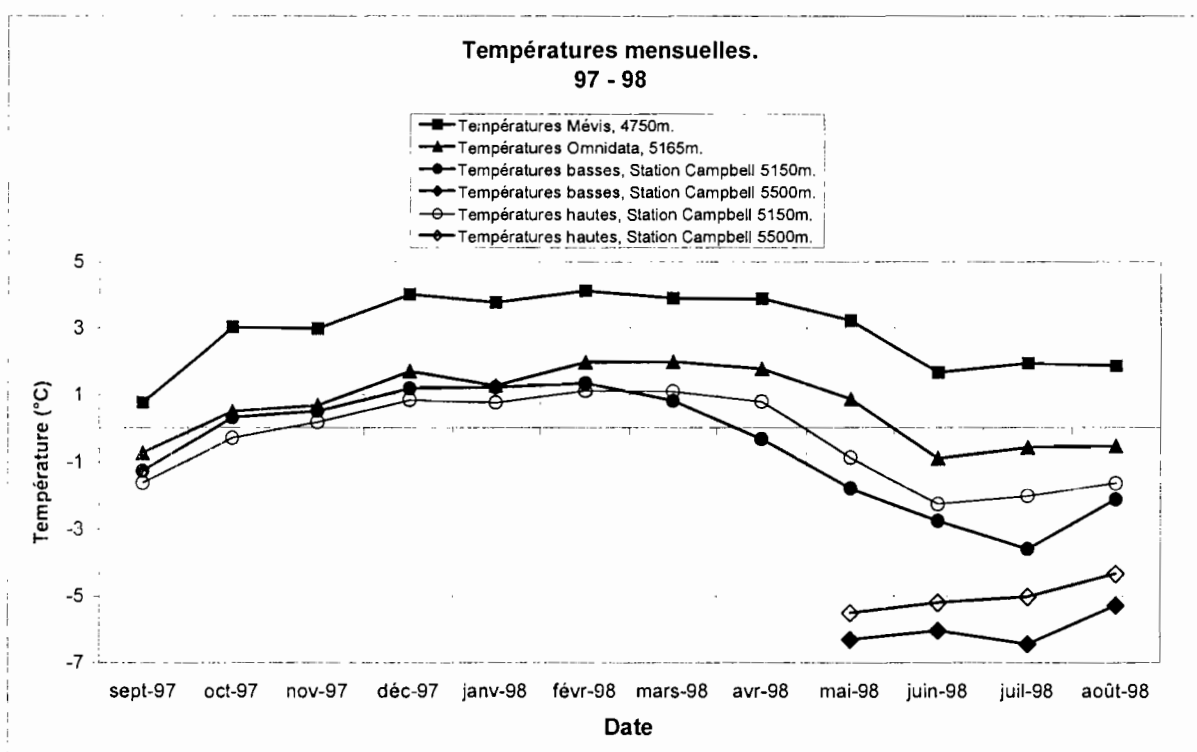


Figure C.28

	Températures Mévis 4750m.	Températures Omnidata 5165m.	Températures Basses 5150m.	Températures Hautes 5150m.	Températures Basses 5500m.	Températures Hautes 5500m.
sept-97	0.76	-0.74	-1.26	-1.62		
oct-97	3.03	0.50	0.32	-0.29		
nov-97	2.98	0.68	0.50	0.17		
déc-97	4.01	1.70	1.19	0.84		
janv-98	3.77	1.28	1.23	0.76		
févr-98	4.12	1.97	1.34	1.12		
mars-98	3.89	1.99	0.82	1.10		
avr-98	3.88	1.78	-0.33	0.79		
mai-98	3.23	0.86	-1.79	-0.89	-6.30	-5.50
juin-98	1.67	-0.90	-2.75	-2.25	-6.03	-5.19
juil-98	1.95	-0.58	-3.58	-2.01	-6.44	-5.02
août-98	1.87	-0.55	-2.12	-1.64	-5.28	-4.33
Moyenne annuelle	2.93	0.67	-0.54	-0.33	-6.01	-5.01

Toutes les valeurs sont exprimées en °C

Tableau C.3 : Températures mensuelles aux différentes altitudes

Extrêmes mensuels

Les extrêmes mensuels des moyennes journalières du Tableau C.3 sont présentés sur la Figure C.29.

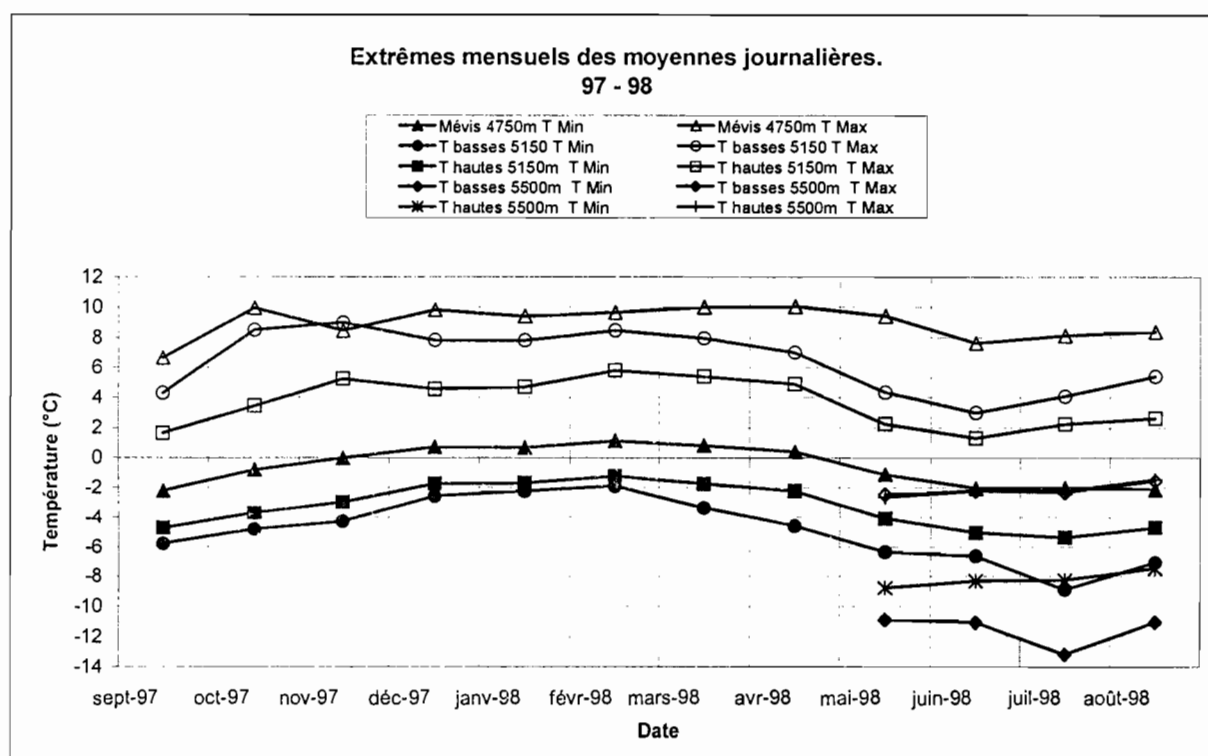


Figure C.29

	Mévis 4750m		T basses 5150		T hautes 5150m		T basses 5500m		T hautes 5500m	
	T Min	T Max	T Min	T Max	T Min	T Max	T Min	T Max	T Min	T Max
sept-97	-2.22	6.64	-5.78	4.29	-4.73	1.64				
oct-97	-0.80	9.94	-4.81	8.49	-3.70	3.45				
nov-97	-0.02	8.45	-4.28	8.98	-2.97	5.24				
déc-97	0.73	9.82	-2.56	7.83	-1.73	4.56				
janv-98	0.67	9.39	-2.24	7.8	-1.69	4.71				
févr-98	1.13	9.64	-1.89	8.46	-1.23	5.78				
mars-98	0.82	9.98	-3.36	7.94	-1.75	5.37				
avr-98	0.39	10.04	-4.6	7	-2.22	4.89				
mai-98	-1.11	9.40	-6.34	4.35	-4.08	2.25	-10.91	-2.46	-8.77	-2.63
juin-98	-2.05	7.63	-6.62	3	-5.05	1.32	-11.07	-2.21	-8.30	-2.20
juil-98	-2.01	8.12	-8.89	4.1	-5.37	2.25	-13.17	-2.32	-8.24	-2.19
août-98	-2.13	8.37	-7.06	5.4	-4.71	2.64	-11.07	-1.54	-7.45	-1.47
Moyenne	-0.55	8.95	-4.87	6.47	-3.27	3.67	-11.55	-2.13	-8.19	-2.12

Toutes les valeurs sont exprimées en °C

Tableau C.4 : Extrêmes mensuels des moyennes journalières aux différentes altitudes

En ce qui concerne les extrêmes mensuels, une faible saisonnalité est encore visible. Les mois de la saison des pluies connaissent les extrêmes mensuels les plus élevés, contrairement aux mois de la saison sèche.

Les enregistrements des différents appareils ont globalement la même évolution. La différence entre les T_{max} et T_{min} est constante pour chaque appareil tout au long de l'année sauf pour l'enregistrement du mois d'octobre de la Mévis où $T_{max} - T_{min}$ est plus élevée (Figure C.29).

C.4.2. Valeurs annuelles

Le tableau C.5 récapitule les moyennes annuelles des températures pour les différents appareils.

	T4750 Mévis	T 5165 moraimé	T haut 5150 (ventilée)	T haut 5500
97-98	+2.93	+0.67	-0.55	-5.01***
96-97	+1.84*	-1.27	-2.07	-2.81*
95-96	+1.9	-0.9	-3.9**	-4.4**
94-95		-0.25		
93-94		-1.0		

Toutes les données sont données en degrés Celsius

Moyennes incomplètes :

* : moyennes de septembre 96 à janvier 97 pour la station Mévis, et de novembre à janvier pour la station à 5500m

** : moyennes sur les cinq derniers mois de l'année hydrologique 95-96

*** : moyennes du 27 mai 98 au 31 août 98.

Tableau C.5 : Températures annuelles aux différentes altitudes

Les années de données complètes pour les différentes stations sont peu nombreuses. La série la plus complète est celle de l'Omnidata. En regardant les données de l'Omnidata on remarque que cette année est la plus chaude depuis 93-94. Les données de la station à 5150 m et de la Mévis confirmeraient ce fait. Les données de 5500 m sont trop insuffisantes pour arriver aux mêmes conclusions : en 97-98 la moyenne annuelle correspond à la période mai-août, période la plus froide de l'année, alors qu'en 96-97 elle correspond à une période plus chaude : de septembre à janvier

Conclusions

L'étude comparative des températures nous apprend que cette année la saisonnalité est légèrement plus marquée que l'année dernière. Les températures moyennes de cette année Niño sont systématiquement supérieures d'environ +1.5 à 2°C à celles des années passées.

D. PRECIPITATIONS

D. 1. Valeurs journalières, pluviomètre de la Cobee, Plataforma (4750 m)

Le pluviomètre Cobee de la Plataforma est relevé quotidiennement à 7h ; la valeur lue par l'observateur Franz Quispe est attribuée au jour précédent. Ces pluies journalières sont présentées dans le Tableau D.1.

	sept-97	oct-97	nov-97	déc-97	janv-98	févr-98	mar-98	avr-98	mai-98	juin-98	juil-98	août-98
1	0	8	1	0	3.5	2	0	5	0	0	8.5	0
2	0	0	2	0	7.5	0	2.5	20	0	0	0	0
3	0	0	7	0	1.5	0	0	8	0	0	0	0
4	0	0	1	0	5.5	0	0	6.5	0	0	0	0
5	0	0	1	0	4	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	5	4	0	9	0	0	0	0	0	0
7	0	0	10	4.5	10.5	0.5	0	0	0	0	0	0
8	0	0	6	5	13.5	5	0	0	0	0	0	0
9	0	5	3	6.5	1.5	5.5	0	0	0	0	0	0
10	0	0	4	0	0.5	1.5	2.5	2	0	0	0	0
11	1.5	0	7	0	0	11.5	0	0	0	0	0	0
12	1	0	4	0	0	11.5	2.5	0	0	0	0	0
13	0	0	0	3	16.5	0	4	0	0	0	0	2
14	0	14	0	0	0	0	6	0	0	0	0	2.5
15	1.5	3	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0
16	2	1	1	10.5	2.5	1.5	28	9	0	0	0	0
17	3.5	0	10	2	5.5	4.5	12.5	0	0	0	0	0
18	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	3	7.5	4.8	0	1	0	0	0	0	0
20	9	0	0	0	4.5	6.5	0	0	0	0	0	0
21	6.5	0	0	0	1.4	3.5	0	0	0	0	0	2
22	0	0	0	3	0	11	0	0	0	0	0	2.5
23	0	0	6	9	0	17	5	0	0	0	0	0
24	0	0	8	5	5.6	16	0	0	0	8	0	0
25	1	0	2	5.5	4	0	0	1	0	9.5	0	0
26	4	0	0	2.5	1.5	0	0	3.5	0	20	0	0
27	15.5	0	0	1	2	3	0	0	0	1	0	0
28	6	0	0	1.5	0	1	0	0	0	0	0	0
29	1	0	4	0	2.5		0	0	0	0	0	0
30	2	0	0	0	1.1		2	0	0	0	0	0
31		3		4	4		4		0		0	0
Total	54.5	34	90	74.5	103.9	110.5	78	55	0	38.5	8.5	9

Tableau D.1 : Pluies journalières à la plataforma à 4750 m (en mm d'eau) ; total annuel : 656.4 mm.

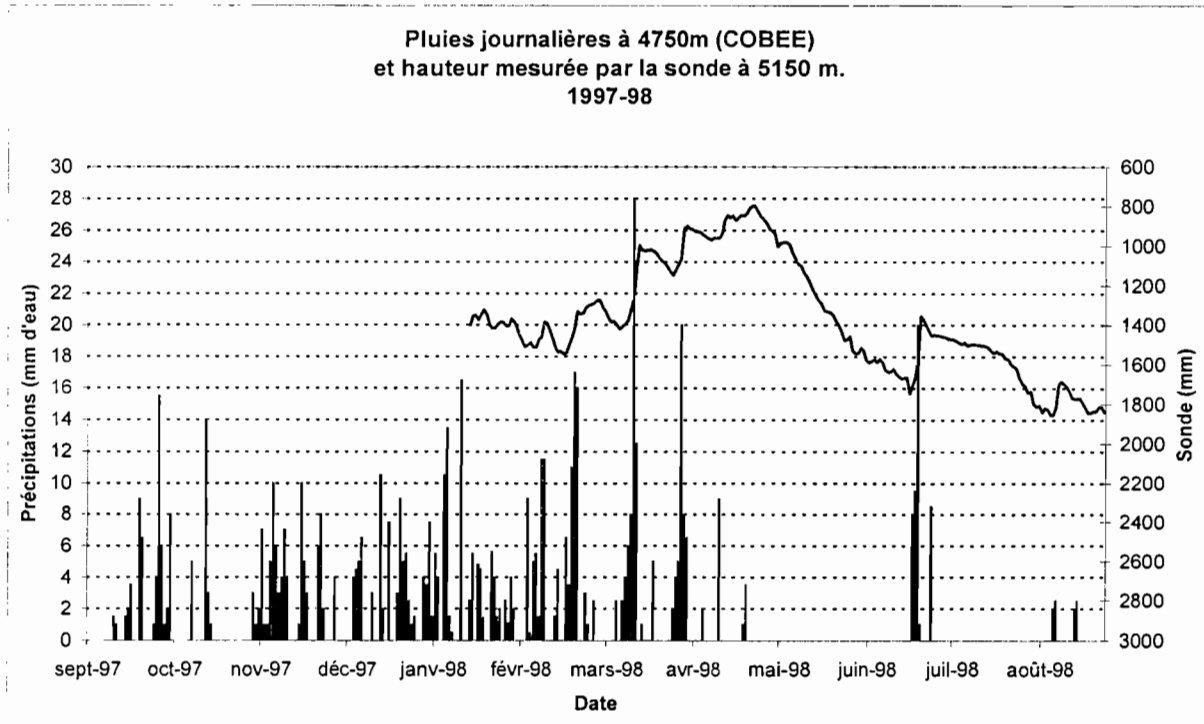


Figure D.1

Saisonnalité moins marquée, précipitations plus faibles

La Figure D.1 illustre le Tableau D.1. Les mesures de la sonde à ultrason qui enregistre la distance entre le sol et le capteur, et indique ainsi les épisodes neigeux sur le glacier, ont été surimposées.

Selon Roche (1992) la saison des pluies en Bolivie commence en décembre et se termine en mars. La saison sèche a lieu de mai à août. Deux périodes de transition séparent les deux saisons : une en avril et l'autre de septembre à novembre. Dans l'ensemble du pays 60 à 78 % des précipitations annuelles interviennent au cours de la saison des pluies.

Si on applique cette description aux relevés journaliers du pluviomètre de la Plataforma à 4750 m pour cette année hydrologique, la saison des pluies recueille 56% des précipitations annuelles contre 76% en 96-97. Janvier et février restent les mois où l'on observe le maximum des précipitations. Les mois appartenant aux périodes de transition ont été assez pluvieux : ils rassemblent 35.6% des précipitations totales (23% l'année dernière) : septembre et novembre ont connu de fortes précipitations. La saison sèche représente 8.5 % des pluies alors qu'elle n'enregistrait que 4% l'année passée : les mois de juin et juillet ont été pluvieux cette année.

On remarque aussi quelques différences avec l'année hydrologique précédente : aucune période de plus de 3 journées consécutives sans pluie n'était observée entre les mois de décembre et mars (Cf. Sicart et al., 1997), ce qui n'est pas le cas cette année où les jours pluvieux sont plus espacés. Cette année la transition saison sèche/saison des pluies a connu de fortes précipitations. En effet, les précipitations de novembre représentent 13.7% des précipitations annuelles alors que pour les mois de la saison des pluies les pourcentages varient de 11.3 à 16.8%.

Cette année Niño correspond à une baisse de la pluviosité qui est relativement plus marquée en saison des pluies qu'en saison sèche, d'où les variations signalées ci-dessus.

D. 2. Valeurs mensuelles et annuelles

D. 2.1. Pluviomètres totalisateurs, pluviomètre de la Cobee à la Plataforma (4750 m) et station pluviométrique à 4830 m

Valeurs mensuelles

Dans le Tableau D.2 on a reporté les mesures mensuelles des pluviomètres totalisateurs répartis dans le bassin versant du glacier, le total mensuel de la pluie journalière à la Plataforma ainsi que l'eau de pluie récupérée cette année à la station limnimétrique à 4830 m. La Figure D.2 illustre ces données.

	P ₁ 5165 m	P ₂ 5080 m	P ₃ 4945 m	P ₄ 4860 m	P ₅ 4855 m	P ₈ 4750 m	P _{plataforma} 4750 m	Pluie 4830m Station limnimétrique
Sept	90	100	115	120	125	90	55	94
Oct	160	175	175	170	170	145	89	194
Nov	225	245	240	230	235	220	179	271
Déc	295	330	335	315	320	315	253	364
Janv	400	450	450	430	430	430	357	514
Févr	545	600	585	555	565	565	467	592
Mars	680	740	720	680	680	700	545	704
Avr	710	780	750	720	730	730	600	879
Mai	710	780	750	720	735	730	600	904
Juin	730	840	800	780	780	770	639	904
Juil	730	840	800	770	780	760	647	nm
Août	765	870	800	775	795	780	656	nm
Total	765	870	800	775	795	780	656	904

nm : non mesurée

Tableau D.2 : Valeurs mensuelles cumulées des pluviomètres totalisateurs (mm)

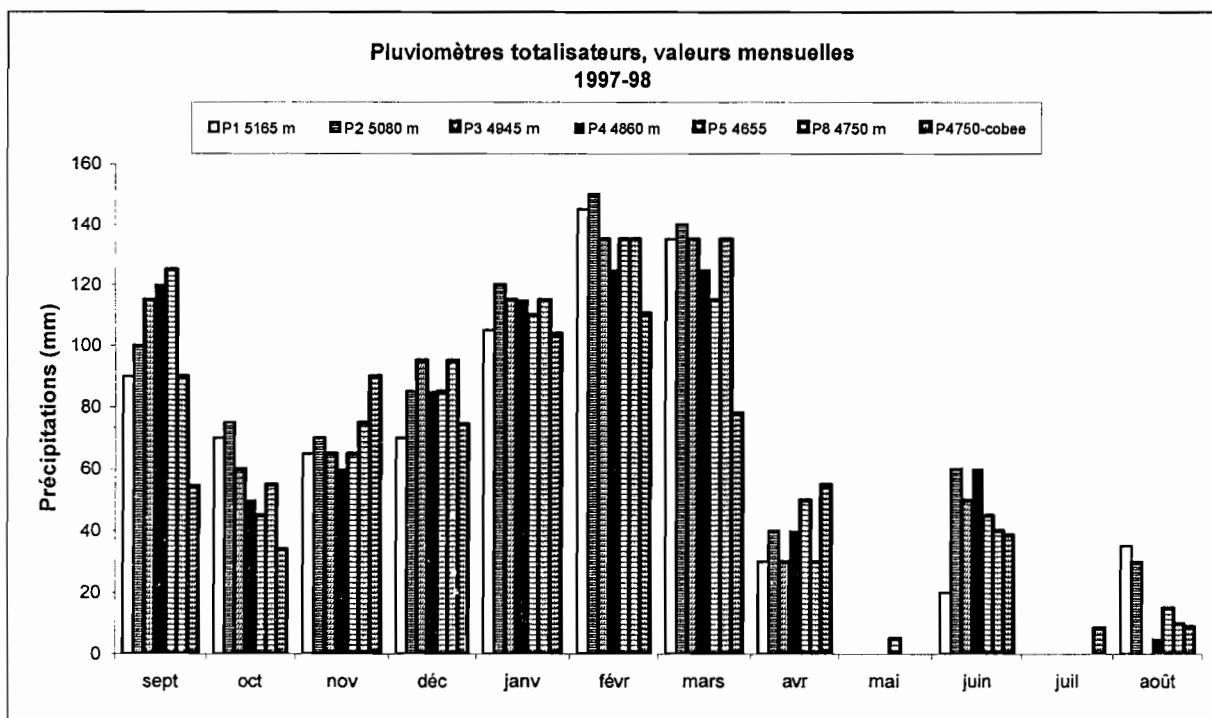


Figure D.2

Date	Vol. (ml)	Hauteur d'eau (mm)
10-sept	235	3
30-sept	6610	91
09-oct	735	10
17-oct	6610	91
05-nov	2280	31
21-nov	3310	45
04-déc	2130	29
21-déc	4655	64
08-janv	6654	91
13-janv	1935	27
23-janv	2350	32
11-févr	5700	78
04-mars	8200	112
07-avr	12750	175
06-mai	1805	25
05-juin	0	0
Total	65959	904

Tableau D.3 : Volume d'eau recueilli à 4830 m lors des visites de routine

On remarque que les valeurs mensuelles des précipitations recueillies par chaque pluviomètre sont très inégales : les différences mensuelles entre pluviomètres peuvent aller jusqu'à 70 mm, mais les données restent tout de même cohérentes entre elles. D'un mois sur l'autre on ne peut pas donner de tendance pour chaque pluviomètre. On ne peut pas non plus établir un gradient selon l'altitude. Ces différences peuvent être attribuées aux situations propres de chaque pluviomètre : l'influence de la vitesse du vent sur la captation des précipitations, le fait que certains reçoivent prioritairement de la neige et les autres de la pluie. Les phénomènes d'évaporation sont aussi à prendre en compte : au cours du mois de juillet aucun des pluviomètres totalisateurs n'enregistre la moindre précipitation, et par contre des pertes de 10 mm sont observées pour P₄ et P₈ (pertes non prises en compte dans les Tableaux et la Figure D.2). Ces pertes sont dues à l'accumulation de neige ou à la formation de blocs de glace au-dessus de l'huile en période froide.

En ce qui concerne la saisonnalité : elle est observable mais moins marquée que les années passées. On observe la même tendance qu'à la Plataforma, à savoir que les mois les plus pluvieux sont ceux de janvier, février, mars et septembre.

Précipitations annuelles (Figure D.3)

Le pluviomètre journalier de la Plataforma recueille les précipitations annuelles les plus faibles (656 mm/an) alors que P₈ situé à proximité dépasse les 780 mm/an. L'eau de pluie récupérée annuellement à 4830 m est la plus importante : 904 mm. Le dernier relevé date du 5 juin 1998 : des précipitations ont été enregistrées fin juin, début juillet et courant août à la Plataforma et au niveau des pluviomètres totalisateurs, ce qui laisse supposer que ce total annuel est sous estimé. Les mesures annuelles des pluviomètres P₁, P₃, P₄ et P₅ sont proches de P₈. L'écart annuel maximum entre les précipitations relevées aux différents pluviomètres est de 248 mm (200 mm l'année dernière) ce qui représente environ 30 % de dispersion, contre 20 % l'an passé.

On gardera les conclusions de l'année dernière pour expliquer de telles différences déjà constatées au cours des années précédentes : le rôle du site (en particulier l'exposition au vent et l'influence de sa vitesse) et, ou, de la forme des collecteurs sur la captation des précipitations : P₁ est situé au sommet de la moraine et en aval d'un col, alors que P₂, situé sur un col à proximité d'une haute paroi rocheuse, est beaucoup plus abrité. Les deux pluviomètres installés au sommet

de moraines à 4855 m (P₅) et 4860 m (P₄) sont des totalisateurs de même diamètre (50.5 cm ; Cf. Inventaire), alors que le pluviomètre à 4830 m d'un diamètre de 305 mm est situé au creux d'un vallon au bord du torrent émissaire du glacier. Cette année hydrologique aura été moins pluvieuse que la précédente : 656 mm à la Plataforma contre 951 mm en 96-97 et 791.3 mm en 95-96. La saisonnalité est également moins marquée.

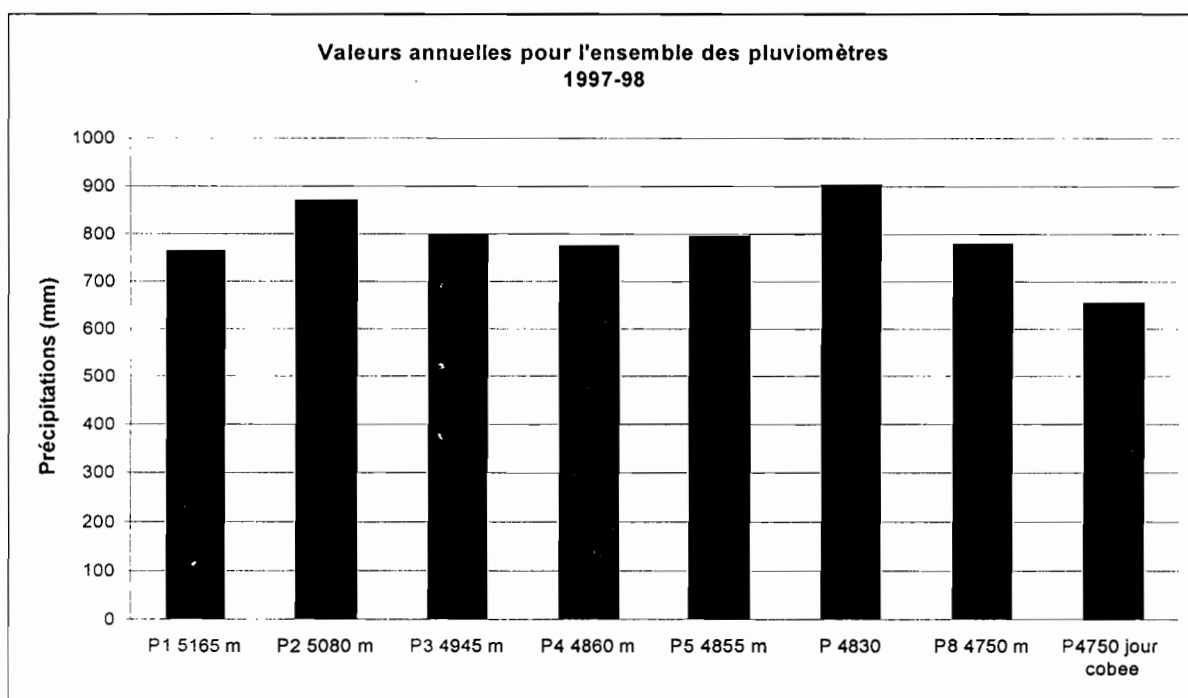


Figure D.3

D. 2.2. Comparaison avec les cycles précédents

Les Figures suivantes présentent les résultats aux différents pluviomètres pour les trois dernières années hydrologiques. Dans le Tableau D.4 on a reporté les précipitations mensuelles au pluviomètre de la Cobee pour les trois dernières années hydrologiques. Sur la Figure D.4, l'année 96-97 se distingue des autres : elle a connu une saison des pluies très prononcée, alors que 97-98 est l'année qui reçoit le moins de précipitations pendant cette même période. Par contre, la période de transition saison sèche/saison des pluies a été relativement pluvieuse cette année tout en restant dans la moyenne des autres cycles hydrologiques.

	95-96	96-97	97-98	Moyenne mensuelle
sept	29	50	55	45
oct	35	32	34	34
nov	71	93	90	85
déc	109	111	75	98
janv	187	220	104	170
févr	137	186	111	145
mars	93	177	78	116
avr	76	49	55	60
mai	8	18	0	9
juin	6	0	39	15
juil	14	0	9	7
août	27	17	9	18
Total	791	951	656	

Tableau D.4 : Précipitations mensuelles à la Plataforma (Cobee, 4750m) depuis 1995

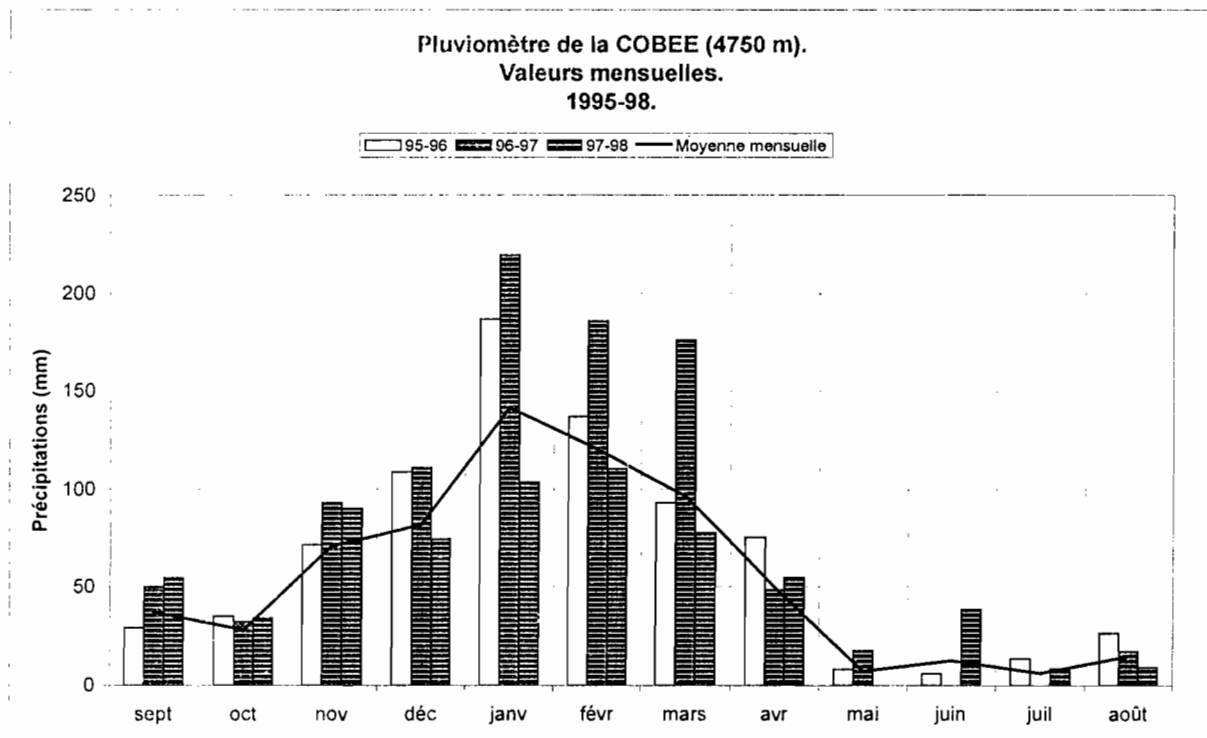


Figure D.4

La Figure D.5 représente les moyennes mensuelles des précipitations de cette année comparées aux moyennes mensuelles et écart-types des précipitations relevées à la Plataforma entre 1971 et 1997.

La courbe représentant les moyennes mensuelles sur la période 1971-1997 a une saisonnalité très bien marquée. On remarque aussi que le domaine de dispersion des valeurs mensuelles autour de la moyenne est plus important pendant la saison des pluies de décembre à mars que pendant les périodes de transition ou de saison sèche. Pour l'année 97-98, les mois de novembre, avril et juillet ont des précipitations très proches de la moyenne. Les valeurs de septembre 97 et juillet 98 sont supérieures à la moyenne mais pour tous les autres mois et en particulier pour ceux de la saison des pluies, les précipitations sont très déficitaires. Mais seul le mois de janvier sort de l'intervalle de dispersion des données autour de la moyenne alors que les mois d'octobre, décembre, février et mars restent dans l'espace inférieur de ce domaine. Cette année est donc parmi les plus déficitaires depuis 1971 mais c'est surtout le mois de janvier qui se distingue par sa pluviosité très faible.

Le Tableau D.5 et la Figure D.6 comparent les précipitations annuelles des pluviomètres totalisateurs de 95 à 98.

Les précipitations les plus importantes sont relevées en 96-97, année Niña. Pour les pluviomètres P₃, P₅, P₈ et celui de la Cobee, c'est à dire les pluviomètres les plus bas, les précipitations recueillies cette année sont inférieures à celles de l'année 95-96. Par contre, pour les pluviomètres de la moraine (P₁ et P₂) et P₄, les valeurs de 95-96 sont légèrement supérieures à celles de cette année.

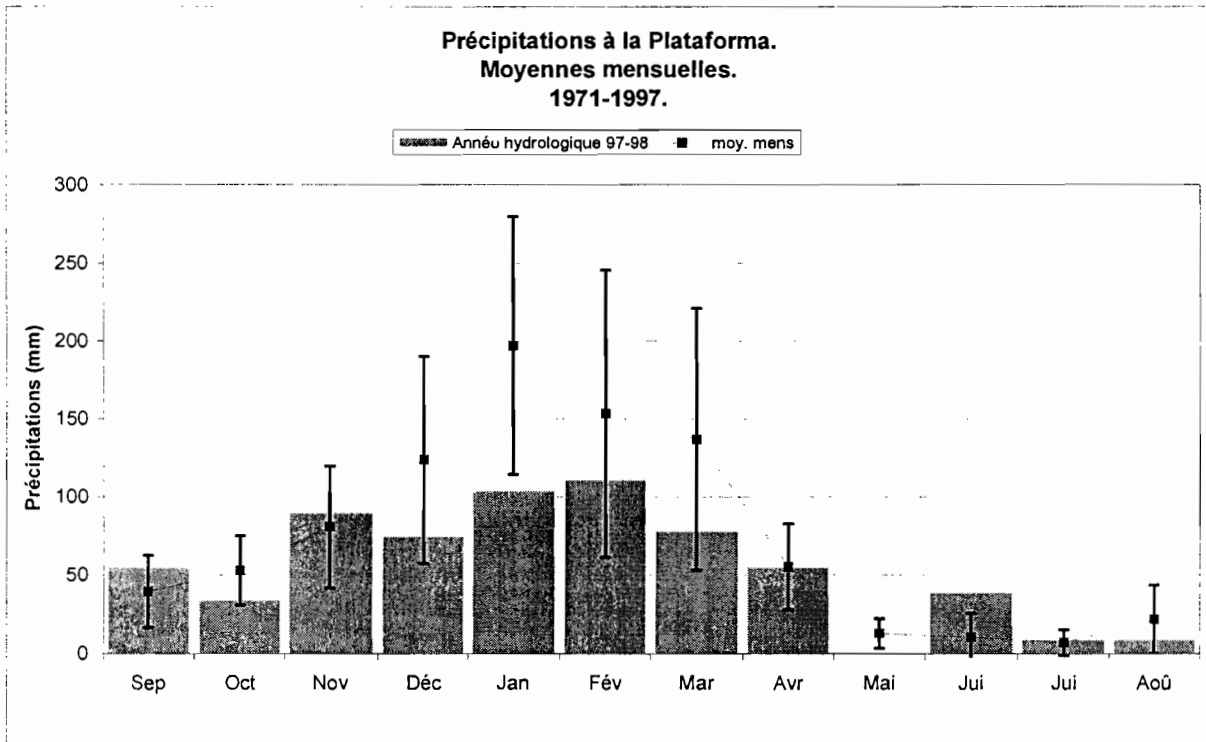


Figure D.5

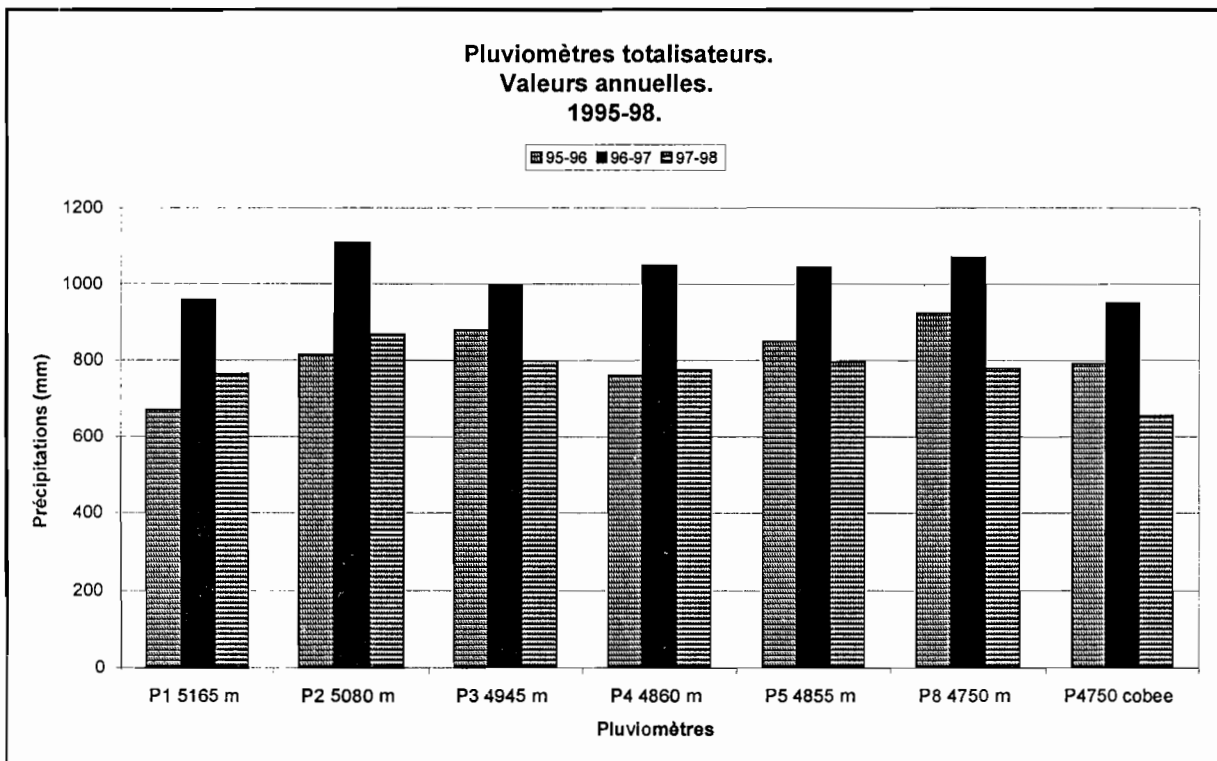


Figure D.6

	P₁ 5165 m	P₂ 5080 m	P₃ 4945 m	P₄ 4860 m	P₅ 4855 m	P₈ 4750 m	P_{cobee} 4750 m
95-96	670	815	880	760	850	925	791.3
96-97	960	1110	1000	1050	1045	1070	951
97-98	765	870	800	775	795	780	656
Moyenne	798	932	893	862	897	925	799

Tableau D.5 : Précipitations annuelles aux différents pluviomètres totalisateurs depuis 1995 (mm)

En terme de pluviosité, cette année hydrologique est très déficitaire : 25% de précipitations en moins par rapport à la moyenne (Wagnon., 1999). Ce déficit n'apparaît qu'en saison des pluies, les périodes de transitions et de saison sèche recevant autant de précipitations que les autres années.

E. BILAN RADIATIF

E. 1. Notations et données disponibles

Les notations utilisées sont les mêmes que pour les rapports précédents (Sicart et al., 1998) et le bilan radiatif à la surface du glacier s'écrit : $R_n = SW_{\downarrow} - SW_{\uparrow} + LW_{\downarrow} - LW_{\uparrow}$

avec :

- Rn : 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 (Cf. chap. B, inventaire de l'équipement du glacier) :

- 4750 m : SW \downarrow (station Mévis à la Plataforma)
- 5150 m : Rn, SW \downarrow et SW \uparrow (station Campbell sur le glacier)
- 5500 m : Rn, SW \downarrow et SW \uparrow (station Campbell sur le glacier)

E. 2. Valeurs journalières

E. 2.1. Comparaison entre la radiation solaire incidente maximale journalière à 5150 m et à 5500 m

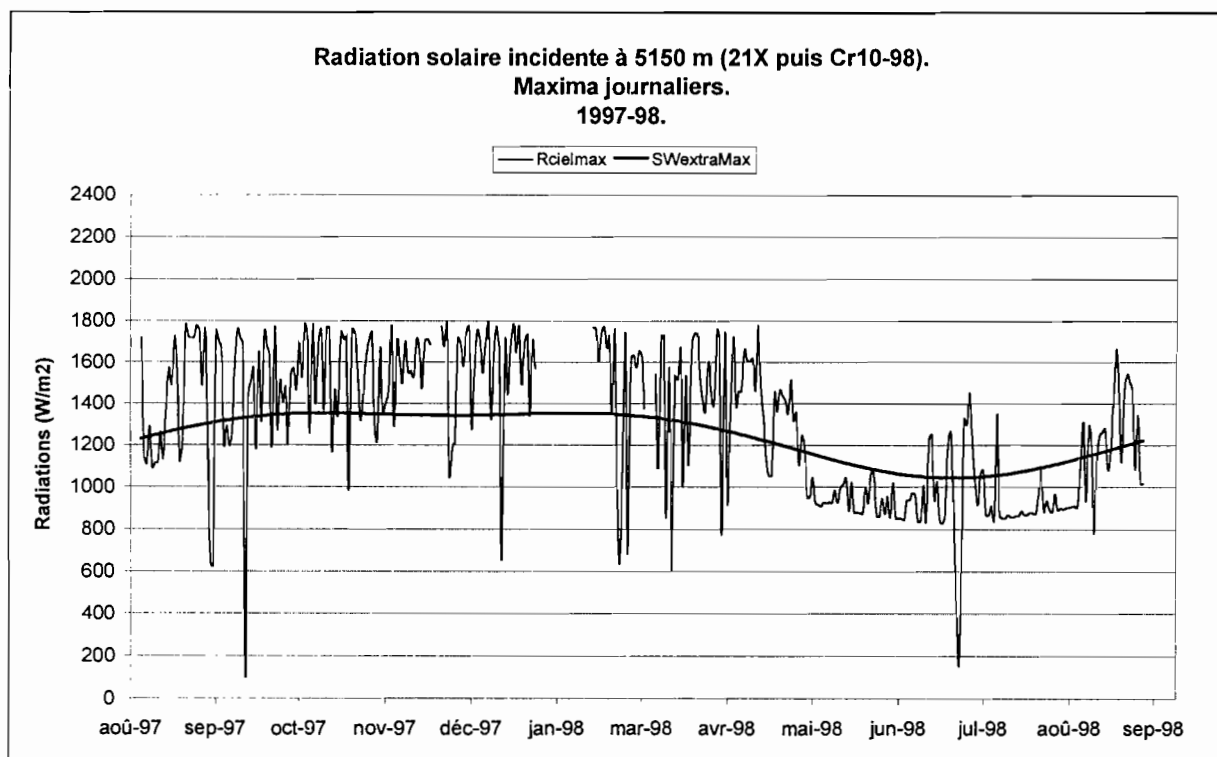


Figure E.1

Sur la Figure E.1, au cours de l'année les maxima suivent la même évolution que les années passées, avec des maxima plus hauts en saison des pluies et plus faibles en saison sèche. On remarque que certaines journées la radiation solaire incidente maximale est largement supérieure à la radiation extraterrestre maximale (Rapports n°49, n°55 et 57). Ces journées correspondent à des journées nuageuses où l'on a de multiples réflexions entre la surface de la neige de fort albédo. Cette année encore, le pyranomètre installé à 5150 m saturé pour les valeurs dépassant 1780 W/m².

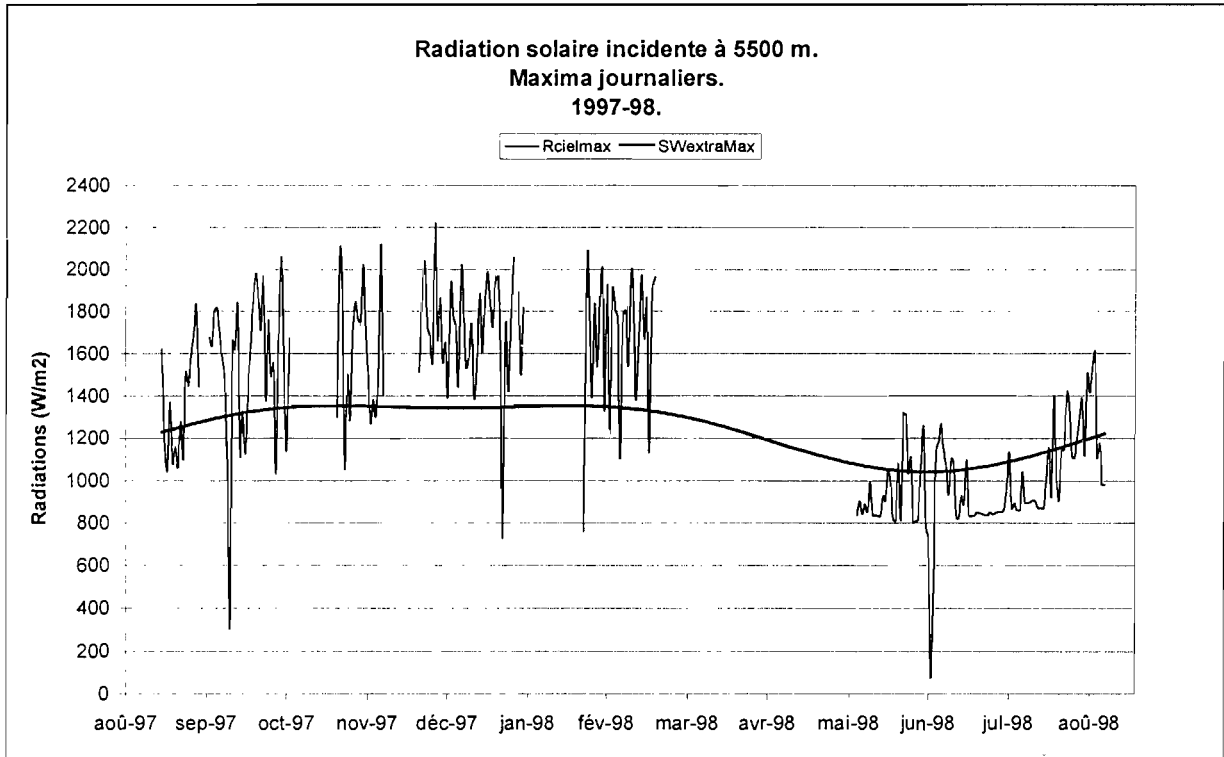


Figure E.2

Aucune différence notable n'existe entre la radiation incidente maximale journalière à 5150 et 5500 m : cependant à 5500 m, le capteur ne sature pas et les valeurs de la radiation solaire incidente atteignent 2220 W/m². Les deux séries sont assez bien corrélées : le coefficient de détermination $R^2 = 0.70$ ($n = 219$ points).

E. 2.2. Albédo moyen journalier à 5150 m et 5500 m.

Cette année nous ne prenons pas la valeur minimale journalière de l'albédo mais la moyenne des moyennes demi-horaire entre 9h et 15h. On limite ainsi 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. On calcule les moyennes journalières après élimination des moyennes demi-horaires supérieures à 1 si celles-ci sont peu nombreuses et n'altèrent pas la série. Une recalibration à posteriori des capteurs de la Cr10-98 à partir de la SAMA nous permet de corriger les mesures des pyranomètres et du bilanmètre à partir du 16/04/98. En effet, le capteur Kipp & Zonen de la SAMA est plus performant que ceux de la Cr10-98 et constitue théoriquement une bonne référence. Les équations de correction utilisées sont les suivantes :

$$SWinc_{corr} = SWinc * 0.954 - 1.4962 \quad (n = 567 \text{ points et } R^2 = 0.99)$$

$$SWglac_{cor} = SWglac * 1.0125 + 2.5951 \quad (n = 668 \text{ points et } R^2 = 0.99)$$

La Figure E.3 compare cet albédo moyen aux valeurs de la sonde à ultrason à 5150 m (à partir du 15/01/98 seulement puisqu'elle était défectueuse auparavant) qui identifie les précipitations, à la moyenne de la température basse entre 9h et 15h pour voir directement l'influence de celle-ci sur l'albédo. La Figure E.4 compare l'albédo moyen journalier aux précipitations à 4750 m.

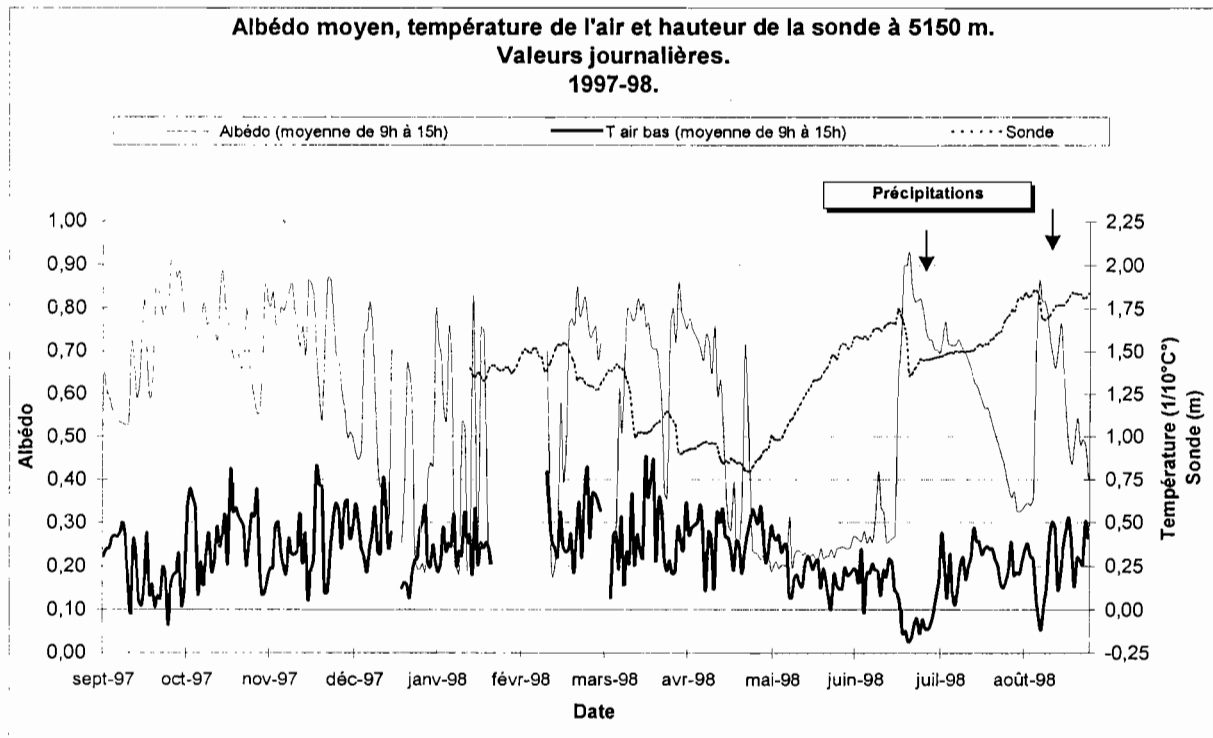


Figure E.3

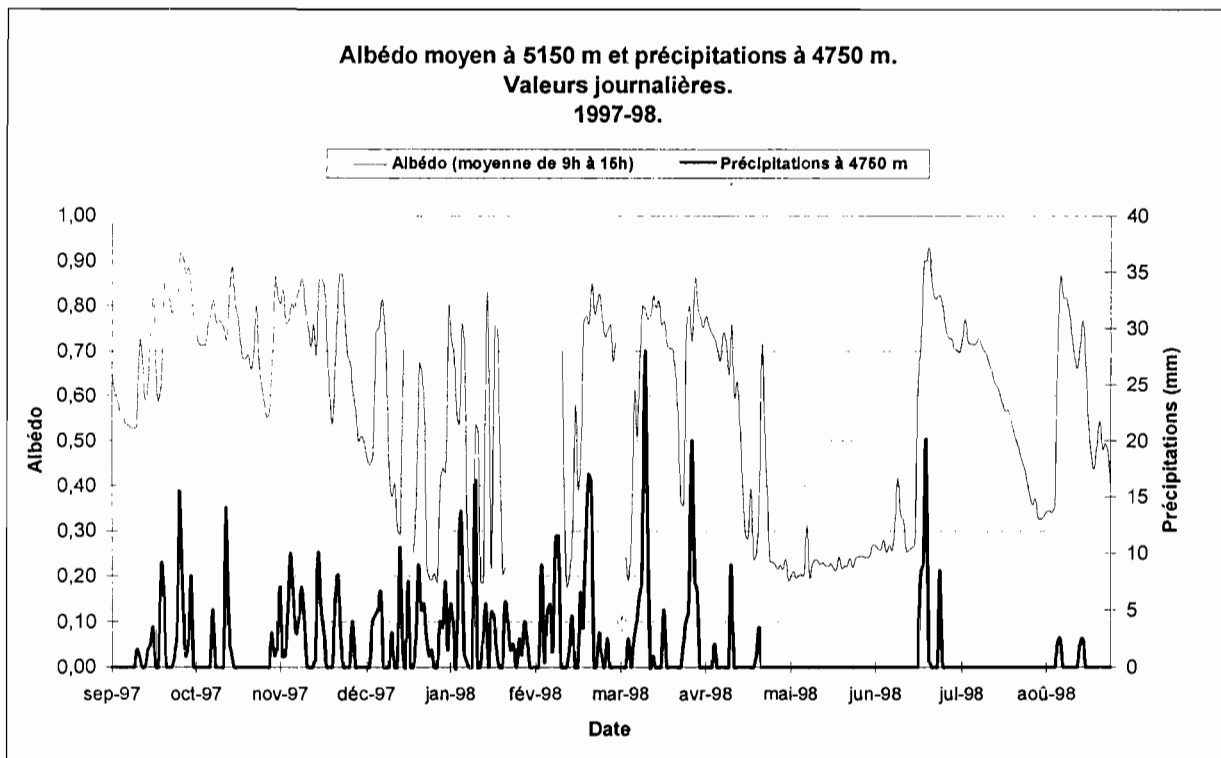


Figure E.4

Les variations de l'albédo au cours de l'année montrent une saisonnalité bien marquée mais quelque peu différente des années précédentes. Sur les Figures E.3 et E.4 on remarque que les périodes de hausse de l'albédo à 5150 m correspondent aux périodes de précipitations.

De septembre à début décembre l'albédo est compris entre 0.6 (neige transformée, névé) et 0.9 (neige fraîche). Ensuite de décembre à fin avril, l'albédo connaît de grandes variations : de 0.2 (glace sale) à 0.9, ce qui indique que les épisodes neigeux sont de faible intensité et espacés dans le temps, ce qui diffère de l'année dernière où les épisodes pluvieux pendant la saison des pluies étaient plus importants et où aucune période de plus de 3 journées sans précipitations n'était observée. De mai à juin l'albédo est très bas, ce qui correspond bien à une période sans précipitations et d'ablation (la hauteur enregistrée par la sonde augmente) où la glace est sale. Fin juin la sonde enregistre de grosses précipitations : aussitôt l'albédo remonte mais décroît rapidement dès que la neige fraîche se transforme. Cette année, le manteau neigeux n'est jamais assez épais pour assurer une décroissance lente de l'albédo.

D'une manière générale sur l'année, la relation albédo et températures n'apparaît pas de manière évidente. On peut tout de même remarquer que les températures positives enregistrées à 5150 m sont associées à des baisses très rapides de l'albédo alors que les températures négatives sont plutôt associées à des albédos élevés. Quand les températures sont élevées, la couche de neige fraîche fond et se transforme laissant place à un névé ou à une couche de glace d'albédo plus faible.

Les Figures E.5 et E.6 présentent l'albédo à 5500 m comparé aux précipitations à 4750 m et aux températures de l'air à 5500 m.

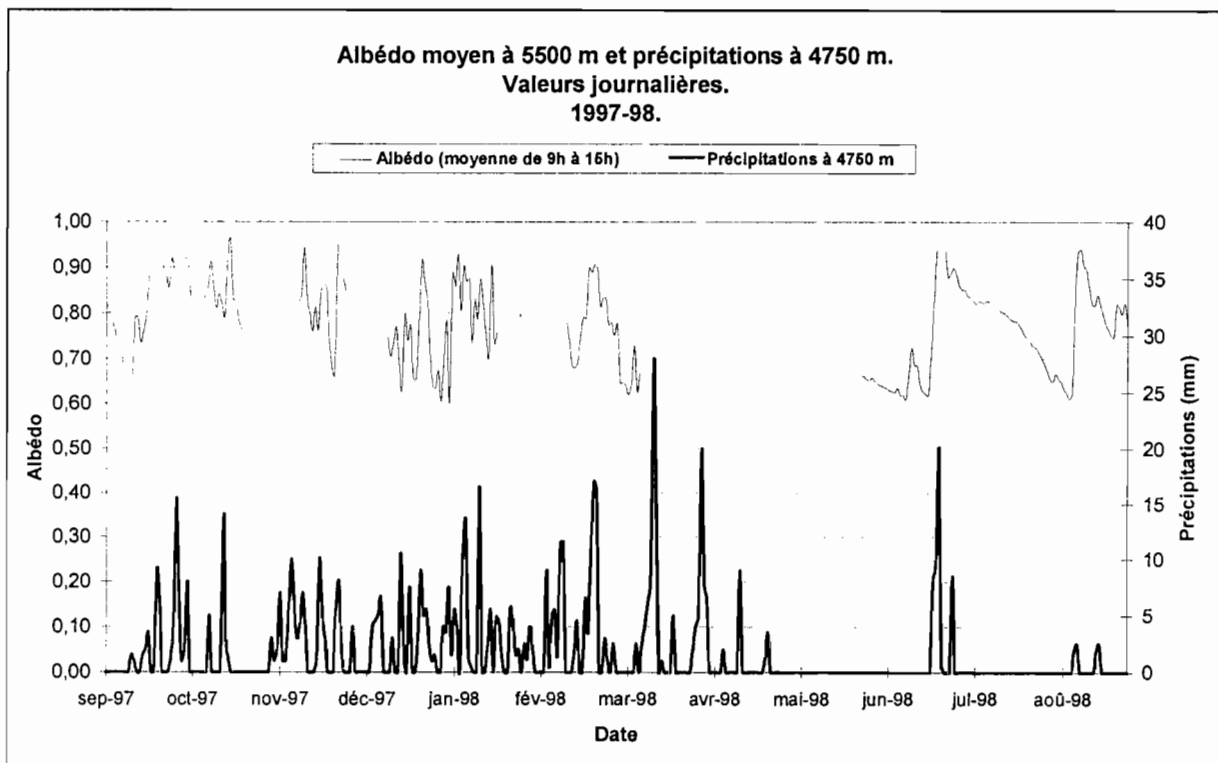


Figure E.5

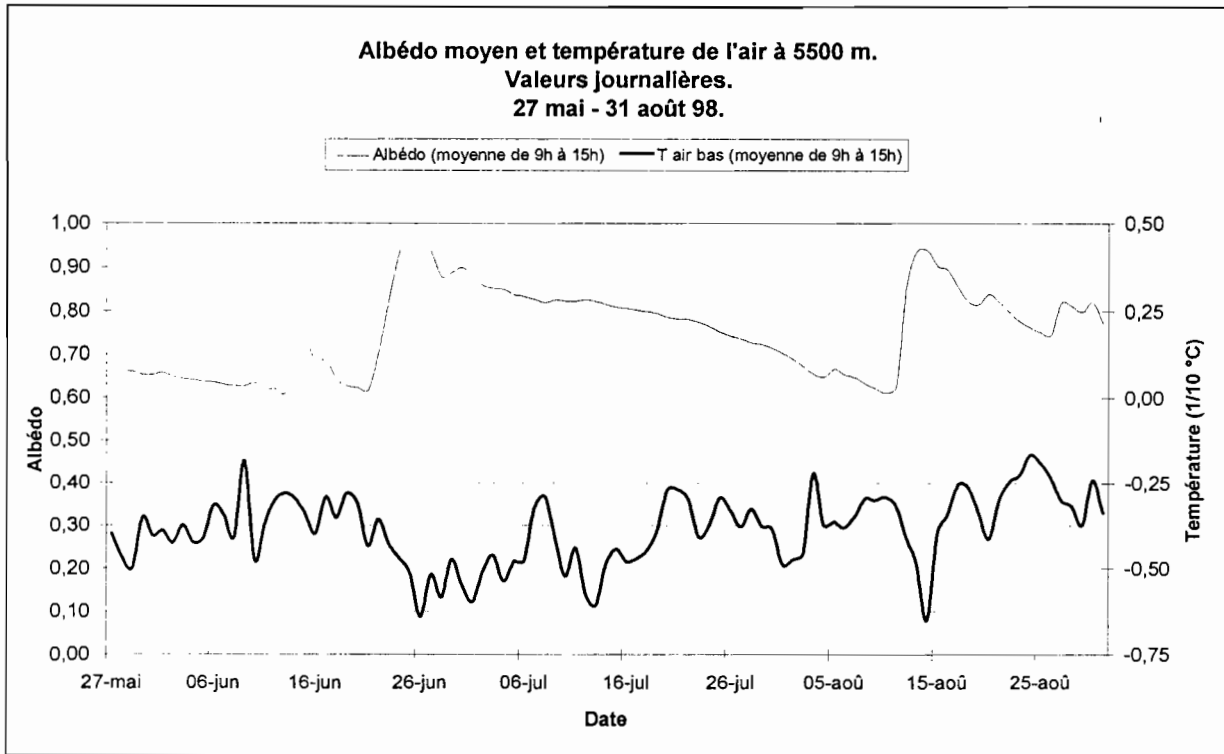


Figure E.6

La série des albédos mesurés à 5500 m en 97-98 (Cf. Figure E.6) est très incomplète. Il est difficile d'observer une saisonnalité et de comparer les valeurs avec celles de 5150m. Cependant, les variations de l'albédo à 5500 m sont moins importantes qu'à 5150 m. Au cours de l'année, l'albédo reste plus élevé qu'à 5150 m et varie entre 0.6 et 0.9 alors qu'à 5150 m il varie entre 0.2 et 0.9 et la valeur de l'albédo étant seulement « relevée » au gré des précipitations. Ceci indique que l'évolution de la surface du glacier à ces deux altitudes est bien distincte. A partir de fin mai 98 où l'enregistrement des moyennes journalières de l'albédo est continu, on peut voir la relation entre albédo, précipitations et températures. Au cours du mois de juin, les hausses brutales de l'albédo correspondent aux précipitations évoquées au paragraphe précédent. Sur cette période, on observe le même comportement qu'à 5150 m.

E. 2.3. Radiation solaire incidente, moyennes journalières à 4750 m, 5150 m et 5500 m

Nous avons représenté la radiation solaire incidente journalière moyenne à 4750 m, 5150 m et à 5500 m, ainsi que la radiation extraterrestre journalière (Figures E.7 à E.9).

A 4750 m, les données de la Mévis ont été corrigées (cf. B.2.2, recalibration de la Mévis à partir du Licor). Idem à 5150 m à partir du 16/04/98 (voir paragraphe précédent).

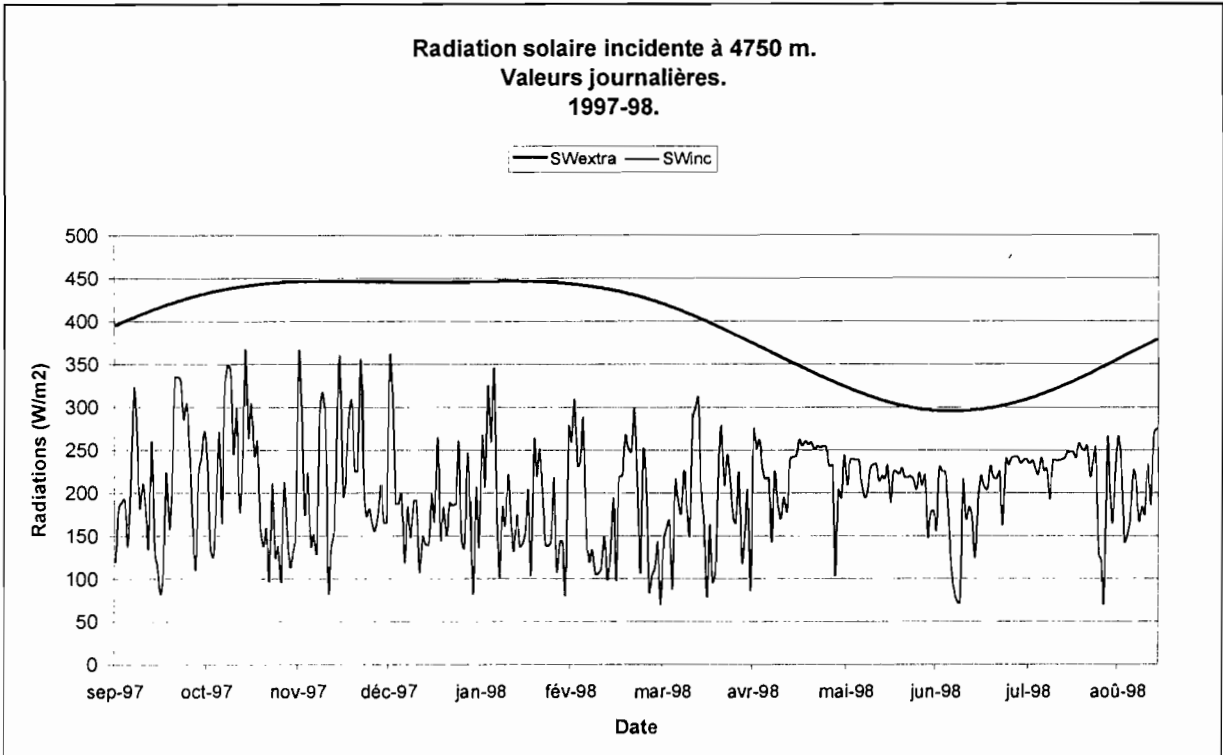


Figure E.7

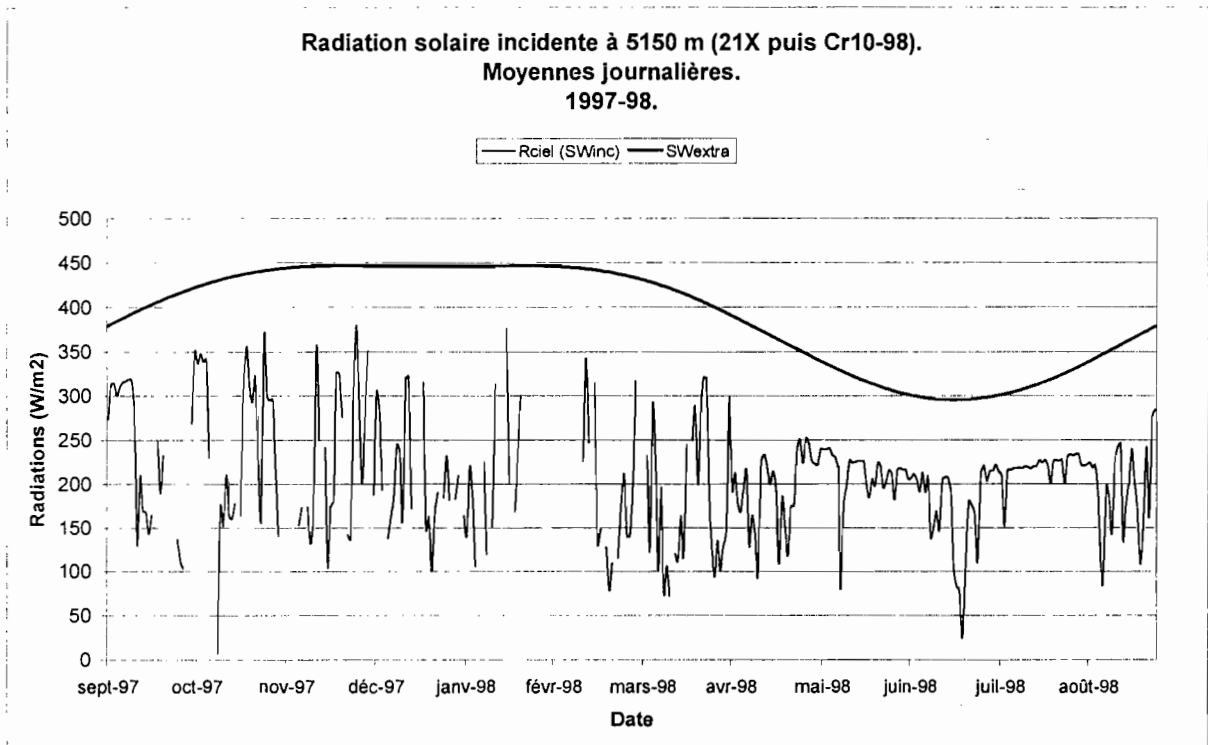


Figure E.8

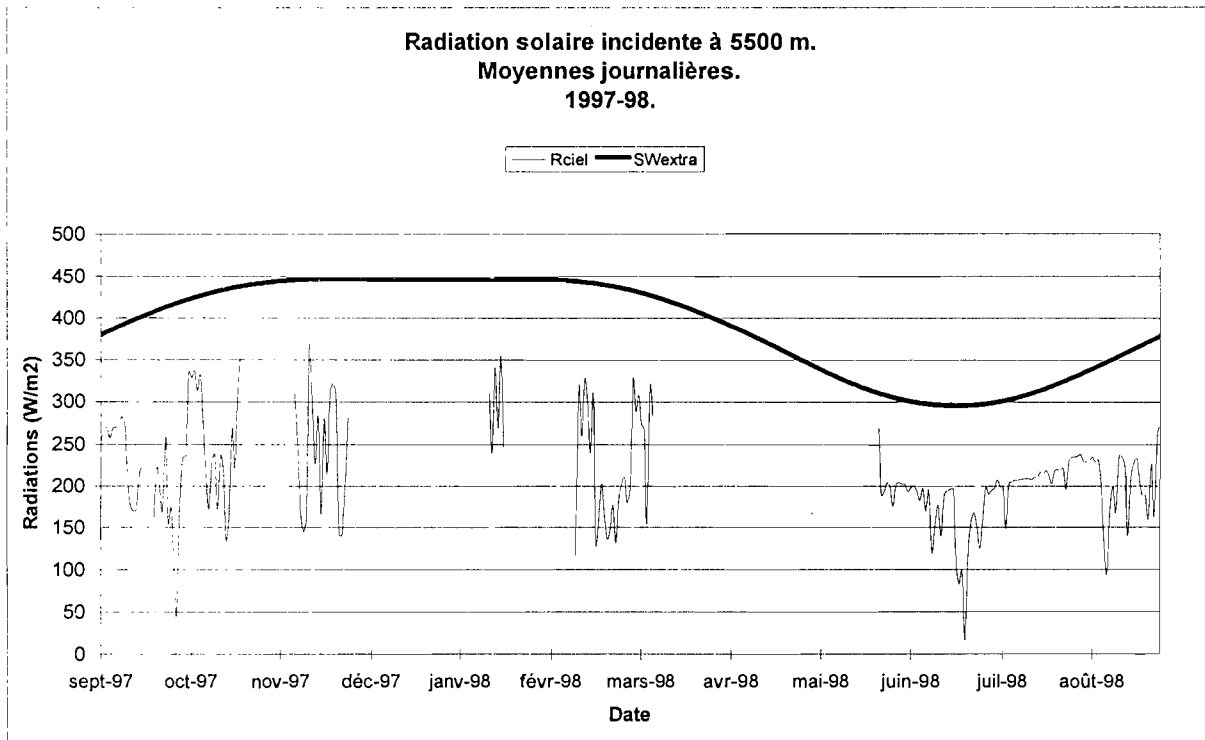


Figure E.9

On retrouve le même comportement que les années précédentes. Une saisonnalité est visible. Elle est moins marquée à 4750 m qu'à 5150 et 5500 m. Les radiations incidentes à la Mévis sont légèrement plus faibles qu'à 5150 et 5500 m : ceci pourrait être dû aux réflexions sur les parois de neige environnantes enregistrées sur le glacier et à la différence d'altitude. Les radiations incidentes suivent l'évolution annuelle de la radiation extraterrestre mais les valeurs moyennes enregistrées sont toutes inférieures à SWextra, ce qui n'était pas le cas pour les valeurs maximales journalières : inférieure de 268 W/m² à 4750 m, de 174 W/m² à 5150 et de 160 W/m² à 5500 m.

E. 2.4. Radiation nette journalière à 5150 m et à 5500 m

Suite à une comparaison des données avec celles issues du radiomètre Kipp&Zonen qui est plus précis, la radiation nette à 5150 m a été corrigée de la façon suivante à partir du 16/04/98 :

$$Rn_{\text{corr}} = Rn * 0.9299 - 14.462 \quad (n = 573 \text{ points et } R^2 = 0.97)$$

On remarque une très nette relation entre Rn et l'albédo : comme les années précédentes, les Rn les plus forts correspondent aux albédos les plus faibles et inversement. Par contre la saisonnalité, peu marquée, semble inversée : à 5150 m, les Rn les plus élevées apparaissent de décembre à mars (Figure E.10) ; cela correspond à une fonte importante qui transforme l'albédo plus que la sublimation. Les chutes de neige de faible intensité laissent vite apparaître la glace, ce qui explique l'albédo faible. Par contre les grosses chutes de neige de juin ont été plus efficaces : l'albédo devient élevé et l'on a ainsi les Rn minimums.

A 5500 m les observations sont plus difficiles étant donné les lacunes importantes. On observe toujours une relation forte entre le comportement de Rn et de l'albédo (Figure E.11). Comme nous l'avons vu au paragraphe précédent, l'albédo varie peu et reste compris tout au long de l'année entre 0.6 et 0.9 ; on retrouve ce comportement sur la radiation nette qui reste comprise entre -70 et +75 W/m², amplitude plus faible qu'à 5150 m (entre -55 et +225 W/m²).

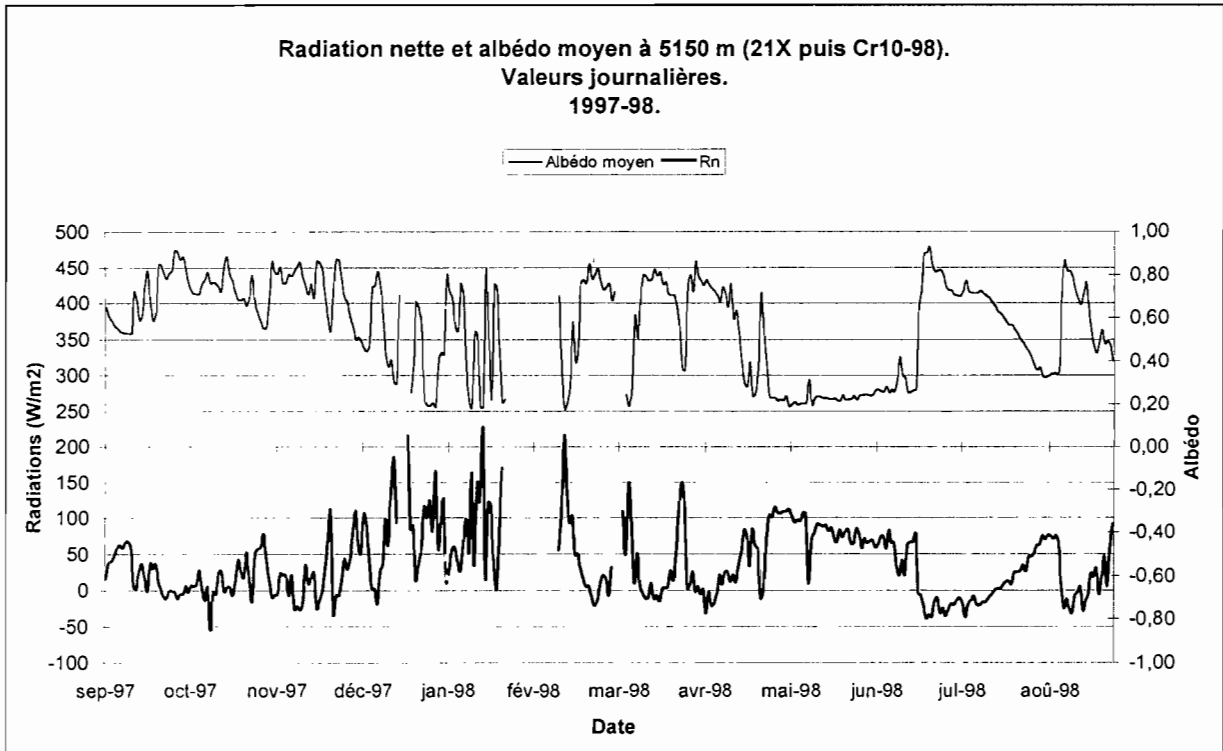


Figure E.10

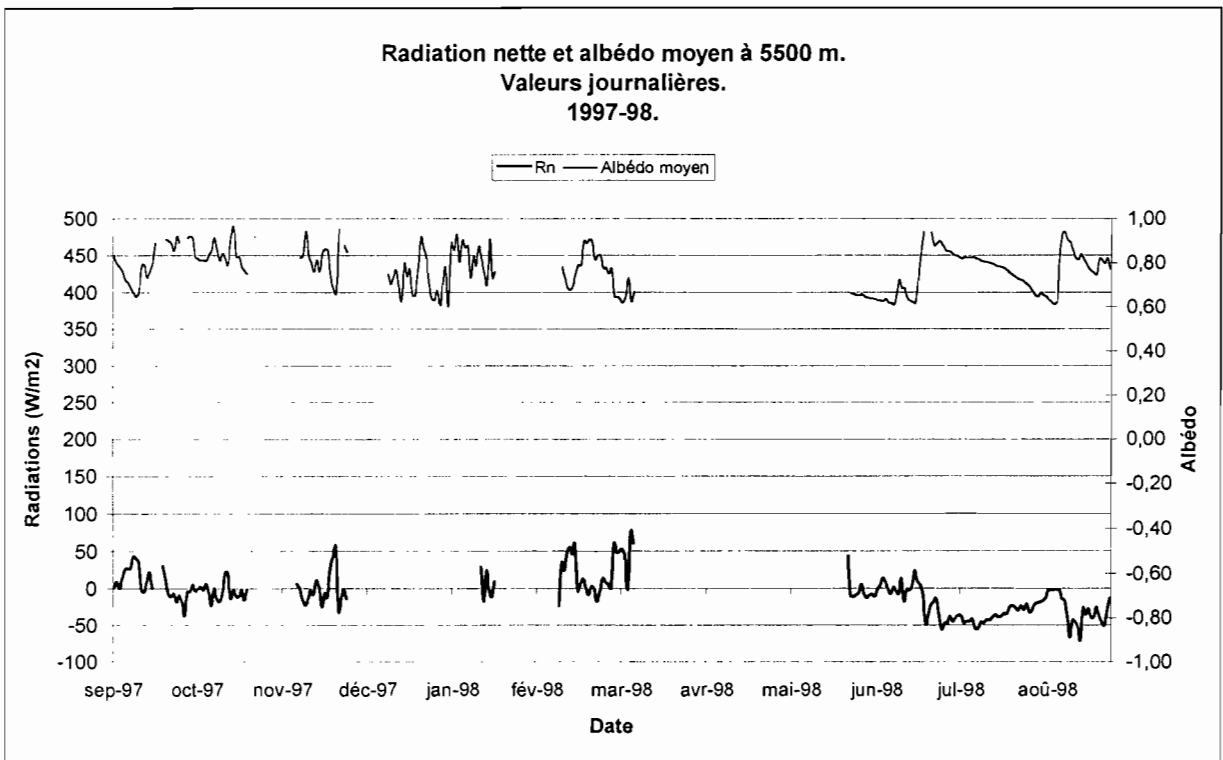


Figure E.11

E. 3. Valeurs mensuelles

E. 3.1. Radiation nette et albédo mensuel

Les valeurs mensuelles de Rn enregistrées à 5150 m et à 5500 m sont assez différentes : l'évolution est identique seulement sur les trois premiers et les trois derniers mois de l'année (Cf. Figure E.12, Tableau E.1) avec $Rn_{5500} < Rn_{5150}$, la différence est de 20 W/m^2 entre septembre et novembre et de plus de 50 W/m^2 entre mai et août. Seul le mois de mars 98 présente une Rn à 5500 m légèrement supérieure à celle de 5150 m et des albédos identiques ce qui pourrait indiquer qu'à cette période les surfaces à ces deux altitudes sont très semblables.

L'influence de l'albédo sur Rn à 5150 m est très nette : le mois de mai correspond à l'albédo le plus faible et au Rn le plus élevé.

A 5500 m, Rn dépend aussi fortement de l'albédo et on observe le même comportement qu'à 5150 m.

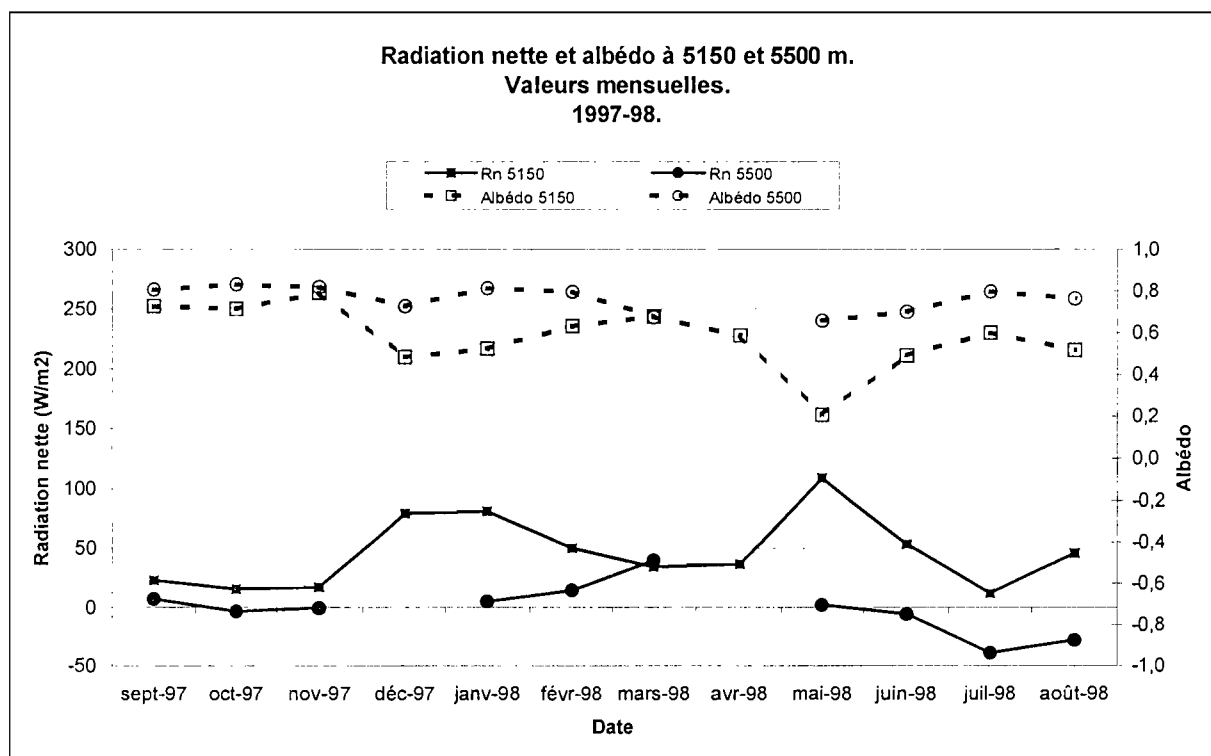


Figure E.12

	Rn 5150	Albédo 5150	Rn 5500	Albédo 5500
sept-97	22,58	0,73	6,95	0,81
oct-97	15,25	0,71	-3,61	0,83
nov-97	16,78	0,79	-0,78	0,82
déc-97	79,26	0,48		0,73
janv-98	81,06	0,52	4,80	0,81
févr-98	49,92	0,63	14,20	0,80
mars-98	34,15	0,68	39,43	0,68
avr-98	36,56	0,59		
mai-98	108,96	0,21	1,96	0,66
juin-98	53,46	0,49	-5,92	0,70
juil-98	11,63	0,60	-39,15	0,80
août-98	45,44	0,52	-28,30	0,76
Moyenne	46,26	0,58	-1,04	0,76

Tableau E.1 : Radiation nette (W/m²) et albédo à 5150 et 5500m

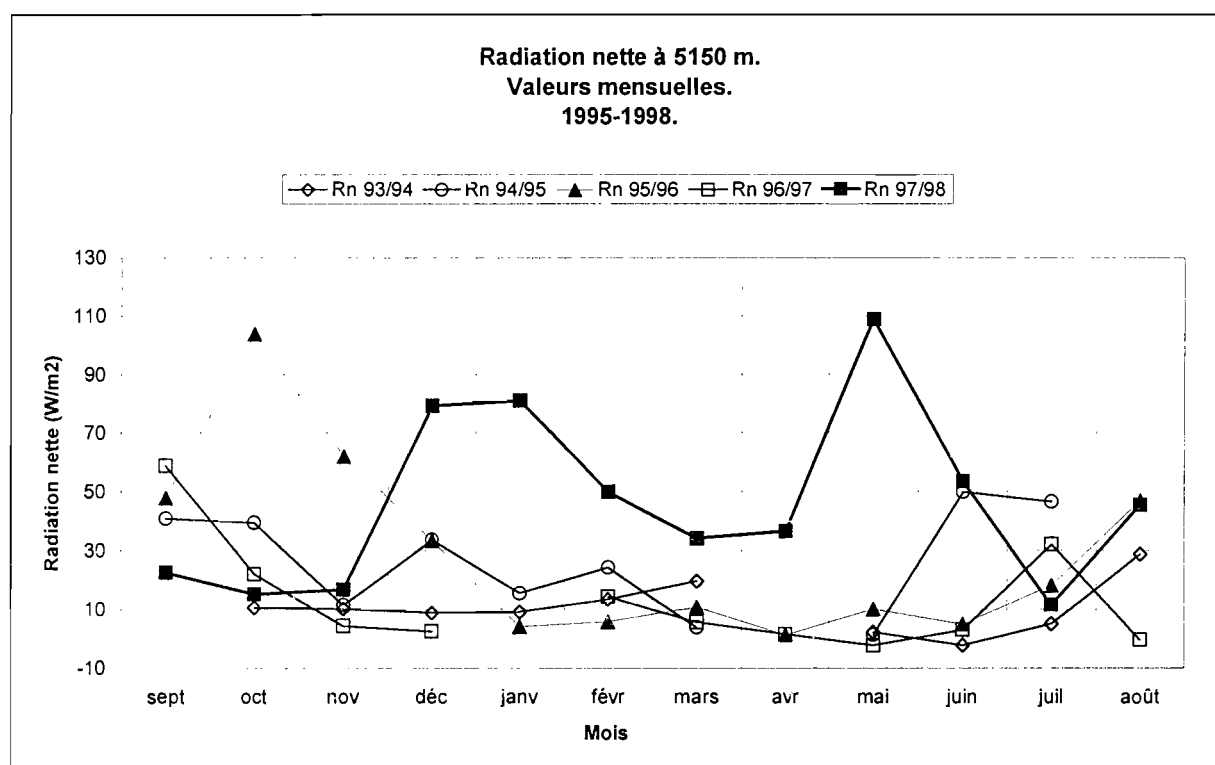


Figure E.13

La moyenne annuelle de l'albédo à 5150 m est de 0.58 et celle à 5500 m de 0.76. On retrouve exactement les mêmes valeurs d'albédo qu'en 95-96 : 0.52 à 5150 m et 0.76 à 5500 m.

La Figure E.13, qui présente les valeurs mensuelles de la radiation nette à 5150 m pour les cinq dernières années, met en évidence la particularité de cette année : elle se distingue des autres qui ont une évolution assez similaire. Toute cette année, la radiation nette a été forte et plus particulièrement en décembre, janvier et mai. Mis à part les mois d'octobre, novembre, juillet et août, les écarts mensuels sont supérieurs à 20W/m² et peuvent atteindre 100W/m² pour le mois de mai. La radiation nette du cycle 97-98 est trois fois supérieure à celle de l'année précédente.

En effet, à cause des précipitations moins abondantes, le manteau neigeux de la saison humide, moins épais, a disparu plus vite, laissant apparaître la surface d'ablation du glacier d'albédo faible sur une période plus longue et sur une surface plus grande. La chute de l'albédo moyen annuel entre 1996-97 et 1997-98 est donc en étroite relation avec l'augmentation de R_n .

F. DEBITS

L'exploitation du limnigraphe OTT R20 de la station "4830" s'est normalement poursuivie durant l'année hydrologique 1997-1998. Le fonctionnement de cet appareil a débuté par une lacune issue de l'année précédente (25/8 au 4/9) qui s'est poursuivie, après un court rétablissement le 5, par une nouvelle interruption du 6 au 10/9 puis du 16 au 17/9. Postérieurement, deux nouvelles lacunes sont à signaler du 2 au 11 mars (défaillance de l'enregistreur) et du 28 juillet au 10 août, en raison de travaux de génie civil à la station. Les défauts d'enregistrement, résultant des incidents successifs de septembre, qui totalisent 11 jours cette année, surviennent à une période où les écoulements, encore inférieurs à $375 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, sont intégralement absorbés par le Tubo. La reconstitution des lacunes journalières, à partir d'une relation $Q_{\text{limni}} / Q_{\text{cobee}}$ de type 2 (Informe 57), est donc possible ; de même que celles des dix jours de mars. Mais, consécutivement aux travaux de juillet/août, une partie des débits enregistrés au limnigraphe fuit en permanence vers le canal Alpaca. La corrélation jusqu'ici utilisée, avec les données Tubo de la Cobee, devient impossible ; à moins d'étalonner cette fuite ! A défaut, une corrélation avec les paramètres climatiques de la station météo 5150 a été utilisée pour combler la lacune du 28 juillet au 10 août.

F.1. Débits instantanés

Rayonnement et température, responsables de la saisonnalité, expliquent toujours les dates d'occurrence des débits extrêmes. Le Tableau F.1 permet de comparer les valeurs instantanées de l'année à celles des années antérieures.

Années	Qmax (l.s-1)	Qs max (l.s-1/km2)	Date	Qmin (l.s-1)	Qs min (l.s-1/km2)	Date
1991/92	929	312	22/12/91	9.7	3.3	22/08/92
1992/93	1070	360	20/12/92	7.7	2.6	17/07/93
1993/94	793	267	7/12/93	8.8	3.0	09/09/94
1994/95	1050	354	6/12/94	23.9	8.0	19/07/95
1995/96	1020	343	15/11/95	13.3	4.5	30/08/96
1996/97	980	330	3/11/96	18.2	6.1	12/06/97
1997/98	1153	388	5/12/97	12.0	4.0	10/07/98

Qs: Débit spécifique (rapporté à une surface de bassin de 2.97 km2)

Tableau F.1 : Débits minima et maxima instantanés des sept dernières années.

Le débit maximum instantané est le plus élevé des sept années observées. Le débit minimum apparaît quant-à lui légèrement inférieur à la moyenne des observations de la période. Les dates d'apparition de ces débits extrêmes se situent également dans la moyenne des observations.

F.2. Débits journaliers

Les débits moyens journaliers et les pluies journalières de la Plataforma (4750 m), sont présentés simultanément (Fig. F.1). La relation pluie-débit reste insignifiante : R^2 proche de 0 avec $n = 365$ et montre qu'il n'y a pas de lien direct entre ces deux séries, même si une certaine relation de cause à effet est visible en début (octobre-décembre) et fin de période humide (mars-avril). La

- débits -

fréquence des jours sans pluie au cours de la saison pluvieuse de cette année Niño, sans aucun doute responsable d'un rayonnement accru, explique l'hydraulicité soutenue de certaines périodes de décembre et de février.

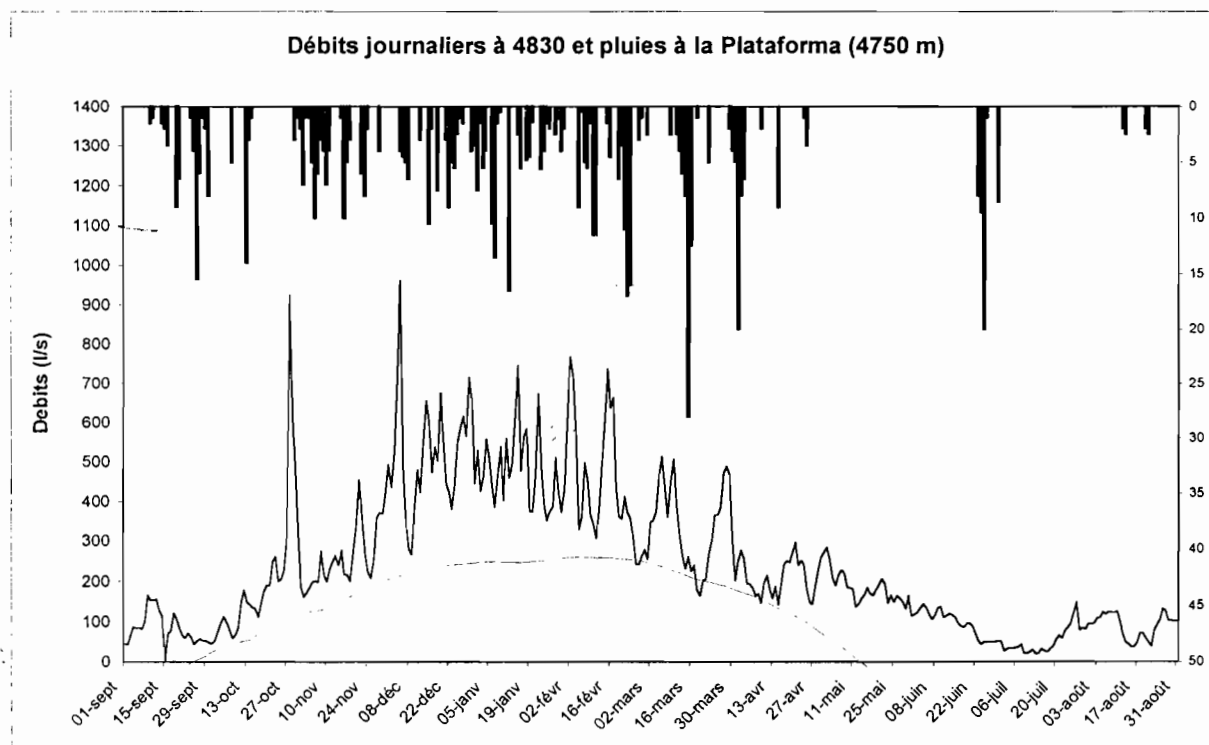


Figure F.1

Les débits moyens journaliers du Tableau F.2 permettent d'observer les valeurs moyennes journalières extrêmes (Tableau F.2). Les valeurs entre parenthèses du Tableau F.3 sont celles qui résultent de reconstitutions par corrélations multiples avec les valeurs hydrologiques du Tubo ou avec les données climatiques recueillies sur le glacier (§ F.4).

Années	Qmj max (l.s ⁻¹)	Date	Qmj min (l.s ⁻¹)	Date
1991/92	645	26/03/92	14	22/06/92
1992/93	703	21/12/92	17	24/08/93
1993/94	529	07/12/93	10	07/07/94
1994/95	636	05/12/94	27	19/07/95
1995/96	652	03/11/95	25	12/07/96
1996/97	514	03/11/96	25	23/05/97
1997/98	961	05/12/97	20	13/07/98

Tableau F.4 : Débits moyens journaliers minima et maxima des six dernières années

- débits -

Jour	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août
1	(44.1)	44.9	185	492	528	601	254	250	272	118	50.3	(94.2)
2	(43.1)	52.3	161	437	427	767	(348)	276	284	123	27.5	(96.2)
3	(66.6)	74.2	171	530	462	718	(352)	257	254	133	32.2	(109)
4	(86.9)	94.2	184	728	557	564	(374)	195	209	143	34.6	(110)
5	84.1	113	198	961	508	329	(468)	194	189	134	34.1	(124)
6	(85.1)	99.4	201	491	440	360	(513)	183	216	118	35.9	(119)
7	(81.7)	80.4	198	344	386	497	(438)	163	228	106	36.9	(125)
8	(100)	58.3	275	282	468	456	(361)	169	220	116	43.7	(123)
9	(165)	66.4	216	267	537	367	(447)	146	185	133	22.8	(123)
10	(153)	86	199	387	404	343	(506)	196	183	137	20.5	(125)
11	153	143	231	479	558	307	(396)	214	180	110	25.2	100
12	155	178	249	424	460	378	318	181	137	115	30.8	69.5
13	128	148	263	555	494	479	265	157	144	120	19.6	49.0
14	113	143	240	654	610	605	231	187	159	117	21.3	44.0
15	95.7	135	277	601	745	736	260	142	165	110	31.8	37.5
16	(70.9)	132	217	473	478	637	225	191	183	96.1	26.7	37.3
17	(77.3)	112	217	537	565	663	240	241	169	89.6	25.0	48.4
18	121	145	200	503	584	439	180	250	165	85.7	32.9	72.6
19	106	176	273	674	377	363	163	247	179	95.4	38.9	71.9
20	83.2	190	335	557	374	356	203	272	192	95.3	56.4	60.5
21	65.2	190	454	445	460	412	204	296	205	90.2	66.0	48.7
22	59.6	249	362	423	673	372	267	240	193	71.3	58.2	39.5
23	71.5	261	270	382	486	357	305	251	146	53.2	78.7	79.3
24	61	200	222	442	392	310	365	243	165	43.7	84.7	92.7
25	44.4	205	208	549	352	243	366	180	149	49.7	95.6	104
26	51.2	228	254	588	375	241	386	149	163	50.0	125	132
27	57	312	359	615	388	262	472	143	158	49.1	148	128
28	53.8	923	372	565	510	278	488	187	149	48.9	(78.8)	103
29	52.3	608	369	715	425		468	230	131	50.5	(85.5)	104
30	48.3	486	426	651	374		300	260	163	50.4	(81.1)	101
31		306		446	433		202		114		(94.7)	103
Moy (l.s ⁻¹)	86	201	260	522	478	444	334	210	182	95	53	89
E. type (l.s ⁻¹)	37	181	78	141	94	157	106	45	40	32	33	31
Qms (l.s ⁻¹ .km ⁻²)	29	68	87	176	161	150	113	71	61	32	18	30

Entre parenthèses : débits reconstitués.

Tableau F.3 : Débits moyens journaliers au limnigraphe 4830

Le débit moyen journalier maximum, est le plus important enregistré jusqu'ici, il intervient, comme dans la majorité des cas, en décembre, alors que le débit moyen journalier minimum se situe dans la moyenne des observations, à la période la plus fréquente d'apparition, en juillet.

F.3. Débits mensuels et annuels

F.3.1. Débits mensuels

Le Tableau F.4 et la Figure F.2 qui rapprochent la valeur mensuelle des débits 97/98 de celles des autres années font ressortir l'importance des écoulements de cette nouvelle année Niño.

Mois	91/92	92/93	93/94	94/95	95/96	96/97	97/98
Sept	88.1	67.8	52.2	147	160	116	(86)
Oct	230	152	84.9	179	362	179	201
Nov	274	234	187	168	350	180	260
Déc	342	201	295	285	281	167	522
Janv	192	114	207	242	214	197	478
fév	185	114	176	289	140	145	444
Mars	243	116	126	137	155	113	293
Avril	194	66.8	81.9	134	94	66	210
mai	179	65.1	62.7	84	82	59	182
Juin	52.7	42.2	61.7	68	55	45	95.1
Juil	28.2	29.2	47.2	71	43	(68)	53
Août	32.8	31.3	132	130	89	(60)	(89)
Module (l.s ⁻¹)	170.1	102.8	126.2	161.2	172.0	116.2	242.8
Qms (l.s ⁻¹ .km ⁻²)	57.3	34.6	42.5	54.3	57.9	39.1	81.7

Tableau F.4 : Débits mensuels des sept dernières années

Le module de 243 litres par seconde est supérieur de 50% au module le plus élevé enregistré jusqu'ici (année 95-96). Les modules de décembre et mai sont en particulier de deux à trois fois plus élevés que la moyenne, alors que les modules de juillet à octobre se maintiennent dans la mouvance de celle des autres années. La variation saisonnière des débits de cette année Niño apparaît donc comme la plus forte enregistrée jusqu'ici.

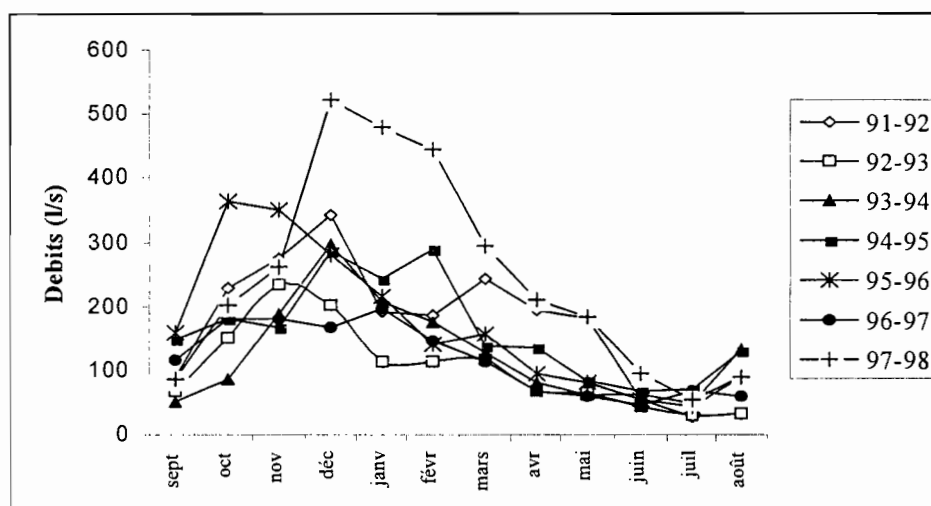


Figure F.2 : Comparaison des débits mensuels des sept dernières années.

F.3.2. Débits annuels

Le bilan de masse glaciaire, établi dans les mêmes conditions que les années précédentes (coefficient de ruissellement de la moraine : 0.8), fait ressortir l'extraordinaire ablation dont le glacier a fait l'objet au cours de cette année. Avec un bilan de masse négatif de plus de deux mètres cinquante, le Niño 97-98 a un effet deux fois plus important que le précédent de 95-96, pour une pluviosité équivalente. Cette année il a fait plus chaud, la précipitation solide est moins sous estimée, donc la précipitation annuelle de 810 mm de 97-98 est plus proche de la réalité que les 826 mm de 95-96.

Années	Module (l.s ⁻¹)	Précipitation annuelle (mm)	Apport moraine (l.s ⁻¹)	Apport glacier (l.s ⁻¹)	Apport glacier (mm/an)	Bilan masse (mm/an)
91/92	170.0	920	21.0	149	2237	-1317
92/93	102.7	1060	24.2	78.5	1179	-119
93/94	125.2	850	19.4	105.8	1589	-739
94/95	161.2	850	19.4	141.8	2131	-1281
95/96	172.0	826	19.7	152.3	2293	-1426
96/97	116.2	1051	24.0	92.2	1385	-397
97/98	242.8	810	18.5	224.3	3368	-2558

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.5 : Bilan hydrologique des six dernières années

F. 4. Reconstitution statistique des débits

F.4.1. Corrélations avec les paramètres climatiques

La corrélation des paramètres climatiques avec les débits de la station 4830 est entreprise lorsque les données du Tubo ne sont pas disponibles ou utilisables. Ce qui a été le cas cette année en raison des travaux menés par la Cobee du 28 juillet au 10 août.

Ces paramètres sont pour cette période de juillet-août 1998, et par ordre d'importance: la température à 5150 (T5150), le rayonnement net (Rn), le rayonnement extra terrestre (Rextra), la pluviosité et la différence des rayonnements incidents et réfléchis (Swinc - Swréf) :

$$\text{Débit} = -4.8883 * \text{Pluie} + 1.3539 * \text{T5150} + 0.9129 * \text{Rn} + 0.3726 * \text{Rextra} - 0.2370 * (\text{Swinc} - \text{Swréf}) - 82.8$$

n : 42 (sur juillet-août) R^2 : 0.61

Sur l'ensemble de l'année hydrologique (242 valeurs) la corrélation apparaît meilleure que celle de l'année dernière ($R^2 = 0.68$), Figure F.3, sauf pour les pics de débit, et les valeurs de basses eaux.

L'influence des rayonnements en saison chaude est particulièrement nette.

$$\text{Débit} = 4.727 * \text{Pluie} + 0.0067 * \text{T5150} + 1.8853 * \text{Rn} + 2.1027 * \text{Rextra} + 0.001 * (\text{Swinc} - \text{Swréf}) - 677$$

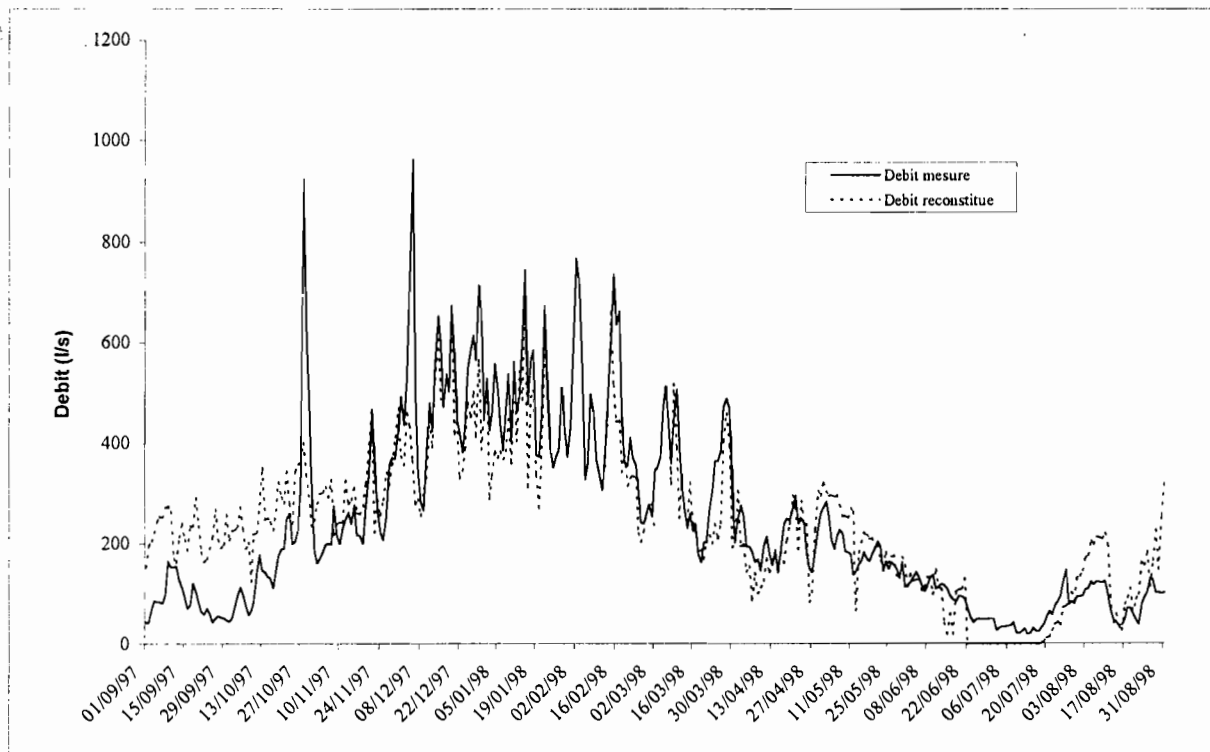


Figure F.3 : Reconstitution du débit journalier par corrélation multiple

F.4.2. Corrélation hydrologique avec le Tubo

La corrélation hydrologique avec les débits du Tubo utilisant les données des jours précédents (J-1) et suivant (J+1) est assez satisfaisante cette année : $R^2 = 0.84$ pour $n = 303$ valeurs ; malgré les perturbations causées par les nombreuses interventions de la Cobee à l'aval du limnigraphe. C'est cette corrélation qui a permis de combler les lacunes du mois de septembre 1997:

$$Q_{\text{limni}} = 0.1949 Q_{\text{cob15h}}(J-1) + 0.4276 Q_{\text{cob7h}}(J) + 0.2175 Q_{\text{cob15h}}(J) + 0.6726 Q_{\text{cob7h}}(J+1) + 1.4958$$

G. *PRESSION DE VAPEUR D'EAU*

Nous mesurons la pression de vapeur d'eau à 4750, 5150 et 5500 m. Les stations Mévis et Campbell 21X sont équipées d'hygro-thermomètres classiques qui fournissent une valeur de l'humidité relative basée sur le principe de la variation de la capacité d'un condensateur. Les stations Campbell Cr10 à 5150 et 5500 m puis Cr10-98 à 5150 m sont-elles équipées de psychromètres constitués de thermocouples ventilés qui enregistrent les températures sèches et humides de l'air. A 5150 m nous n'étudions que les valeurs des psychromètres.

Nous utilisons les équations psychrométriques théoriques suivantes pour calculer les pressions de vapeur à partir de températures sèches et humides :

$$\text{Pression de vapeur saturante : } e_{\text{sat}} = 6.1078 \text{ EXP } ((17.08085 T_{\text{sec}}) / (234.175 + T_{\text{sec}}))$$

$$\text{Pression de vapeur : } e = e_{\text{sat}} T_{\text{hum}} - 0.00066 * 540 (T_{\text{sec}} - T_{\text{hum}})$$

G. 1. *Moyennes journalières à 4750 , 5150 et 5550 m.*

Les Figures G.1, G.2 et G.3 représentent les moyennes journalières de la pression de vapeur d'eau à 4750, 5150 et 5500 m.

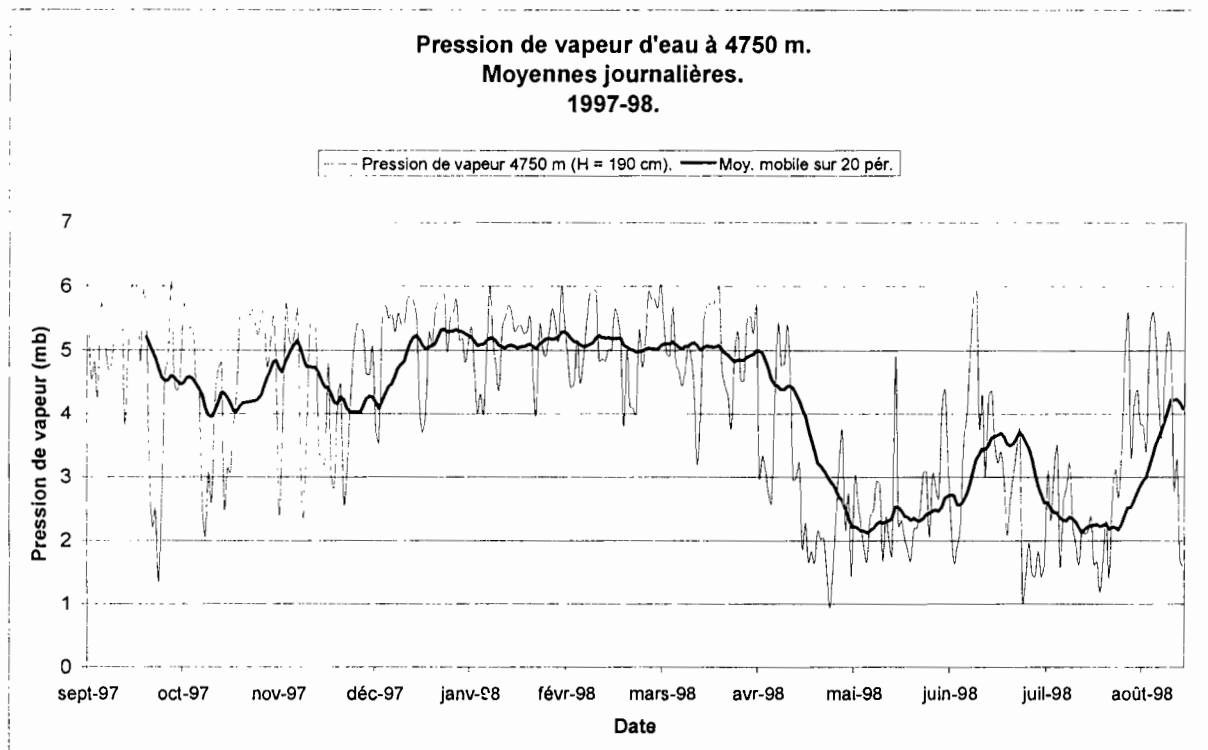


Figure G.1

A 4750 m, les mesures hautes présentent une saisonnalité assez nette : les pressions de vapeur les plus importantes sont relevées en septembre, novembre et de janvier à fin mars, c'est à dire pendant la saison des pluies, mais aussi en juin et août lors de journées pluvieuses. Les pressions de vapeur les plus basses correspondent aux mois secs ou aux périodes de transitions. Tout au long de l'année, les valeurs sont comprises entre 1 et 6 mb, 6.11 mb correspondant à la saturation à 0°C.

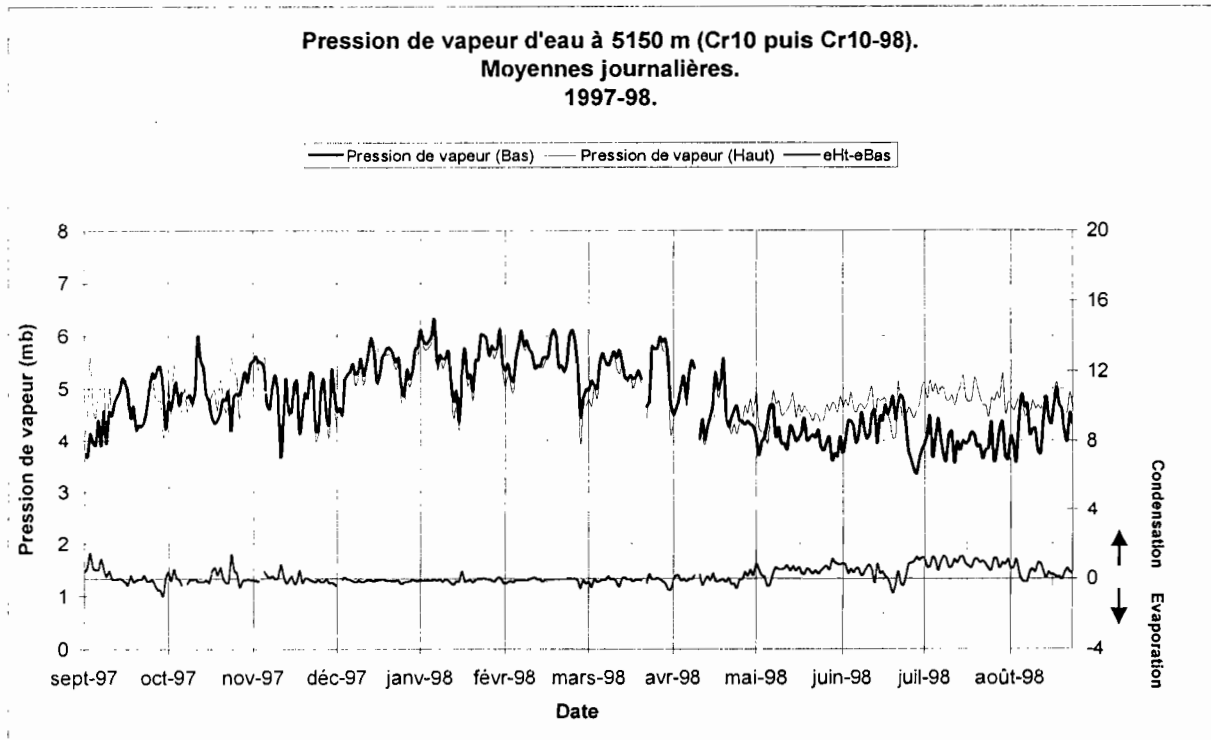


Figure G.2

A 5150 m, les mesures basses et hautes sont pratiquement identiques pendant la saison des pluies de décembre à mars, la différence entre la pression de vapeur “ haute ” et “ basse ” est très constante et comprise entre -0.97 et +1.15 mb, pour une moyenne de +0.15 mb (Figure G.2), ce qui correspond à une situation de légère condensation. De mai à fin août, la différence eBas – eHaut devient négative et correspond à une situation de condensation. Nous verrons plus en détail une partie de cette période sur la Figure G.6.

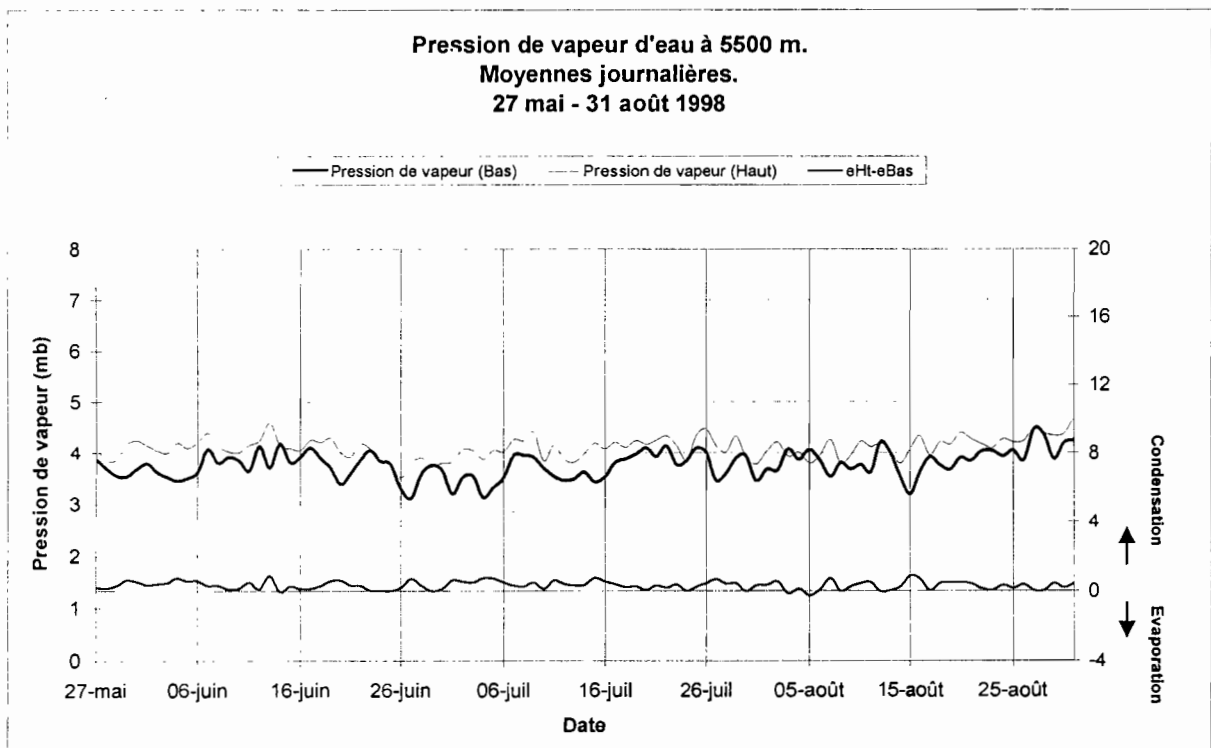


Figure G.3

A 5500 m, la période de données est assez limitée et ne représente qu'une partie de la saison sèche : du 27 mai 98 au 31 août 98. La différence des pressions est comprise entre -0.26 et $+0.88$ mb, pour une moyenne sur la période de $+0.33$ mb (Figure G.3). Comme à 5150 m, nous sommes en situation de condensation.

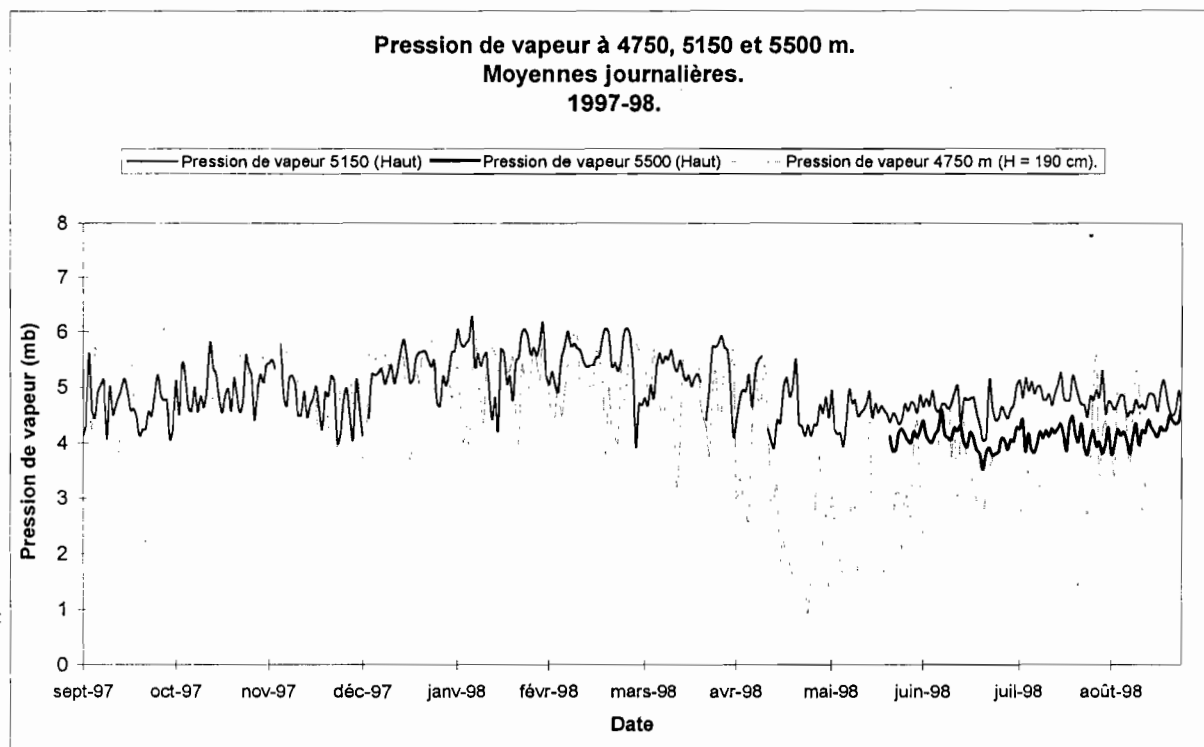


Figure G.4

La Figure G.4 nous permet de comparer les séries à 4750, 5150 et 5500 m. La saisonnalité est assez bien marquée surtout pour la Mévis : pressions de vapeur d'eau plus fortes pendant la saison des pluies ou lors des journées pluvieuses de la saison sèche. Sur le glacier, on observe un effet tampon où les variations sont plus faibles. Les pressions de vapeur mesurées à 4750 m d'altitude restent inférieures et de plus faible amplitude que celles mesurées à 5150 et 5500 m.

G. 2. Moyennes demi-horaires

Nous avons représenté sur les Figures G.5 et G.6 les pressions de vapeur hautes et basses ainsi que leur différence à 5150 m pour deux périodes de huit jours : du 1^{er} au 7 janvier 98 et du 3^{er} au 9 juillet 98. La première période correspond aux conditions de la saison des pluies et la seconde à celles de la saison sèche. Cette deuxième période n'a pas connu de précipitations.

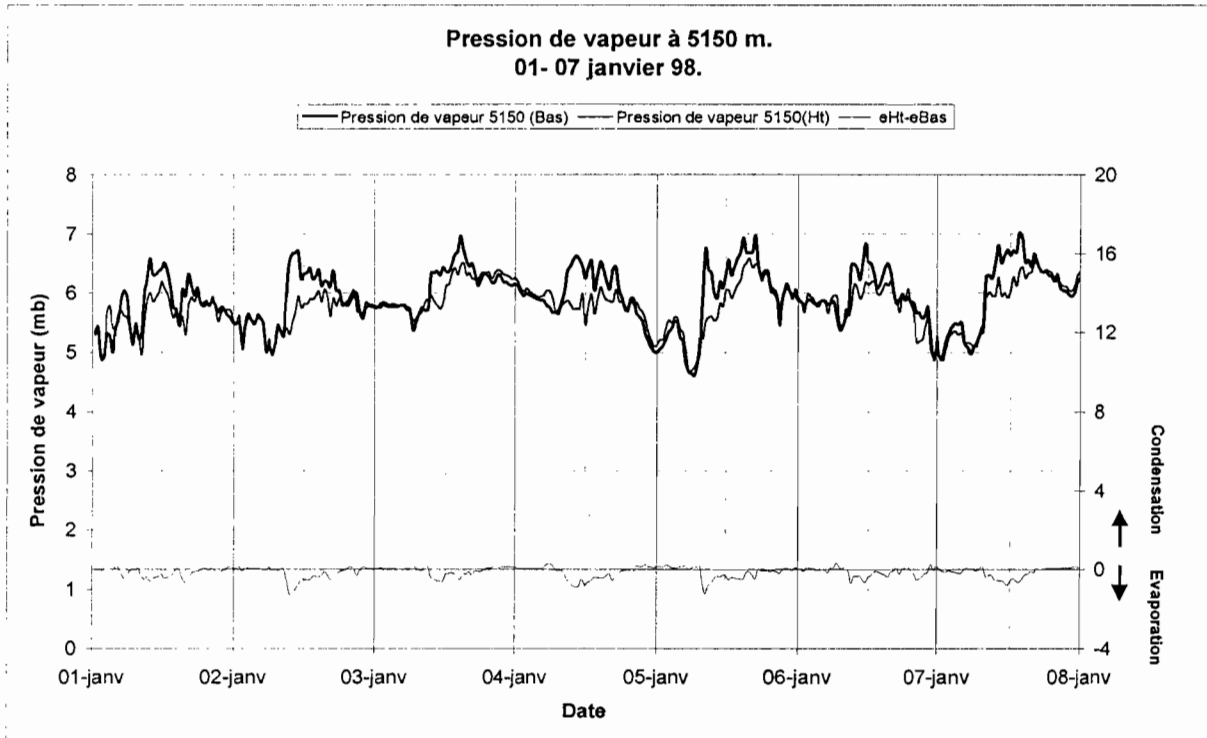


Figure G.4

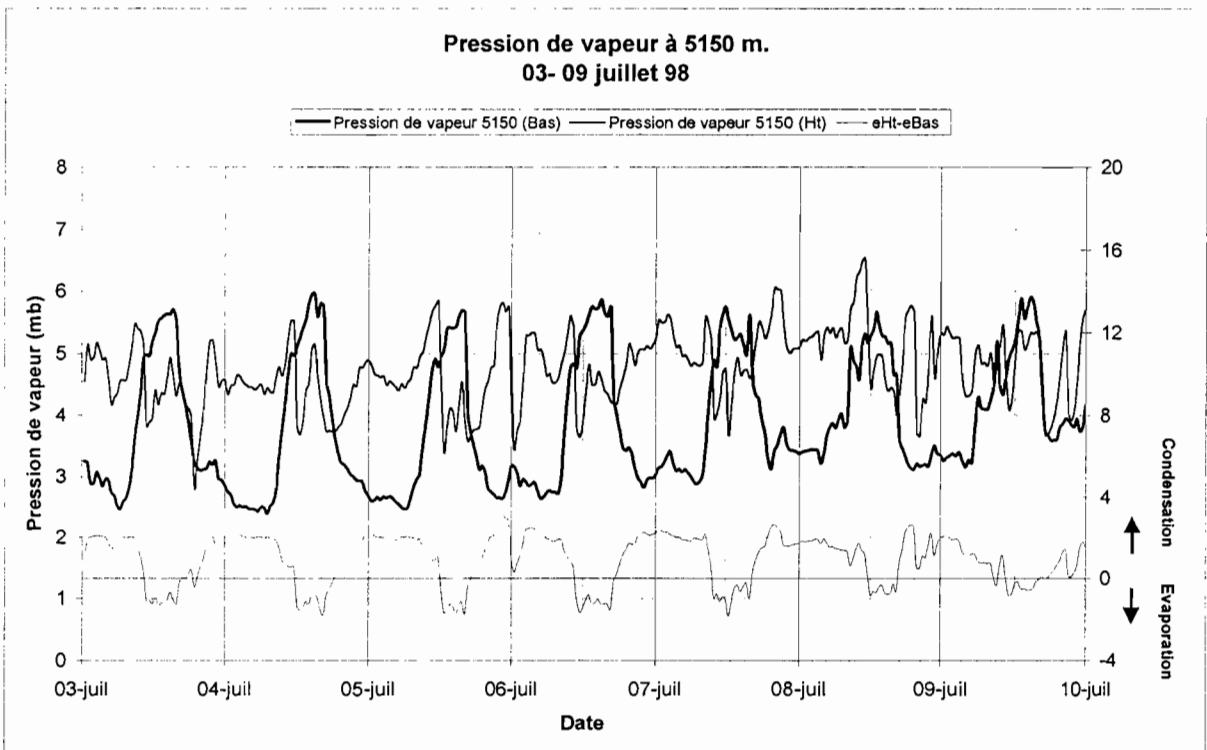


Figure G.5

On remarque pour ces deux périodes un cycle jour/nuit important, surtout en saison sèche. En janvier, $e_{Bas} > e_{Haut}$ en journée de 8-9h à 16-17h (évaporation). Ensuite pendant la nuit et jusqu'au lendemain matin, les pressions de vapeur sont identiques. En juillet, on observe toujours une différence entre le jour et la nuit : en journée, les pressions de vapeur d'eau " basses " sont plus fortes que les pressions de vapeur " hautes " comme en janvier

(évaporation), mais le comportement est différent la nuit : on a $e_{Bas} < e_{Haut}$ (situation de condensation).

On a donc une alternance de situation d'évaporation/sublimation, plutôt le jour, et de condensation plutôt la nuit. Cette alternance est surtout marquée en saison sèche. En saison des pluies, les pressions de vapeur ont des valeurs plus élevées qu'en saison sèche. Par contre, l'amplitude jour/nuit est plus grande en saison sèche.

En juillet, l'évaporation et la sublimation sont un peu plus importantes qu'en saison des pluies. Pourtant en moyenne journalière, le gradient $e_{Bas} < e_{Haut}$ domine (condensation, Cf. Figures G.2, G.5 et G.6), ce qui semble paradoxale puisque c'est pendant cette période que l'on a le plus de pénitents qui correspondent à des conditions météorologiques ensoleillées, sèches et modérément froides, donc à des situations d'évaporation/sublimation importantes. On ne peut conclure sur les flux turbulents seulement à partir des gradients de vapeur d'eau, il faudrait prendre en compte la stabilité thermodynamique de l'atmosphère (stable le jour, très stable la nuit), la variation de la hauteur de rugosité, et de plus il faut rappeler que l'apparition en journée d'un maximum de température vers 30 cm au-dessus de la surface (Wagnon., 1999) limite le calcul des flux turbulents à quelques dizaines de cm d'épaisseur au-dessus de la surface.

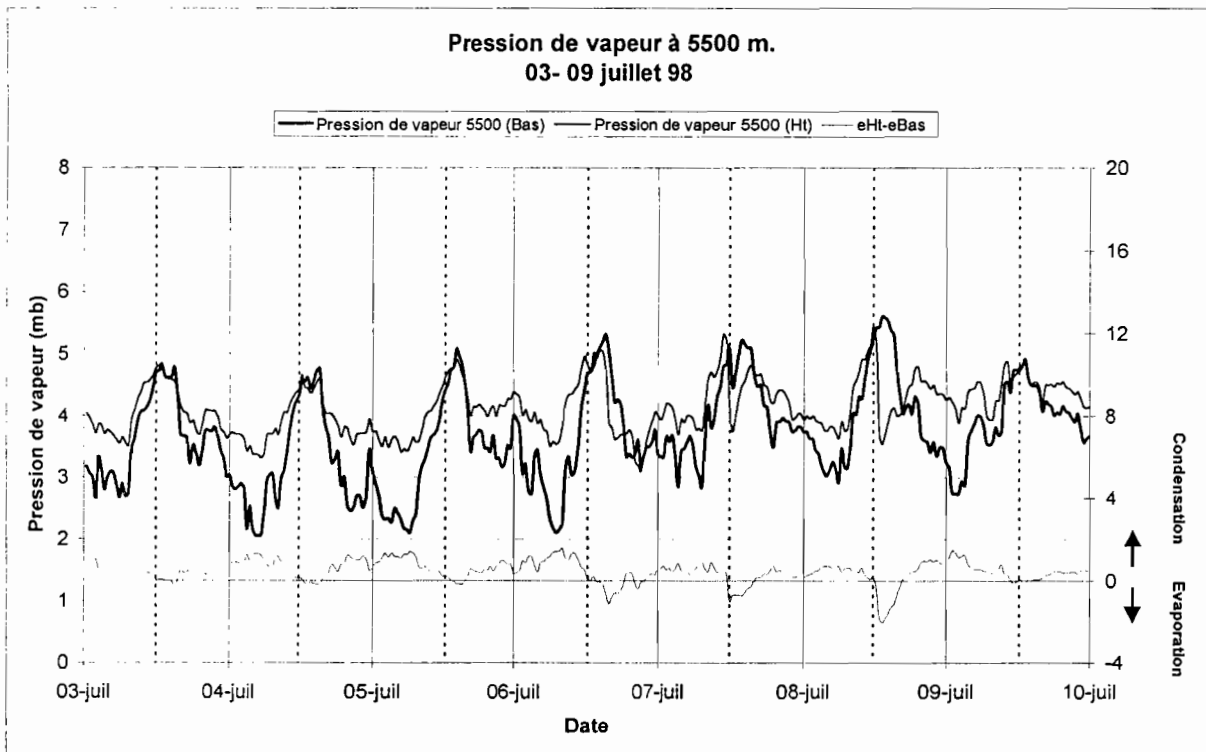


Figure G.6

A 5500 m, on a le même ordre de grandeur de pression de vapeur qu'à 5150 m. On observe également une différence entre le jour et la nuit. Les pressions de vapeurs sont assez identiques dans la journée de 11h à 16h, avec e_{Bas} légèrement supérieure à e_{Haut} (évaporation). Ensuite, la nuit jusqu'au lendemain midi, la pression de vapeur basse est plus faible que la mesure haute (condensation). On retrouve la situation d'évaporation/sublimation le jour et de condensation la nuit. L'amplitude de $e_{Bas} - e_{Haut}$ est plus faible qu'à 5150 m : on a sans doute moins d'évaporation.

Même si l'on a vu quelques différences, globalement on observe le même cycle jour/nuit, en saison des pluies et en saison sèche, à 5150 comme à 5500 m.

G. 3. Moyennes mensuelles à 5150 m

Le Tableau G.1 regroupe les moyennes mensuelles de la pression de vapeur enregistrée aux différentes altitudes. La Figure G.7 illustre ce Tableau.

	e5150Bs	e5150Ht	e5500Bs	e5500Ht	eMévis
sept-97	4.58	4.68			5.21
oct-97	4.86	4.94			4.01
nov-97	4.88	4.85			4.59
déc-97	5.33	5.21			4.85
janv-98	5.59	5.50			5.22
févr-98	5.65	5.58			5.14
mars-98	5.31	5.20			4.97
avr-98	4.92	4.81			4.36
mai-98	4.16	4.52	3.68	4.05	2.27
juin-98	4.28	4.65	3.75	4.07	3.18
juil-98	3.91	4.84	3.71	4.10	2.41
août-98	4.27	4.75	3.89	4.16	3.42
Moyenne 97-98	4.81	4.96	3.75	4.10	4.14
Moyenne 96-97		4.64	4.45		4.88
Moyenne 95-96		4.62	*		4.79

* non calculée

Tableau G.1

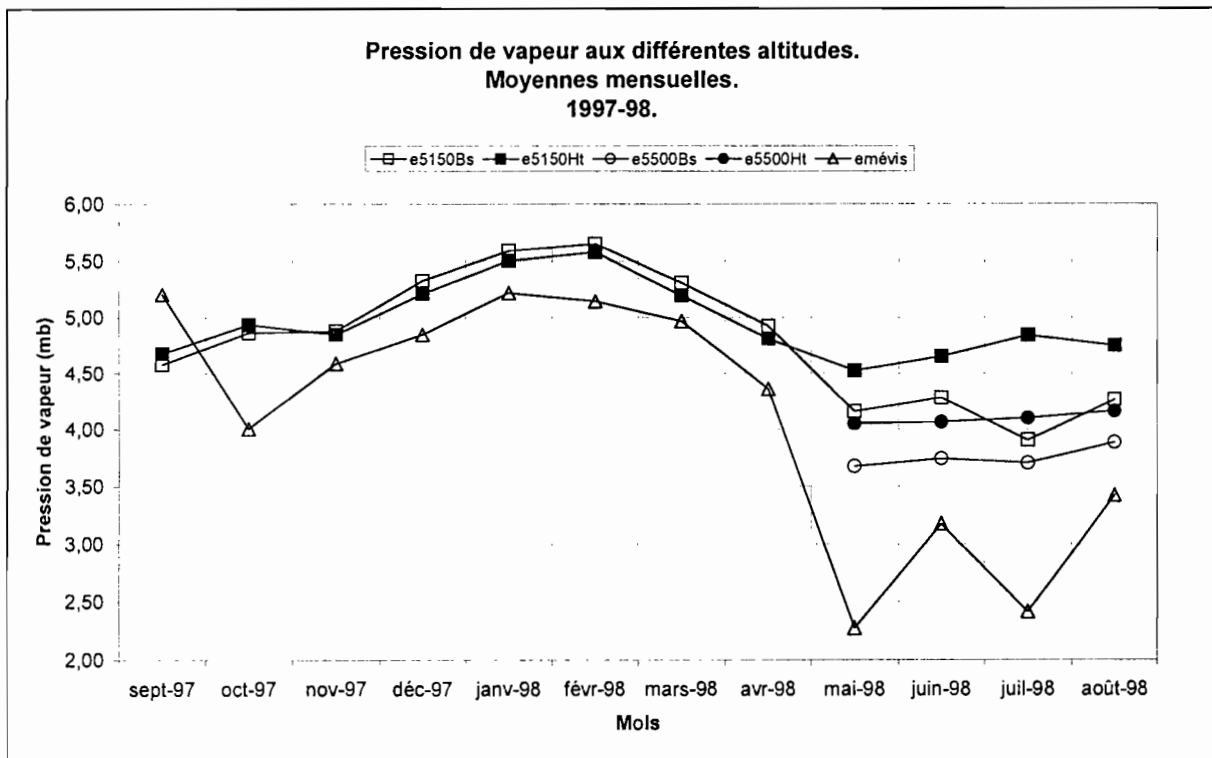


Figure G.7

L'évolution annuelle des pressions de vapeur aux différentes altitudes au cours de l'année est assez semblable. La saisonnalité est marquée.

On a aussi $e_{5150} > e_{5500}$ tout au long de l'année. A 5150 m la moyenne annuelle de la pression de vapeur est plus forte que celles des années passées.

L'évolution des pressions de vapeur d'eau enregistrées à la Mévis est globalement identique à l'évolution sur le glacier mais présente quelques différences notamment en juin où la pression de vapeur d'eau augmente brusquement, correspondant à un épisode pluvieux bien enregistré. La saisonnalité est plus grande comme on l'a vu pour les moyennes journalières.

H. VITESSE ET DIRECTION DU VENT

H. 1. Mesures disponibles

Les mesures disponibles concernent la Plataforma et le glacier (Cf. chapitre B) :

- 1- Plataforma (4750 m) : vitesse du vent à 230 cm de hauteur
- 2- Station Campbell à 5150 m : direction et vitesse du vent à 30 et 180 cm de hauteur.
- 3- Station Campbell à 5500 m : direction et vitesse du vent à 250 cm de hauteur à partir du 23 octobre 1996.

H. 2. Vitesse et direction du vent à 5150 m (valeurs instantanées), évolution des gradients entre 30 et 180 cm de hauteur

Nous présentons ci-dessous les moyennes demi-horaires de la vitesse du vent à 30 et 180 cm ainsi que la direction du vent pour deux journées, une de la saison des pluies et l'autre de la saison sèche : le 12 février 1998 (journée neigeuse) et le 1^{er} juin 98 (journée de beau temps, surface correspondant à de la glace). Figures H.1 à H.4.

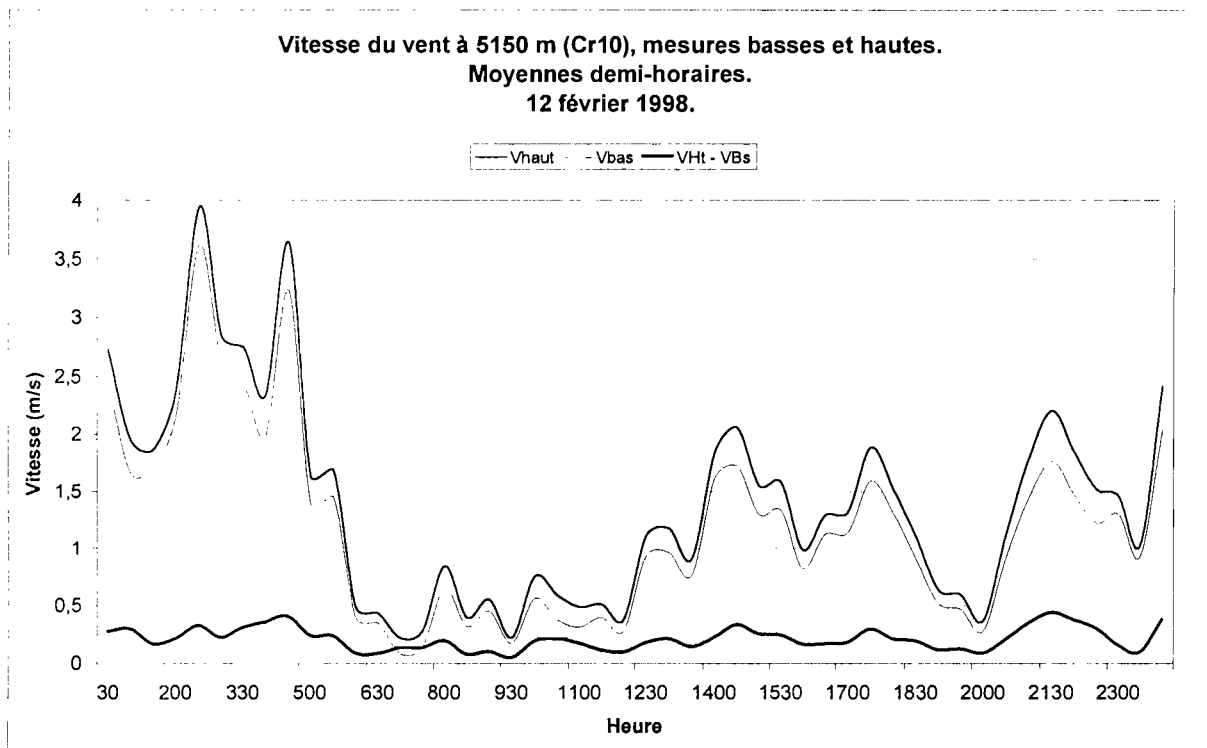


Figure H.1

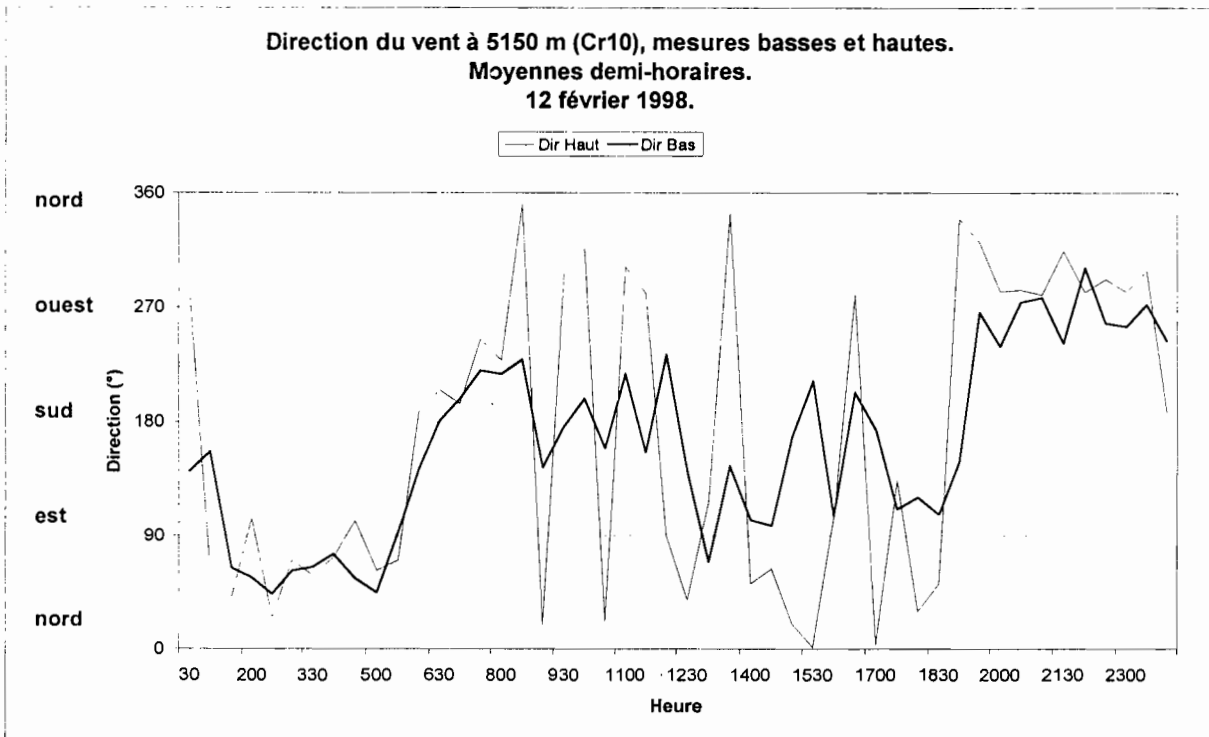


Figure H.2

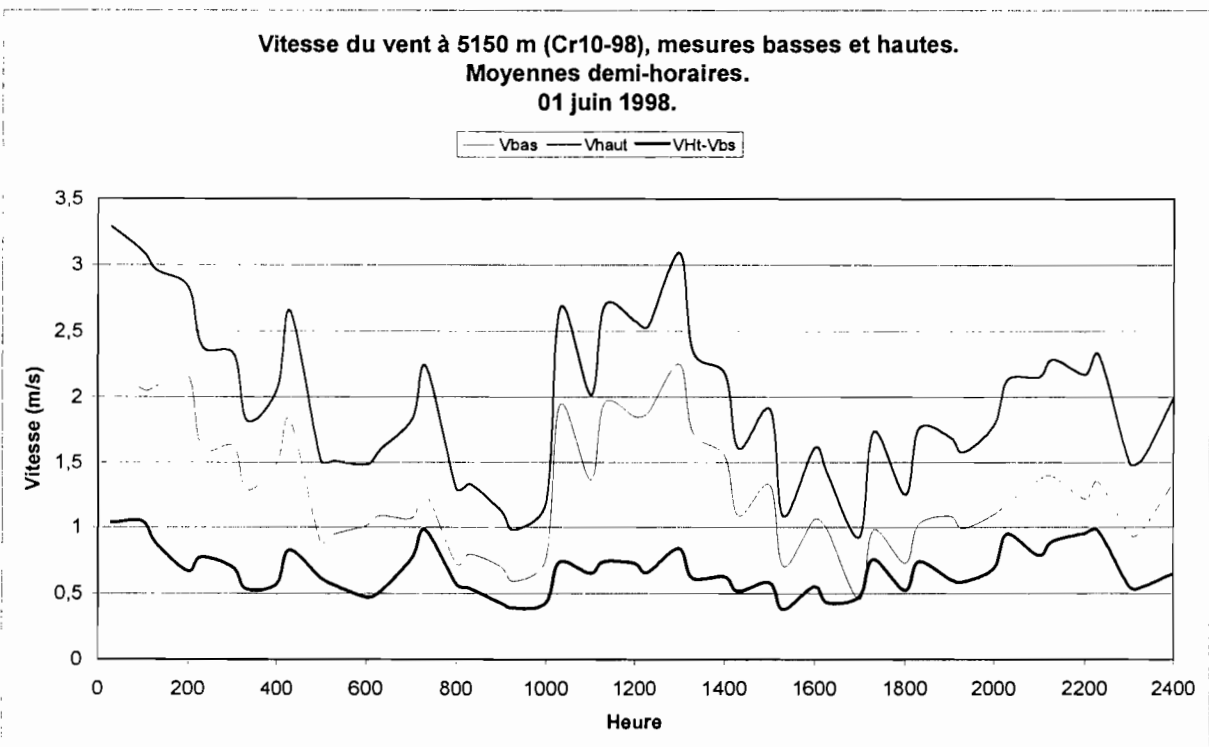


Figure H.3

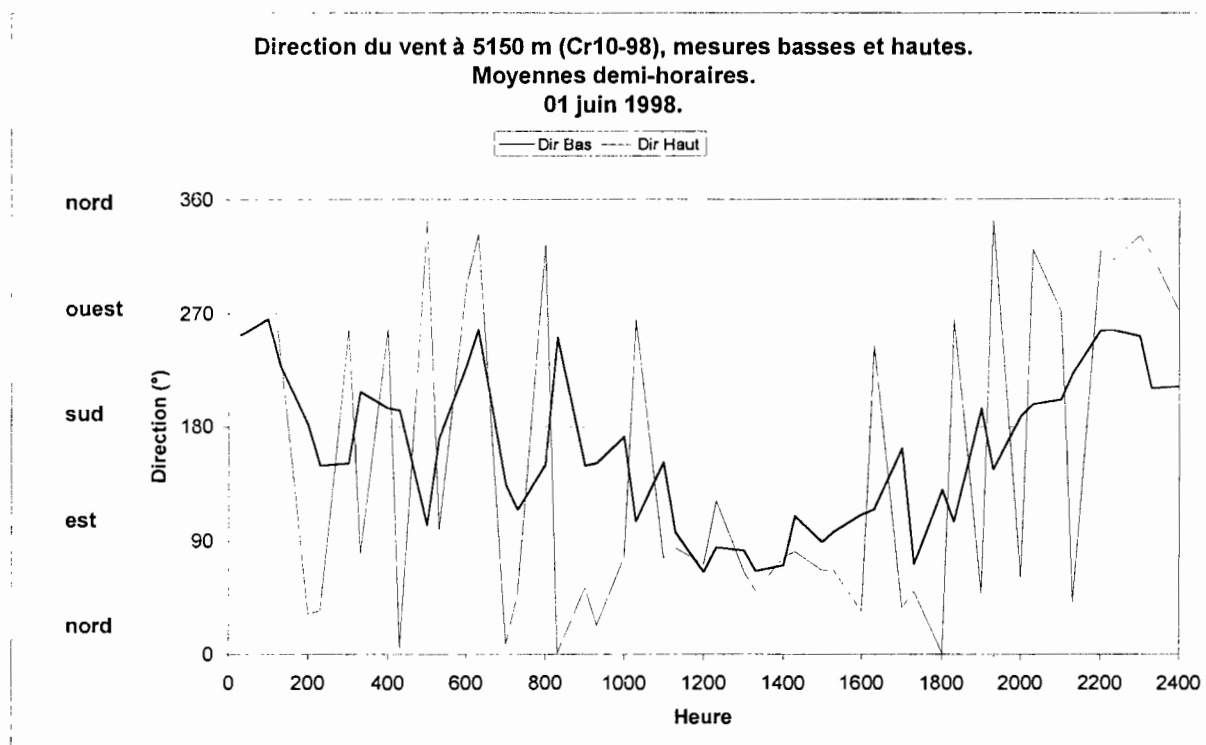


Figure H.4

Vitesse du vent

Pour les deux journées présentées, les vitesses mesurées à 180 cm de hauteur sont toujours plus fortes que celles mesurées à 30 cm : en effet le vent est freiné par les rugosités de surface (profil logarithmique de la vitesse du vent). Le 12 février, les vitesses basses et hautes du vent sont très bien corrélées ($R^2 = 0.99$, 47 points) et sont comprises entre 0 et 4 m/s. La différence $V_{\text{haut}} - V_{\text{bas}}$ est très régulière et comprise entre 0 et 0.5 m/s. Le 1^{er} janvier, la vitesse haute est comprise entre 1 et 3.5 m/s et la vitesse basse entre 0.5 et 2.5 m/s. La différence $V_{\text{Haut}} - V_{\text{Bas}}$ fluctue entre 0.5 et 1 m/s. Sur ces deux journées on remarque que le gradient s'élève pour les vitesses élevées. En journée le 12 février, c'est entre 14h et 18 h que la vitesse du vent est la plus forte et le 1^{er} janvier entre 10h et 14h. Mais c'est la nuit que globalement les vitesses sont les plus importantes (vent catabatique).

Direction du vent

On dispose des mesures chaque demi-heures de la direction du vent. Le 12 février, le sens du vent entre 2h et 5h est nord-est (vent venant de la vallée) alors que sur le reste de la journée il vient plutôt du nord, sauf entre 20h et 23h où il est nord-ouest. Le 1^{er} juin 98, on observe un vent venant du nord-est en milieu de journée entre 12h et 15h. Le reste de la journée la provenance dominante des vents est globalement nord.

Pour ces deux dates, les directions à 30 cm et à 180 cm sont assez différentes tout au long de la journée, sauf lorsque le vent provient de la vallée (nord-est) où l'on remarque que ces vents correspondent aux vents qui ont les vitesses les plus élevées. Quand la vitesse du vent est plus faible, on observe un décalage entre les directions hautes et basses du vent (la direction haute étant en avance). Dans des conditions de vent très faible à nul, les girouettes peuvent s'immobiliser dans les directions du dernier vent le plus fort : les directions peuvent être totalement différentes entre le haut et le bas et les mesures suivantes sont alors fausses.

On considère que la direction haute du vent est la plus représentative parce que la moins sujette aux perturbations dues aux frottements en surface.

Des mesures à un pas de temps très court (toutes les 15 secondes par exemple) durant quelques minutes et activées toutes les heures permettraient de quantifier le retard de la direction mesurée à 30 cm sur celle mesurée à 180 cm.

Les figures suivantes présentent les vitesses du vent à 4750, 5150 et 5500 m pour une période de 6 jours : du 1^{er} au 6 août 1998.

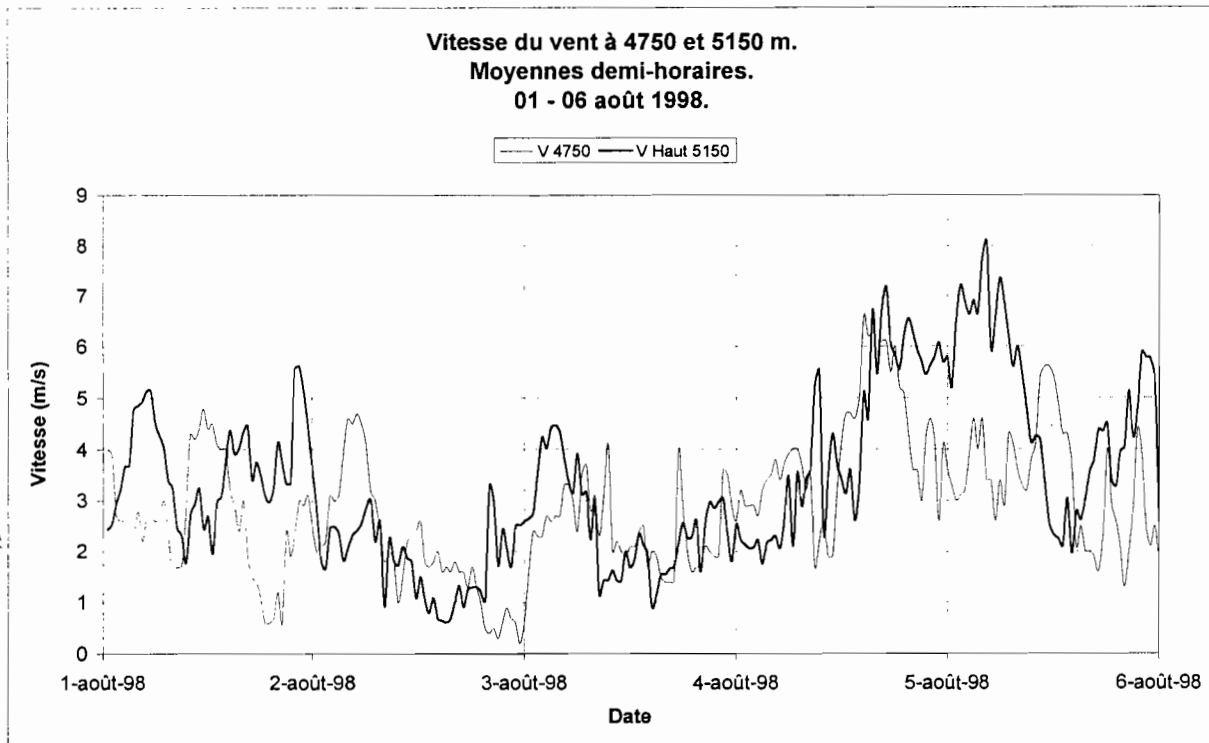


Figure H.5

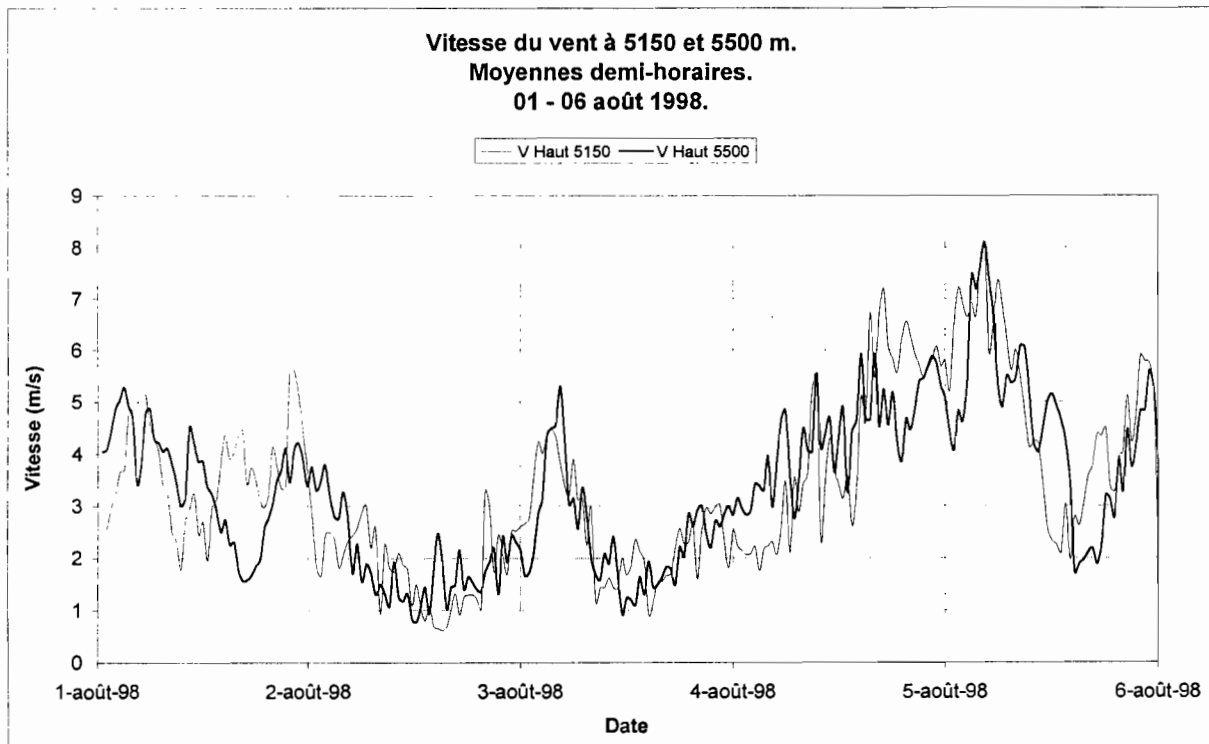


Figure H.6

La Figure H.5 compare les valeurs hautes à 4750 et 5150 m. Les vitesses sont très différentes : aux vitesses élevées sur le glacier correspondent des vitesses faibles à la plateforme et inversement. La vitesse du vent à 5150 m est en moyenne plus élevée qu'à 4750 m. Les régimes de vent sur le glacier sont différents de ceux de la Plataforma et de la vallée du Zongo.

Sur la Figure H.6 où sont représentées les vitesses du vent sur le glacier à 5150 et 5500 m, on observe également de fortes différences. Par contre, les différences entre les vitesses à 5150 et 5500 m sont plus faibles qu'entre la Plataforma et 5150 m.

H. 3. Valeurs journalières à 4750 m, 5150 m et 5500 m

La Figure H.7 représente les moyennes journalières des mesures hautes 4750, 5150 et 5500 m.

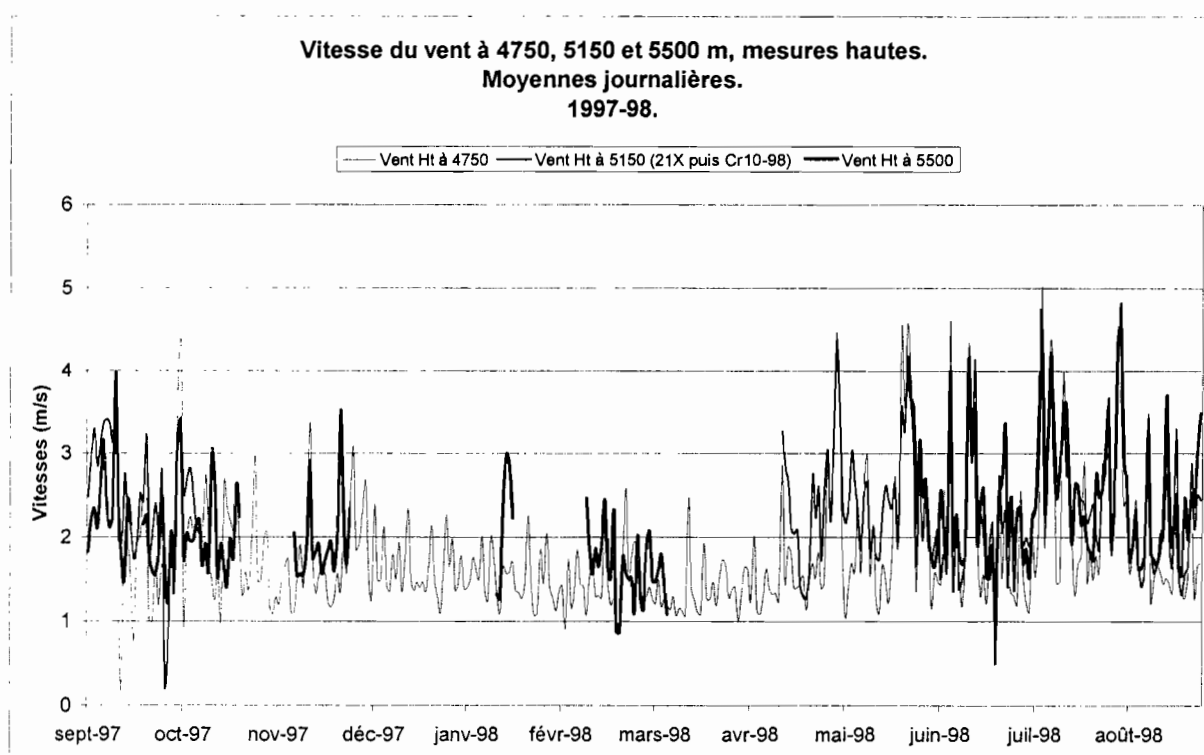


Figure H.7

Toutes les stations enregistrent une évolution saisonnière de la vitesse du vent et aucun gradient de la vitesse avec l'altitude n'apparaît. La vitesse du vent en saison sèche est plus forte qu'en saison des pluies : le maximum atteignant 5 m/s est mesuré à 4750 m au mois de juillet. La différence saison humide-saison sèche est d'environ un m/s.

H. 4. Valeurs mensuelles à 4750 m, 5150 m et 5500 m

Les séries complètes des moyennes mensuelles à 4750 5150 et 5500 m font bien apparaître l'effet saisonnier de la vitesse du vent, soit une augmentation en saison sèche de moins d'1 m/s environ (Cf. Tableau H.1, Figure H.8). La vitesse du vent à 5500 m est systématiquement supérieure à celle de 4750 m.

A 5150 m, les séries sont celles de la Cr10 puis Cr10-98 puisque les données de la station 21X sont très incomplètes dues à un mauvais fonctionnement des anémomètres (Cf. chapitre B).

Les moyennes annuelles à 4750, 5150 et à 5500 m sont très proches de l'année 1996-97 (Cf. Tableau H.1) : 1.72 m/s à 4750 m, 1.85 pour le vent haut à 5150 m et 3.31 m/s à 5500 m.

	4750	5150 Bas	5150 Ht	5500 Ht
sept-97	1.56	2.25	1.86	2.16
oct-97	1.92	2.05	1.87	2.07
nov-97	1.75	1.89	1.70	1.97
déc-97	1.62	1.71	1.49	
janv-98	1.53	1.49	1.29	2.19
févr-98	1.48	1.44	1.20	1.70
mars-98	1.34	1.52	1.23	1.53
avr-98	1.49	1.68	1.27	
mai-98	2.41	1.85	2.63	3.35
juin-98	2.01	1.06	2.13	2.29
juil-98	2.24	1.06	2.57	2.57
août-98	1.95	1.35	2.31	2.44
Moyenne	1.78	1.61	1.80	2.23

Données en m/s

Tableau H.1

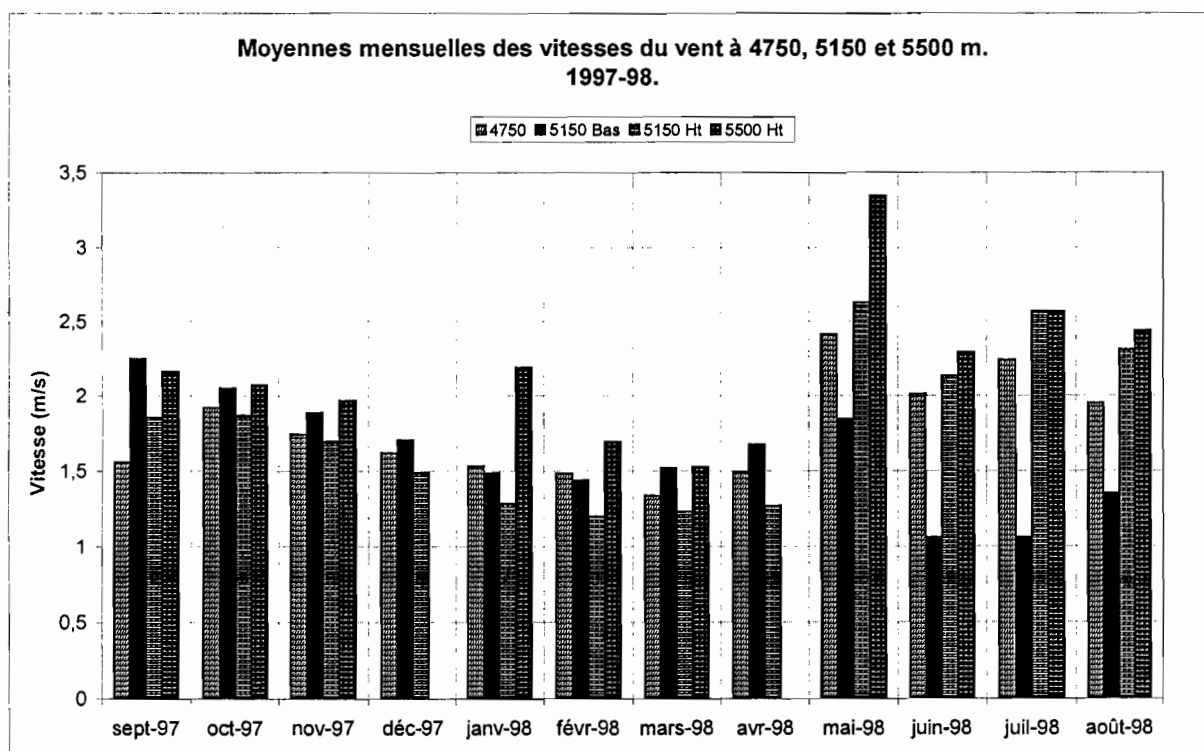


Figure H.8

I. MESURES DE LA SONDE A ULTRASON A 5150 M

Nous présentons dans ce chapitre les mesures de la sonde à ultrason installée sur le glacier à 5150 m. On enregistre la distance entre le sol et le capteur toutes les 30 minutes.

La Figure I.1 présente la variation de la distance sonde/surface du glacier du 15 janvier au 31 août 1998, seule période de l'année hydrologique disponible. Lorsque la distance augmente, il s'agit d'une période d'ablation, de transformation de la neige ou d'un simple tassement sans perte en équivalent eau. Inversement sa diminution correspond à une période d'accumulation.

Lors du démantèlement de la station 21X et de l'installation de la station de référence Cr10-98 (16/04/98), nous avons été confrontés au problème du calage des deux séries de la sonde puisque le jour du démantèlement 9 mm de précipitation ont été enregistrés à la Plataforma. La correction est effectuée de manière à prendre en compte la précipitation le jour du changement de sonde.

Les données postérieures au 6 mai ont été corrigées afin de prendre en compte une baisse du capteur de 143 cm à 139 cm effectuée ce jour là (Cf. rapport de visite du 06/05/98).

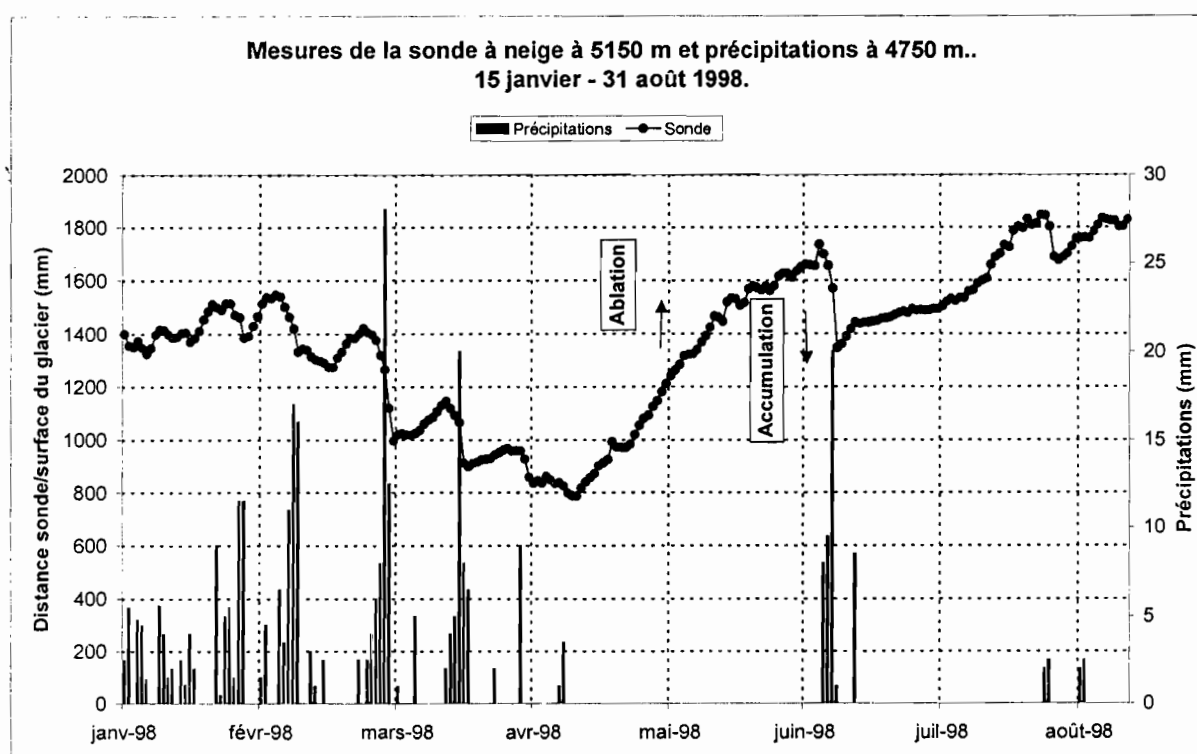


Figure I.1

On observe la plus forte ablation pendant les mois de la saison sèche d'avril à fin juillet et surtout pendant le mois de mai. Cette ablation est interrompue mi-juin par un épisode neigeux important, environ 40 cm de neige à 5150 m. L'ablation de fin avril à début juin est de 1 m de glace soit environ 90 cm d'eau.

L'accumulation s'est faite pendant la saison des pluies mais d'une manière discontinue puisque les précipitations cette année sont moins nombreuses et une ablation est observée tout au long de l'année.

La Figure I.2 présente la variation journalière de la distance sonde/surface : on peut donc à partir de cette figure distinguer les jours d'ablation nette et ceux où l'on a une accumulation nette.

On remarque sur cette période que les journées d'ablation sont prépondérantes et que cette ablation est assez régulière, interrompue par des précipitations neigeuses.

Les mois de la saison des pluies (de janvier à mars) sont les mois qui enregistrent le plus de précipitations neigeuses.

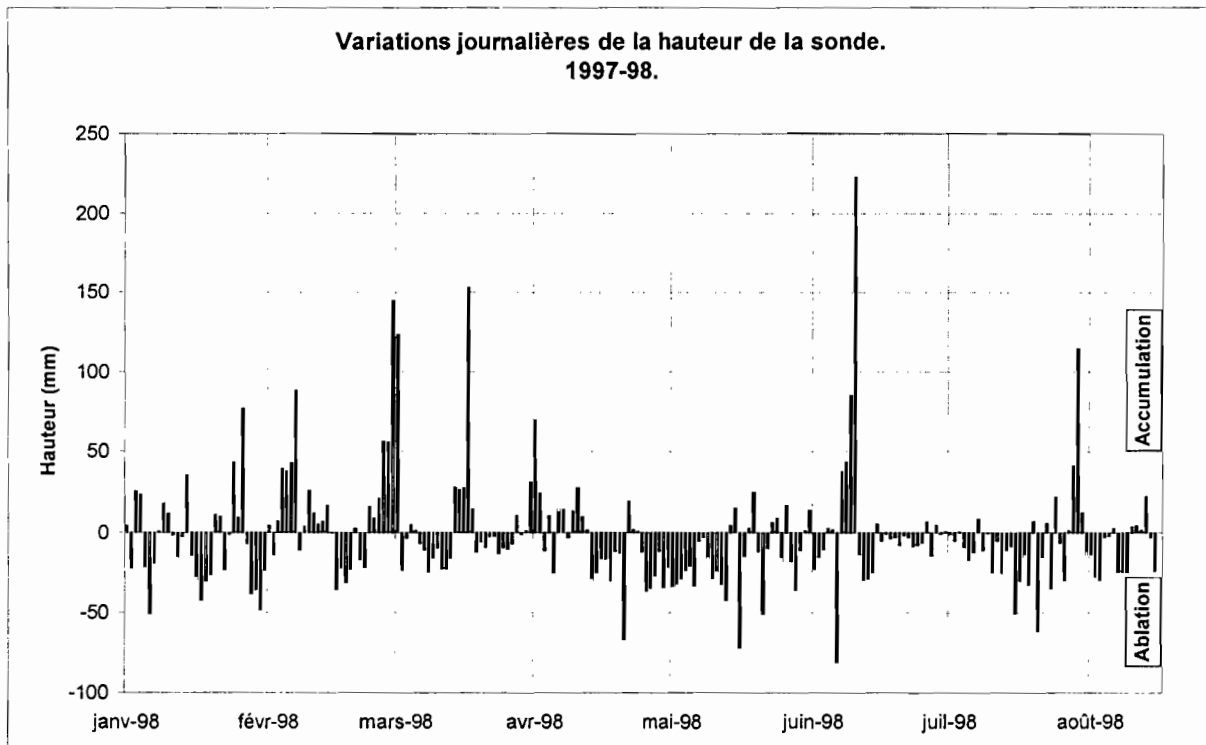


Figure I.2

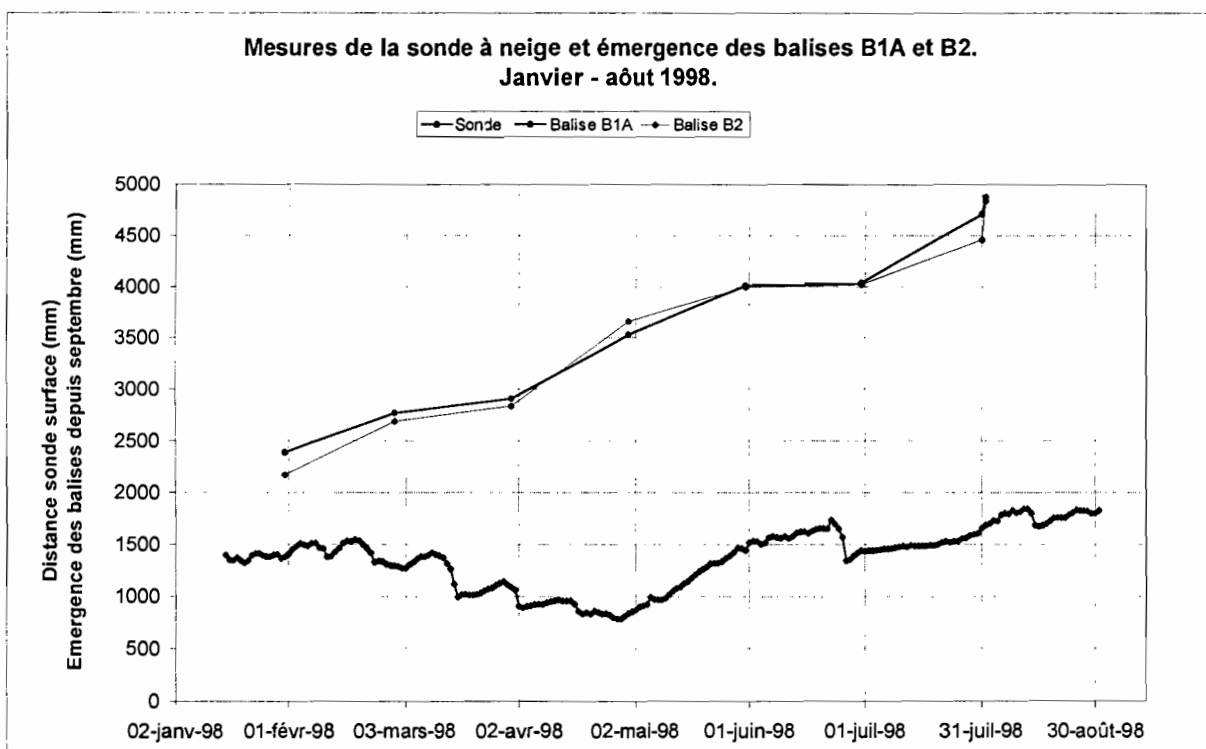


Figure I.3

On a représenté sur un même graphique (Figure I.3) les données de la sonde et l'émergence depuis le début du mois de septembre des balises les plus proches de la sonde. Ces balises sont peu nombreuses et les données des deux que nous avons retenues (B1A et B2) présentaient des aberrations dues sans doute à des erreurs de relevé d'émergence et de numéro de balise. En corrigeant ces erreurs, on retrouve une même évolution pour les deux balises. L'évolution des données de la sonde et des deux balises est assez identique, sauf de février à mars où la sonde montre une légère accumulation alors que les balises indiquent une ablation, de mars à avril : sonde en accumulation, balises en très légère ablation et d'avril à mai où la sonde indique une légère accumulation alors que les balises montrent une ablation de 50 cm. D'une manière générale, l'ablation est plus prononcée au niveau des balises que de la sonde. L'année dernière on observait également pour certains mois une ablation plus forte au niveau des balises. Les importantes différences de mesures (plus de 2.5 m de variation aux balises sur six mois pour 0.3 m de variation à la sonde sur la même période) sont certainement dues aux emplacements des balises sous le vent alors que la sonde est située dans une cuvette. Des effets locaux sur la fonte sont également possibles au niveau des balises. D'où le problème de représentativité des balises et de la sonde.

J. GLACIOLOGIE

J.1. L'accumulation mesurée en fin d'année hydrologique

Il s'agit du bilan net estimé à la fin de l'année hydrologique 97-98 par forages et mesures densimétriques dans la partie haute du glacier qui correspond à la zone d'accumulation. Cette année les sondages ont été réalisés seulement à la fin de la saison hydrologique, contrairement aux années précédentes où l'on effectuait en plus des sondages à la fin de la saison des pluies ; les valeurs entre mai et septembre étaient très proches (différence maximale de 5%).

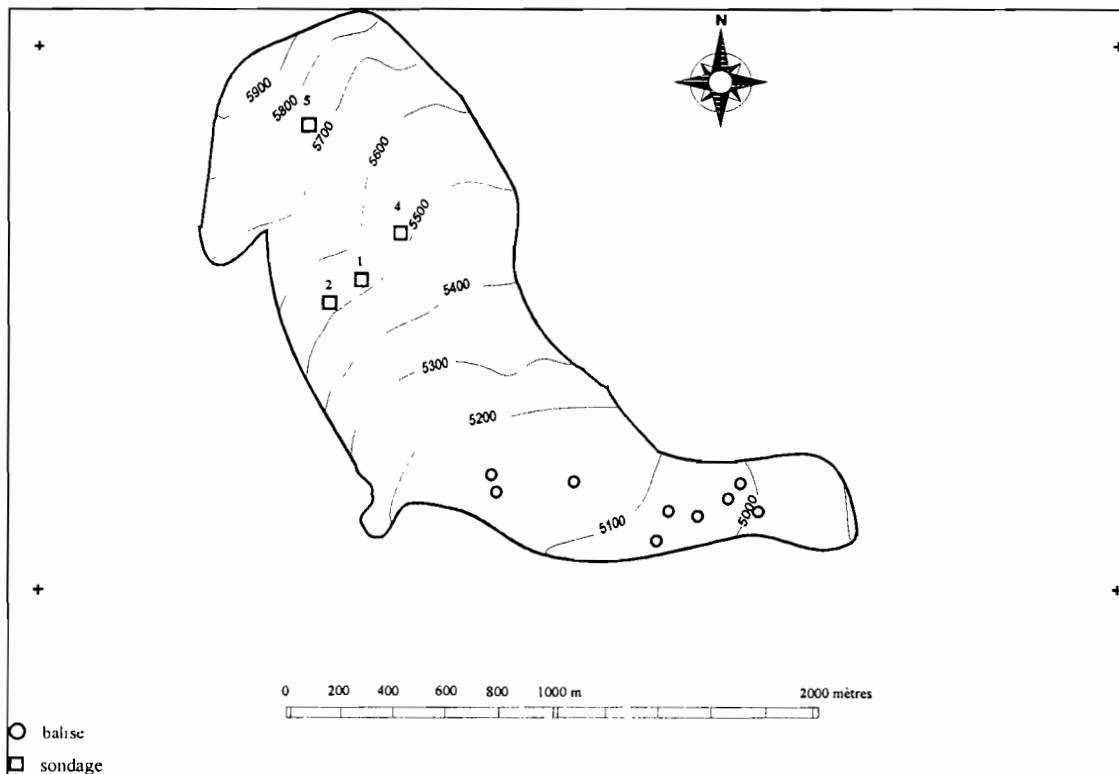


Figure J.1

Sur la carte ci-dessus (Figure J.1) on localise l'emplacement des puits qui nous ont permis de mesurer le bilan net de l'année hydrologique de la zone d'accumulation lors de la mission du 11 septembre 1998 : sondage n°2 (5520 m, au niveau de la station Campbell), sondage n°4 (5520 m, Combe Est) et le sondage n°5 (5700 m, pente sud du Sommet Sud). La numérotation des sondages est identique à celle utilisée les années précédentes. Sur la Figure J.1 on ne représente que les sondages utilisés cette année.

Nous avons seulement 3 sites dans cette zone car le mauvais temps ne nous a pas permis d'en réaliser d'autres. De plus, les années précédentes des essais avec davantage de puits ont montré une bonne homogénéité des mesures obtenues, puisque dans cette zone on a des précipitations convectives dans des conditions peu ventées et transformation en quelques jours de la neige vers des densités entre 0.4 et 0.5 g/cm³.

J.1.1. Résultats des différents sondages

Les résultats des sondages réalisés cette année sont consignés dans les Tableaux J.1 et J.2, illustrés par les Figures J.2 et J.3 : on a pesé à différentes profondeurs des carottes de neige qui nous permettent de calculer la densité à ces profondeurs, ce qui nous donne une densité moyenne sur la profondeur totale. On traduit cette densité moyenne en tranche d'eau qui correspond au bilan net de la tranche d'altitude considérée.

L (cm)	L cum(cm)	Pb (g)	Pn (g)	Vol.(cm ³)	D (g/cm ³)	WE (mm)
16.0	16.0	742	216	530.9	0.41	65.1
16.0	32.0	762	236	530.9	0.44	71.1
16.0	48.0	759	233	530.9	0.44	70.2
16.0	64.0	746	220	530.9	0.41	66.3
16.0	80.0	761	235	530.9	0.44	70.8
80.0					0.43	344

Tableau J.1 : Sondage 2 : Altitude : 5520 m. ; site : 50 m au N-E de la station météo. Station météo inaccessible à cause d'une crevasse ; accumulation nette : 334 mm d'eau

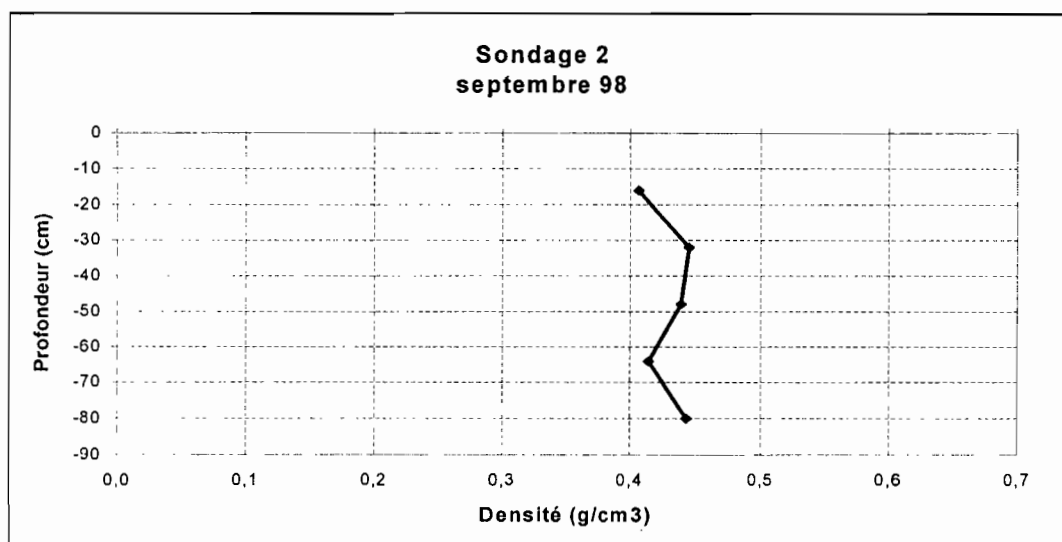


Figure J.2

L (cm)	L cum(cm)	Pb (g)	Pn (g)	Vol.(cm ³)	D (g/cm ³)	WE (mm)
16	16	713	187	530.93	0.35	56.35
16	32	853	327	530.93	0.62	98.54
16	48	840	314	530.93	0.59	94.63
16	64	840	314	530.93	0.59	94.63
16	80	840	314	530.93	0.59	94.63
80					0.55	439

Tableau J.2 : Sondage 4 : Altitude : 5520 m ; site : Combe Est ; accumulation nette : 439 mm d'eau

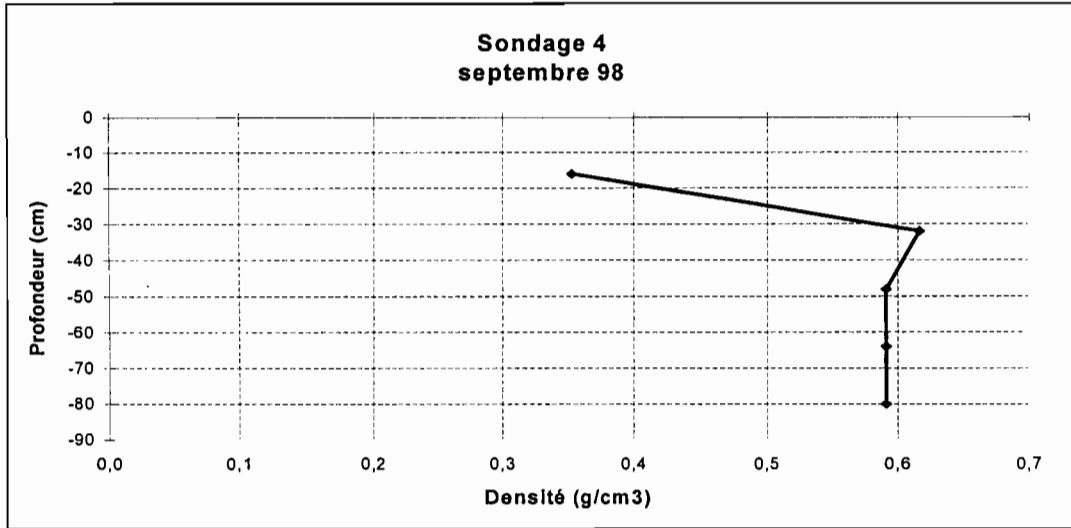


Figure J.3

L (cm)	L cum(cm)	Pb (g)	Pn (g)	Vol.(cm ³)	D (g/cm ³)	WE (mm)
16.0	16.0	703	177	530.9	0.33	53.3
16.0	32.0	683	157	530.9	0.30	47.3
16.0	48.0	723	197	530.9	0.37	59.4
16.0	64.0	701	175	530.9	0.33	52.7
16.0	80.0	721	195	530.9	0.37	58.8
16.0	96.0	740	214	530.9	0.40	64.5
16.0	112.0	741	215	530.9	0.40	64.8
16.0	128.0	763	237	530.9	0.45	71.4
16.0	144.0	760	234	530.9	0.44	70.5
16.0	160.0	760	234	530.9	0.44	70.5
16.0	176.0	786	260	530.9	0.49	78.4
176.0					0.39	692

Tableau J.3 : Sondage 5 : altitude : 5700 m ; site : pied de la Voie des Français (pente sud du Sommet Sud) ; accumulation nette : 692 mm d'eau

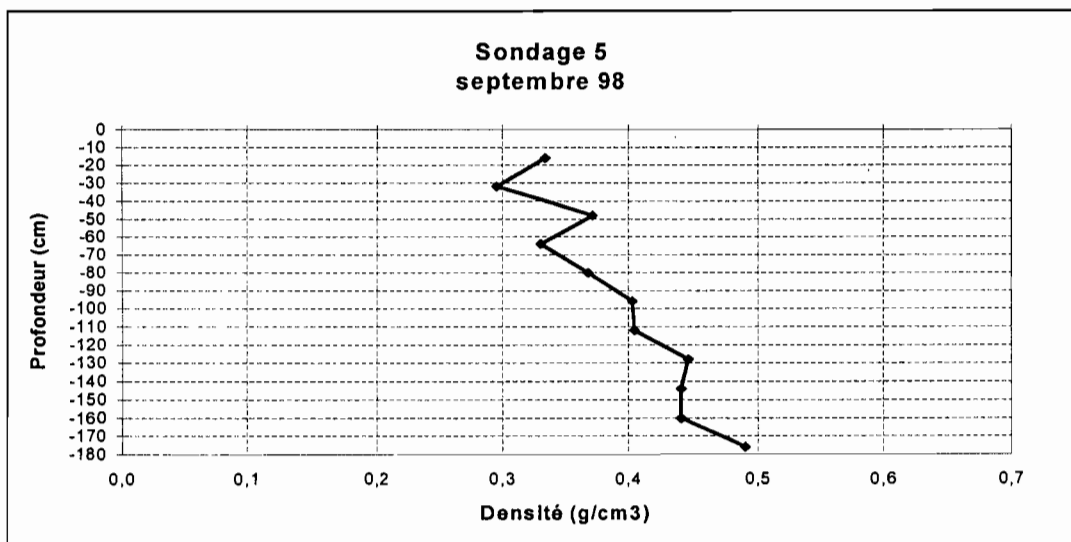


Figure J.4

Les densités moyennes obtenues sont du même ordre que celles des années passées, sauf pour le puits 4 où la densité calculée est supérieure aux autres puits. (Tableau J.4, Figure J.5).

Sites		1995-96	1996-97	1997-98
5700m (5)	densité (g/cm ³)	0.39	0.42	0.39
	mm d'eau	965	1225	692
5520m (4)	densité (g/cm ³)	0.40	0.45	0.55
	mm d'eau	886	1267	439
5520m (2)	densité (g/cm ³)	0.49		0,43
	mm d'eau	572		334
5520m (1)	densité (g/cm ³)	0.41	0.46	
	mm d'eau	907	1475	

5520 (1) : Station Campbell

5520 (2) : Rive droite

5520 (4) : Combe est

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 trois dernières années

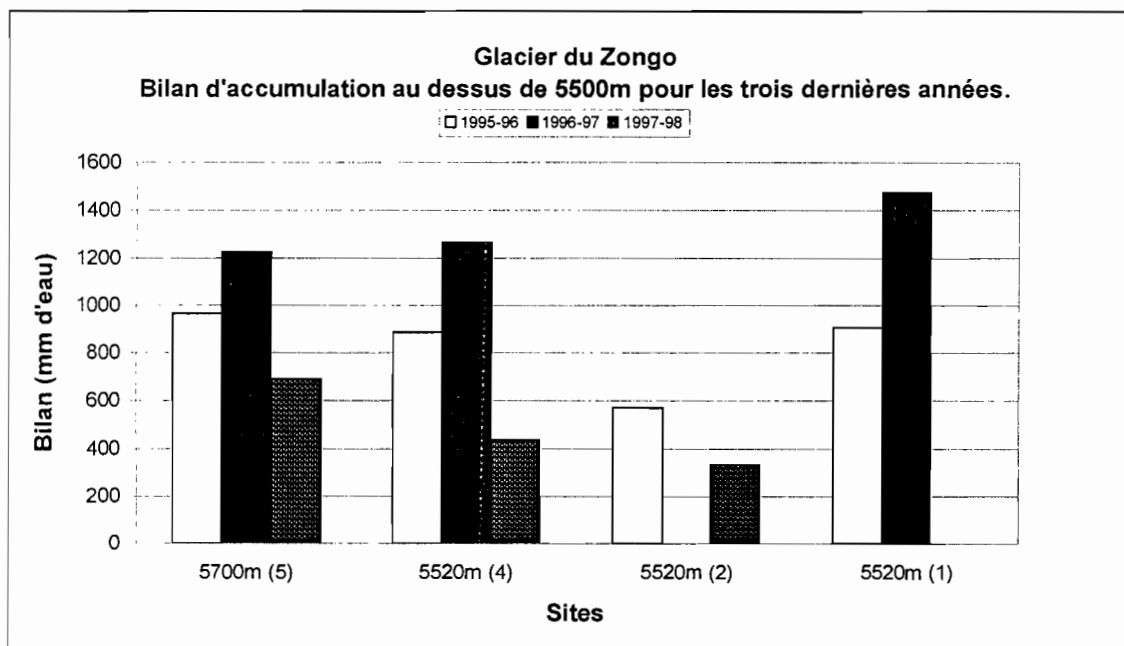


Figure J.5

J.1.2. Résumé des bilans entre 5500 et 6000m

Tranches d'altitude	Altitude centre de classe	Bilan (mm d'eau)
5500-5600	5550	392
5600-5700	5650	542
5700-5800	5750	692
5800-5900	5850	692
5900-6000	5950	692

En italique : bilan interpolé

1. 5500-5600 m : moyenne des valeurs des sondages n°2 (Campbell, 5520 m) et n°4 (Combe Est, 5520 m) : Tableaux J.1. et J.2.
2. 5600-5700 m : moyenne des valeurs 5500-5600 m et 5700-5800 m.
3. 5700-5800 m, 5800-5900 m et 5900-6000 m : mesure du sondage au pied de la voie des français à 5700 m.

Les bilans à 5850 et à 5950 m sont interpolés à partir des bilans à 5550 et 5750 m puisque cette année on observe un gradient entre ces deux altitudes.

Les résultats de ce tableau sont ajoutés au tableau J.5 de la partie J.2

J.2. Le bilan de masse du glacier

La Figure J.1 page 84 présente le réseau de balises et de sondages utilisés afin de déterminer le bilan de masse du glacier pour l'année hydrologique 1997-98.

Nous avons vu au chapitre précédent les résultats des sondages réalisés le 11 septembre 1998 et les bilans en zone d'accumulation.

En zone d'ablation le réseau de balises correspond à celui de l'année précédente après remplacement des balises perdues. La lecture des émergences des balises est effectuée chaque début du mois par l'observateur de la Cobee.

Le calcul des bilans de masse est effectué de la manière suivante :

- 4850-5000 m : balises du front (25, 27, 36)
- 5000-5100 m : balises 4, 5, 8, 9, 10, 7, 11, 12
- 5100-5200 m : balises 1, 2 et 04

Rappel :

- 5200-5300 m, 5300-5400 m et 5400-5500 m : on réalise une interpolation linéaire entre les valeurs 5100-5200 m et 5500-5600 m.
- 5500-5600 m : moyenne des valeurs des sondages Campbell (5520 m) et Combe Est (5520 m)
- 5600-5700 m : moyenne des valeurs 5500-5600 m et 5700-5800 m.
- 5700-5800 m, 5800-5900 m et 5900-6000 m : mesure du sondage au pied de la voie des français à 5700 m.

J.2.1. Bilan spécifique mensuel dans la zone d'ablation (5030-5170m) depuis 1991.

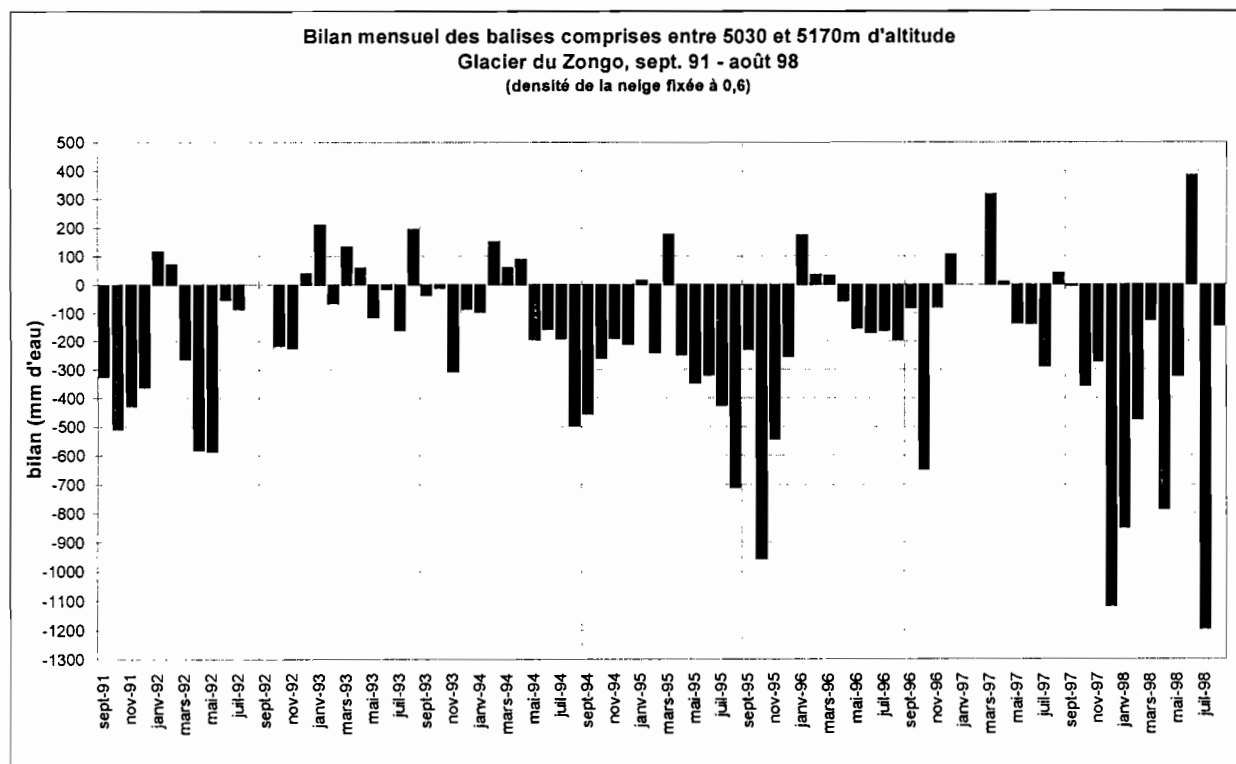


Figure J.6

Sur la tranche d'altitude 5030-5170 et depuis 1991, le bilan spécifique mensuel est très négatif. Les années 92-93 et 96-97 présentent un bilan équilibré. L'année 97-98 a un bilan très déficitaire : c'est cette année que l'ablation a été la plus forte avec un record de plus d'un mètre vingt d'ablation en juillet 1998 (Figure J.6).

J.2.2. Bilan cumulé dans la zone d'ablation (5030-5170m) depuis 1991.

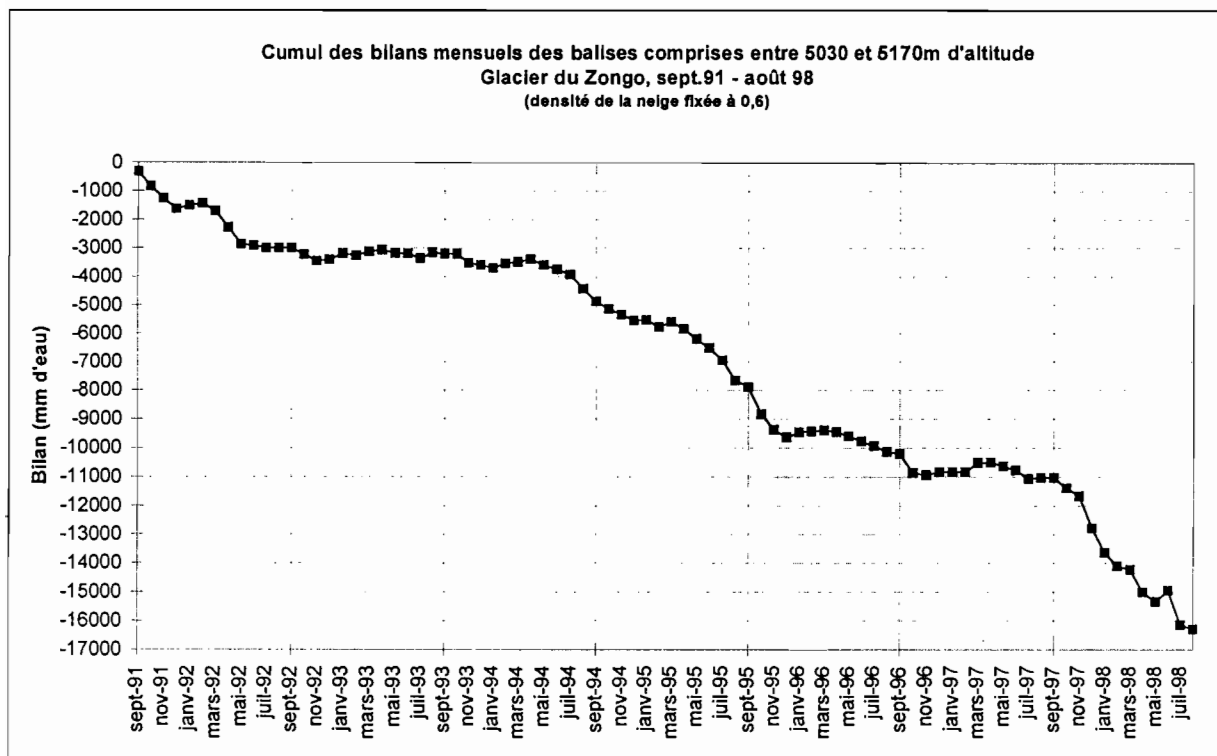


Figure J.7

Le bilan cumulé montre l'augmentation de l'ablation depuis 1991 avec des pertes en eau très importantes pour les années hydrologiques 94-95 et 97-98 (Figure J.7).

J.2.3. 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. On construit cette courbe de la manière suivante : à l'altitude z correspond la valeur du bilan de la tranche : $[z-50 \text{ m} - z+50 \text{ m}]$ (Figure J.8. et Tableau J.5.). L'altitude de ELA est déterminée graphiquement et correspond à l'intersection de la courbe $z = f(\text{bn})$ et de l'axe des abscisses.

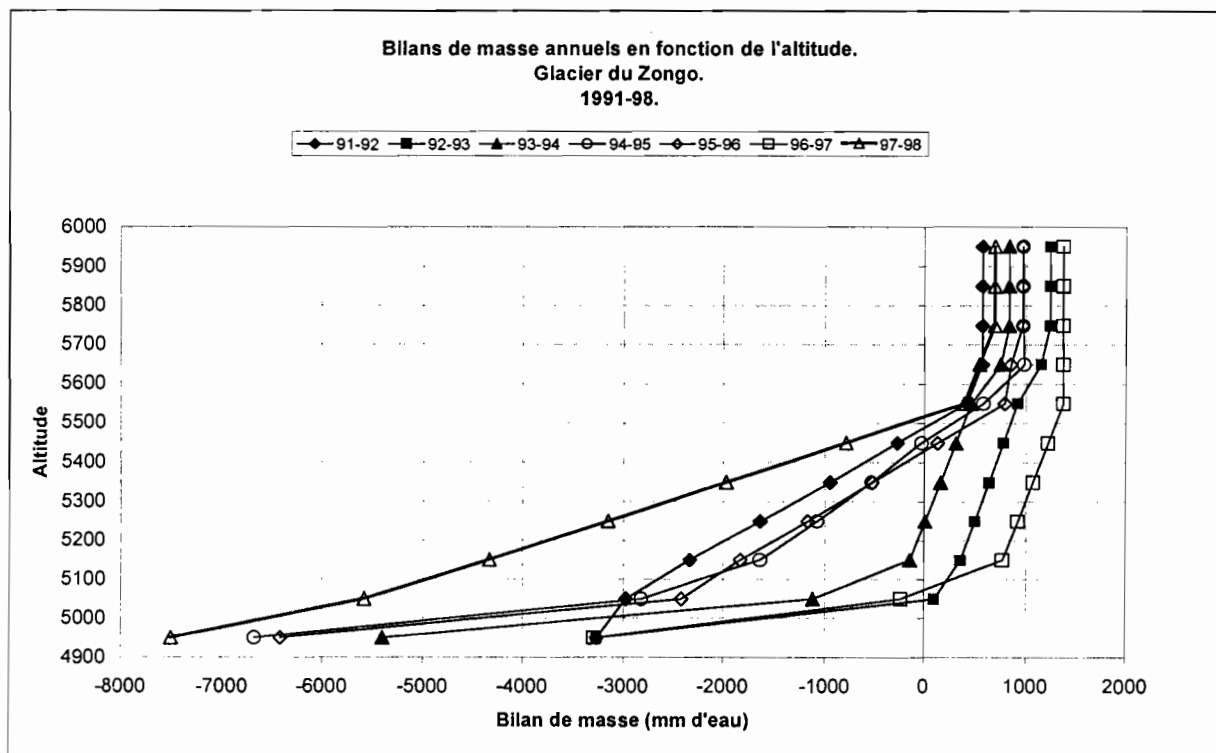


Figure J.8

altitude (m)	91-92	92-93	93-94	94-95	95-96	96-97	97-98
4950	-3265	-3265	-5403	-6680	-6420	-3291	-7500
5050	-2976	101	-1123	-2820	-2416	-231	-5580
5150	-2330	358	-140	-1640	-1830	768	-4332
5250	-1640	497	11	-1080	-1175	918	-3151
5350	-950	635	162	-530	-521	1068	-1970
5450	-267	774	313	-25	133	1218	-789
5550	420	913	464	580	788	1371	392
5650	569	1148	747	980	848	1371	542
5750	571	1239	832	970	965	1371	692
5850	571	1239	832	970	965	1371	692
5950	571	1239	832	970	965	1371	692

Tableau J.5. : Bilan (mm d'eau) en fonction de l'altitude

En italique : bilan interpolé

La Figure J.8 représente le bilan spécifique selon l'altitude pour les sept dernières années hydrologiques. Le coefficient d'activité du glacier qui correspond au gradient de ce bilan en fonction de l'altitude db/dz a été calculé (Wagnon., 1999) : il est de 2000 mm/100 m entre 4900 et 5100 m, sauf pour l'année 91-92 où ce coefficient est très faible pour la partie terminale du glacier : moins de 200 mm/ 100 m.

J.2.4. *Récapitulatif des données glaciologiques du Zongo et de Chacaltaya depuis 1991.*

Les tableaux J.6. et J.7 récapitulent les données glaciologiques des glaciers du Zongo et de Chacaltaya.

Glacier du Zongo, récapitulatif depuis 1991 (valeurs entre 91 et 96 réactualisées en 1997)

Année	Bn (1) mm d'eau	ΣBn (2) mm d'eau	P (3) mm	A (4) mm	Q (5) mm	ELA (6) m	AAR (7) %	Term. (8) m
1991-92	-900	-900	920	1820	2240	5500	39	-12.3
1992-93	+516	-384	1060	544	1180	5050	88	+1.1
1993-94	-88	-472	850	938	1590	5250	64	-10.2
1994-95	-703	-1175	850	1553	2130	5450	44	-6.4
1995-96	-675	-1850	826	1501	2293	5425	47	-11.8
1996-97	+797	-1053	1051	254	1398	5075	89	-15.6
1997-98	-1962	-3015	810	2772	3368	5510	39	-24.8
Moyenne	-431	-1264	918	1349	2028	5323	59	-11

Tableau J.6. Glacier du Zongo, récapitulatif depuis 1991

Glacier de Chacaltaya, récapitulatif depuis 1991

Année	Bn (1) mm d'eau	ΣBn (2) mm d'eau	P (3) mm	A (4) mm	ELA (6) m	AAR (7) %	Term. (8) m
1991-92	-1166	-1166			5371	0	-5.0
1992-93	+277	-889			5180	83	-4.7
1993-94	-1080	-1969	710	1790	5359	3	-4.6
1994-95	-1470	-3439	690	2160	5368	2	-17.6
1995-96	-1874	-5313	615	2489	5454	0	-24.4
1996-97	-659	-5972	800	1459	5322	10	0
1997-98	-3660	-9632	715	4375	5495	0	
Moyenne	-1376	-4054	706	2455	5364		

Tableau J.7. Glacier de Chacaltaya, 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 P₂, P₃, P₄ et P₅ pour toutes les années, sauf en 94-95 où est représentée la moyenne des pluviomètres P₁, P₂, P₃, P₄830 à cause de fuites dans P₄ et P₅ (rapport n°49, p.48). Les moyennes des années précédentes, pas toujours effectuées à partir des mêmes pluviomètres, ont été recalculées dans ce tableau. Pour Chacaltaya : total des précipitations au bas du glacier P₇.*
- (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) *Avance (+) ou recul (-) du front du glacier*

Evolution des bilans nets spécifiques des glaciers du Zongo et de Chacaltaya depuis 1991.

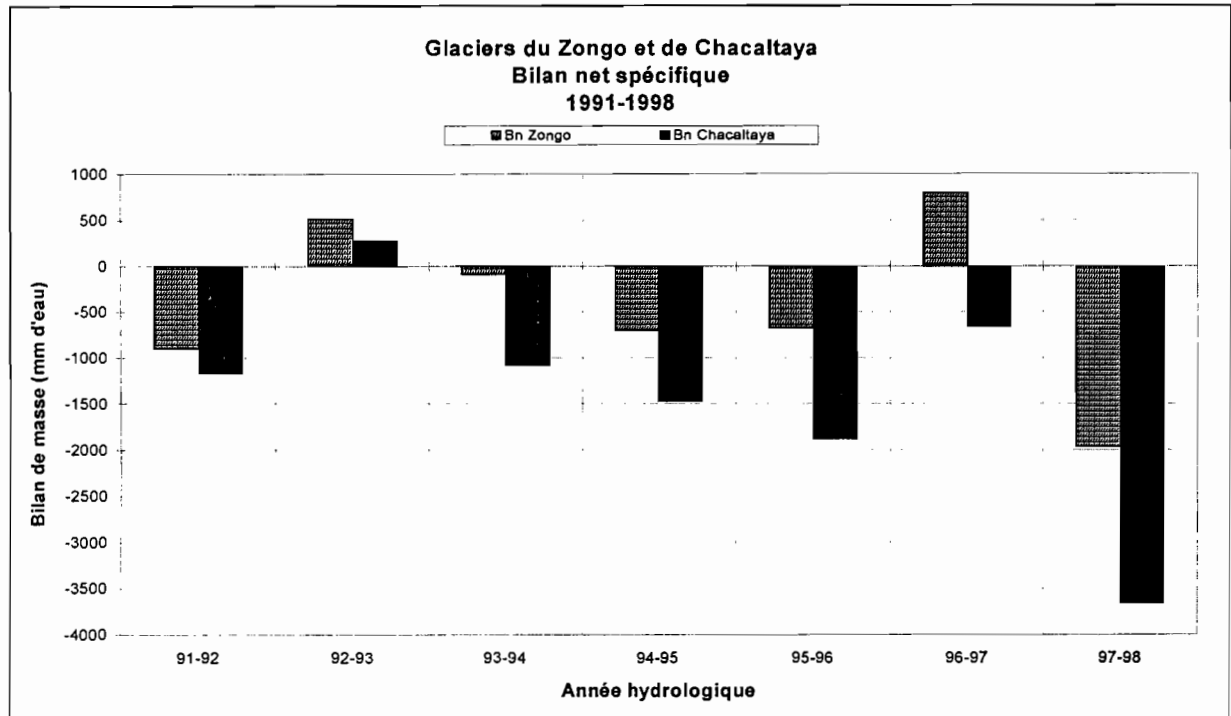


Figure J.9.

Pour le Zongo, pour les sept années représentées, deux possèdent un bilan spécifique excédentaire, les autres étant déficitaires. Le bilan spécifique moyen est de -431 mm depuis 1991. Les deux bilans les plus négatifs correspondent aux deux événements Niño les plus intenses. En 1997-98 le bilan de masse du Zongo est le plus négatif mesuré depuis le début du programme NGT : il est plus de deux fois plus négatif que pour 1991-92 qui était jusqu'à présent l'année la plus déficitaire (Figure J.9).

Même constat pour le glacier de Chacaltaya qui a un bilan presque deux fois plus déficitaire cette année que pour l'année 1995-96 qui était la plus déficitaire.

En comparant les bilans des deux glaciers, on constate que cette année a connu le plus fort déficit, et de beaucoup, depuis le lancement du programme. C'est Chacaltaya qui a le bilan le plus négatif avec un déficit supérieur de presque 86% par rapport au glacier du Zongo. Des explications à cette importante différence entre les deux glaciers ont été avancées dans le rapport n°57 (Sicart et al., 1998).

Evolution des bilans nets spécifiques cumulés pour les glaciers de Zongo et de Chacaltaya depuis 1991.

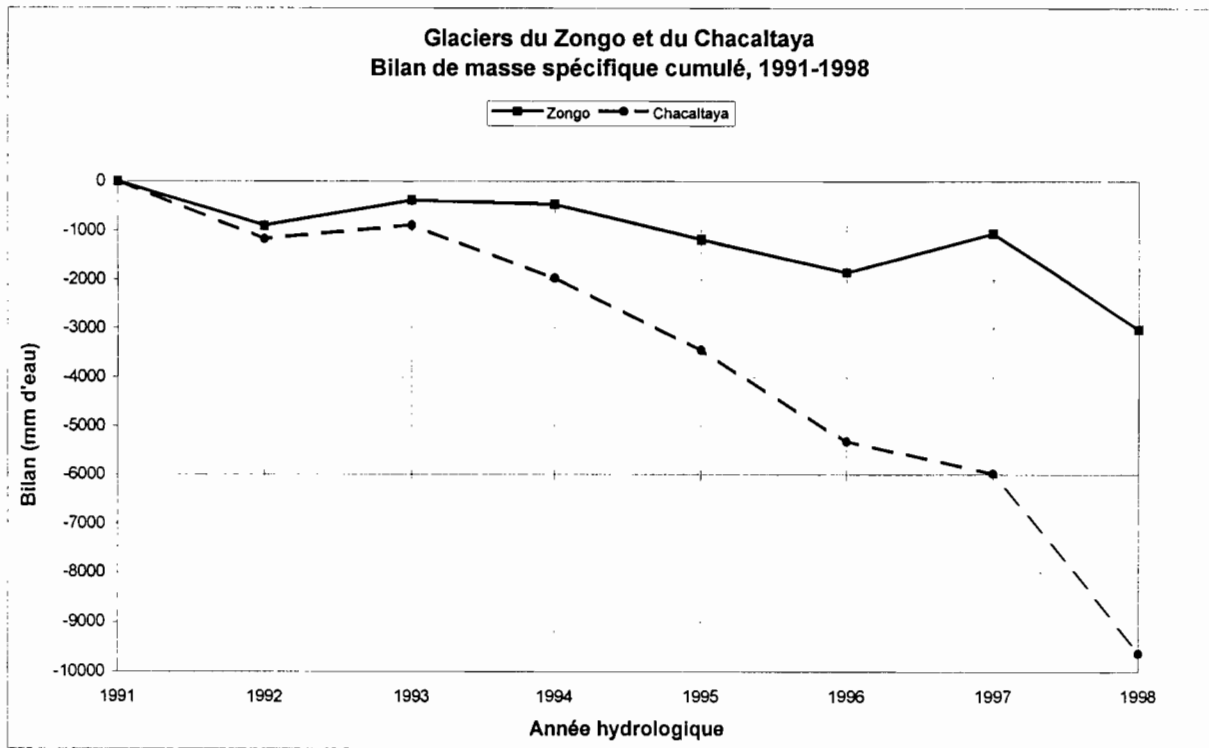


Figure J.10.

La Figure J.10. montre également très nettement l'accentuation de l'écart de bilan de masse entre les deux glaciers depuis 1991.

Evolution de l'ELA et de l'AAR en fonction du bilan net pour le glacier du Zongo.

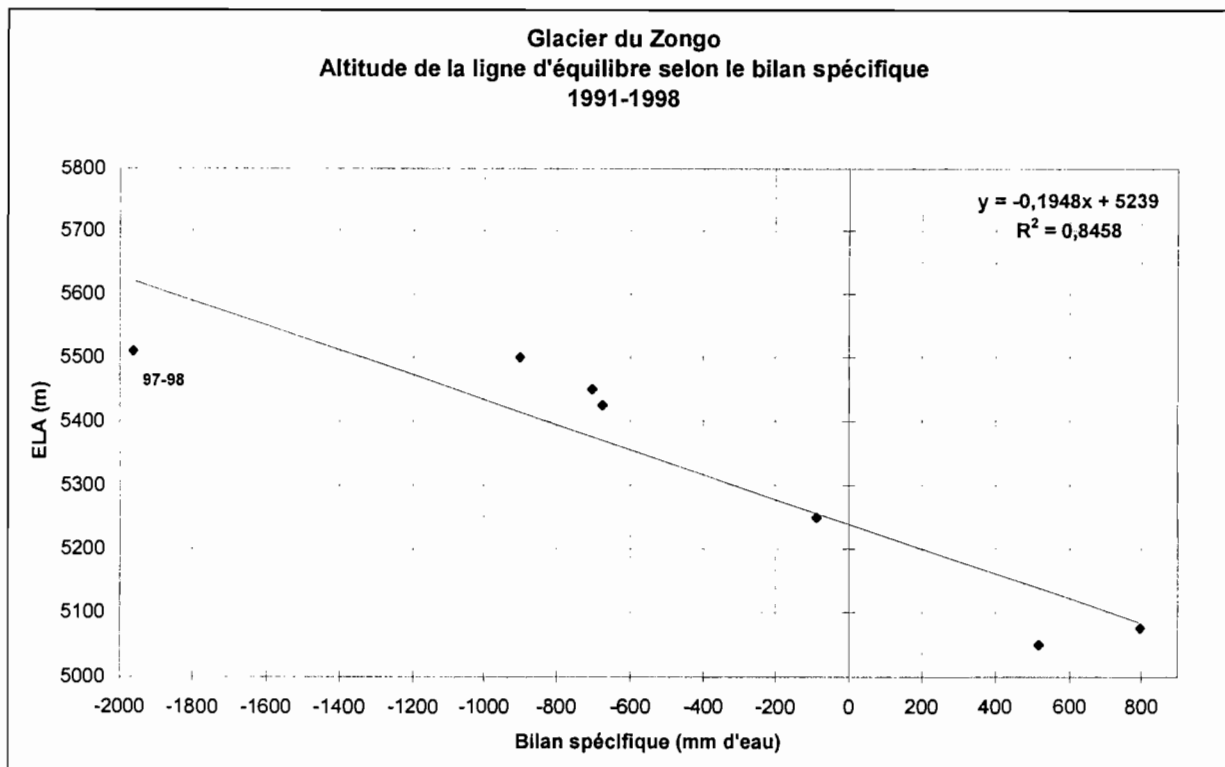


Figure J.11

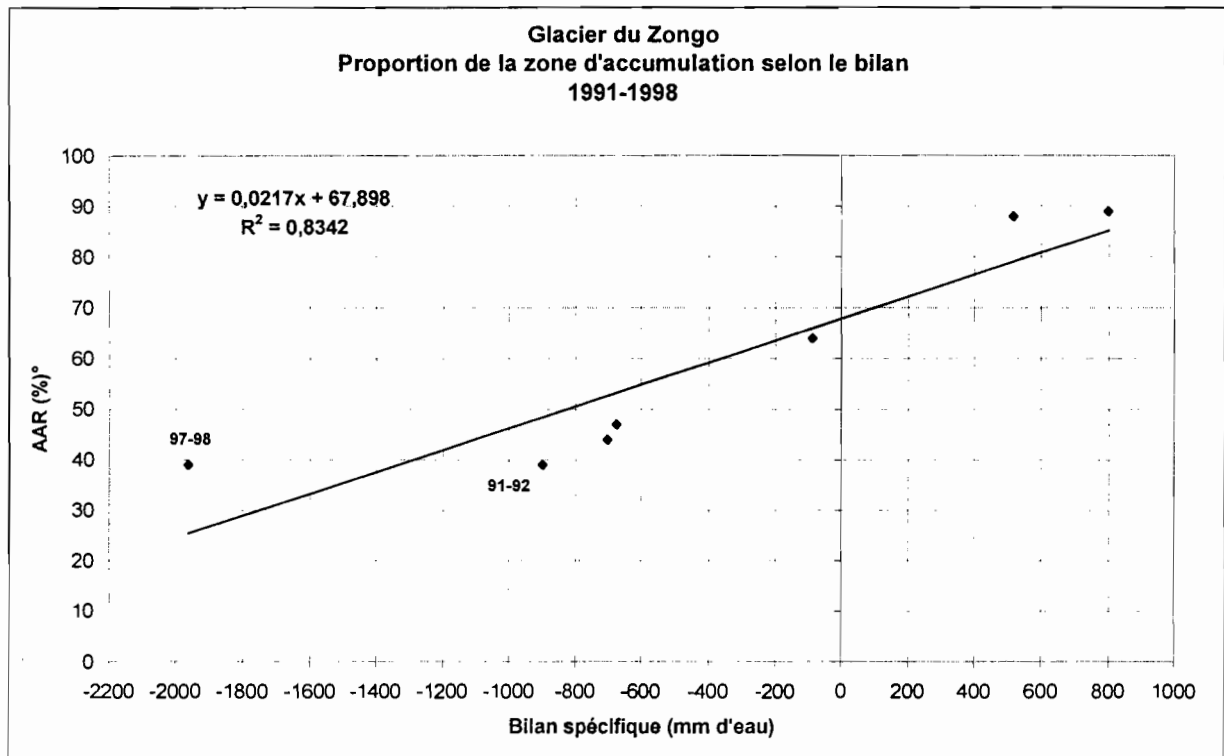


Figure J.12

Plus le bilan spécifique est déficitaire, plus haute est la ELA (Figure J.11, point 97-98). De même la proportion de la surface d'accumulation (AAR) diminue (Figure J.12): elle ne représente que 39% cette année, ce qui est identique à l'année 91-92, autre année dont le bilan spécifique est le plus déficitaire (-900 mm contre -1962 mm cette année).

Sur la période 91-98, en situation d'équilibre (bilan net nul), la superficie de la zone d'accumulation du glacier du Zongo représente environ 70% de la superficie totale (Figure J.12.)

J.3. Comparaison entre bilan net spécifique et débit spécifique

Depuis 1991, la lame d'eau au torrent émissaire est supérieure à l'ablation du glacier: la différence (Q-A) est de 596 mm cette année, ce qui est inférieur à la moyenne depuis 1991: 679 mm. Si on considère une sublimation non négligeable sur le glacier, l'ablation doit être supérieure au débit. Les raisons de cette différence ont été expliquées dans les rapports précédents: sous estimation des précipitations dans la zone d'alimentation du glacier due à une légère augmentation des précipitations avec l'altitude et surtout parce qu'il y a plus de neige sur le glacier que sur les moraines où sont les pluviomètres totalisateurs, et surestimation du bilan net spécifique.

J.4. Topographie

Comme les autres années la topographie a été réalisée par le cabinet *Jaime Cari Silva* (financement de la COBEE) au début du mois de septembre 1998. Les points d'appui de la polygonale sont les mêmes que ceux des mesures topographiques de novembre 1997 avec un point supplémentaire V-6 (Cf. Tableau J.8).

POINTS	Nord (m)	Est (m)	Cote (m)	Support
Z-1	8200217.734	591495.014	5157.448	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	48.55.555	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.8. : Coordonnées des points de la polygonale du Glacier du Zongo

- Le recul du glacier (1991-98).

Pour estimer les fluctuations du front du glacier, on utilise la carte au 1/2500 sur laquelle sont reportées les mesures topographiques de la limite inférieure du glacier depuis 1991 (cf. Figure J.14). Sur cette carte, onze segments ont été tracés le plus perpendiculairement possible à la limite du front et répartis régulièrement le long du front du glacier. La moyenne des mesures 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 résultats sont consignés dans le Tableau J.9. La figure J.13 illustre ces données. Le recul cette année, -24.8 m, est environ 60% plus important que l'année dernière, -15.6 m, qui était jusqu'à présent le plus fort enregistré. Le recul cumulé est de 80 m depuis 1991, soit un recul moyen de 11 m par an.

Même si cette année recul du front et bilans spécifiques correspondent à des pertes de masses exceptionnelles, il n'y a pas de relation de causalité immédiate entre les deux puisqu'il faudrait tenir compte du temps de réponse du glacier. On a une période de bilans négatifs du glacier depuis au moins 10 ans, les vitesses de glace au front sont sans doute réduites et une année particulièrement déficitaire amène une fonte au front plus efficace.

Année	Fluctuation annuelle (m)	Cumul (m)
1991-92	- 12.3	- 12.3
1992-93	+ 1.1	- 11.2
1993-94	- 10.2	- 21.4
1994-95	- 6.4	- 27.8
1995-96	- 11.8	- 39.6
1996-97	-15.6	-55.2
1997-98	-24.8	-80.0

Tableau J.9. : Mouvements du front du Glacier du Zongo entre août 1991 et septembre 1998 (moyennes des mesures des 11 segments réparties le long du front du glacier)

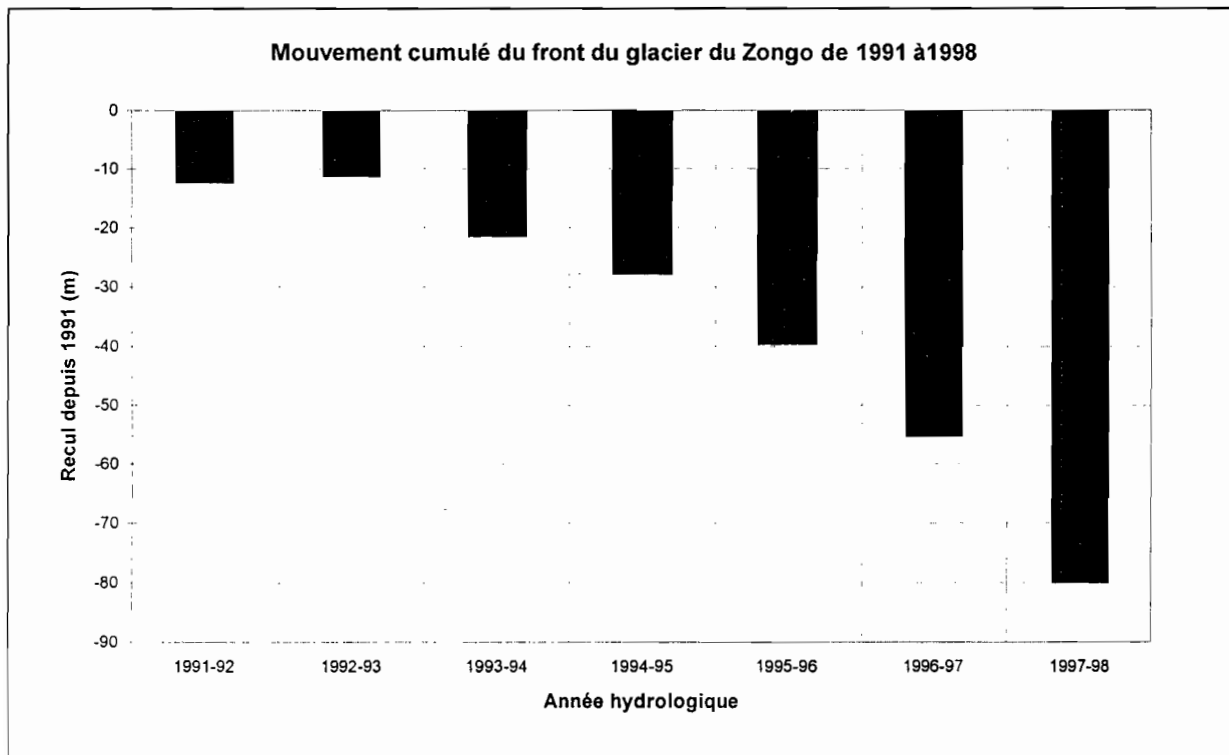


Figure J.13.

**Glacier du Zongo :
fluctuations du front de 1991 à 1998**

- GLACIAL HUAYNA POTOSI - 1991
- GLACIAL HUAYNA POTOSI - 1992
- GLACIAL HUAYNA POTOSI - 1993
- GLACIAL HUAYNA POTOSI - 1994
- GLACIAL HUAYNA POTOSI - 1996
- GLACIAL HUAYNA POTOSI - 1996
- GLACIAL HUAYNA POTOSI - 1997
- GLACIAL HUAYNA POTOSI - 1998



BM-4

BM-3

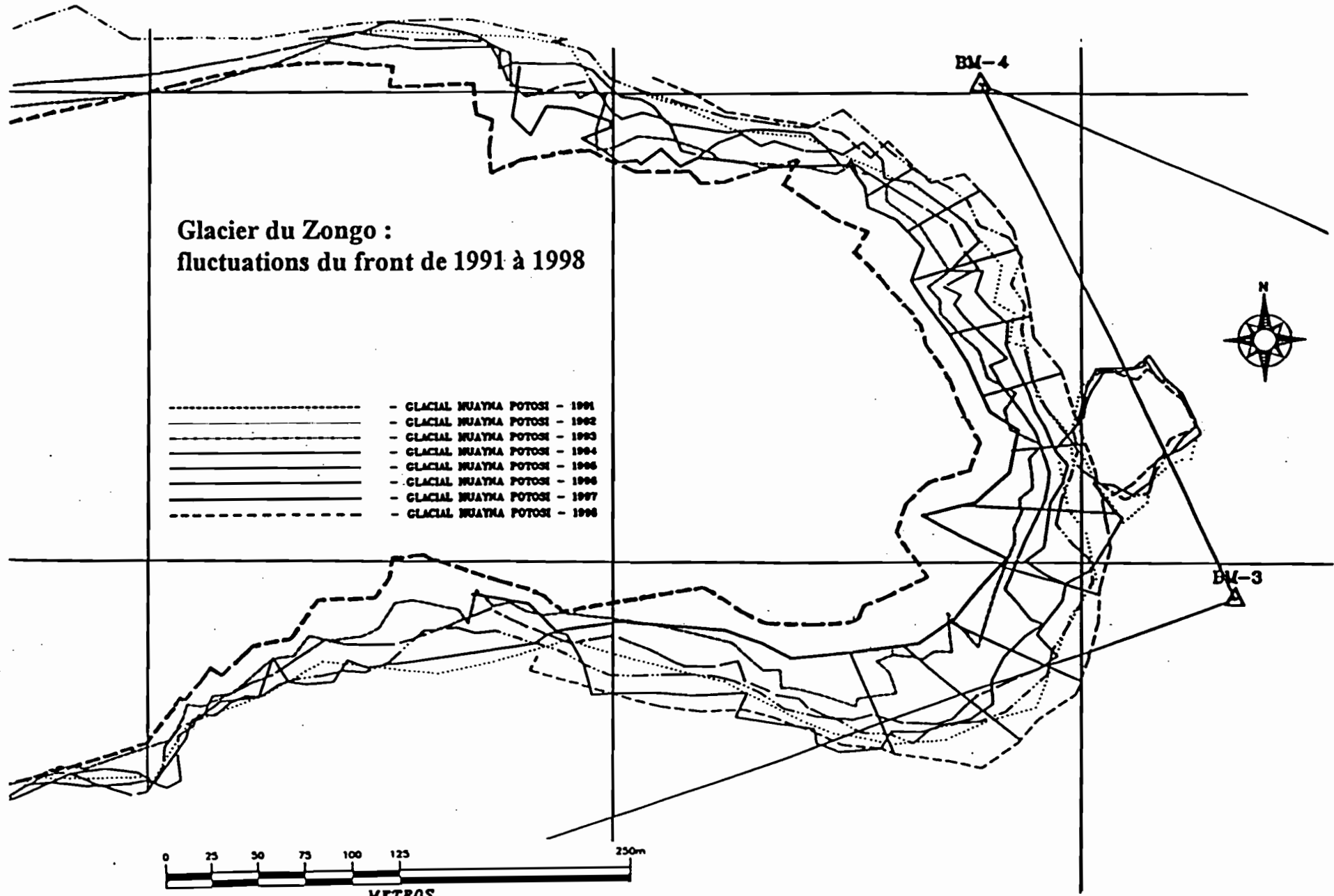


Figure J.14

K. CONCLUSION

L'année hydrologique 1997-98, année Niño avec un des indices « Southern Oscillation Index » (SOI) le plus négatif depuis 1948, se distingue nettement des années précédentes depuis l'initiation du programme Neige et Glaciers Tropicaux en 1991.

En terme de pluviométrie, cette année hydrologique est parmi les plus déficitaires depuis 1971 : déficit de 25% de précipitations par rapport à la moyenne. C'est aussi l'année la plus chaude depuis 93-94 avec des températures supérieures de +1.5°C à +2°C aux années passées. Quant au bilan radiatif, on a cette année la radiation nette la plus forte depuis 1991. Les conséquences sur le glacier sont les suivantes : bilan de masse négatif de plus de 2.5 m d'eau. Le Niño 97-98 a eu un effet deux fois plus important que le précédent 95-96 pour une pluviosité équivalente.

Les nouveautés cette année résident dans l'installation à 5150 m de la nouvelle station Campbell Cr10-98 qui succède ainsi aux stations 21X et Cr10. A 5500 m, la station Campbell portable devient la station d'altitude de référence au même titre que la Cr10-98. Elle a également été complétée par une ventilation continue et une température haute à partir de décembre 1997.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Berthier E., 1998 – Reconstitution des débits de 3 bassins glaciaires des Andes boliviennes. *Rapport de stage de Magistère. Ecole Normale Supérieure de Paris, ORSTOM, août 1998. 44 p + annexes.*

Berton P., Wagnon P., Francou B., Pouyaud B., Baldivieso H., 1997 - Mesures météorologiques, hydrologiques et glaciologiques sur le glacier Zongo, année hydrologique 95/96. *ORSTOM-Bolivie, Rapport n°55, janvier 1997. 119 p.*

Duploux A., 1999 – Etude du recul du front du glacier du Zongo par télédétection de 1948 à 1998. *Rapport de stage de DESS 'Application des Technologies Spatiales ». ULP Strasbourg, IRD, 1999. 37 p + annexes.*

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

Queney P., 1974 - Eléments de Météorologie, *Masson, Paris.*

Rigaudière P., Ribstein P., Francou B., Pouyaud B., Saravia R., 1995 - Mesures météorologiques, hydrologiques et glaciologiques sur le glacier Zongo, année hydrologique 93/94. *ORSTOM-Bolivie, Rapport n°43, Janvier 1995. 68 p.*

Roche M. A., 1992 - El Clima de Bolivia, Programa Hidrologico Y Climatologico de la Cuenca Amazonica de Boliva (PHICAB), *Actas del Seminario sobre el PHICAP, 5 y 6 noviembre de 1992, Bolivie.*

Sicart J.E., Wagnon P., Gallaire R., Francou B., Ribstein P., Pouyaud B., Valdivieso H., 1998 - Mesures météorologiques, hydrologiques et glaciologiques sur le glacier Zongo, année hydrologique 96/97. *ORSTOM-Bolivie, Rapport n°57, Juillet 1998. 119 p.*

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

Wagnon P., Ribstein P., Francou B., Pouyaud B., Valdivieso H., 1995 - Mesures météorologiques, hydrologiques et glaciologiques sur le glacier Zongo, année hydrologique 94/95. *ORSTOM-Bolivie, Rapport n°49, décembre 1995. 82 p.*