

INFORME N ° 57
ORSTOM - BOLIVIE



Station météorologique à 5150m d'altitude (juillet 1998)

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

ANNEE HYDROLOGIQUE 1996 - 97

J. E. SICART (ORSTOM)
P. WAGNON (ORSTOM)
R. GALLAIRE (ORSTOM)
B. FRANCOU (ORSTOM-CNRS)
P. RIBSTEIN (ORSTOM)
B. POUYAUD (ORSTOM)
H. BALDIVIESO (COBEE)

JUILLET 1998

SOMMAIRE

A. INTRODUCTION	1
B. INVENTAIRE DE L'EQUIPEMENT DU GLACIER	5
<i>B.1 Station pluviométrique à 4750 m d'altitude</i>	5
<i>B.2 Station météorologique à 4750 m d'altitude</i>	5
<i>B.3 Station hydrologique à 4830 m d'altitude</i>	7
<i>B.4 Station météorologique portable à 5025 m d'altitude</i>	8
<i>B.5 Stations météorologiques à 5150 m d'altitude</i>	9
<i>B.6 Station météorologique portable à 5550 m d'altitude</i>	14
<i>B.7 Mesures réalisées sur la moraine</i>	16
<i>B.8 Mesures réalisées lors de missions ponctuelles sur le glacier</i>	17
<i>B.9 Récapitulatif</i>	18
C. TEMPERATURES DE L'AIR	20
<i>C.1 Températures instantanées</i>	20
<i>C.2 Moyennes journalières</i>	33
<i>C.3 Températures minimales et maximales journalières</i>	41
<i>C.4 Températures mensuelles et annuelles</i>	45
D. TEMPERATURES DANS LA GLACE	49
<i>D.1 Information disponible</i>	49
<i>D.2 Thermocouples 21X</i>	50
<i>D.3 Thermocouples CR10</i>	51
<i>D.4 Conclusion</i>	52
E. PRECIPITATIONS	53
<i>E.1 Valeurs journalières, pluviomètre de la COBEE, Plataforma (4750 m)</i>	53
<i>E.2 Valeurs mensuelles et annuelles</i>	54
F. BILAN RADIATIF	62
<i>F.1 Notations</i>	62
<i>F.2 Valeurs journalières</i>	62
<i>F.3 Valeurs mensuelles</i>	73
G. DEBITS	76
<i>G.1 Débits instantanés</i>	76
<i>G.2 Débits journaliers</i>	77
<i>G.3 Débits mensuels et annuels</i>	79
<i>G.4 Reconstitution statistique des débits</i>	81

H. HUMIDITE RELATIVE DE L'AIR	84
<i>H.1 Précision sur les données</i>	84
<i>H.2 Moyennes journalières à 5150 m, 5550 m et 4750 m</i>	85
<i>H.3 Moyennes mensuelles à 5150 m</i>	87
I. VITESSE ET DIRECTION DU VENT	89
<i>I.1 Mesures disponibles</i>	89
<i>I.2 Vitesse et direction du vent à 5150 m (valeurs instantanées), évolution des gradients entre 30 et 180 cm de hauteur</i>	89
<i>I.3 Valeurs journalières à 4750 m, 5025 m, 5150 m et 5550 m</i>	91
<i>I.4 Valeurs mensuelles à 4750 m, 5150 m et 5550 m</i>	94
J. MESURES DE LA SONDE A ULTRASON A 5150 M	96
K. GLACIOLOGIE	98
<i>K.1 L'accumulation nette</i>	98
<i>K.2 Le bilan de masse du glacier</i>	108
<i>K.3 Comparaison entre bilan net spécifique et débit spécifique</i>	113
<i>K.4 Topographie</i>	114
L. CONCLUSION	117
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	118

A. INTRODUCTION

Ce rapport d'activité, sur le modèle de ceux des années 1993-94 (Rigaudière et al., 1995), 1994-95 (Wagnon et al., 1995), et 1995-96 (Berton et al., 1997) présente les mesures météorologiques, hydrologiques et glaciologiques effectuées dans le bassin versant du glacier du Zongo de septembre 1996 à août 1997.

Ci-dessous, à la suite de la localisation géographique du dispositif de mesure 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).

Le corps du rapport se compose d'un inventaire détaillé des capteurs météorologiques utilisés et des modifications intervenues, suivi d'une présentation des mesures sous forme de tableaux et graphes. Les éléments d'analyse critique des données seront surtout développés à partir de comparaisons avec l'année 95-96.

• *Situation géographique du dispositif de mesure*

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 : compris 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.

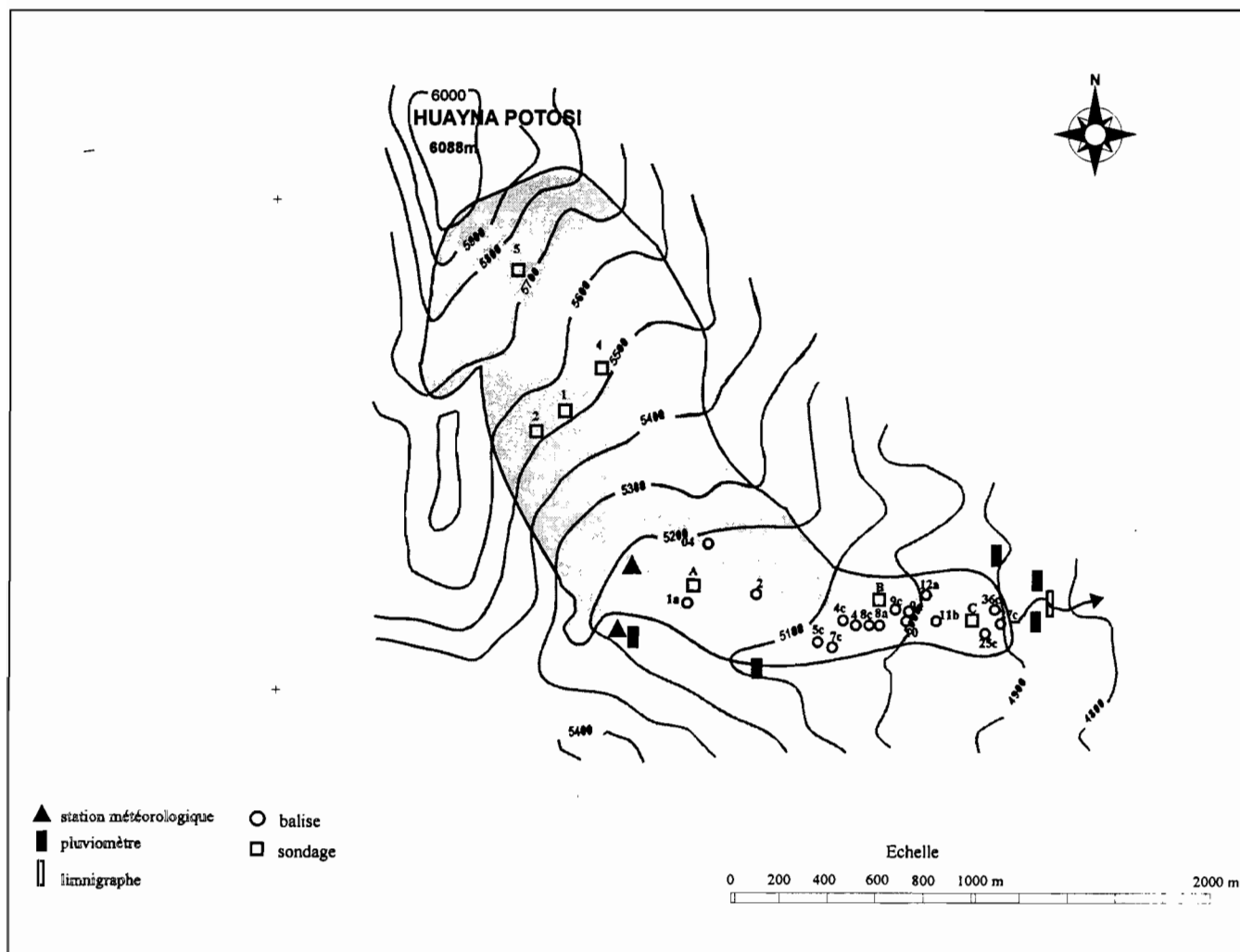


Figure A.1 : *Dispositif de mesures météorologiques, hydrologiques et glaciologiques dans le bassin versant du glacier du Zongo en 1997 (d'après Sicart, 1996, modifié).*

• **Evolution des conditions climatiques dans le bassin versant du glacier**

Les observations du tableau A.1 proviennent des missions effectuées sur le glacier du Zongo tous les quinze jours environ, afin de récupérer les données des stations météorologiques à 5150 m et à 5550 m. Ainsi ces observations concernent la situation météorologique du bassin du Zongo entre 4750 m (plateforma) et 5150 m ou 5550 m d'altitude.

Date	Matin	Après midi	Etat de surface du glacier à 5150m
septembre			
02	beau	beau	.
12	beau	couvert	neige transformée
17	beau	précipitation	.
19	beau	précipitations	.
octobre			
04	beau	précipitations	neige fraîche
18	beau	couvert	glace
22	couvert	couvert	glace
23	précipitations	précipitations	.
30	beau	précipitations	.
novembre			
*13-18	couvert / précipitations	couvert / précipitations	neige fraîche
décembre			
02	beau	couvert	neige fraîche
03	beau	précipitations	.
16	beau	couvert	neige fraîche
23	couvert	précipitations	neige fraîche
janvier			
02	couvert	précipitations	neige fraîche
07	beau	couvert	neige transformée
09	couvert	couvert	.
22	précipitations	couvert	neige transformée
février			
03	précipitations	précipitations	neige transformée
17	couvert	couvert	.
18	précipitations	précipitations	neige fraîche
mars			
08	beau	précipitations	neige fraîche
18	couvert	couvert	neige transformée
19	beau	couvert	.
21	couvert	précipitations	neige transformée
avril			
11	couvert	précipitations	neige fraîche
23	beau	couvert	neige fraîche
30	beau	beau	neige fraîche
mai			
13	beau	beau	.
15	beau	couvert	neige transformée
25-27	couvert puis beau	couvert puis beau	neige fraîche puis transformée
juin			
05	beau	beau	.
22	beau	beau	pénitents de neige (h=5cm)
juillet			
26	beau	beau	pénitents de neige (h=30cm)
août			
01-11	beau puis précipitations	beau puis précipitations	pénitents de neige
14	couvert	précipitations	neige fraîche
26	couvert	précipitations	neige transformée
28	beau	beau	neige transformée

* : mission de quelques jours effectuée 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 en dessous du front du glacier du Zongo.

Tableau A.1

D'après le tableau A.1 :

- la saison des pluies semble s'installer dès début septembre, puisque on n'observe pas de longues périodes de beau temps durant les mois de septembre, octobre ou novembre.

- l'évolution journalière des conditions climatiques en saison des pluies correspond généralement 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 des pluies fut particulièrement longue (environ 8 mois), puisque la saison sèche ne s'installe qu'à la fin du mois d'avril.

- une nouvelle période de perturbations intervient au cours du mois d'août, suivie d'une période stable de beau temps tout le mois de septembre.

Pour finir on notera qu'au vue de l'évolution du « Southern Oscillation Index » (SOI), le début de l'année 1997 est considéré en situation « La Niña ».

B. INVENTAIRE DE L'EQUIPEMENT DU GLACIER

Nous présentons ici le dispositif des mesures météorologiques et hydrologiques qui a fonctionné sur le glacier du Zongo durant l'année hydrologique 96-97. Le dispositif des mesures glaciologiques est présenté dans le chapitre K.

B. 1. Station pluviométrique à 4750 m d'altitude

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 :

1. Un pluviomètre de la COBEE relevé chaque jour par l'observateur de la compagnie : Franz Quispe. Ce relevé est effectué à 7h00 du matin, et les précipitations sont attribuées au jour précédent.

Diamètre : 19 cm

2. Un pluviomètre totalisateur relevé chaque mois par le même opérateur.

Diamètre : 50,5 cm, hauteur : 100 cm, couleur noire.

• Données recueillies

1. Pluie journalière, ainsi que des observations météorologiques (heure des précipitations, type de temps).
2. Pluie mensuelle.

• Lacunes dans les données

La mesure du mois de janvier 97 du pluviomètre totalisateur n'a pas été effectuée.

B. 2. Station météorologique à 4750 m d'altitude

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

Aucune lacune n'est à déplorer cette année.

B. 2.2. Station MEVIS

• Descriptif

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

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

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

• Lacunes dans les données

Les données disponibles ne recouvrent que la période du 1^{er} septembre 96 au 24 janvier 97. En effet les problèmes de récupération des données nous ont fait perdre toutes les mesures de la fin janvier au 10 septembre 1997. A partir de cette date la méthode de récupération des données a été

simplifiée par l'utilisation d'une carte magnétique. 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 dévissée (il faudrait peut-être changer l'ensemble du capteur).

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

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

B. 3.1. Station limnimétrique

• 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

- du 06 au 26 juillet 1997 : système mécanique d'entraînement de la bande arrêté.
- du 07 au 08 août 1997 : système mécanique d'entraînement de la bande arrêté.
- du 08 août au 04 septembre 1997 : des travaux effectués par la COBEE ont empêché la mesure du débit (cours d'eau dévié).
- du 26 août au 04 septembre 1997 : limnigraphe descendu pour révision, changement d'appareil.

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).

• Lacunes dans les données

Aucune lacune n'est à déplorer cette année.

B. 4. Station météorologique portable à 5025 m d'altitude

Cette station portable a été installée du 25 juillet 1996 au 22 octobre 1996, en rive gauche de la partie terminale du glacier au milieu d'énormes crevasses caractéristiques du front du glacier.

• Descriptif

Il s'agit d'une station de mesure CR 10 - CAMPBELL (GB) comprenant les capteurs suivants :

1. Un psychromètre ventilé situé à 60 cm du sol. (Prototype : INRA de Bordeaux)
2. Un psychromètre ventilé situé à 195 cm du sol. (mêmes références que le précédent)
3. Un anémomètre-girouette situé à 240 cm du sol. (marque : Campbell, 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)
4. Un pyranomètre courtes longueurs d'onde situé à 110 cm du sol, dirigé vers le ciel. (marque : Campbell, référence : SP1110 Pyranometer Sensor, précision : inférieur à $\pm 5 \text{ W m}^{-2}$, gamme de longueurs d'ondes mesurée : de $0.35 \mu\text{m}$ à $1.1 \mu\text{m}$)
5. Un pyranomètre courtes longueurs d'onde situé à 110 cm du sol, dirigé vers le bas. (marque : Campbell, référence : SP1110 Pyranometer Sensor, précision : inférieur à $\pm 5 \text{ W m}^{-2}$, gamme de longueurs d'ondes mesurée : de $0.35 \mu\text{m}$ à $1.1 \mu\text{m}$)

Remarque : en raison de l'ablation ou de l'accumulation en surface, les hauteurs des capteurs varient au cours de la saison. Les hauteurs citées sont régulièrement relevées et ajustées lors des visites de routine (tous les 15 jours environ). Cette remarque vaut pour toutes les autres stations installées sur le glacier.

Les mesures sont effectuées toutes les 15 secondes. La station est alimentée par une batterie de 12V/6Ah, d'une autonomie d'environ 2 mois. Les psychromètres ventilés sont eux alimentés par un panneau solaire d'une puissance de 3 Watts. Cette source d'énergie est suffisante uniquement lors des jours de beau temps. Ainsi la nuit et les journées de nébulosité importante, les températures enregistrées ne sont pas ventilées

• Données recueillies

Nous disposons des moyennes demi-horaires et journalières suivantes :

1. La température sèche ventilée de l'air à 60 et 195 cm de la surface.
2. La température humide ventilée de l'air à 60 et 195 cm de la surface.
3. La vitesse et la direction du vent à 240 cm de la surface.
4. La radiation courtes longueurs d'ondes incidente à 110 cm de la surface.
5. La radiation courtes longueurs d'onde réfléchie à 110 cm de la surface.
6. L'albédo.

Des maxima journaliers suivants :

1. Les températures sèches et humides, hautes et basses.
2. La vitesse du vent.
3. Les radiations courtes longueurs d'onde incidente et réfléchie.

Des minima journaliers suivants :

- 1- Les températures sèches et humides, hautes et basses
- 2- L'albédo.

• Modifications survenues au cours de l'année hydrologique

hauteurs des capteurs :

jour	psychro bas (cm)	psychro haut (cm)	pyranomètres (cm)	anémomètre (cm)
25/07/96	65	200	115	245
17/09/96	avant : 140 après : 70	avant : 275 après : 205	avant : 190 après : 120	avant : 320 après : 250
04/10/96	avant : 70 après : 60			
18/10/96	après : 40		après : 110	

Tableau B.1 : évolution des hauteurs des capteurs de la station portable (5025m)

• Lacunes dans les données

- La girouette n'a en fait jamais fonctionné (capteur hors d'usage).
- Entre le 17 et le 19 septembre 1996, les deux psychromètres ont été descendus afin d'effectuer un contrôle des appareils. Le 19 septembre seul le psychromètre « bas » a été réinstallé.

B. 5. Stations météorologiques à 5150 m d'altitude

A cette altitude, deux centrales d'acquisition de mesures météorologiques ont été installées côte à côte. La station Campbell 21X a été installée le 06/09/95, la station Campbell Cr10 le 26/03/96.

B. 5.1. Station Campbell 21X

• Descriptif

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

1. Un hygromètre situé à 30 cm du sol. (marques : Campbell, références : 207 Temperature & RH probe, précision : <0.1 °C pour la température et < 3% pour l'humidité relative)
2. Un hygromètre situé à 180 cm du sol (*mêmes caractéristiques que le précédent*)
3. Un bilanmètre situé à 100 cm du sol. (marques : REBS, références : Q-6 net radiometer)
4. Un pyranomètre courtes longueurs d'ondes dirigé vers le ciel, situé à 100 cm du sol. (marques : LI-COR, références : Li-200sz, précision : < ±5% mais typiquement < ±3%, gamme de longueurs d'ondes mesurée : de 0,35 à 1,1 μm)
5. Un pyranomètre courtes longueurs d'ondes dirigé vers le bas, situé à 100 cm du sol. (*mêmes caractéristiques que le précédent*)
6. Un anémomètre situé à 30 cm du sol (marques : Met One, références : 014 Met One, précision : ±1,5%, seuil de mesure : 0,45 ms⁻¹)
8. Un anémomètre situé à 180 cm du sol (marques : Wales)

9. Une sonde à neige mesurant en continu l'ablation ou l'accumulation (marques : Campbell, références : UDG01 Ultrasonic Depth Gauge, précision : +/- 1 cm ou 0.4 % de la distance mesurée, température de fonctionnement : de -25 °C à +50 °C)

10. Deux thermocouples de type 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.

11. Deux sondes Platine de température située à 30 et 180 cm du sol. (marques : Campbell, 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 l'autonomie en énergie de la station n'est pas limitée.

• Modifications survenues au cours de l'année hydrologique

Hauteurs des capteurs :

jour	hygro-thermomètre bas (cm)	hygro-thermomètre haut (cm)	anémomètre bas (cm)	anémomètre haut (cm)	bilanmètre (cm)	pyranomètres (cm)
25/08/96	150	300	130	310	165	170
12/09/96	140	290	115	300	160	165
04/10/96	135		120		169	175
18/10/96	165		150		205	200
22/10/96	avant : 172 après : 60	avant : . après : 220	avant : 157 après : 60	avant : . après : 260	avant : 212 après : 95	avant : 207 après : 110
30/10/96	65	230	60	260	95	110
14/11/96	40	195	30	245	70	75
15/11/96	39	198	25	243	72	72
16/11/96	33	200	20	247	64	66
02/12/96	30	188	25	238	68	80
16/12/96	avant : 05 après : 83	avant : 163 après : 180	avant : 0 après : 80	avant : 213 après : 220	avant : 43 après : 90	avant : 55 après : 103
23/12/96	75	170	65	220	84	98
02/01/97	60	152	50	187	61	76
07/01/97	60		50	220	71	83
22/01/97	avant : 40 après : 40	avant : 164 après : 187	avant : 31 après : 31	avant : 197 après : 197	avant : 44 après : 60	avant : 58 après : 74
03/02/97	avant : 17 après : 40	avant : 160 après : 160	avant : 3 après : 25	avant : 175 après : 175	avant : 39 après : 39	avant : 52 après : 52
21/02/97	50	170	35	185	58	50
08/03/97	avant : 23 après : 36	avant : 145 après : 145	avant : 17 après : 36	avant : 150 après : 150	avant : 44 après : 44	avant : 42 après : 42
21/03/97	avant : 25 après : 38	avant : 133 après : 133	avant : 15 après : 30	avant : 133 après : 133	avant : 36 après : 40	avant : 32 après : 40
11/04/97	0	90		92	69	57
30/04/97		96		96	68	58
15/05/97	10	110	5	110	90	76

jour*	hygromètre (cm)	thermomètre bas (cm)	thermomètre haut (cm)	anémomètre bas (cm)	anémomètre haut (cm)	bilanmètre (cm)	pyrano (cm)
26/05/97	130	30	195	22	185	86	74
10/06/97		30	195	24	187	92	80

jour**	hygro-thermomètre bas (cm)	hygro-thermomètre haut (cm)	anémomètre bas (cm)	anémomètre haut (cm)	bilanmètre (cm)	pyranomètres (cm)
22/06/97	30	180	30	180	95	85
26/07/97	75	220	58	217	140	120
14/08/97	avant : 70 après : 40	avant : 180 après : 180	avant : 60 après : 40	avant : 210 après : 185	avant : 135 après : 135	avant : 120 après : 120

* : changement de la répartition des appareils pour une période de calibration

** : fin de période de calibration

Tableau B.2 : évolution des hauteurs des capteurs de la station 21X (5150m)

Autres :

- Du 22/08/96 au 22/10/96, l'anémomètre « bas » a été placé à côté de l'anémomètre « haut » (à 220 cm du sol) afin de comparer leurs mesures. Un nouvel anémomètre, géré par la station CR10 (anémomètre de marque Met One, modèle : 014A, précision : $< \pm 1.5 \%$), fut utilisé en remplacement.

A la suite de cet essai, l'anémomètre « bas » a été redescendu à son emplacement initial et son remplaçant a été installé pour effectuer les mesures hautes.

- La sonde à neige n'a plus fonctionné à partir du 11 avril 1997

• Données recueillies

Nous disposons des moyennes demi - horaires et journalières suivantes :

1. La température de l'air non ventilée à 30 et 180 cm de la surface.
2. L'humidité relative de l'air à 30 et 180 cm de la surface.
3. La vitesse du vent à 30 et 180 cm de la surface.
4. La radiation courtes longueurs d'onde incidente et réfléchie à 100 cm de la surface.
5. La radiation nette toutes longueurs d'onde à 100 cm de la surface.
6. 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 :

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

Nous disposons des minima journaliers suivants :

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

Lacunes dans les données

- Le bilanmètre a été débranché involontairement entre le 07 janvier et le 21 février
- Une période de lacunes est à déplorer du 27 juillet 97 au 3 août 97. Ces lacunes sont dues à un dépassement de la capacité de stockage des données.

B. 5.2. Station Campbell CR10

Cette station météorologique a été installée le 26/03/96 à environ 6 mètres de la station 21X. Les capteurs et la centrale d'acquisition des données ne sont pas sur le même mât. Le mât supportant tous les capteurs se trouve à 10 mètres d'un second mât supportant la centrale. 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 multiplexer afin d'augmenter le nombre de mesures. Les mesures sont effectuées toutes les 15 secondes.

Elle possède les capteurs suivants :

1. Un psychromètre ventilé à 30 cm du sol (*prototype INRA - Bordeaux*)
2. Un psychromètre ventilé à 180 cm sol (*mêmes caractéristiques que le précédent*)
4. Des thermocouples 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.
5. Un bilanmètre situé à 55 cm du sol. (marque : Campbell, 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)
6. Deux anémomètre-girouette situés à 30 cm et 180 cm du sol. (marque : Campbell, référence : 05103 Wind Monitors Young, 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:

jour	psychro bas (cm)	psychro haut (cm)	bilanmètre (cm)
12/09/96	59	204	65
04/10/96	55	205	63
18/10/96	avant : 85 après : 35	avant : 230 après : 180	avant : 95 après : 50
22/10/96	43	188	
30/10/96	45	195	
18/11/96	21	167	
02/12/96	34	179	
16/12/96	avant : 14 après : 30	avant : 160 après : 180	
23/12/96	avant : 25 après : 36	avant : 175 après : 186	
02/01/97	avant : 20 après : 50	avant : 170 après : 200	
07/01/97	66	209	
22/01/97	47	189	
03/02/97	avant : 28 après : 30	avant : 173 après : 180	
18/02/97	30	180	

jour	psychro bas (cm)	psychro haut (cm)	Anémo bas (cm)	Anémo haut (cm)
08/03/97	avant : 23 après : 44	avant : 173 après : 199	avant : 23 après : 44	avant : 180 après : 199
21/03/97	avant : 25 après : 42	avant : 175 après : 192	avant : 13 après : 35	avant : 162 après : 185
11/04/97	avant : 12 après : 58	avant : 168 après : 208	avant : -5 après : 50	avant : 142 après : 200
23/04/97	avant : 65 après : 30	avant : 215 après : 180	avant : 45 après : 34	avant : 195 après : 184
30/04/97	avant : 35 après : 30	avant : 185 après : 180	avant : 40 après : 33	avant : 190 après : 183
15/05/97	avant : 44 après : 30	avant : 194 après : 180	avant : 54 après : 32	avant : 204 après : 182
08/03/97	avant : 23 après : 44	avant : 173 après : 199	avant : 23 après : 44	avant : 180 après : 199
26/05/97	22	172	23	173
10/06/97	30	180	40	190
22/06/97	avant : 42 après : 30	avant : 192 après : 180	avant : 42 après : 30	avant : 192 après : 180
26/07/97	avant : 60 après : 30	avant : 220 après : 180	avant : 77 après : 52	avant : 218 après : 200
01/08/97	avant : 42 après : 30	avant : 192 après : 180	avant : 62 après : 50	avant : 212 après : 200
26/08/97	35	180	40	180

Tableau B.3 : évolution des hauteurs des capteurs de la station Cr10 (5150m)

autres:

- Le bilanmètre a été enlevé définitivement de la station le 23 octobre 96, afin d'être utilisé en Equateur
- Les deux anémomètres installés le 2 mars 97 n'ont fonctionné correctement qu'à partir du 22 avril 97 à cause d'un problème de branchement : il ne faut pas brancher deux anémomètres sur une même prise pulse
- 21/03/97 : réorientation du nord de la girouette bas
- 20/05/97 : réorientation des références Nord des deux girouettes

• Données recueillies

Nous disposons des moyennes demi - horaires et journalières suivantes :

1. La température sèche de l'air à 30 et 180 cm de la surface.
2. La température humide de l'air à 30 et 180 cm de la surface.
3. 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).
4. Les vitesses du vent à 30 et 180 cm de la surface.
4. Les directions du vent à 30 et 180 cm de la surface.
6. La radiation nette, toutes longueurs d'onde confondues, à 60 cm de la surface

Ainsi que les extrêmes journaliers suivants :

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

• Lacunes dans les données

- Psychromètre bas trouvé en panne le 12/09/96, descendu à La Paz pour réparation, puis réinstallé le 19/09/96
- Psychromètre haut descendu pour révision du 17/09/96 au 19/09/96

B. 6. Station météorologique portable à 5550 m d'altitude

Du 23/04/96 au 07/10/97 une station du type CR10 a fonctionné dans la zone d'accumulation du glacier à 5550m (pour le descriptif et le détail des données recueillies Cf. rapport n°55). A partir du 23/10/96 et tout le reste de la année hydrologique, 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:

1. Un bilanmètre situé à 1 m du sol. (marques : Campbell, 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)

2. Un anémomètre-girouette situé à 250 cm du sol. (marque : Campbell, 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)
3. Un pyranomètre courtes longueurs d'onde situé à 120 cm du sol, dirigé vers le ciel. (marque : Campbell, référence : SP1110 Pyranometer Sensor, précision : inférieur à ± 5 , gamme mesurée : de $0.35 \mu\text{m}$ à $1.1 \mu\text{m}$)
4. Un pyranomètre courtes longueurs d'onde situé à 120 cm du sol, dirigé vers le bas. (marque : Campbell, référence : SP1110 Pyranometer Sensor, précision : inférieur à ± 5 , gamme mesurée : de $0.35 \mu\text{m}$ à $1.1 \mu\text{m}$)
5. 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 12V/6Ah. L'autonomie semble être de l'ordre de quelques mois.

• Données recueillies

Nous disposons des moyennes demi - horaires et journalières suivantes :

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

Ainsi que les maxima journaliers de :

1. Les températures humides et sèches de l'air à 30 cm de la surface.
2. La radiation nette à 1 m de la surface.
3. La radiation courtes longueurs d'onde directe à 120 cm de la surface.
4. La radiation courtes longueurs d'onde réfléchi à 120 cm de la surface.
3. La vitesse du vent à 250 cm de la surface.

Et les minima journaliers de :

1. Les températures humides et sèches de l'air à 30 cm de la surface.
2. La radiation nette à 1 m de la surface.
5. l'albédo.

• Lacunes dans les données

Les pertes de données dues à un mauvais fonctionnement de la batterie correspondent aux périodes suivantes :

- du 01/12/96 au 03/12/96
- du 30/06/97 au 11/08/97

De plus du 11/08/96 au 14/08/97, nous ne disposons ni des mesures de radiation nette ni des mesures de la direction du vent à cause d'une erreur de chargement de programme.

B. 7. Mesures réalisées sur la moraine

B. 7.1. Mesures de température

• Descriptif

Un thermomètre OMNIDATA (sonde Pt) enregistre la température de l'air sous abri à 5165 mètres d'altitude en rive droite du glacier à environ 300 m de distance des stations météorologiques sur le glacier 21x et Cr10.

• 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 19 au 22 septembre 96
- du 02 au 07 janvier 97
- du 20 au 21 mars 97
- du 05 au 10 juin 97
- du 26 au 28 août 97

B. 7.2. Mesures cumulées des précipitations

Un réseau de 6 pluviomètres totalisateurs est installé sur les moraines autour du glacier à différentes altitudes de façon à appréhender la variabilité spatiale des précipitations

• Descriptif

Caractéristiques : 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.

P8 : 4750 m, Plataforma.

Type II : P1 : 5165 m, moraine rive droite

P3 : 4945 m, moraine rive gauche.

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

Les mesures du mois de janvier n'ont pas été effectuées.

B. 8. Mesures réalisées lors de missions ponctuelles sur le glacier.

En complément du dispositif de mesure permanent, trois missions ponctuelles sur le glacier à 5150m d'altitude ont été réalisées. Les objectifs étaient les mêmes que ceux des missions de l'année précédente.

Chronologie :

1. en saison des pluies du 13 au 18 novembre 1996
2. en fin de la transition entre la saison des pluies et la saison sèche du 19 au 27 mai 1997
3. en saison sèche du 1 au 11 août 1997

Comme l'année dernière les mesures effectuées furent les suivantes :

- Mesures d'évaporation et de sublimation à partir de lysimètres.

Ces mesures ont été effectuées lors des trois missions. De plus au cours de la saison sèche des lysimètres, mesurés lors des visites de routine (environ tous les 15 jours), ont été laissés en place à 5150 m pour une durée d'environ un mois.

- Mesures de fusion.

Lors des trois missions, ces mesures ont été effectuées avec une « boîte à fusion ». On rappelle qu'il s'agit d'une caisse métallique blanche constituée d'une partie supérieure avec un fond en grillage (3 épaisseurs de grillage, maille : 1 mm), qui s'emboîte dans un bac étanche. On remplit la partie supérieure de neige et on enterre le tout à la manière des lysimètres. Ainsi chaque soir on mesure l'eau de fonte contenue dans le bac inférieur. Les dimensions de la partie recevant la neige sont les suivantes : 49 cm × 49 cm × 15 cm.

- Mesures des températures de l'air et de la neige à la surface du glacier.

- Température sèche de l'air à la surface mesurée par un psychromètre ventilé portable, donné par l'*Universität Innsbruck* (caractéristiques inconnues).
- Température de la neige ou de la glace à la surface mesurée par deux types d'appareil : trois sondes platines prêtées par le Laboratoire de Glaciologie de Grenoble et un thermomètre numérique à sonde (marque : ADIP, modèle : PN2A s, caractéristique : Pt 100Ω à 0°C, précision : inconnue, néanmoins il affiche 0/-0.1 °C lorsque sa sonde est plongée dans de la glace fondante).

De petites plaques métalliques blanches (3 cm*5 cm) sont installées sur les sondes afin d'accroître leur inertie thermique, et de les protéger des radiations solaires. Néanmoins cette dernière protection étant peu efficace, les mesures de jour peuvent être fausses par beau temps.

- Mesures du regel nocturne.

Dans un récipient rempli d'environ 2 kg d'eau liquide, on mesure chaque matin (chaque soir) la quantité d'eau qui a gelé durant la nuit (pendant la journée). Le récipient en plastique utilisé (25 cm*18 cm et 12cm de profondeur) est enterré dans la neige ou la glace à la manière des lysimètres.

- Mesures de la densité de la neige.

Par pesée de carottes issues d'un cylindre métallique de 7 cm de diamètre, 16 cm de longueur et pesant 528 g, on mesure la densité de la neige de surface afin de suivre les transformations du manteau neigeux.

- Mesures de la teneur en eau liquide de la neige.

La teneur en eau liquide est la proportion d'eau en phase liquide présente par capillarité dans la neige. Cette mesure, qui complète la mesure de densité et est effectuée par une sonde diélectrique LEAS (caractéristiques non données), est basée sur la mesure de la permittivité relative de la neige.

- Mesures d'émergence de balises.

Afin de évaluer précisément l'ablation ou l'accumulation sur le site de la mission, on mesure les émergences d'une dizaine de balises deux fois par jour (la précision est de l'ordre du millimètre de neige ou de glace).

- Observations météorologiques et observation de l'évolution de la surface du glacier.

Il s'agit d'évaluer toutes les demi-heures la journée et toutes les 4 heures la nuit, les paramètres suivants : la nébulosité (i.e. couverture nuageuse), la force et la direction du vent, la qualité de la surface (neige fraîche, glace vive, pénitents...), et les périodes où se produit la fusion superficielle.

B. 9. Récapitulatif

<u>Température de l'air sous abri :</u>	à 4750 m (deux mesures à la Plataforma) à 5165 m (sur la moraine)
<u>Température sèche ventilée de l'air :</u>	à 5025 m (sur le glacier, mesures « basse » et « haute ») à 5150 m (sur le glacier, mesures « basse » et « haute ») à 5550 m (sur le glacier, mesure « basse »)
<u>Température humide ventilée de l'air :</u>	à 5025 m (sur le glacier, mesures « basse » et « haute ») à 5150 m (sur le glacier, mesures « basse » et « haute ») à 5550 m (sur le glacier, mesure « basse »)
<u>Humidité relative :</u>	à 4750 m (Plataforma) à 5025 m (sur le glacier, mesures « basse » et « haute ») à 5150 m (sur le glacier, mesures « basse » et « haute ») à 5550 m (sur le glacier, mesure « basse »)
<u>Radiation solaire directe et réfléchi :</u>	à 4750 m (plataforma, radiation directe seulement)

à 5025 m (sur le glacier)
à 5150 m (sur le glacier)
à 5550 m (sur le glacier)

Radiation nette : à 5150 m (sur le glacier)
à 5550 m (sur le glacier)

Vitesse et direction du vent : à 4750 m (plataforma, la direction n'est pas
mesurée)
à 5025 m (sur le glacier)
à 5150 m (sur le glacier, mesures « basse » et
« haute »)
à 5550 m (sur le glacier)

Pluie : à 4750 m (deux mesures)
à 4850 m
à 5000 m
à 5165 m

Débit du torrent émissaire du glacier : à 4850 m

C. TEMPERATURES DE L'AIR

Nous enregistrons la température de l'air sous abri hors du glacier à 4750 m (deux mesures) et à 5165 m d'altitude. Sur le glacier, on dispose des mesures à 5025 m, 5150 m et 5550 m d'altitude.

C. 1. Températures instantanées

Les valeurs instantanées évoquées dans ce paragraphe sont les moyennes demi-horaires issues des stations météorologiques Campbell à 5150 m sur le glacier (stations 21x et Cr10), et les moyennes bi-horaires de l'Omnidata à 5165 m sur la moraine.

C. 1.1. Influence de la ventilation sur les températures à 5150 m

Afin de vérifier les conclusions de l'année dernière concernant l'influence de la ventilation sur les températures à 5150 m, nous étudions les deux mêmes périodes de données retenues en 95-96, soit la première semaine d'avril et la dernière semaine de juin.

Les mesures non ventilées sont celles issues des hygrothermomètres de la station 21X, les mesures ventilées celles issues des psychromètres de la station Cr10. 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.

- Avril 97

Les plus grands écarts entre la température ventilée et la température non ventilée, que ce soit pour les mesures basses ou hautes, se situent en milieu de journée lorsque la radiation est maximum (figure C.1 et C.2). Pour les mesures basses, le coefficient de corrélation entre les séries ventilées et non ventilées est très proche de celui de l'année dernière pour la même période (0,83 à comparer à 0,86), par contre cette année ce coefficient concernant les mesures hautes est plus faible que son équivalent de l'année dernière (0,71 au lieu de 0,82). Concernant les mesures hautes, les différences expliquant un si faible coefficient de corrélation entre les séries ventilées et non ventilées ne proviennent que des pics de la température non ventilée en milieu de journée, pics dus à une forte radiation, et la nuit les deux séries sont quasiment identiques.

Par contre pour les mesures basses, et comme l'année dernière, on peut noter que malgré un écart de 2 à 4 degrés la nuit entre les températures ventilées et non ventilées, le coefficient de corrélation entre les deux séries est assez élevé. Si ce décalage était constant et systématique on pourrait évoquer pour l'expliquer un problème de calibrage des capteurs, mais en fait l'écart n'est systématique que pour les premiers jours de la semaine étudiée.

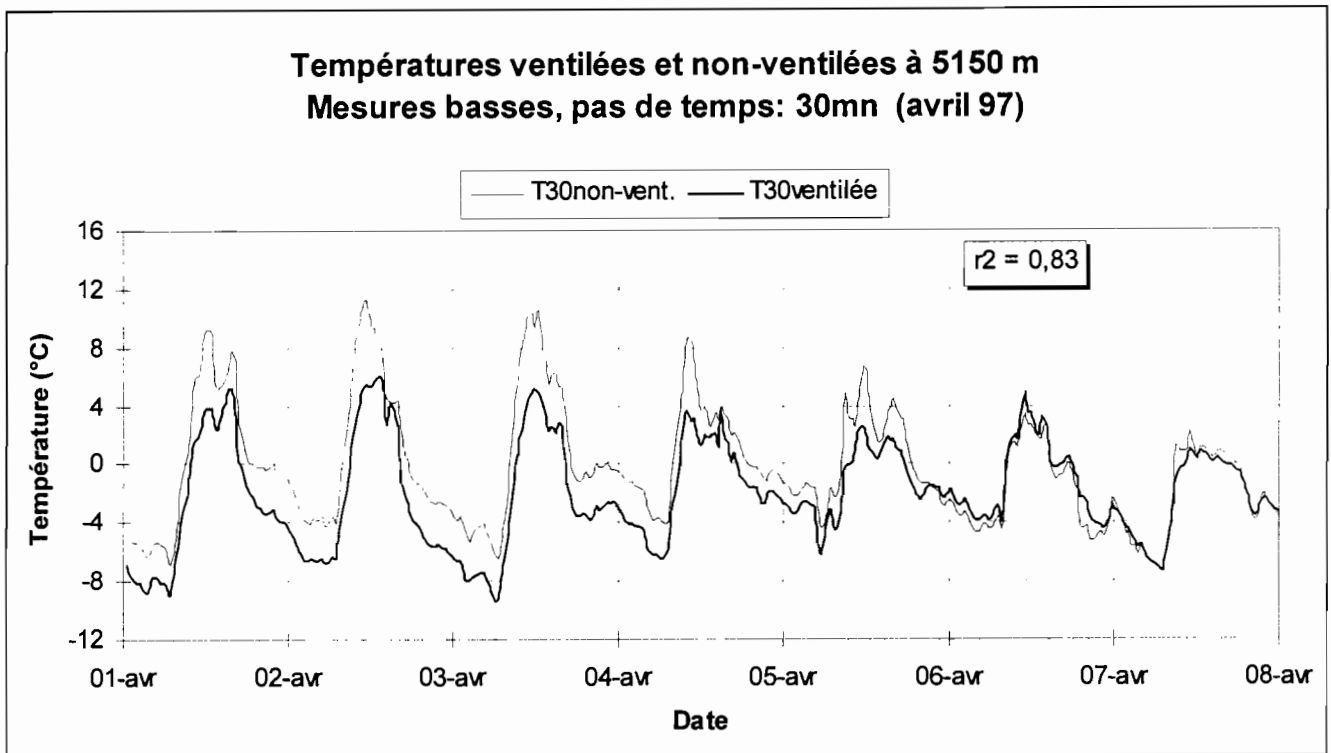


Figure C.1

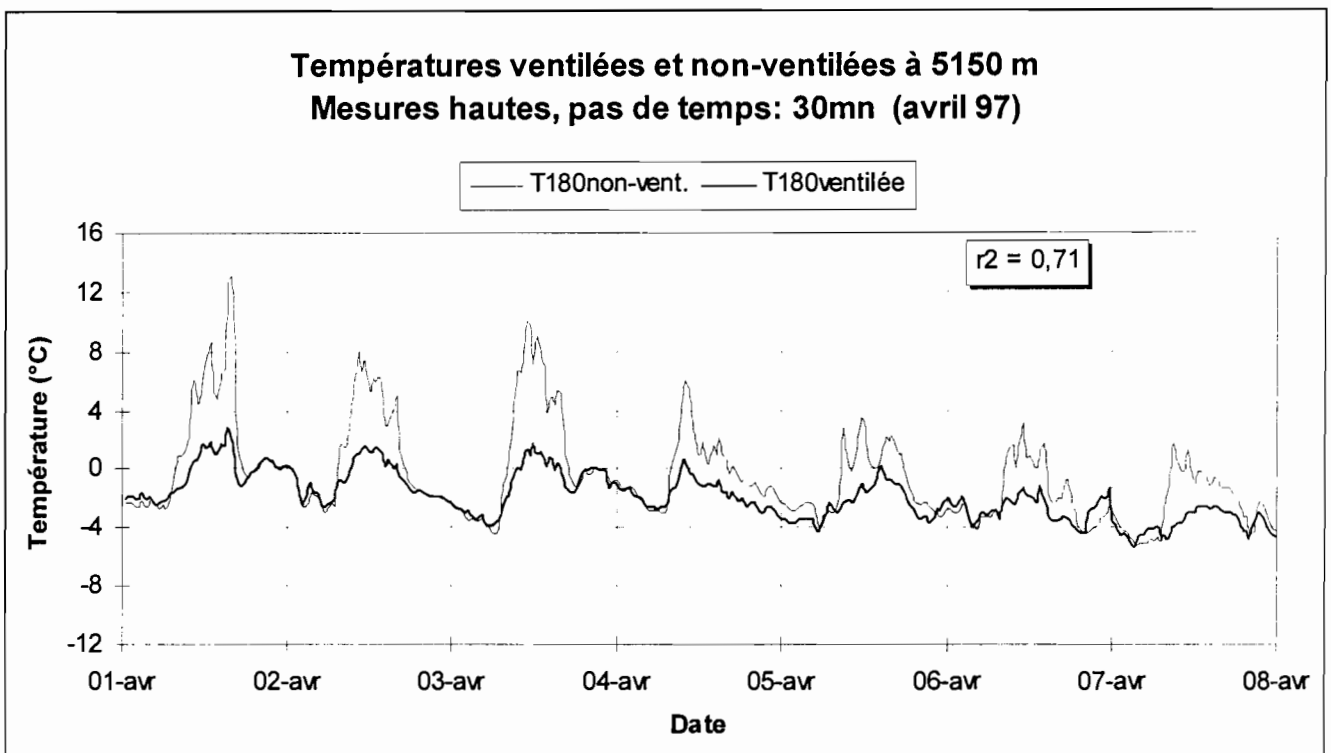


Figure C.2

Les courbes représentant l'évolution de la différence entre les températures basse et haute (Cf. figure C.3) font apparaître des plus grandes amplitudes entre le jour et la nuit que l'année dernière (amplitude d'une dizaine de degré au lieu de 4 degrés).

En particulier pour les mesures ventilées, cette figure laisse apparaître une tendance régulière et prévisible :

- la nuit la température basse est plus faible que la température haute : profil stable ($R_n < 0$ à cause de l'émission de surface dans l'infrarouge)

- la journée, la couche d'air humide au dessus de la surface est chauffée par la radiation solaire et le gradient thermique est négatif. Le profil est alors instable avec une couche chaude surmontée d'une couche froide (Wagnon et al., soumis).

Malgré une grande différence d'amplitude et d'évolution entre les gradients de cette année et ceux de l'année dernière, les coefficients de corrélation entre les séries ventilées et non ventilées sont similaires pour ces deux années (0,57 et 0,53).

On peut s'étonner du fait que les différences ($T_{bas} - T_{haut}$) non ventilées soient plus proches des mesures ventilées en journée que durant la nuit. Or la journée, les températures hautes et basses non ventilées sont surestimées du même ordre de grandeur par rapport aux mesures ventilées (environ 4 degrés) et le gradient vertical n'est ainsi pas trop biaisé. Par contre durant la nuit, nous avons vu que la température basse non ventilée restait plutôt supérieure à celle ventilée (en particulier pour les premiers jours de la semaine étudiée), alors que ce décalage nocturne était inexistant pour les mesures hautes. La différence ($T_{bs} - T_{ht}$) se trouve ainsi surestimée.

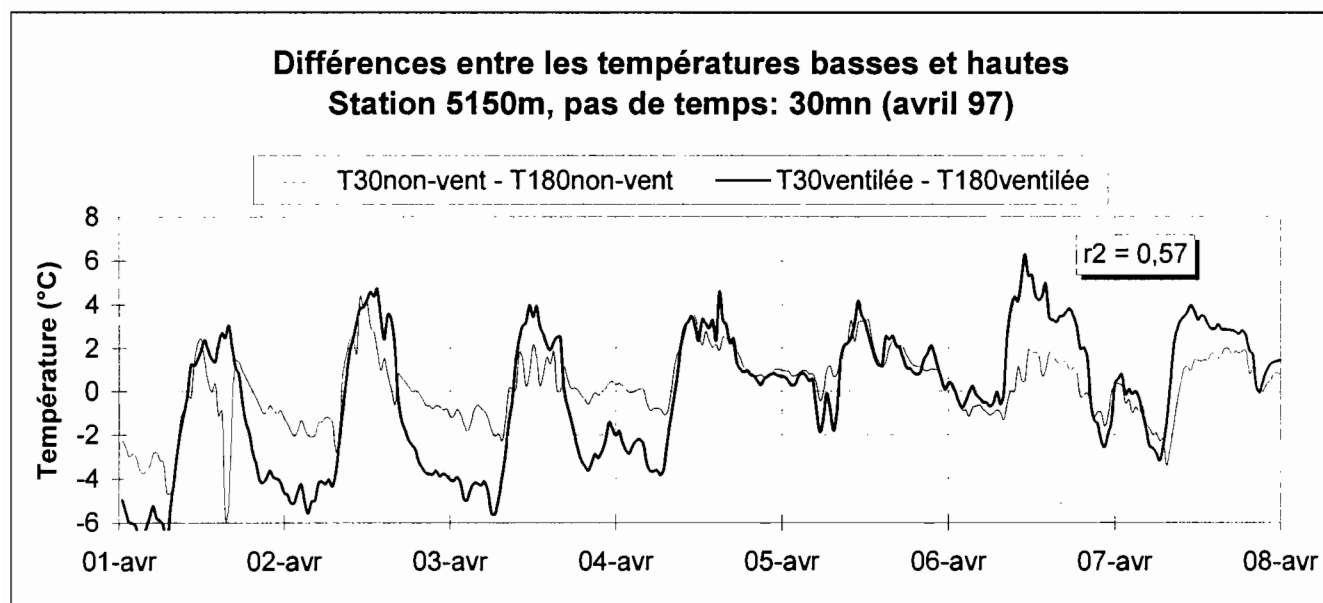


Figure C3

- Juin 97

Comme l'année dernière, les coefficients de corrélation entre les séries ventilées et non ventilées sont élevés pour les mesures hautes et basses (0,96 et 0,87, Cf. figures C.4 et C.5). Les pics de température non ventilée dus aux radiations solaires sont plus faibles (moins de 4 degrés) qu'en avril pour les mesures hautes, et même pratiquement inexistantes pour les mesures basses. Ainsi soit la radiation a une plus grande influence sur les températures en avril malgré une plus grande couverture nuageuse, soit le vent plus fort en juin provoque une meilleure ventilation des capteurs de la 21X (moyennes mensuelles de la vitesse du vent à 5550 m : 2,07 m/s en avril et 3,13 m/s en juin, la moyenne du mois d'avril à 5150 m n'est pas disponible, Cf. tableau I.2).

Concernant les mesures basses, on retrouve la permanence d'un écart nocturne entre les mesures ventilées et celles non ventilées.

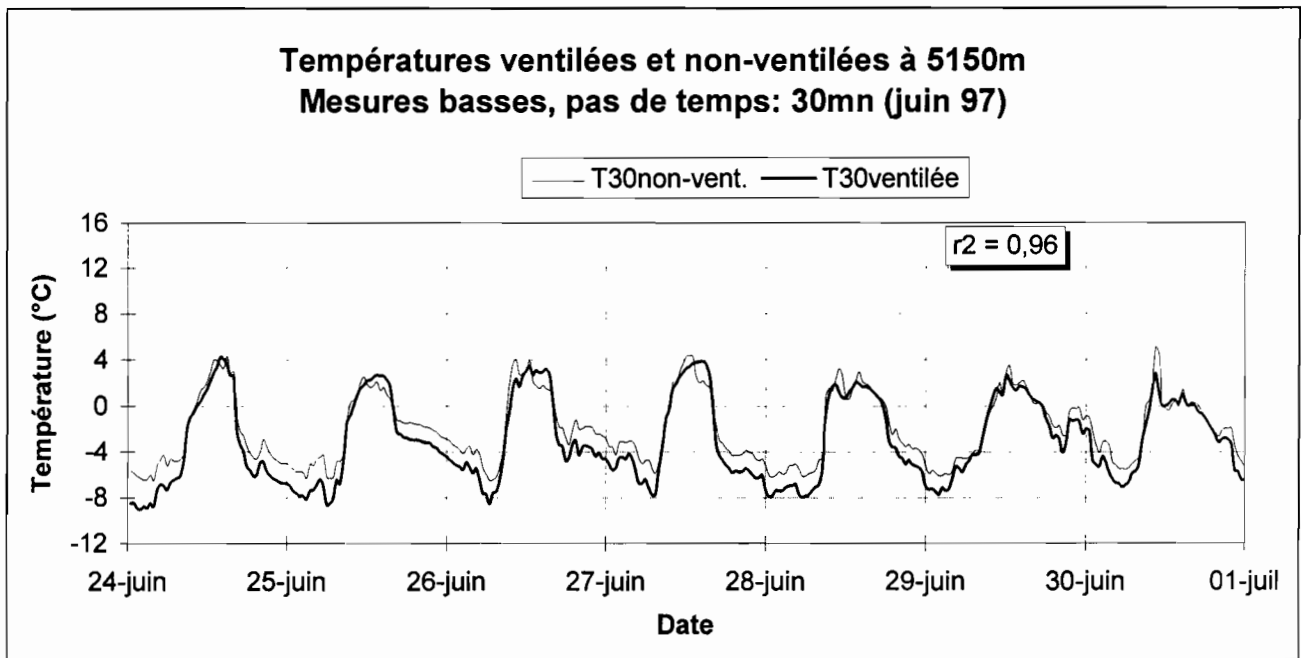


Figure C.4

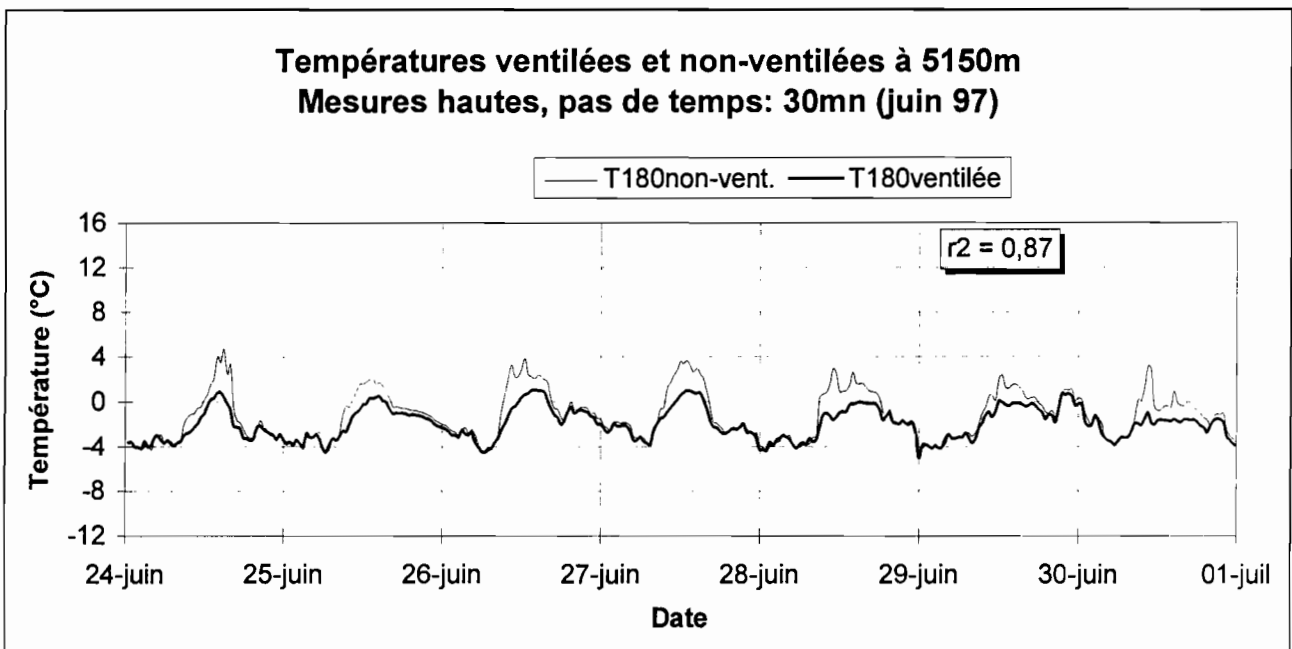
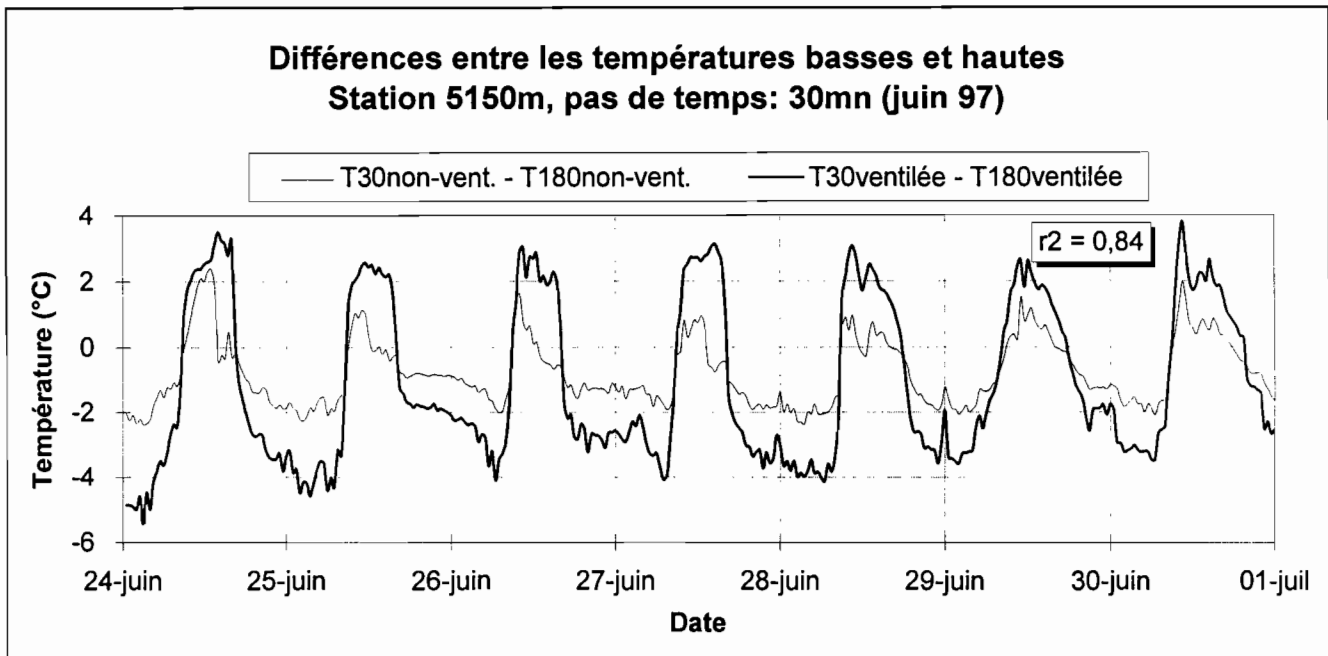


Figure C.5

Le coefficient de corrélation entre les différences ($T_{bas} - T_{haut}$) des mesures ventilés et non ventilés est plus élevé que celui de l'année dernière (0,84 au lieu de 0,66, Cf. figure C.6). Les écarts entre les séries ventilées et non ventilées sont similaires à ceux observés la première semaine d'avril : faibles la journée et plus grands la nuit. Les remarques faites au sujet de cette évolution journalière lors de la première semaine d'avril sont également valables ici.



- Conclusion

La ventilation permet donc de prévenir l'apparition d'un pic artificiel de température dû à la radiation solaire. Les coefficients de corrélation calculés entre les séries ventilées et les séries non ventilées sont élevés (supérieurs à 0.70), cependant les écarts sont différents d'un capteur à l'autre et perturbent les calculs des gradients verticaux (le coefficient de corrélation entre les différences (Tbas-Thaut) ventilées et non ventilées est de 0.57 pour la première quinzaine d'avril). Ainsi il est nécessaire de maintenir la ventilation des psychromètres jours et nuits, quel que soit le temps.

C. 1.2. Evolution au cours de l'année de la différence (Tbas-Thaut) pour les mesures ventilées à 5150 m d'altitude

Les figures C.7 et C.8 permettent de suivre l'évolution de la différence entre les mesures ventilées basses et hautes issues de la station CR10 à 5150 m sur le glacier. On retrouve ici l'évolution journalière de cette différence de température déjà évoquée au chapitre précédent : différence (Tbas-Thaut) négative la nuit et positive la journée. De plus ces figures font apparaître une augmentation de la différence en saison des pluies. En effet de septembre à avril les différences entre les deux températures sont réparties autour d'une moyenne de 0,88°C et de mai à fin août autour de -1°C. La moyenne sur l'année est de +0.2°C, pour un écart type de 2.4°C. En saison des pluies la surface du glacier est le plus souvent en fusion donc à 0 °C, ce qui implique des différences (Tbas-Thaut) plus élevées qu'en saison sèche.

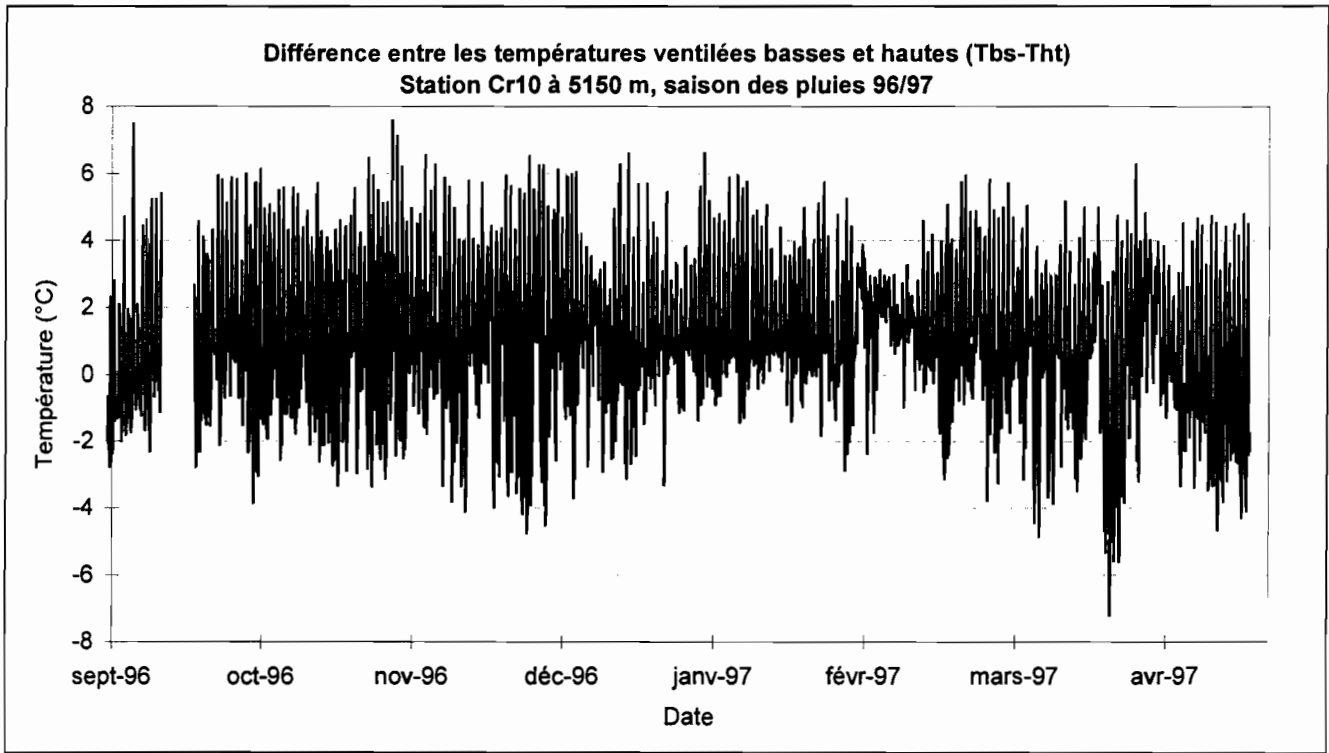


Figure C.7

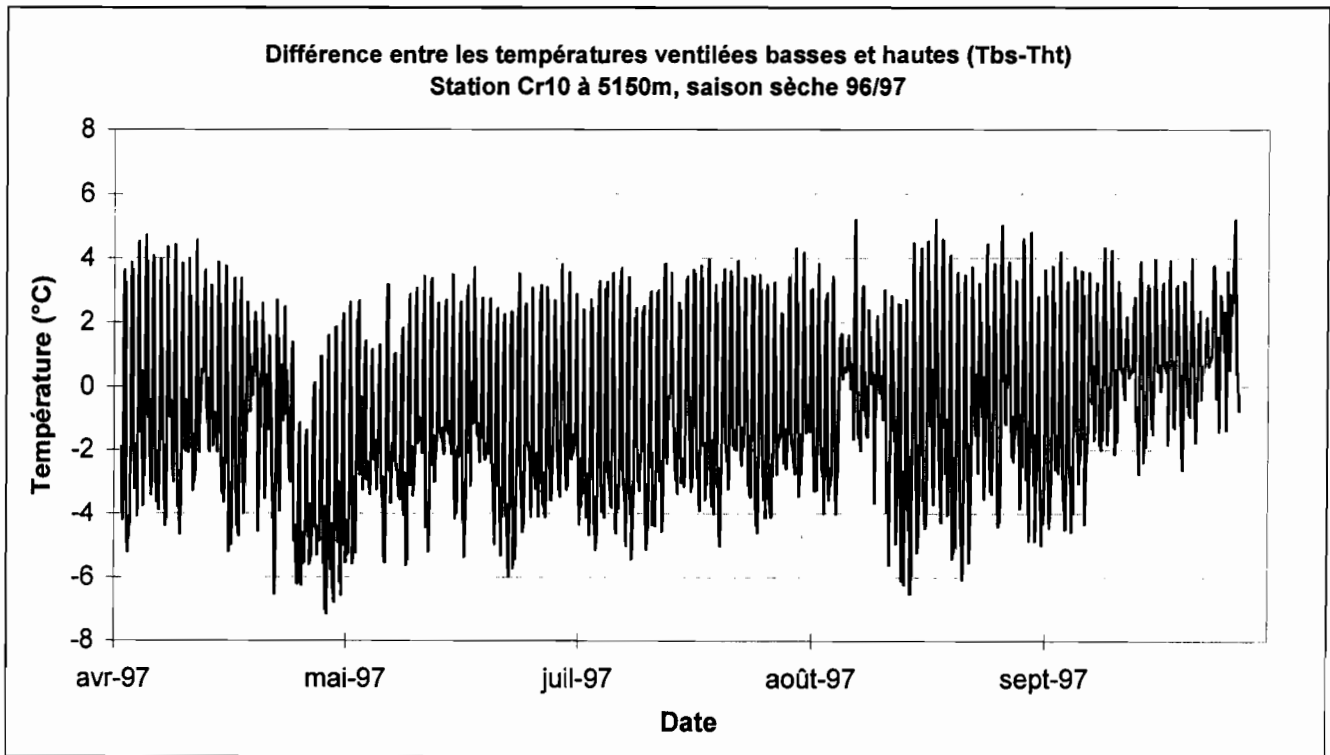


Figure C.8

C. 1.3. Température de l'air à 5150 m, comparaison des séries sur et hors du glacier

a- Valeurs instantanées

Nous disposons des mesures de température de l'air à 5150 m sur le glacier et à 5165 m hors du glacier. La mesure hors du glacier est celle de l'enregistreur Omnidata, et à la différence des comparaisons des rapports précédents la mesure sur le glacier est celle du thermomètre ventilé haut de la station Cr10. Nous avons sélectionné quatre périodes de 15 jours : les quinze premiers jours de novembre 96 et ceux de février 97 représentatifs des conditions de la saison des pluies, les quinze premiers jours d'avril 97 représentatifs de la période de transition entre les deux saisons, et les quinze premiers jours de juillet représentatifs des conditions de la saison sèche.

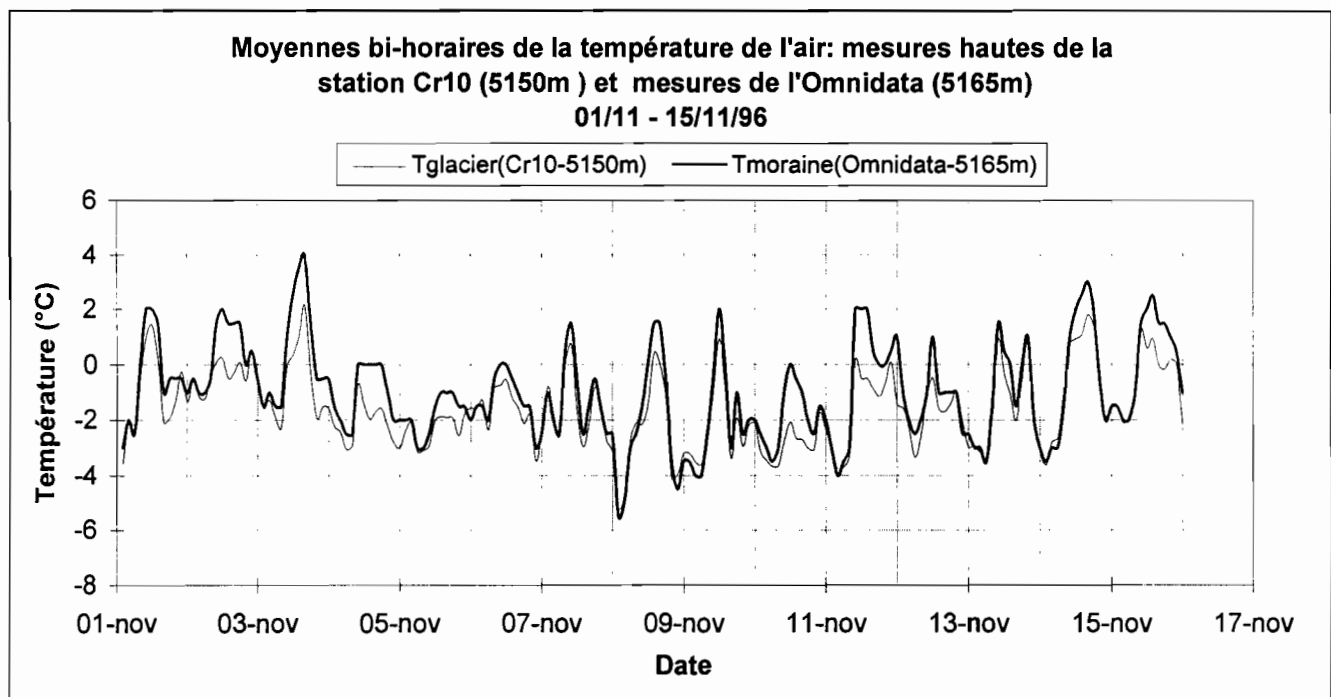


Figure C.9

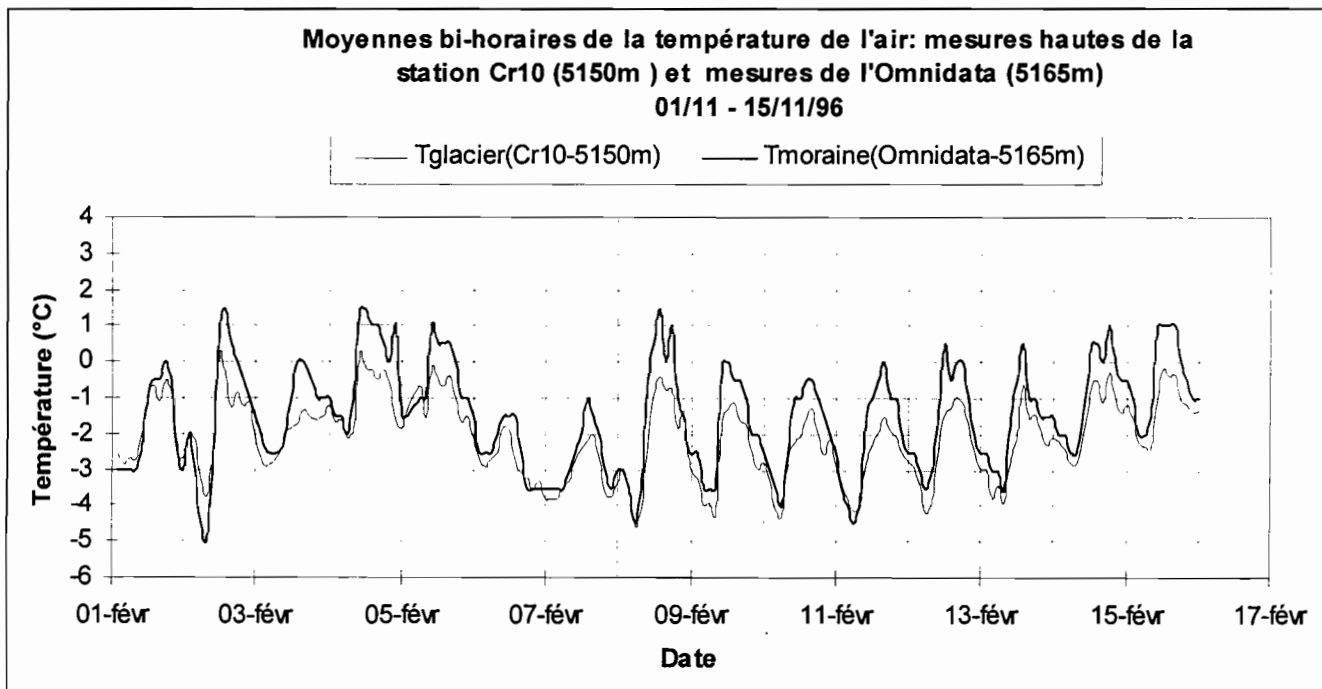


Figure C.10

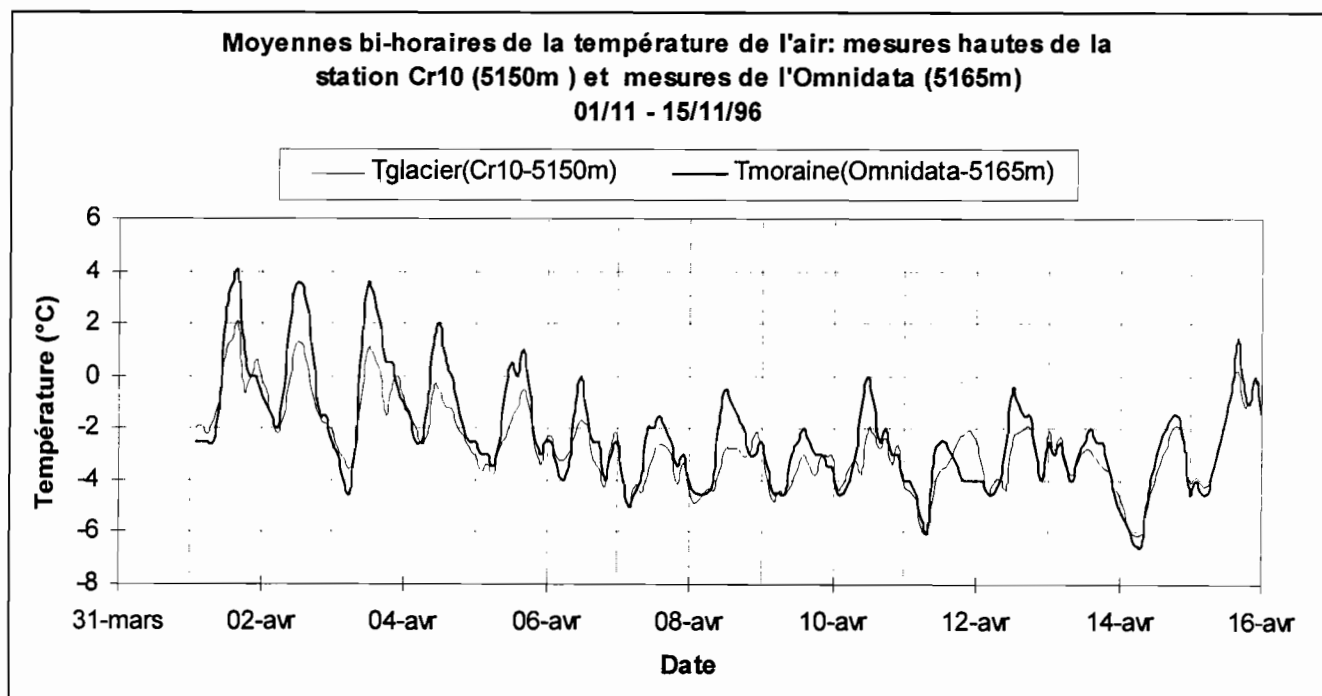
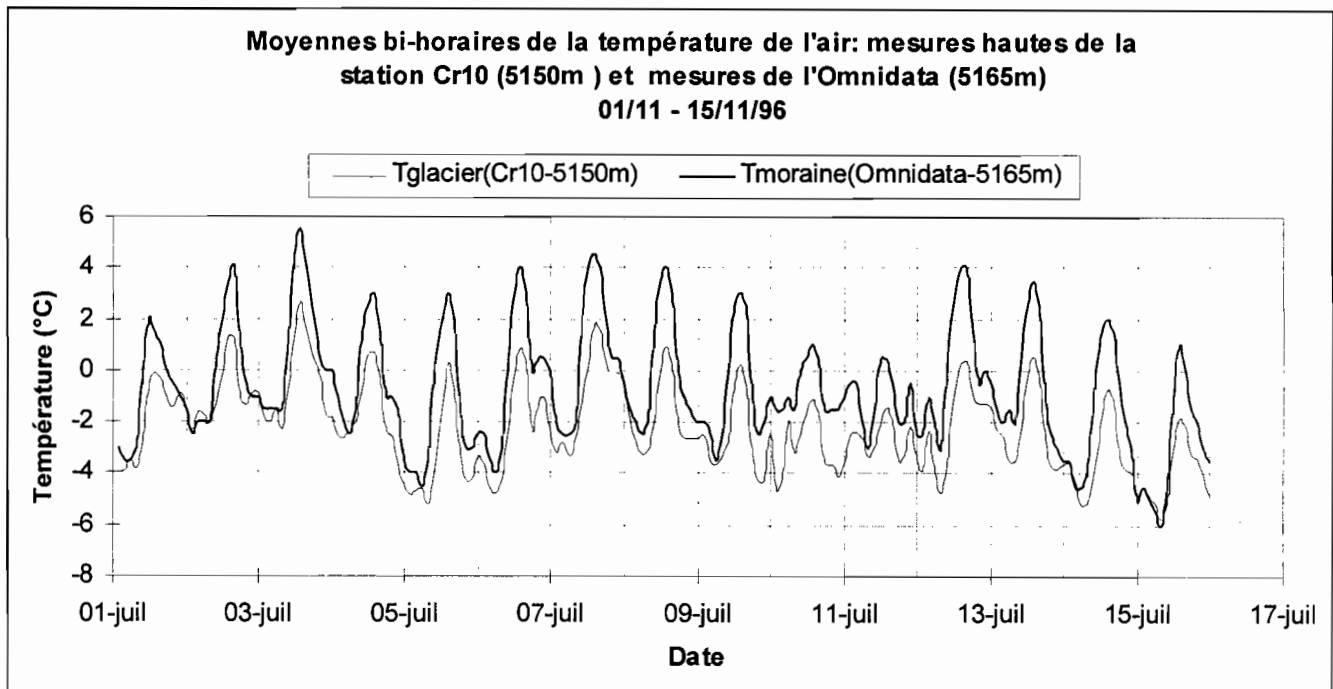


Figure C.11



Dans le rapport N°49 (année 94-95) les comparaisons entre la température sur la moraine et sur le glacier à 5150 m d'altitude sont basées sur des mesures non ventilées, les seules alors disponibles. Dans ces conditions à cause de la radiation solaire, les mesures de température sur le glacier sont surestimées et systématiquement supérieures à celles sur la moraine pendant la journée. Dans le rapport N°55 (95-96), une telle comparaison a été également réalisée à partir de mesures non ventilées sur le glacier et les résultats obtenus étaient similaires à ceux de l'année précédente.

Ici les figures C.9 à C.16 montrent que la ventilation permet d'obtenir des résultats cohérents : la plus faible inertie thermique du granite ($0,754 \text{ kJ/kg/K}$) que celle de la glace ($2,135 \text{ kJ/kg/K}$) et l'absence de changement d'état pour la roche expliquent l'augmentation journalière de température plus forte sur la moraine.

La nuit la différence entre la température sur le glacier et celle sur la moraine est faible (entre -2 et $+1^\circ\text{C}$ environ), le terme prépondérant des échanges d'énergie avec l'atmosphère est l'émission radiative dans l'infrarouge. Deux effets interviennent alors : la glace a une plus grande émissivité dans l'infrarouge que le granite, mais le granite connaît en général des températures plus élevées (l'émission est proportionnelle à la puissance quatre de la température). Ainsi la différence entre la température sur le glacier et celle sur la moraine varie entre des valeurs positives et négatives pendant les nuits. De plus on n'a pas évoqué ici l'influence, difficile à quantifier, des effets de site. En effet l'Omnidata est placé au sommet d'une moraine bordée par une paroi rocheuse, alors que la station sur le glacier est placée sur un plateau entouré de séracs et de pentes de neige réfléchissant fortement les radiations solaires.

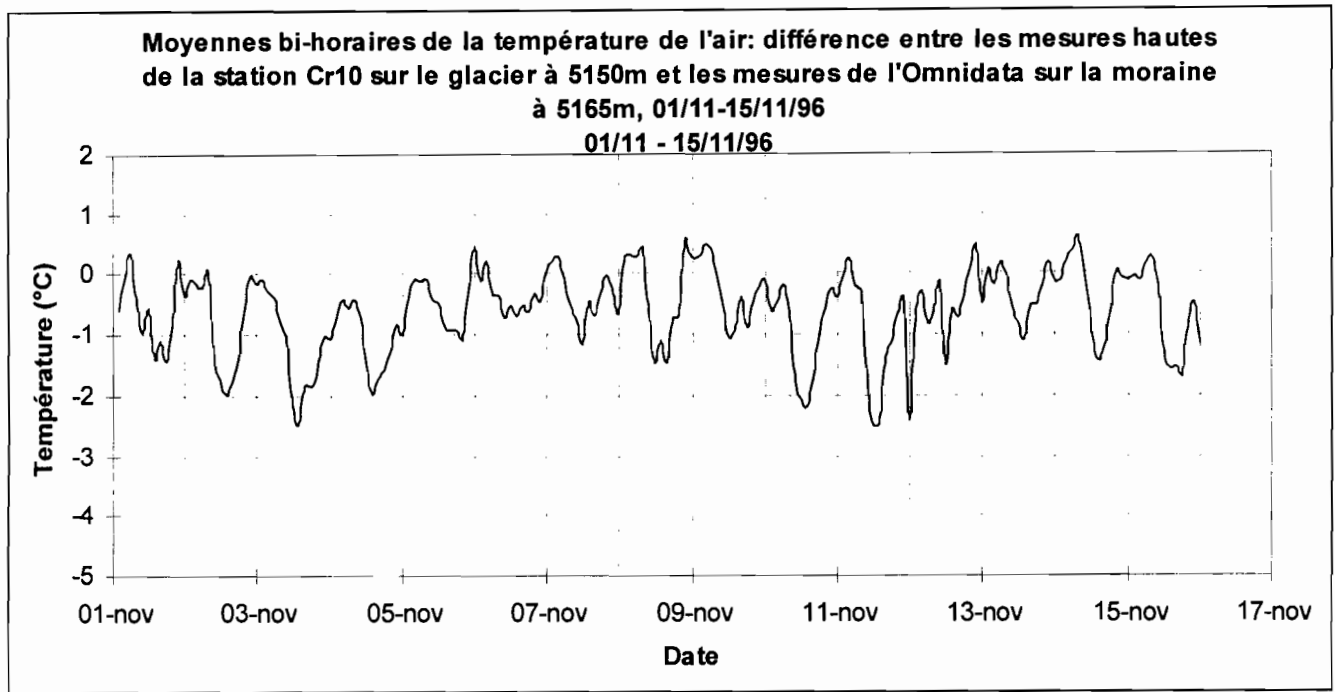


Figure C.13

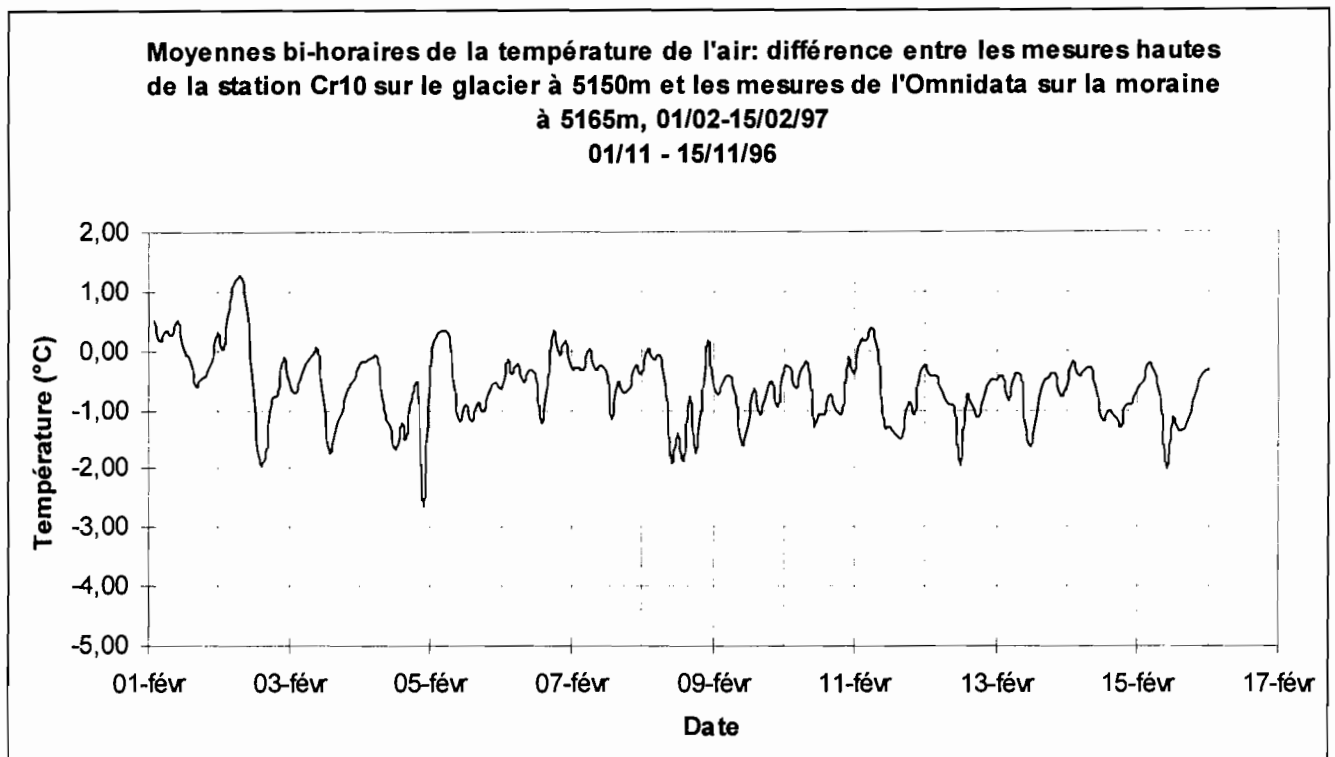


Figure C.14

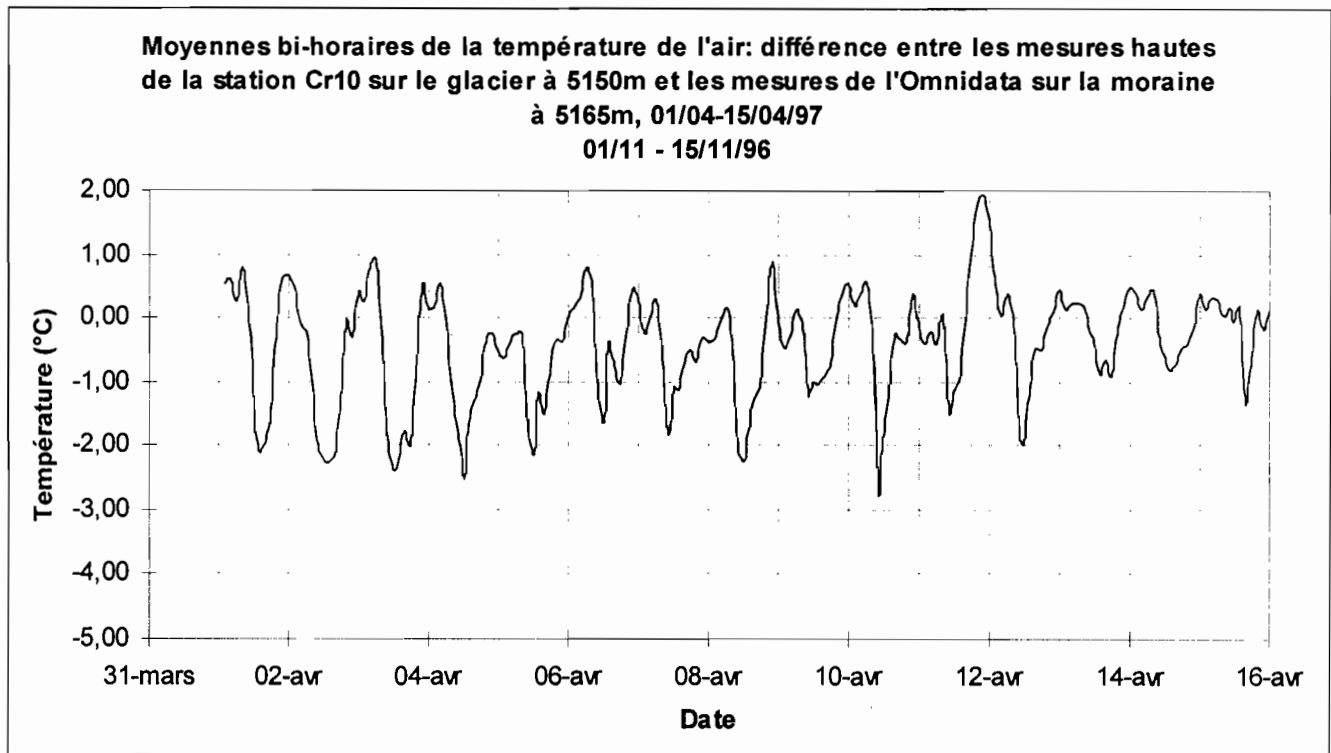


Figure C.15

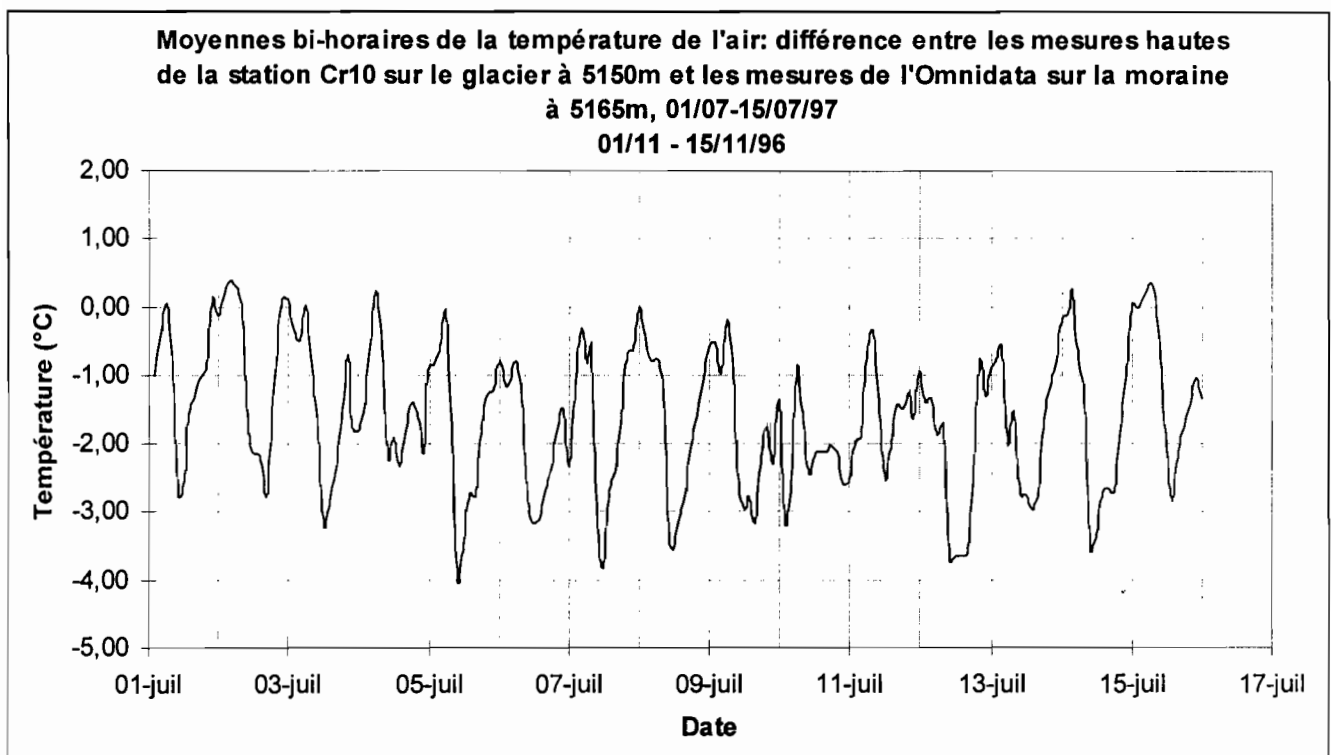


Figure C.16

b- Corrélations

Les coefficients de corrélation entre les séries de mesures sur le glacier et sur la moraine sont plus élevés que ceux obtenus les années précédentes avec des mesures non ventilées sur le glacier (coefficients supérieurs à 0.83, Cf. figures C.17 à C.20). Les équations des droites de régression sont proches pour les quatre périodes considérées, en particulier les coefficients directeurs sont compris entre 0.6664 et 0.7338.

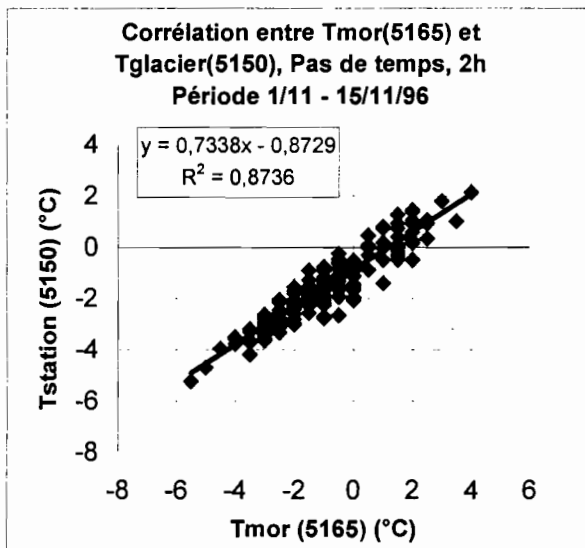


Figure C.17

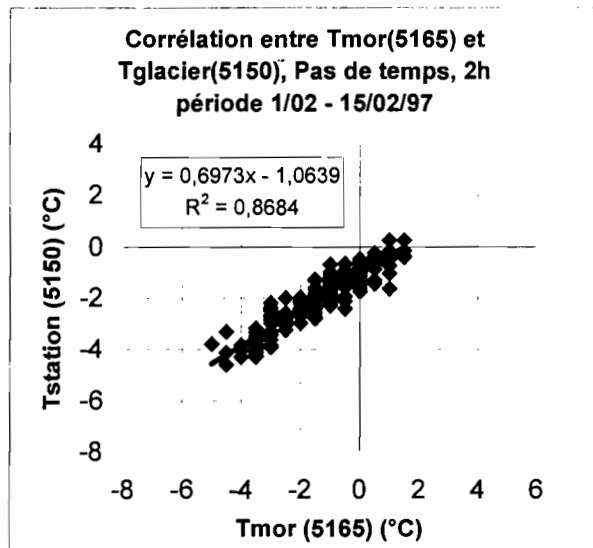


Figure C.18

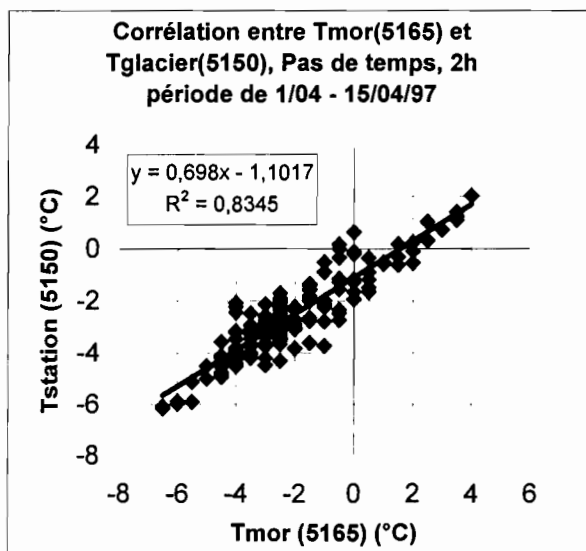


Figure C.19

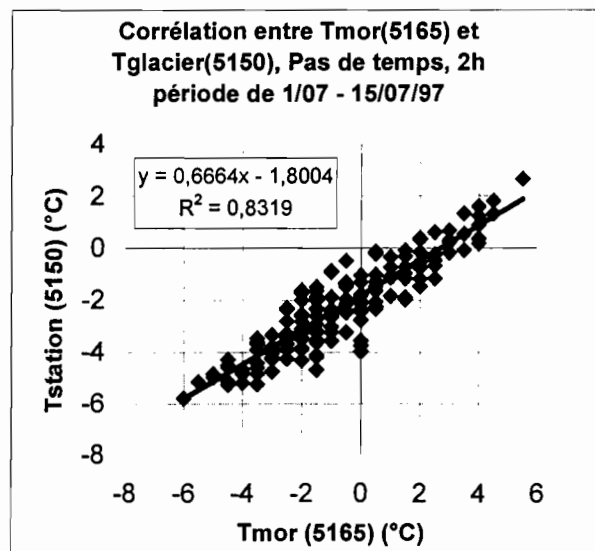


Figure C.20

c- Extrêmes journaliers

Les figures C.21-a, C.21-b, C.22-a et C.22-b montrent qu'au début du mois de juillet les maxima journaliers de température sont concomitants sur la moraine et sur le glacier, et apparaissent entre 12h et 14h lorsque la radiation solaire incidente est maximale. Par contre pour cette même période de beau temps les minima sur la moraine apparaissent plutôt en fin de nuit, voire en début de matinée (entre 4h et 8h), alors que sur le glacier ils semblent davantage répartis tout au long de la nuit.

Pour la première quinzaine de novembre les maxima journaliers de température apparaissent entre 10h et 14h avant que le ciel ne commence à se couvrir, sans décalage horaire entre le glacier et la moraine. Aucun effet saisonnier n'apparaît : que ce soit sur la moraine ou sur le glacier, la répartition des minima est similaire en novembre et en juillet. Les décalages horaires entre les minima sur la moraine et sur le glacier sont donc similaires pour ces deux périodes.

On peut noter la présence de données surprenantes : par exemple un maximum journalier en juillet sur le glacier à 22h, un tel artefact ne peut provenir que d'un dysfonctionnement du capteur puisque l'enregistrement des mesures se fait automatiquement.

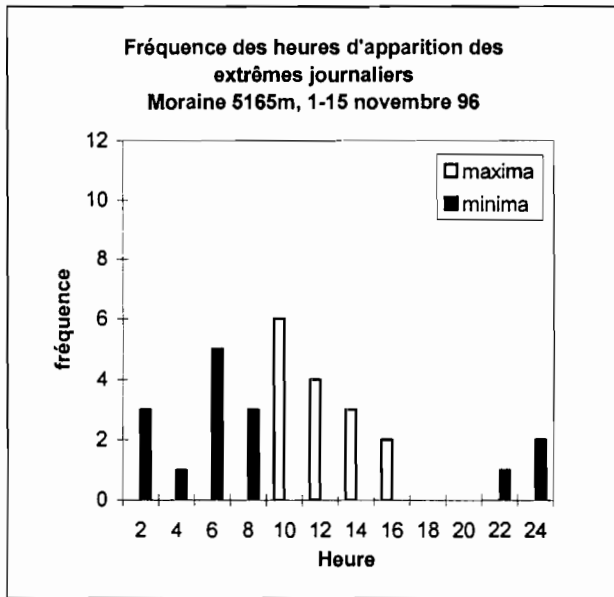


Figure C.21-a

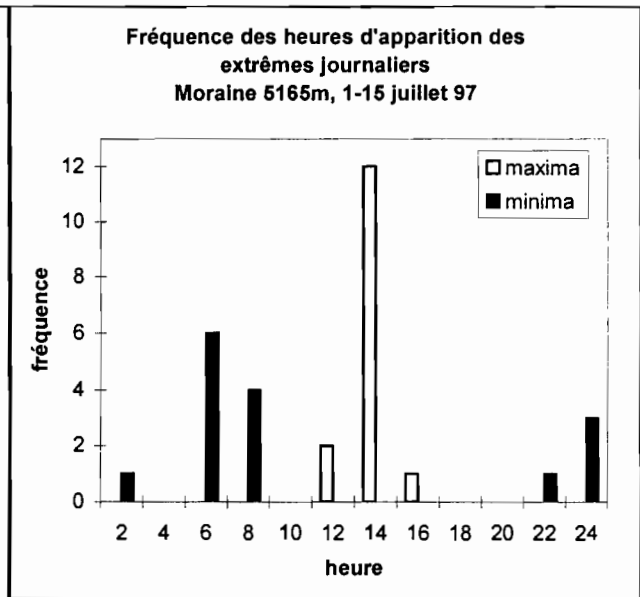


Figure C.21-b

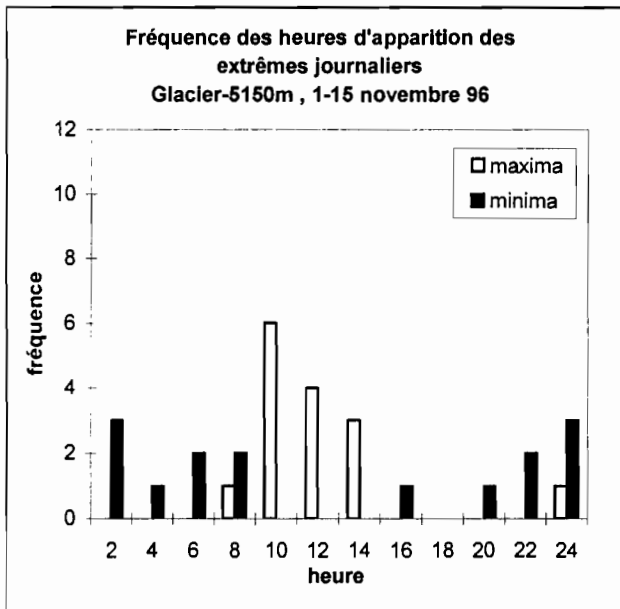


Figure C.22-a

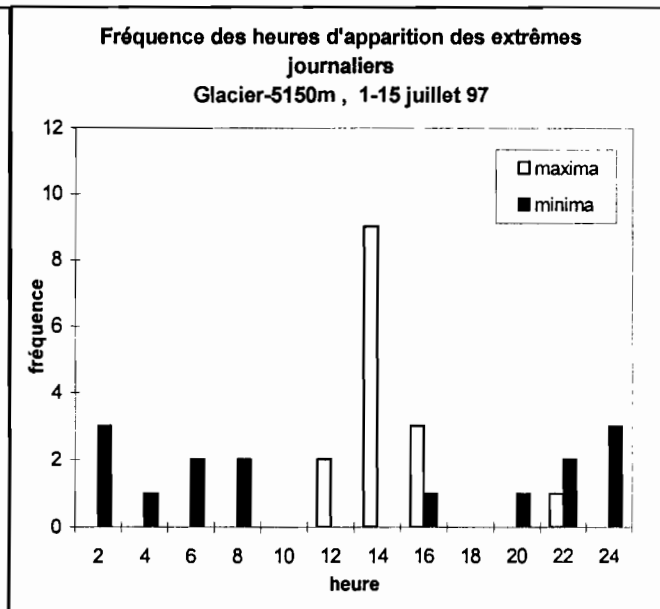


Figure C.22-b

C. 2. Moyennes journalières

En complément des moyennes journalières des mesures évoquées au chapitre précédent (mesures à 5150 m sur le glacier et à 5165 m d'altitude sur la moraine), nous nous intéressons ici aux moyennes journalières de température à la Plataforma (4750 m) : station Mevis et thermographe, et aux moyennes enregistrées par les stations Campbell à 5025 m et à 5550 m d'altitude. A partir de ces moyennes journalières nous comparons d'une part des mesures issues d'appareils différents situés au même endroit (par exemple comparaison des mesures issues du thermographe et de la station Mevis), et d'autre part nous calculons les gradients thermiques selon l'altitude sur et hors du glacier.

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

La figure C.23 montre que la température enregistrée par le thermographe papier est systématiquement supérieure à celle enregistrée par la station Mevis. Le coefficient de corrélation entre ces deux séries de mesures est très médiocre (0,69), bien que supérieur à son équivalent de l'année dernière (0,52). En moyenne sur la période où les données de la Mevis sont disponibles (du 1^{er} septembre au 24 janvier) la température issue du thermographe est supérieure à celle de la station Mevis de 1.5°C (3.31°C et 1.83°C), chiffre équivalent à celui obtenu en 1995-96 : 3.1°C pour le thermographe et 1.9°C pour la Mevis (Cf. rapport n°55).

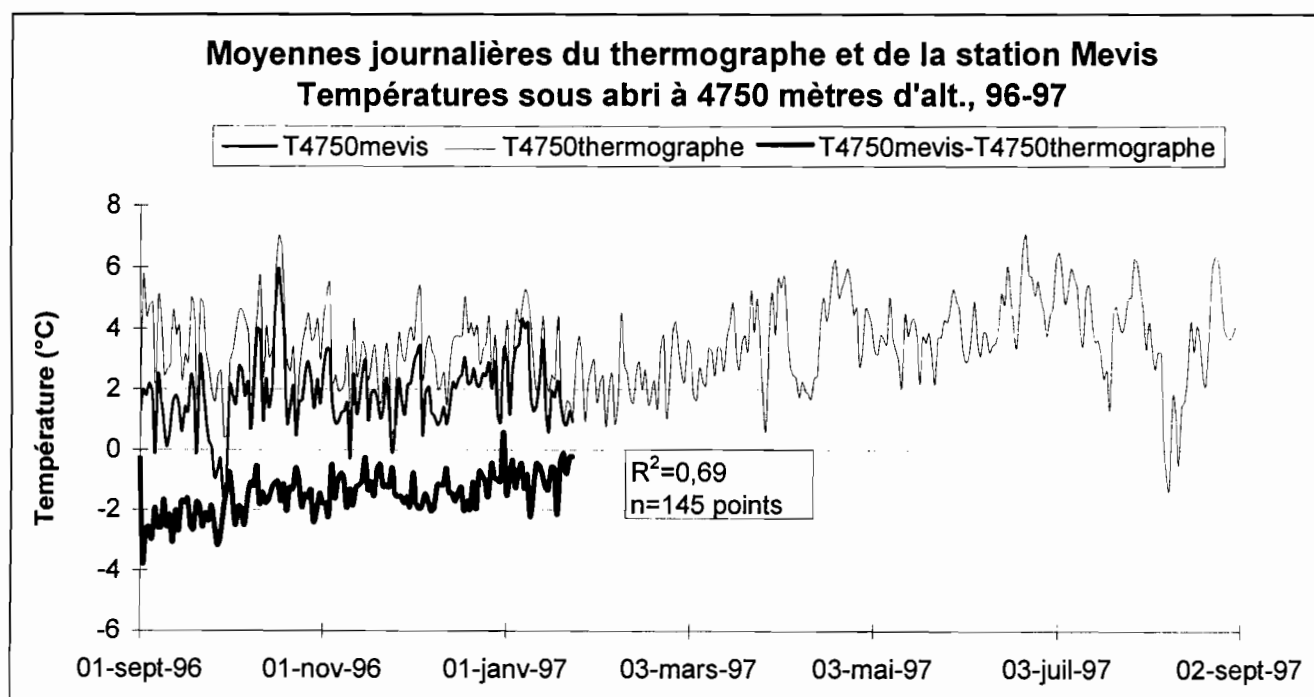


Figure C.23

La figure C.24, représentant les moyennes bi-horaires des mesures de température du thermographe et de la station Mevis du 1^{er} au 15 octobre, montre que les différences entre les deux appareils ne sont pas dues à un problème d'exposition au rayonnement solaire, puisque un écart entre les deux

courbes est également observé la nuit. 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.

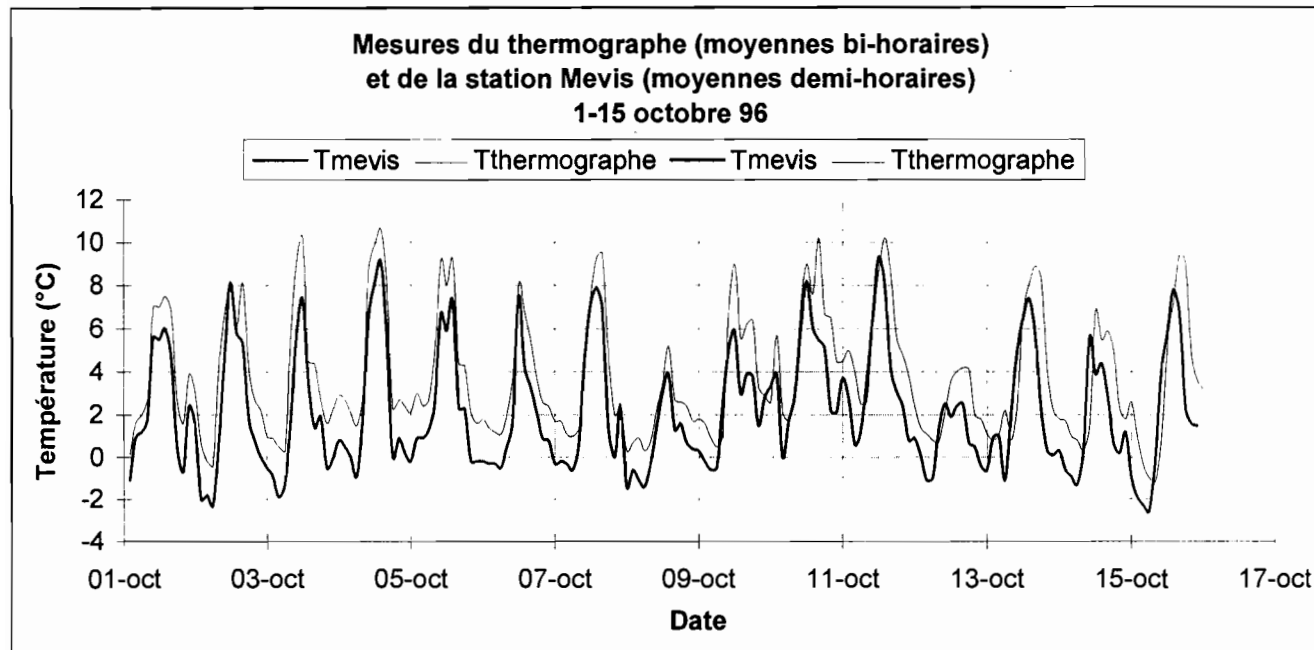
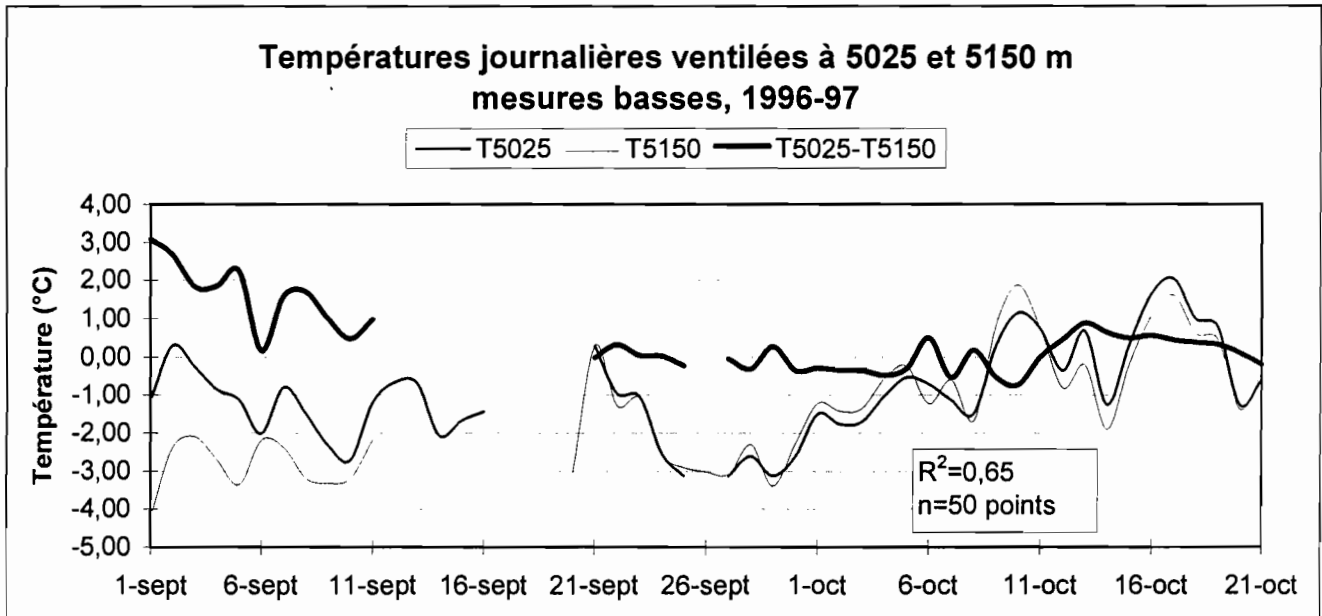


Figure C.24

C. 2.2. Températures journalières ventilées sur le glacier à 5025 m et à 5150 m, estimation du gradient selon l'altitude

A partir du 12 septembre 1996, la présence d'une batterie couplée à un panneau solaire permet aux psychromètres à 5150 m de disposer d'une ventilation continue ; de jour comme de nuit, quel que soit le temps. Pour l'année hydrologique 1996-97 les mesures de températures ventilées de la station à 5025 m d'altitude ne sont disponibles que du 1^{er} septembre au 22 octobre 1996. Cette station seulement équipée d'un panneau solaire, ne bénéficie d'une ventilation efficace que par temps clair. Le psychromètre bas de la station à 5025 m d'altitude a été descendu pour révision du 17 au 19 septembre, puis le 26 septembre il n'a pas fonctionné entre 13h00 et 14h00 pour une raison inconnue. De plus, celui de la station à 5150 m a connu une panne du 12 au 19 septembre. Ainsi, et comme on le voit sur la figure C.25, les données disponibles sont très incomplètes. Le gradient moyen obtenu pour cette période est faible : $0.36^{\circ}\text{C}/100\text{m}$, et certaines journées du début du mois d'octobre la température enregistrée à 5150 m est supérieure à celle à 5025 m (problème de ventilation des psychromètres ?). Ce gradient de température anormalement faible peut s'expliquer par le fait que la surface de la glace à température de fusion a une grande influence sur les températures de l'air à son contact, et ce quelle que soit l'altitude. Du 1^{er} au 11 septembre la fusion étant moins importante, le gradient est plus élevé (Cf. figure C.25), cependant la valeur moyenne obtenue pour cette période est trop élevée : $1,28^{\circ}\text{C}/100\text{m}$.

Il faut aussi rappeler que les deux sites concernés sont différents du point de vue de l'exposition (la langue glaciaire terminale est exposée à l'Est, alors que le plateau de 5150 m est exposé au sud), de la pente (plus forte au front du glacier), de l'état de surface (plus grande rugosité à l'aval)...



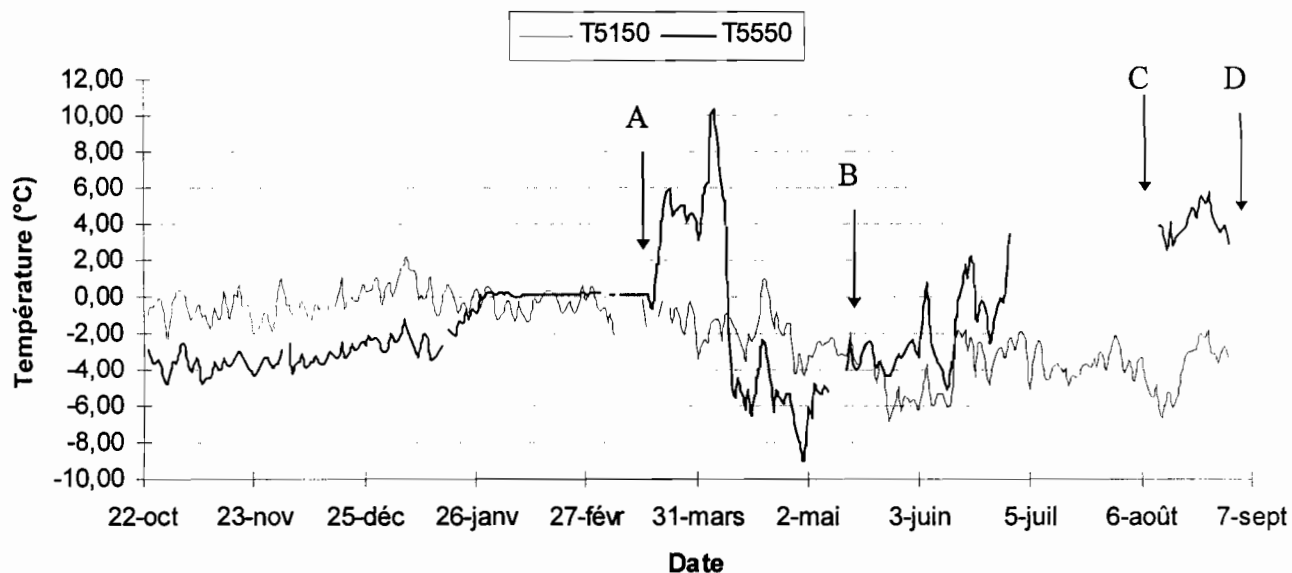
*C. 2.3. Températures journalières ventilées à 5150 m et à 5550 m,
estimation du gradient selon l'altitude*

La figure C.26 montre qu'à partir de la fin du mois de janvier 1997 les évolutions des températures ventilées basses enregistrées par les stations Campbell à 5150 m et à 5550 m d'altitude sont très différentes (séries non corrélées, $R^2 = 0.0005$).

Du 30 janvier au 16 mars le psychromètre de la station à 5550 m est enseveli sous la neige, ce qui explique une température constante à 0°C. Il est difficile de trouver une explication à la forte hausse de température à cette altitude entre le 18 mars et le 5 avril ; entre le 18 mars et le 13 mai aucune visite de la station n'a été effectuée. Il est possible que de la neige se soit accumulée dans la prise d'air de la ventilation du psychromètre : le rapport de visite du 13 mai mentionne le fait que la station est trouvée enfouie mais que les capteurs émergent de la neige. Le 11 août le couvercle du psychromètre n'est pas en place, ainsi l'influence de la radiation solaire peut expliquer la hausse de température à partir de la fin du mois de juin.

La figure C.27 montre que l'amplitude thermique à 5550 m (différence entre le maximum et le minimum journalier) augmente d'environ 5°C à partir de la fin du mois de mars : cette augmentation peut provenir en effet d'une mauvaise ventilation, comme d'une mauvaise protection du capteur contre la radiation solaire. Cependant si l'augmentation de température entre le 18 mars et le 10 avril n'étaient due qu'à un problème de ventilation ou d'exposition aux radiations solaires, les minima journaliers n'augmenteraient pas (certains minima enregistrés atteignent +5°C, Cf. figure C.27). Pour expliquer ces anomalies on peut aussi évoquer des variations de la température de référence, mais pour quelles raisons ?, et pourquoi une telle chute des températures entre le 7 et le 10 avril permettant un retour à des valeurs plus cohérentes ? La figure C.28 montre que cette chute est particulièrement brutale entre le 9 avril à 13h30 et le lendemain à 2h (baisse de 12 degrés des températures sèche et humide). Ces graphes permettent de déceler les mesures fausses, mais n'amènent aucune explication satisfaisante sur l'origine des perturbations.

**Températures journalières ventilées à 5150 et 5550 m
mesures basses, 1996-97**



- A : capteurs trouvés ensevelis sous la neige (18/03)
- B : station trouvée enfouie, mais les capteurs émergent de la neige (13/05)
- C : le couvercle du psychromètre n'est pas en place (11/08)
- D : remise d'un nouveau couvercle sur le psychromètre (03/09)

Figure C.26

**Minima et maxima journaliers de la température basse ventilée
5550m, 1996-97**

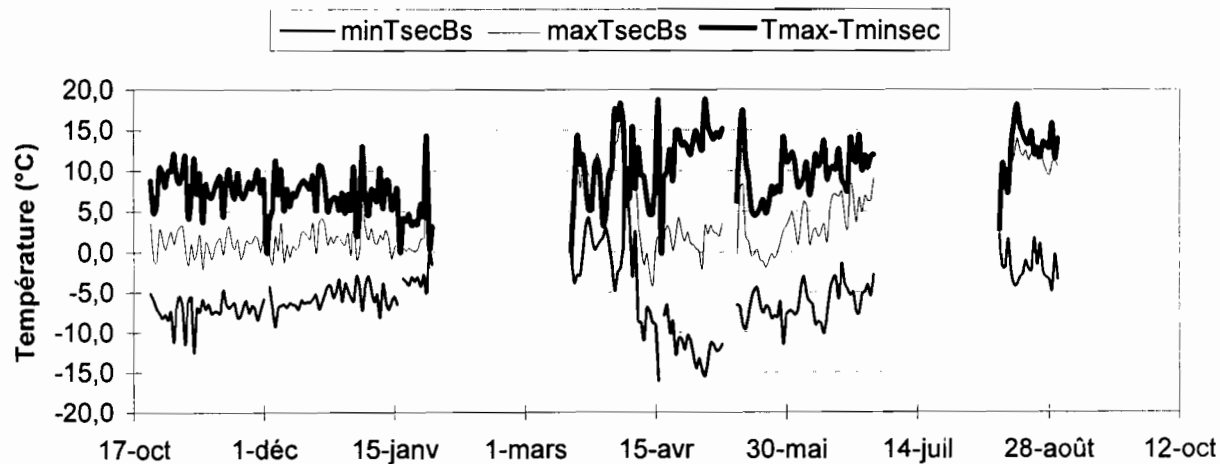


Figure C.27

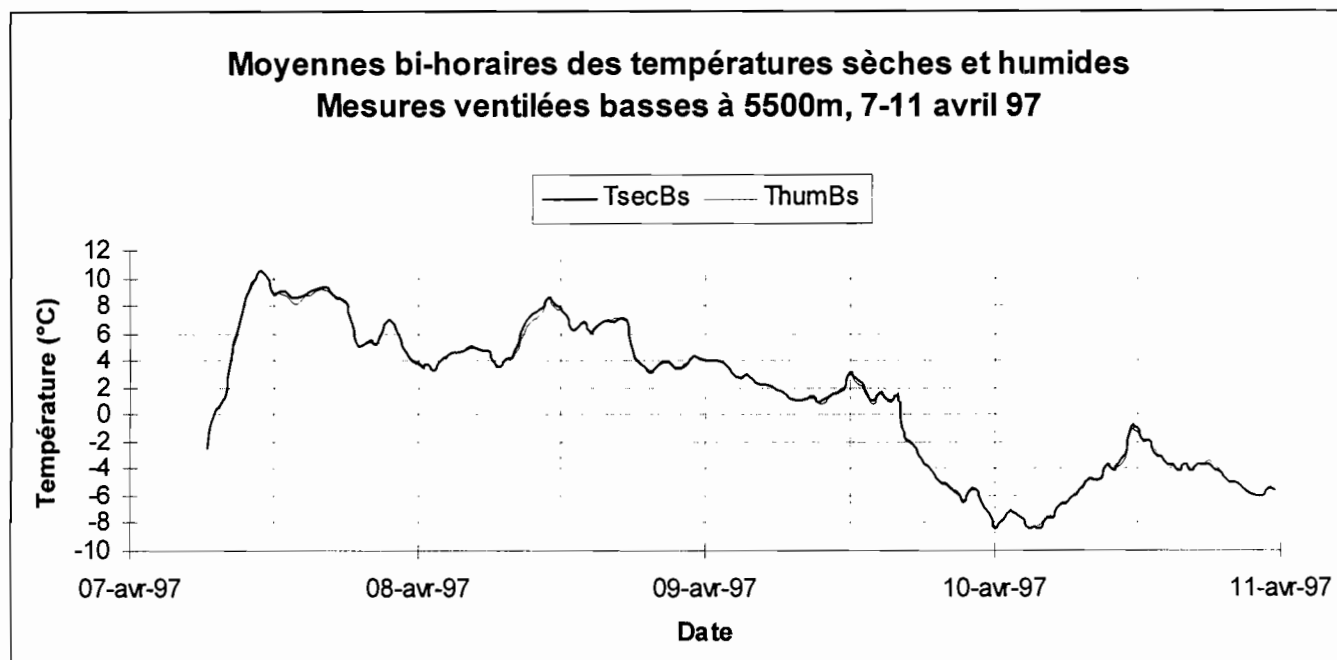


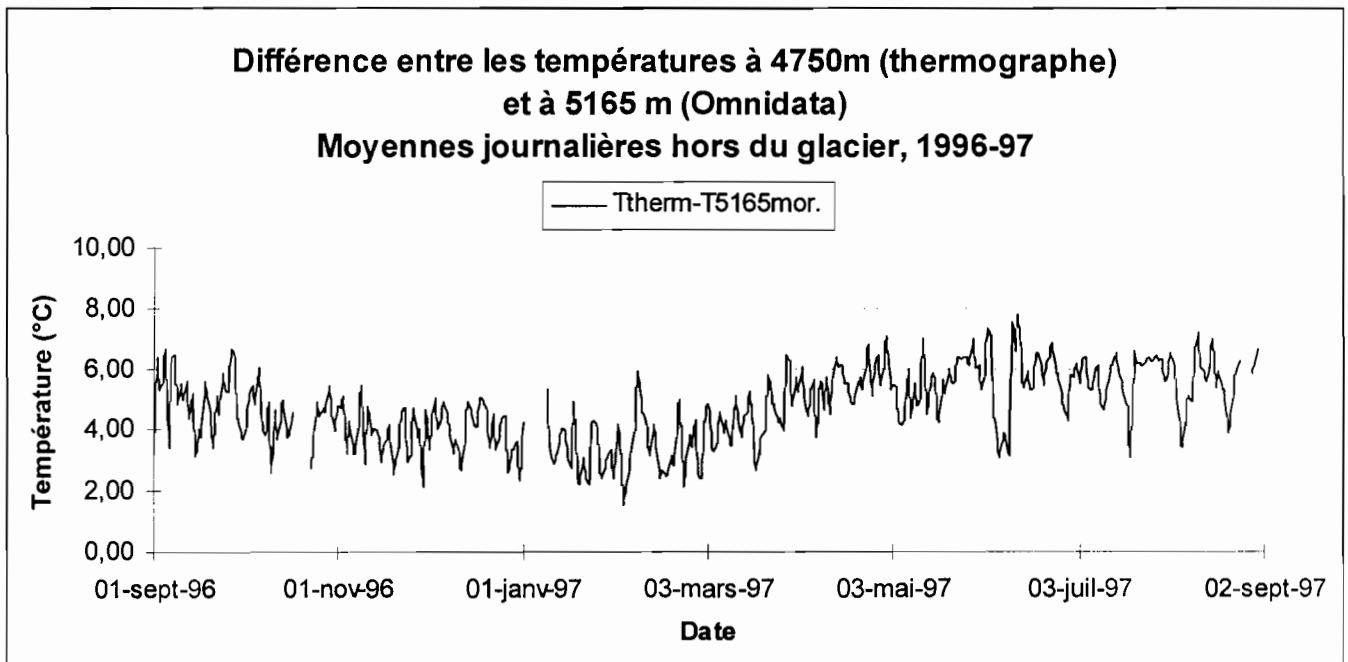
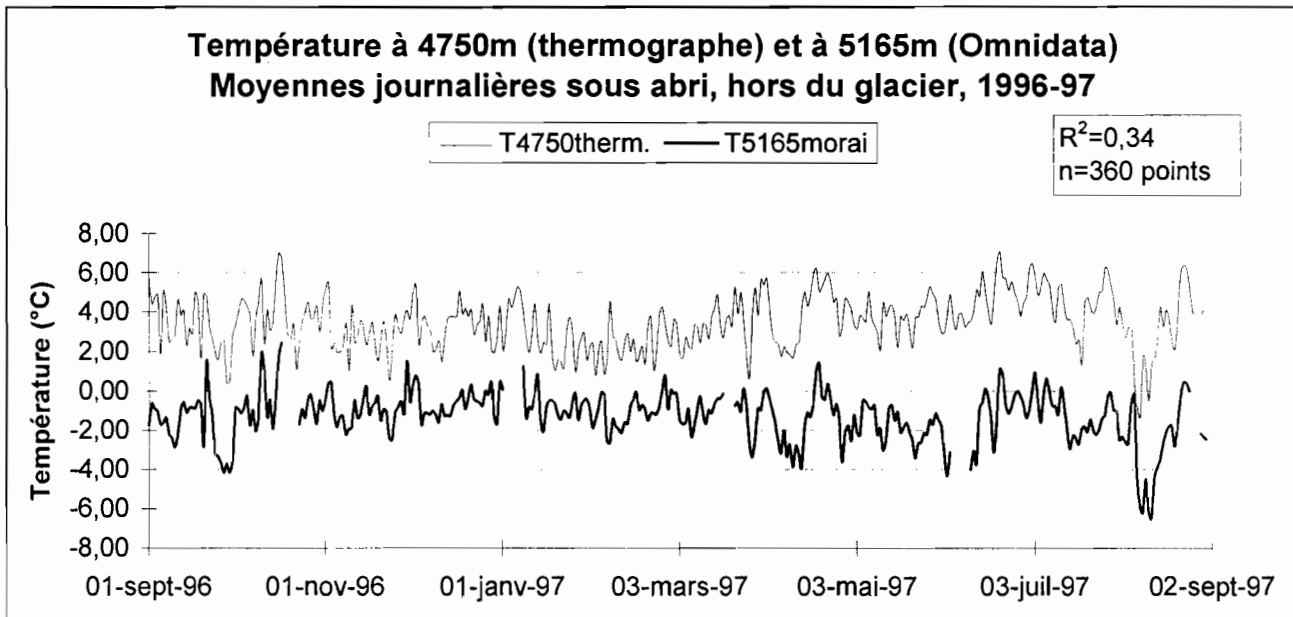
Figure C.28

*C. 2.4. Températures journalières non ventilées à 4750 m et à 5165 m,
estimation du gradient selon l'altitude hors du glacier.*

Les mesures enregistrées à la Plateforma (station Mevis et thermographe papier) 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.

• Comparaison entre les mesures enregistrées par le thermographe papier (4750 m) et par l'Omnidata (5165 m)

Comme le montre la figure C.29, la corrélation obtenue entre les séries de mesures du thermographe et de l'Omnidata est très médiocre ($R^2=0.34$, $N=360$), inférieure à celle obtenue l'année dernière ($R^2=0.46$, $N=313$). Le gradient thermique moyen entre 4750 et 5165 m d'altitude calculé à partir de ces mesures est de $-1.1^\circ\text{C}/100\text{m}$ (Cf. figure C.30), ce qui est une valeur proche de celle calculée en 95-96 ($-0.97^\circ\text{C}/100\text{m}$). La mauvaise corrélation entre les deux séries de mesures et la valeur de gradient thermique trop élevée peuvent provenir soit d'effets locaux (les appareils de la Plateforma sont placés près d'un col et l'Omnidata est situé au sommet d'une moraine), soit de problèmes des capteurs.



- Comparaison entre les mesures enregistrées par la station Mevis (4750 m) et par Omniidata (5165 m)

Du 1^{er} septembre au 24 janvier le coefficient de corrélation entre les séries de mesures de la Mevis et de l'Omniidata est élevé ($R^2=0.80$, $n=150$ points, Cf. figure 31), et le gradient moyen obtenu à partir de ces données (-0.68 °C/100m) est plus satisfaisant que celui obtenu à partir des mesures du thermographe. Ainsi comme il a été dit l'année dernière, les mesures obtenues à partir de la station Mevis semblent plus fiables que celles issues du thermographe.

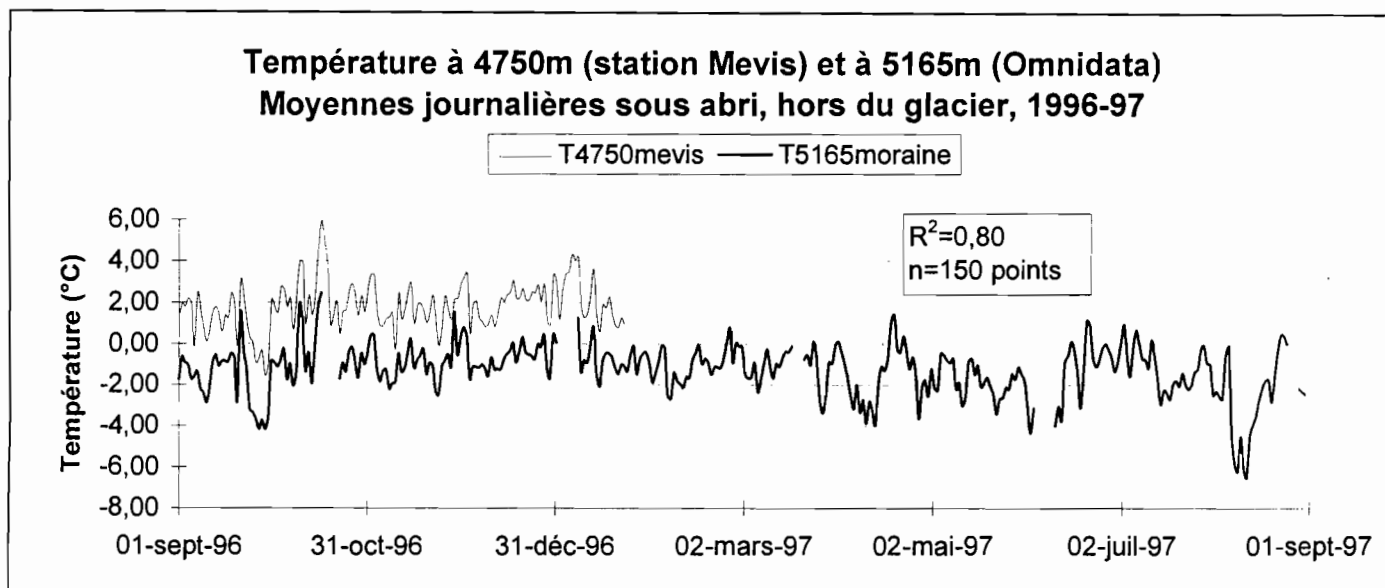


Figure C.31

C. 2.5. Récapitulatif des gradients

Cette année, à cause du mauvais fonctionnement de la centrale Mevis et des lacunes de la station à 5550 m, les estimations des gradients sont moins nombreuses que l'année dernière et la période de recoupement des trois gradients calculées n'est que de 3 mois (Cf. tableau C.1). En moyenne de novembre à janvier le faible gradient obtenu à partir des mesures à 5150 m et à 5550 m, soit -0.65 °C/100m, ne peut pas être attribué à l'influence de la fusion en surface du glacier (Cf. chapitre C.2.2), puisque il est très proche de la moyenne sur cette même période, obtenue à partir des mesures hors du glacier à 4750 m et à 5165 m, soit -0.64 °C/100m.

La série du thermographe, seule série complète sur l'année, fait apparaître comme l'année dernière une baisse du gradient d'environ 0.5 °C/100m durant la saison sèche (Cf. figure C.32). Ce qui est en accord avec le fait que le gradient thermique en valeur absolue est plus élevé en atmosphère sèche qu'en atmosphère humide.

	4750/5165m. (°C/100m) Thermographe et Omnidata	4750/5165m. (°C/100m) Mevis et Omnidata	5550/5150m. (°C/100m) Stations Campbell
Sept	-1.26	-0.69	
Oct	-1.10	-0.72	
Nov	-0.97	-0.65	-0.74
Dec	-0.99	-0.66	-0.72
Jan	-0.83	-0.62	-0.49
Fev	-0.86		
Mar	-1.06		
Avr	-1.37		
Mai	-1.38		
Juin	-1.39		
Juil	-1.44		
Août	-1.39		
Moyenne	-1.17	(-0.67)	(-0.65)
Moy. nov-janv	-0.93	-0.64	-0.65

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

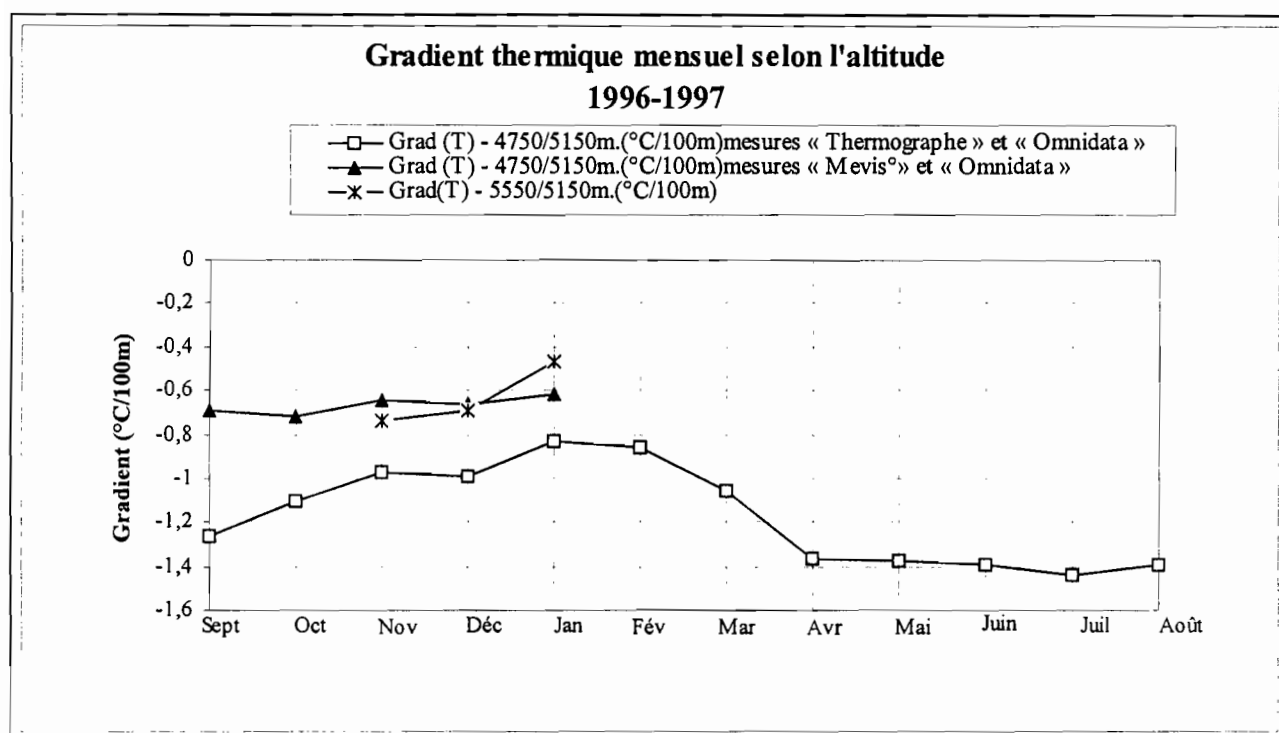


Figure C.32

Le tableau C.2 confirme la tendance relevée dans le rapport n°55 : le gradient annuel calculé à partir du thermographe (4750 m) et de l'Omnidata (5165 m) est en diminution constante depuis 1993 et atteint à présent des valeurs trop faibles (-1.17 °C/100m en 96/97). Cette baisse ne peut être corroborée par les valeurs mensuelles de la Mevis ou de la station à 5550 m puisque ces séries sont très incomplètes cette année (pour chacune moins de la moitié de l'année est représentée) et peut provenir d'un mauvais fonctionnement du thermographe, dont la fiabilité a déjà été mise en doute (Cf. chapitre C.2.4).

Année	grad(T) - 4750/5150 (°C/100m)*
93/94	-0,52
94/95	-0,76
95/96	-0,97
96/97	-1,2

* mesures thermographe et omnidata

Tableau C.2 : comparaison des moyennes annuelles du gradient thermique

C. 3. Températures minimales et maximales journalières

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

Les moyennes annuelles des extrêmes journaliers enregistrés par le thermographe sont proches de celles de l'année dernière (Cf. figure C.33, en 95/96 la moyenne des maxima était de +8.3°C et celle des minima de -0.1°C). Par contre les évolutions sont sensiblement différentes : on n'observe aucun effet saisonnier dans l'évolution des minima et une très faible baisse des maxima en saison des pluies (alors qu'en 95/96 l'évolution des minima était plus saisonnière que celle des maxima, Cf. rapport n°55). Du fait de l'évolution des maxima, l'amplitude thermique journalière diminue sensiblement en saison des pluies (Cf. figure C.34).

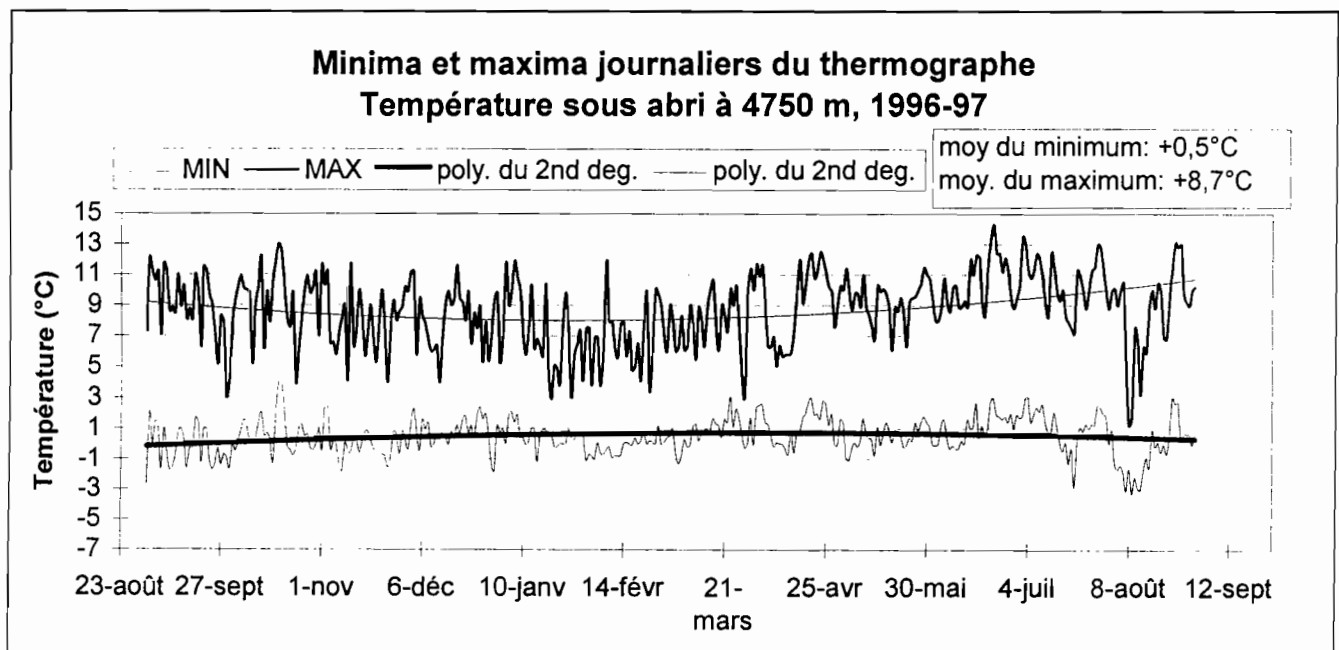


Figure C.33

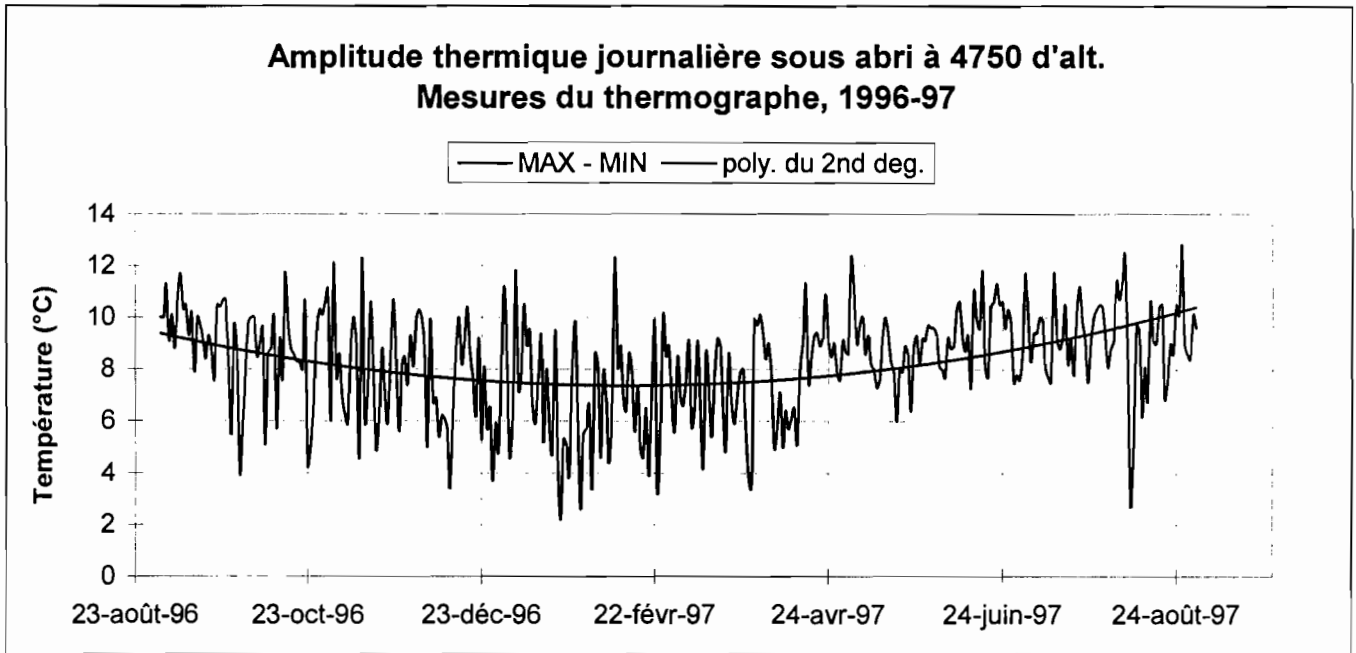


Figure C.34

Nous avons déjà vu au chapitre B.2.2 que les données disponibles de la station Mevis ne recouvraient qu'une faible partie de l'année. On peut néanmoins observer sur la figure C.35 une augmentation des minima journaliers au cours des premiers mois de la saison des pluies (contrastant avec une stabilité des maxima), cette tendance se traduisant évidemment par une baisse de l'amplitude thermique journalière durant cette même période (Cf. figure C.36).

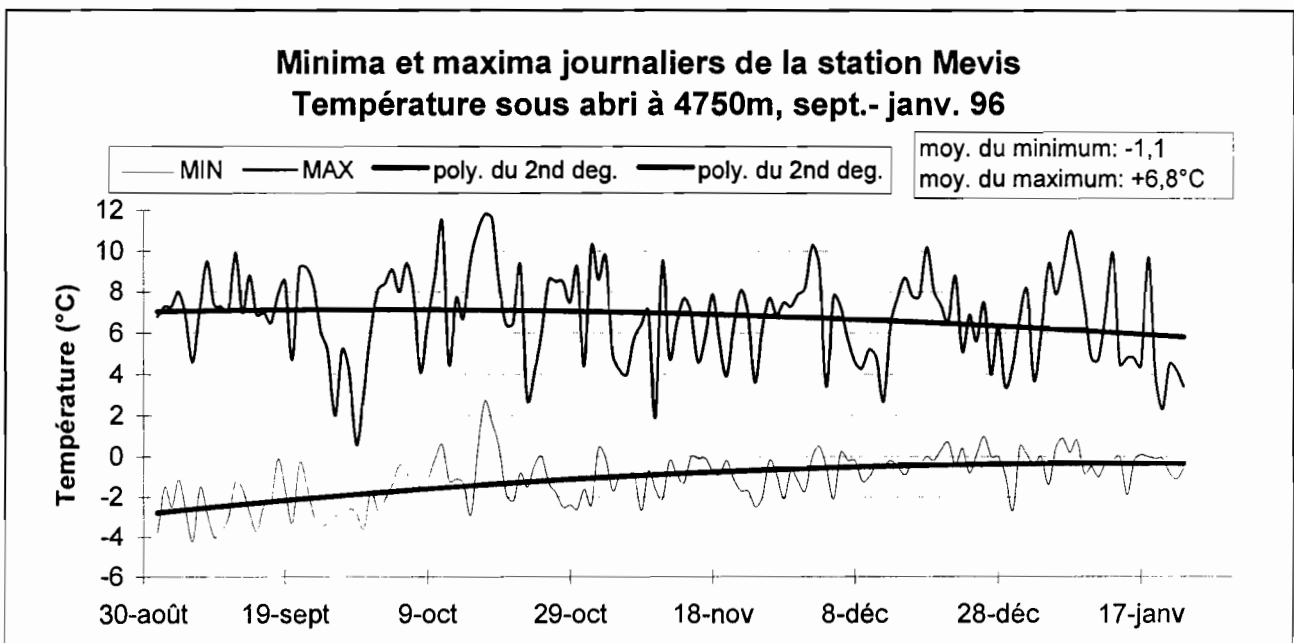


Figure C.35

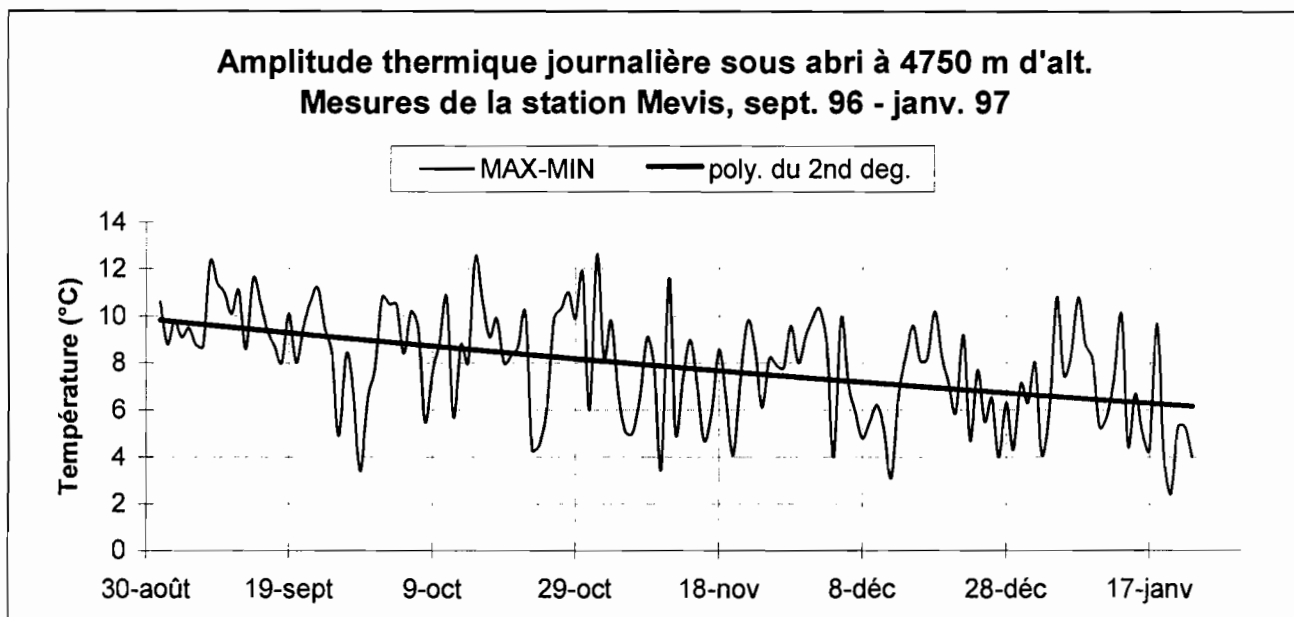
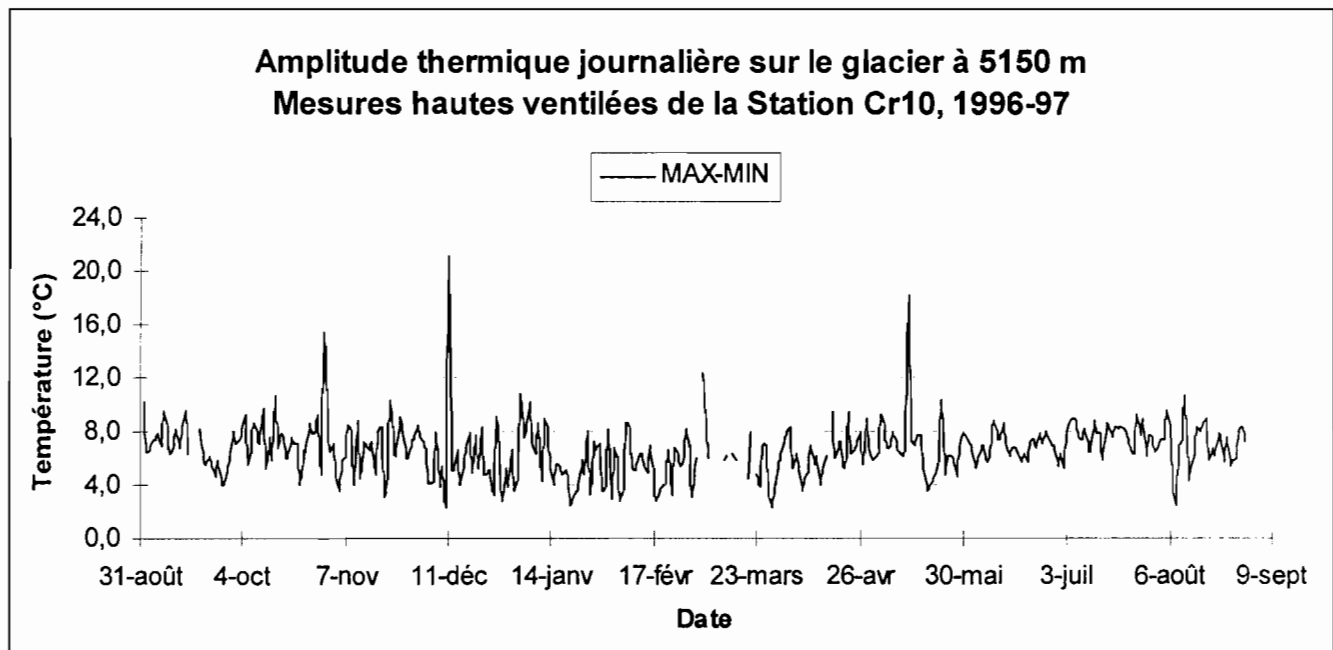
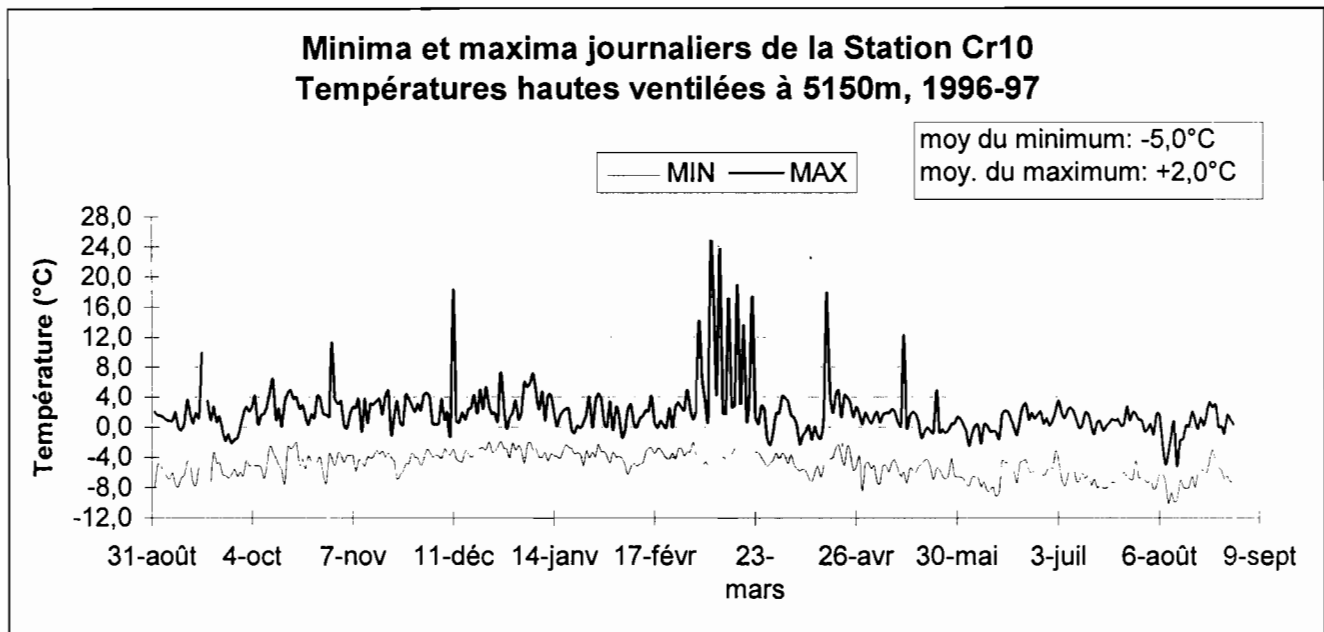


Figure C.36

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

Contrairement à l'année 95/96, aucun effet saisonnier n'apparaît dans les évolutions des minima et des maxima journaliers de la température haute ventilée enregistrée par la station CR10 à 5150 m (Cf. figure C.37) et donc dans l'évolution de l'amplitude journalière (Cf. figure C.38). On remarque sur ces figures que des pics des températures maximales apparaissent en août, octobre, décembre et surtout de février à mars. Ces pics coïncident systématiquement avec des lacunes dans l'enregistrement des minima. En l'absence de ces pics, sans doute artificiels, la moyenne annuelle des maxima serait de 1,6°C. Les mois de février et mars 1997 correspondent à des périodes de fortes chutes de neige, et il se peut que le cylindre de ventilation ait alors été obstrué par la neige. Cependant les lacunes dans l'enregistrement des minima durant ces mêmes périodes restent inexplicables.



C. 3.3. Minima et maxima à 5550 m d'altitude, températures basses ventilées

Nous avons déjà vu que les mesures fiables de la station Cr10 à 5550 m d'altitude ne recouvraient que la période du 23 octobre 96 au 30 janvier 97. Les évolutions sur toute l'année hydrologique des minima et des maxima journaliers ont été présentées sur la figure C.27 (chapitre C.2.3). La figure C.39, représentant les évolutions de ces extrêmes uniquement sur la période de fiabilité des mesures, fait apparaître des pics de la température maximale de plus de 5°C d'amplitude à partir de la fin du mois de décembre (lors de journées dégagées en saison des pluies), et une augmentation des minima au cours du changement de saison. Ces tendances se traduisent en une baisse des amplitudes journalières, marquée par des pics d'une dizaine de degrés d'amplitude environ (Cf. figure C.40).

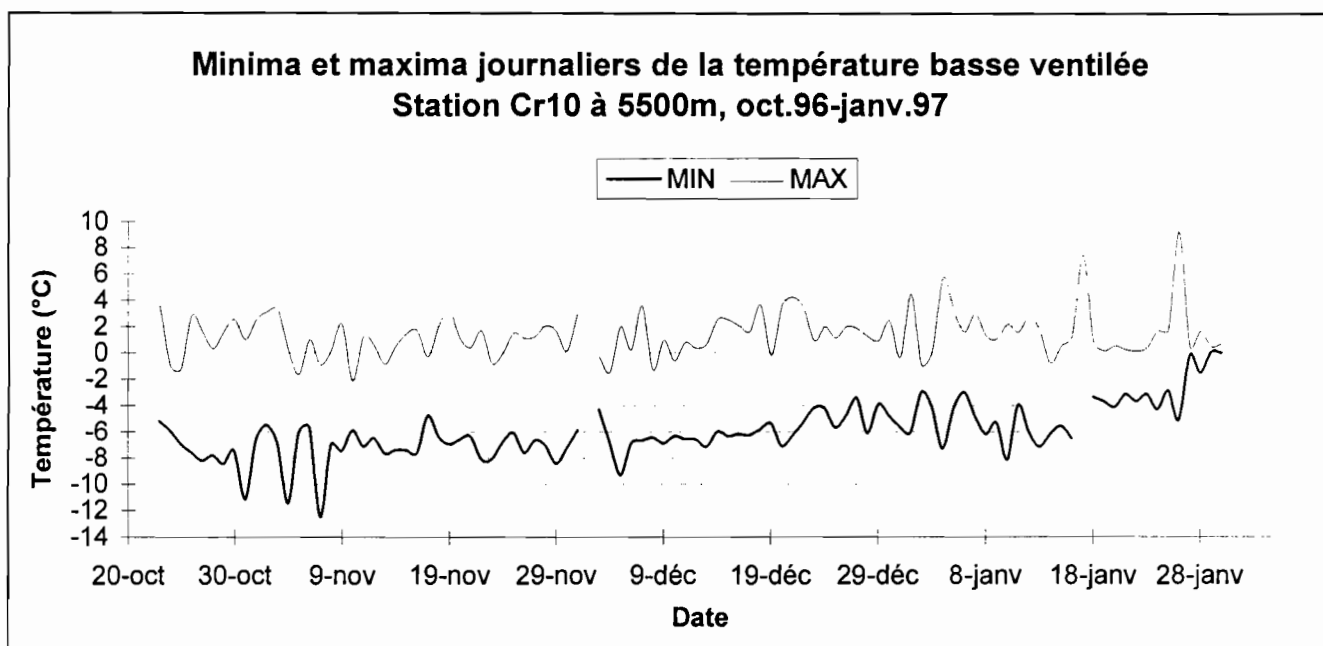


Figure C.39

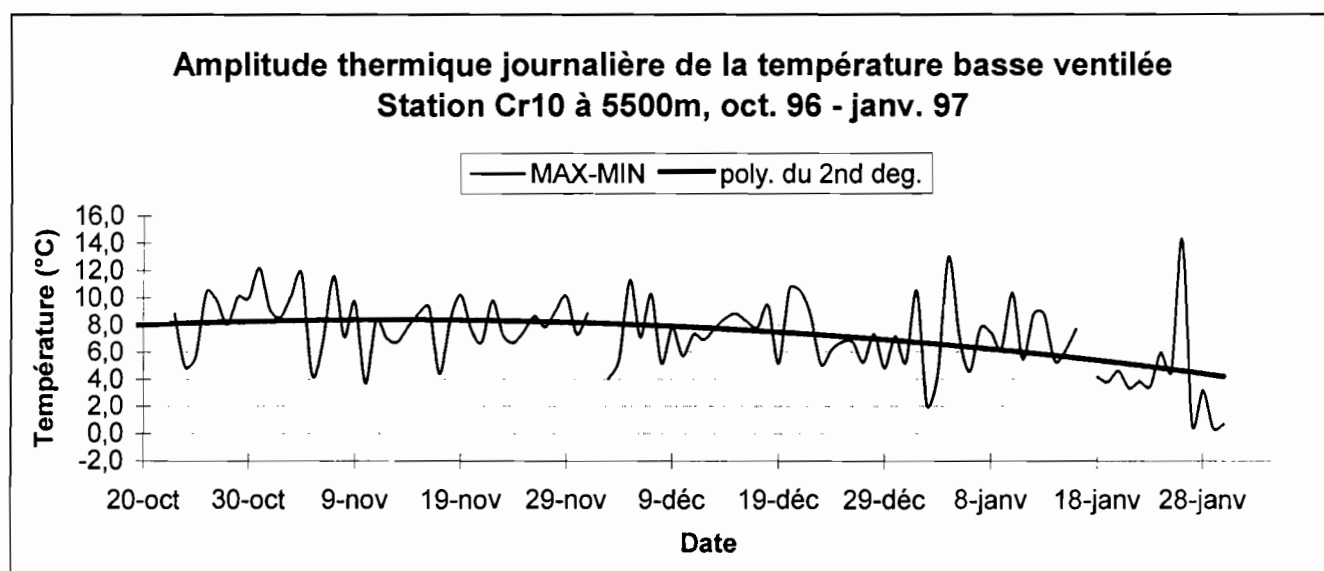


Figure C.40

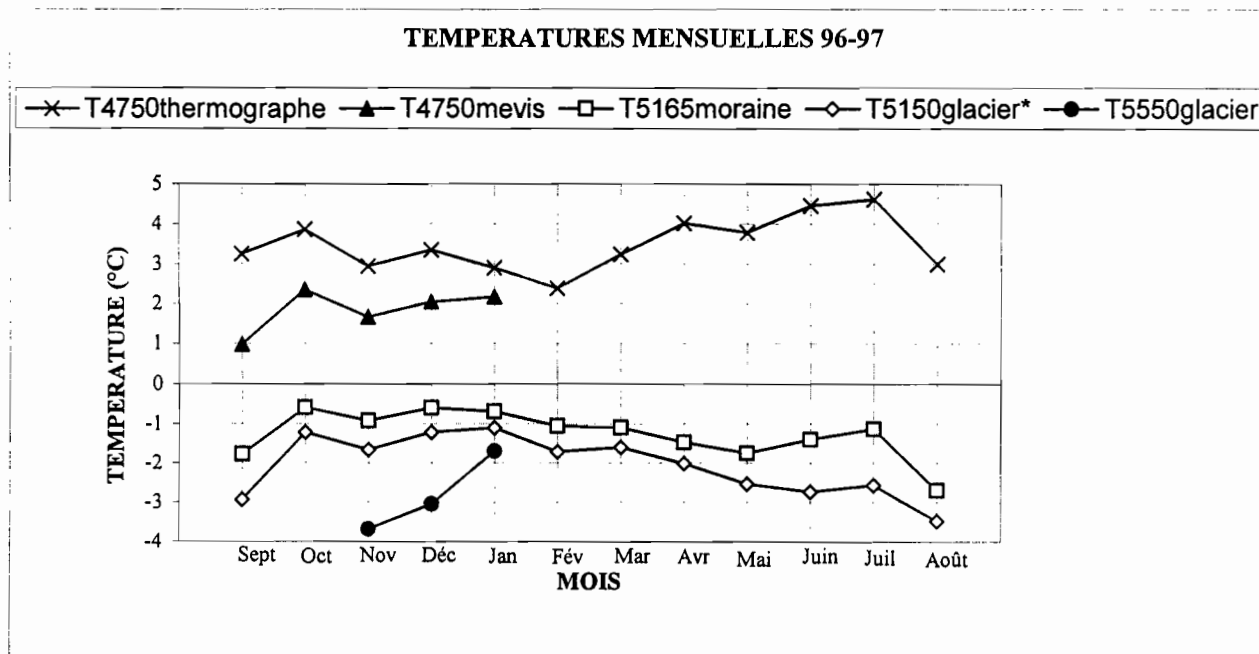
C. 4. Températures mensuelles et annuelles

C. 4.1. Valeurs mensuelles

Sur la figure C.41 représentant l'ensemble des données mensuelles disponibles (la figure correspond au tableau C.3), seules les mesures à 5165 m sur la moraine (Omnidata) et sur le glacier à 5150 m (station Campbell) représentent des séries complètes et fiables. En effet, pour la première de ces séries les seules lacunes de quelques jours correspondent aux périodes de dépouillement des données (Cf. chapitre B.7.1), et pour la seconde les lacunes correspondent aux journées du 17 et 18 septembre 96. Par contre les périodes de données fiables ne sont pour les stations Mevis et

Campbell à 5550 m respectivement que de 5 et 3 mois (Cf. chapitres B.2.1 et C.2.3). La série de mesures du thermographe à 4750 m est complète sur l'ensemble de l'année 96/97, mais il enregistre une augmentation de température en saison sèche ; la valeur mensuelle la plus élevée étant de 4,62°C en juillet.

Si on s'en tient donc aux mesures à 5150 m et à 5165 m, un effet saisonnier d'amplitude de l'ordre d'un degré Celsius apparaît (la moyenne pour les mois d'octobre, novembre, décembre, janvier et février est de -0.78°C sur la moraine et -1.39°C sur le glacier ; la moyenne pour les mois de mai, juin, juillet août et septembre est de -1.75°C sur la moraine et de -2.85°C sur le glacier).



* mesures hautes ventilées de la station Campbell (Cr10)

Figure C.41

mois	T4750thermo.	T4750mevis	T5150moraine	T5150glacier	T5550
sept-96	3,25	0,98	-1,78	-2,94	
oct-96	3,86	2,35	-0,59	-1,22	
nov-96	2,94	1,66	-0,93	-1,67	-3,68
déc-96	3,35	2,04	-0,60	-1,22	-3,05
janv-97	2,90	2,17	-0,70	-1,11	-1,70
févr-97	2,40		-1,06	-1,72	
mars-97	3,25		-1,10	-1,60	
avr-97	4,02		-1,48	-2,02	
mai-97	3,79		-1,75	-2,54	
juin-97	4,46		-1,40	-2,74	
juil-97	4,62		-1,13	-2,57	
août-97	3,01		-2,70	-3,48	
Moy. an.	3,49	1,84	-1,27	-2,07	-2,81

Toutes les valeurs sont exprimées en °C

Tableau C.3 : températures mensuelles aux différentes altitudes

Selon la figure C.42, représentant les valeurs du tableau C.4, les extrêmes mensuels des moyennes journalières de la température sur le glacier à 5150 m font apparaître une amplitude saisonnière plus marquée que les moyennes mensuelles (les minima sont compris entre -6,9°C en août et -3,3°C en décembre, les maxima entre 0°C et 2,8°C pour les mêmes mois). A l'image des moyennes mensuelles, les maxima et minima mensuels des moyennes journalières enregistrés par le

thermographe à 4750 m augmentent en saison sèche (les maxima de juin et de juillet sont supérieurs à 10°C).

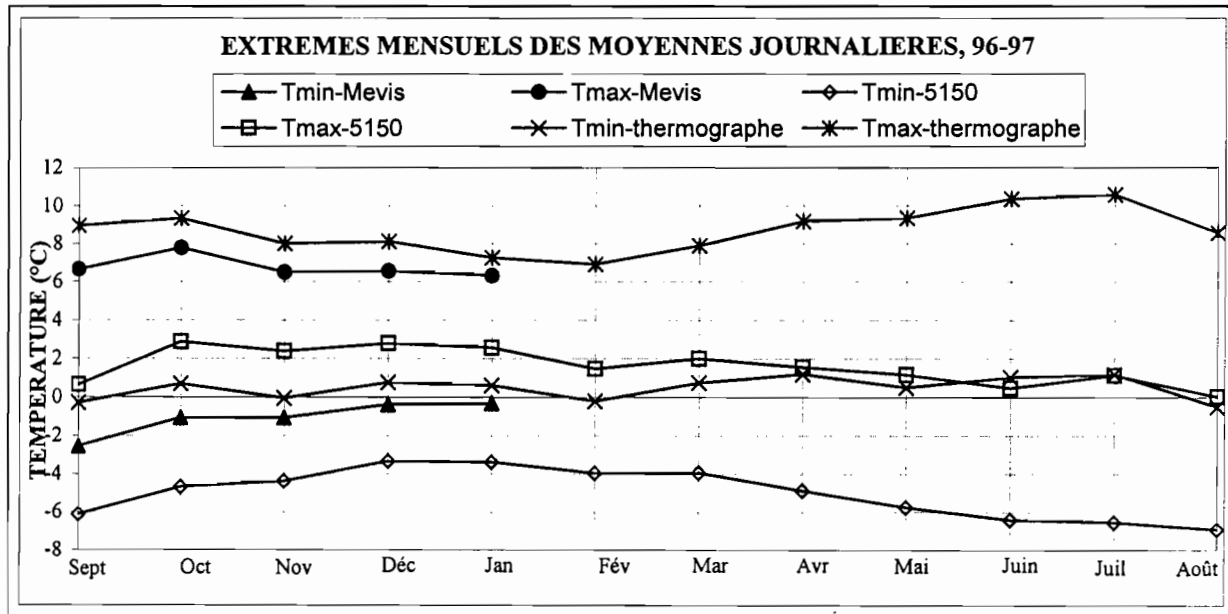


Figure C.42

mois	Thermographe Min	Thermographe Max	Mevis Min	Mevis Max	Cr10-5150 Min	Cr10-5150 Max
sept	-0,29	8,94	-2,54	6,64	-6,11	0,65
oct	0,71	9,33	-1,06	7,78	-4,68	2,87
nov	-0,04	8,00	-1,07	6,48	-4,36	2,39
déc	0,76	8,12	-0,37	6,55	-3,32	2,78
janv	0,61	7,26	-0,30	6,32	-3,37	2,56
fév	-0,20	6,92			-3,94	1,48
mar	0,75	7,90			-3,93	2,01
avr	1,21	9,18			-4,87	1,57
mai	0,52	9,35			-5,75	1,17
juin	1,04	10,35			-6,40	0,49
jull	1,19	10,57			-6,54	1,15
août	-0,48	8,58			-6,91	0,04
Moyenne	0,48	8,71	-1,07	6,75	-5,02	1,60

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

C. 4.2. Valeurs annuelles

Seulement deux années de données sont disponibles pour les stations Mevis (4750 m) et Campbell (5150 m et 5550 m), des séries annuelles le plus souvent incomplètes (Cf. tableau C.5). L'année 96-97 est selon le thermographe à 4750 m l'année la plus chaude depuis 1991, alors que selon l'OmniData à 5165 m elle est la plus froide depuis 1993. La série de données la plus complète est celle du thermographe qui fonctionne depuis le début du programme NGT, mais nous avons vu que sans doute ces mesures étaient surestimées d'un degré Celsius au moins (Cf. Chapitre. C.2.4) et que sur l'année hydrologique 96-97 il enregistrait un effet saisonnier absurde (Cf. chapitre C.4.1).

	T _{4750thermo.}	T _{4750mevis}	T _{5150moraine}	T _{5150 glacier ventilée}	T ₅₅₅₀
96-97	+3,49	+1.84*	-1.27	-2.07	-2.81*
95-96	+ 3,1	+1.9	- 0,9	- 3,9**	- 4,4**
94-95	+ 1,6		- 0,25		
93-94	+ 1,0		- 1,0		
92-93	+ 2,2				
91-92	+ 2,8				

Toutes les données sont données en degrés Celsius

Moyennes incomplètes :

* : moyennes sur les mois de septembre à janvier pour la station Mevis, et de novembre à janvier pour la station campbell à 5550m

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

Tableau C.5 : températures annuelles aux différentes altitudes

D. TEMPERATURES DANS LA GLACE

D. 1. Information disponible

L'interprétation des gradients de température dans le manteau neigeux ou dans la glace mesurés par les deux stations à 5150 m (Cf. chapitre B.4) a été largement développée dans les deux derniers rapports d'activité (Cf. rapports n°49, chapitre 4 et rapport n°55, chapitre D). La période de fonctionnement de la sonde à ultrason permettant de suivre les évolutions des profondeurs des capteurs enfouis, est réduite de septembre 1996 à début avril 1997 (Cf. chapitre J) et les seules autres indications disponibles sont contenues dans les rapports de visite sous la forme suivante :

a) Station 21X (5150m)

04/10/96 : les deux thermocouples sont à l'interface neige/glace sous 30cm de neige

08/10/96 : les thermocouples sont en surface

22/10/96 : les thermocouples sont en surface sous un caillou

14/11/96 : Avant : un thermocouple sous une pierre à -20cm, et l'autre à -10cm dans la neige
Après : un en surface, et l'autre (T-100) à l'interface glace/neige à -20cm

16/12/96 : thermocouple qui était à l'interface enlevé puis remis

22/01/97 : mise en place du second thermocouple en surface

b) Station Cr10 (5150m)

Rapport 22-25/08/96 : sondes -20/-30/-50/-70 enlevées, il reste -150 (toujours à 0°C)

Rapport 30/10/96 : sonde LGGE en surface

Rapport 13-18/11/96 : avant : 3 thermocouples + sonde LGGE à -10cm dans la neige fraîche
après : 1 thermocouple à -50cm ou plus, 2 thermocouples suspendus au mât
sonde LGGE sans ailette blanche à -25 cm (interface neige - glace)

Rapport 16/12/96 : thermocouples -20/-30/-50/-50 retrouvés et un seul remplacé à l'interface neige glace à -25cm

Rapport 23/12/96 : mise en place d'un thermocouple en surface, et résumé : T-270 toujours dans la glace depuis fin mars 96, T-20 est à l'interface neige/glace et T - x en surface

Rapport 22/01/97 : un thermocouple mis en surface, une plaque blanche collée dessus et mise en place de la sonde LGGE n°4

Rapport 03/02/97 : le thermocouple placé en surface le 22/01/97 est enlevé et remis en surface

Rapport 18/02/97 : un thermocouple retrouvé en surface

Rapport 05/03/97 : un thermocouple mis en surface

Au vue de ces informations, imprécises et incomplètes puisque ne recouvrant pas toute l'année hydrologique, nous choisissons de représenter à titre d'exemple, et sans revenir à une interprétation précise des données, les mesures instantanées de la station 21X sur deux périodes : du 5 au 12 octobre 96 et du 15 au 22 novembre 96, et celles de la station CR10 sur la période du 17 au 24 décembre 97.

D. 2. Thermocouples 21X

5-12 Octobre 96

Selon les rapports de visite, les deux thermocouples sont enfouis sous 30 cm de neige le 04/10/96 (Cf. paragraphe D.1). Cependant T-50 suit les mesures de l'air enregistrées par la station Cr10 30 cm au dessus de la surface (Cf. figure D.1). Selon T-100 le manteau neigeux est à température de fusion toutes les journées considérées, et les nuits les minima de l'ordre de -3°C sont en retard sur ceux de l'air d'environ 6h. A partir du 10 octobre T-100 enregistre des valeurs positives en journées, liées peut être à la baisse du niveau du glacier d'environ 50 mm mesurée par la sonde à neige du 10 au 11 octobre.

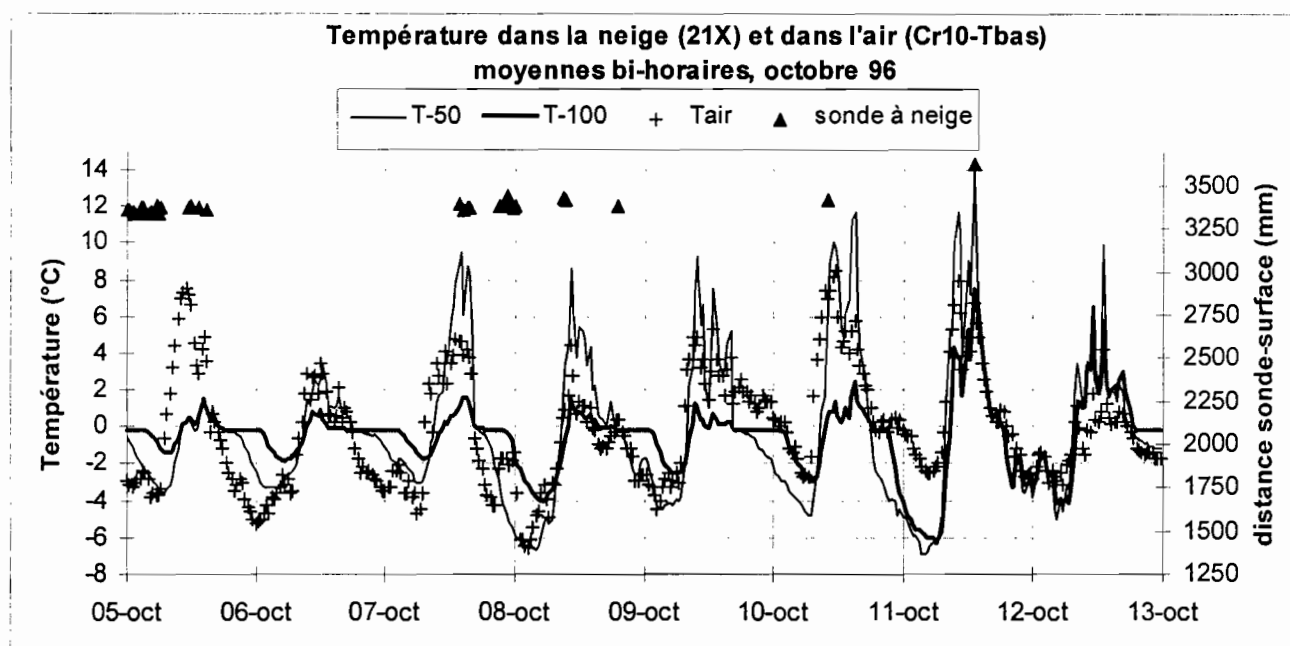


Figure D.1

15-22 Novembre 96

Le 14 novembre T-50 est placé en surface et T-100 est enfoui sous 20 cm de neige (Cf. paragraphe D.1). Les deux premières nuits de la période considérée T-50 suit la température de l'air, puis sans que la sonde à ultrason ne mesure aucune accumulation de neige les mesures de ce capteur rejoignent T-100 constant à 0°C (Cf. figure D.2).

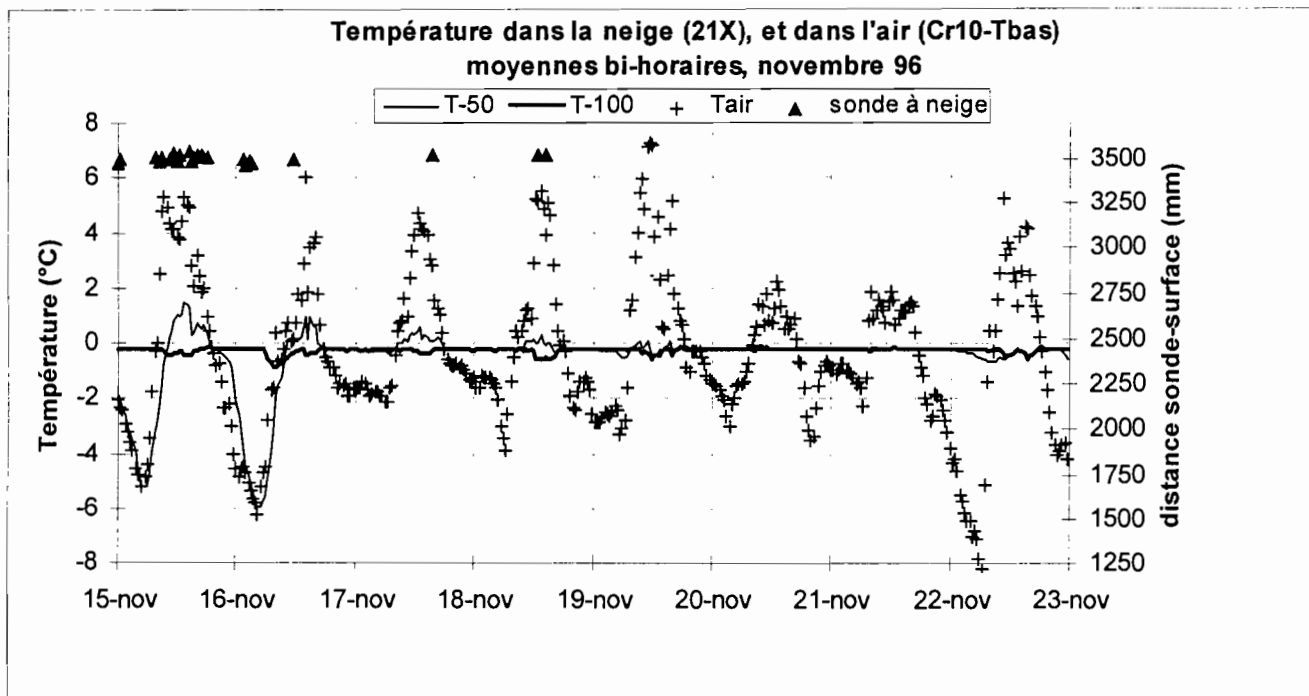


Figure D.2

D. 3. Thermocouples CR10

17-24 Décembre 96

D'après le rapport de visite du 16 décembre et le « résumé » du 23 décembre (Cf. chapitre D.1), il semble que le capteur T-20 ait été enfoui sous 25 cm de neige le 16/12/96. Selon les trois mesures de la sonde à neige disponibles la semaine précédent Noël, la surface du glacier a baissé de 65 mm du 17 (12h00) au 18 décembre (9h00), puis du 18 décembre (9h00) au 21 décembre (10h30) 95 mm de neige se sont accumulés. Du 17 au 24 décembre T-20 suit l'évolution de la température de l'air sans retard notable, mais selon des amplitudes environ 25 fois plus faibles (T-20 est compris entre -0,6 et -0,2 °C, Cf. figure D.3, attention les échelles de Tair et Tneige sont différentes).

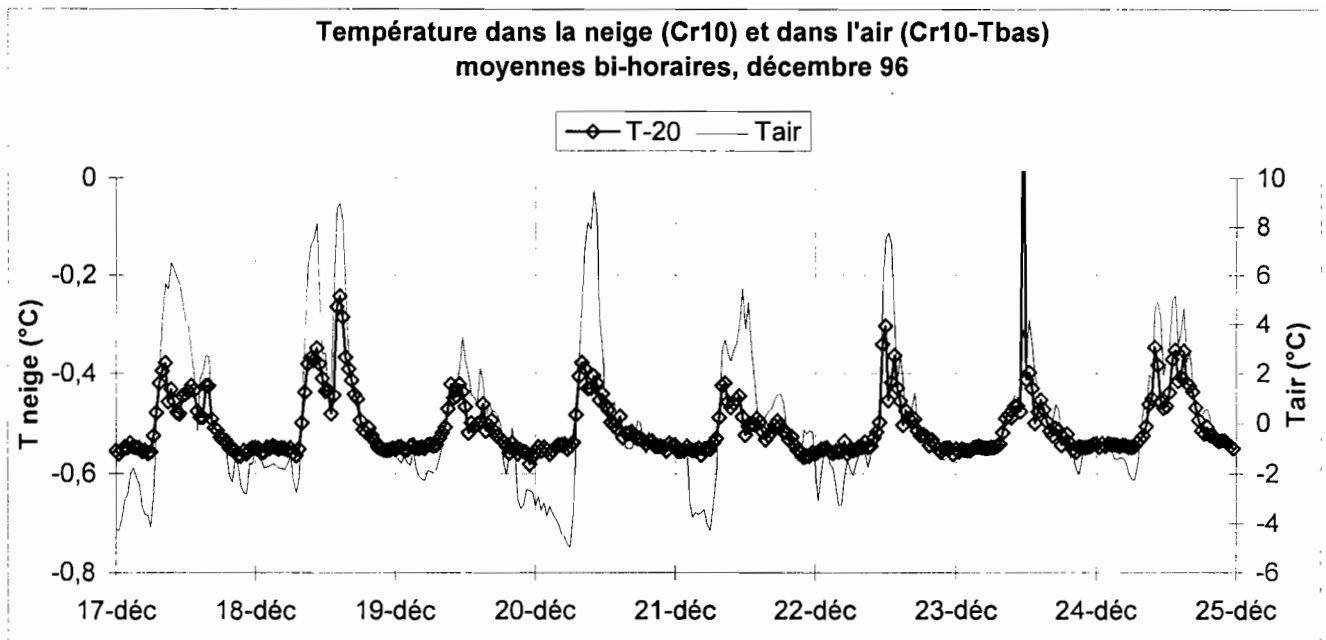


Figure D.3

D. 4. Conclusion

Les mesures présentées ici correspondent souvent à la température de l'air qui circule entre les grains du manteau neigeux et sont influencées par les radiations solaires qui le pénètrent. Afin de rendre compte des gradients thermiques plus profonds au sein de la glace du glacier, il serait nécessaire d'entreprendre une étude précise des mesures de la saison sèche 96-97 associée au suivi des émergences des balises, alors seules informations disponibles sur l'évolution de l'élévation de la surface.

*Ciel rouge le soir laisse bon espoir
Ciel rouge le matin, pluie en chemin*
(dicton des latitudes nord tempérées)

E. PRECIPITATIONS

E. 1. Valeurs journalières, pluviomètre de la COBEE, Plataforma (4750 m)

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.

Cette description s'applique cette année aux mesures du pluviomètre à 4750 m, puisque 73 % des précipitations annuelles sont mesurées des mois de décembre à mars, mois au cours desquels aucune période de plus de 3 journées consécutives sans pluie n'est observée (Cf. tableau E.1, figure E.1). Les précipitations des mois de transition représentent 23 % des précipitations totales, et celles de la saison sèche n'en représentent que 4 % (aucune pluie n'est enregistrée au cours des mois de juin et de juillet 1997).

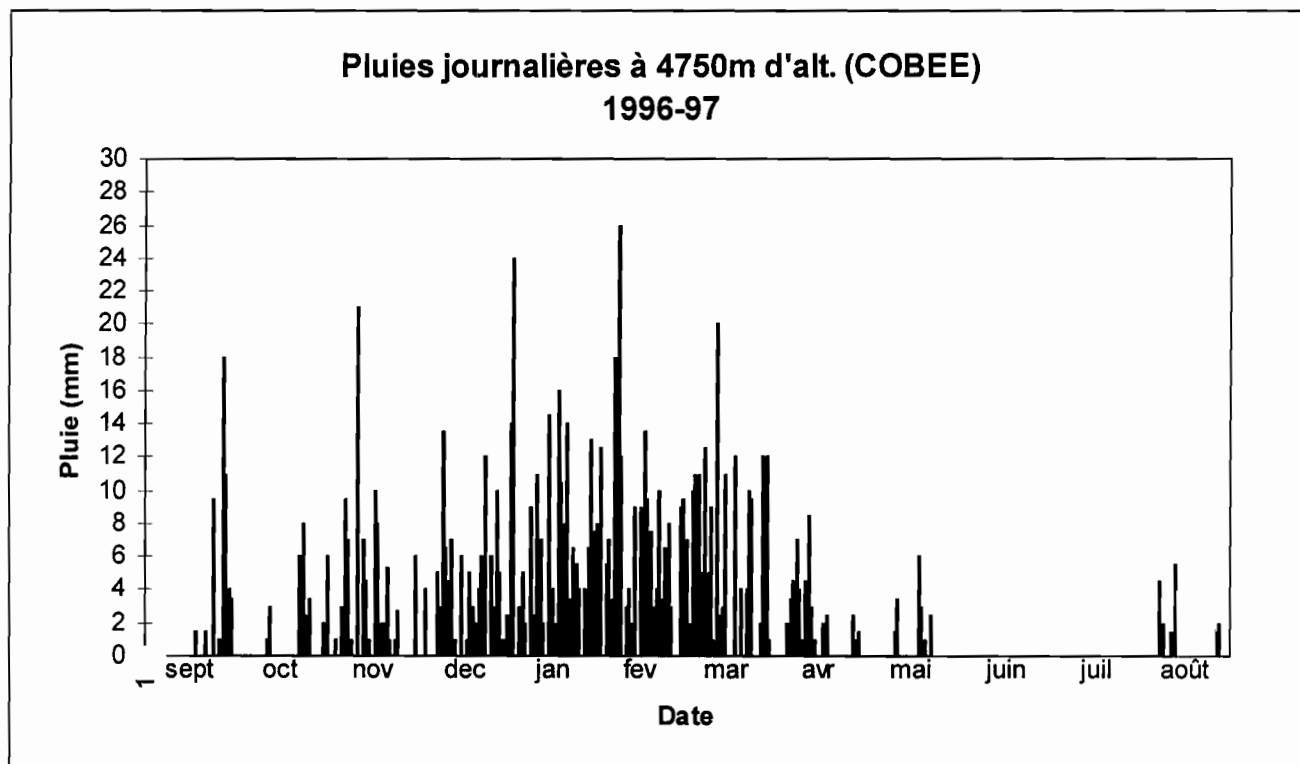


Figure E.1

	sept-96	oct-96	nov-96	déc-96	janv-97	févr-97	mars-97	avr-97	mai-97	juin-97	juil-97	août-97
1	0,0	0,0	0,0	0,0	14,0	0,0	7,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	0,0	0,0	0,0	0,0	24,0	5,5	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3	0,0	0,0	1,0	4,0	0,0	7,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	3,5	11,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,0	0,0	3,0	0,0	5,0	18,0	11,0	3,5	0,0	0,0	0,0	0,0
6	0,0	0,0	9,5	0,0	2,0	26,0	5,0	4,5	0,0	0,0	0,0	0,0
7	0,0	0,0	7,0	5,0	0,0	12,0	12,5	7,0	0,0	0,0	0,0	4,5
8	0,0	0,0	1,0	3,0	9,0	0,0	5,0	4,0	0,0	0,0	0,0	2,0
9	0,0	0,0	0,0	13,5	2,5	3,0	9,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0,0	0,0	21,0	6,5	11,0	4,0	1,0	4,5	1,5	0,0	0,0	0,0
11	0,0	1,0	0,0	4,5	7,0	2,0	20,0	8,5	3,5	0,0	0,0	1,5
12	0,0	3,0	7,0	7,0	2,0	9,0	2,5	3,0	0,0	0,0	0,0	5,5
13	0,0	0,0	4,5	1,0	0,0	0,0	3,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0
14	0,0	0,0	1,0	0,0	14,5	9,0	11,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
15	0,0	0,0	0,0	6,0	4,0	13,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
16	0,0	0,0	10,0	0,0	2,0	9,5	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0
17	1,5	0,0	8,0	1,0	16,0	7,5	12,0	2,5	0,0	0,0	0,0	0,0
18	0,0	0,0	2,0	5,0	10,5	3,0	0,0	0,0	6,0	0,0	0,0	0,0
19	0,0	0,0	2,0	3,0	8,0	4,0	4,0	0,0	3,0	0,0	0,0	0,0
20	1,5	0,0	5,3	2,0	14,0	10,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0
21	0,0	0,0	1,0	4,0	3,5	3,5	4,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
22	0,0	6,0	0,0	6,0	6,5	6,5	10,0	0,0	2,5	0,0	0,0	0,0
23	9,5	8,0	1,0	12,0	5,5	8,0	9,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
24	0,0	2,5	2,7	0,0	4,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
25	1,0	3,5	0,0	6,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
26	18,0	0,0	0,0	3,0	4,0	0,0	2,0	2,5	0,0	0,0	0,0	1,5
27	11,0	0,0	0,0	10,0	6,5	9,0	12,0	1,0	0,0	0,0	0,0	2,0
28	4,0	0,0	0,0	5,0	13,0	9,5	12,0	1,5	0,0	0,0	0,0	0,0
29	3,5	0,0	0,0	1,0	7,5		1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
30	0,0	2,0	6,0	0,0	8,0		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
31		6,0		2,5	12,5		0,0		0,0		0,0	0,0
total	50	32	93	111	220	186	177	49	18	0	0	17

Tableau E.1 : Pluies journalières à la plataforma à 4750 m (en mm d'eau, valeurs brutes lues par l'observateur de la COBEE), total annuel : 951mm

E. 2. Valeurs mensuelles et annuelles

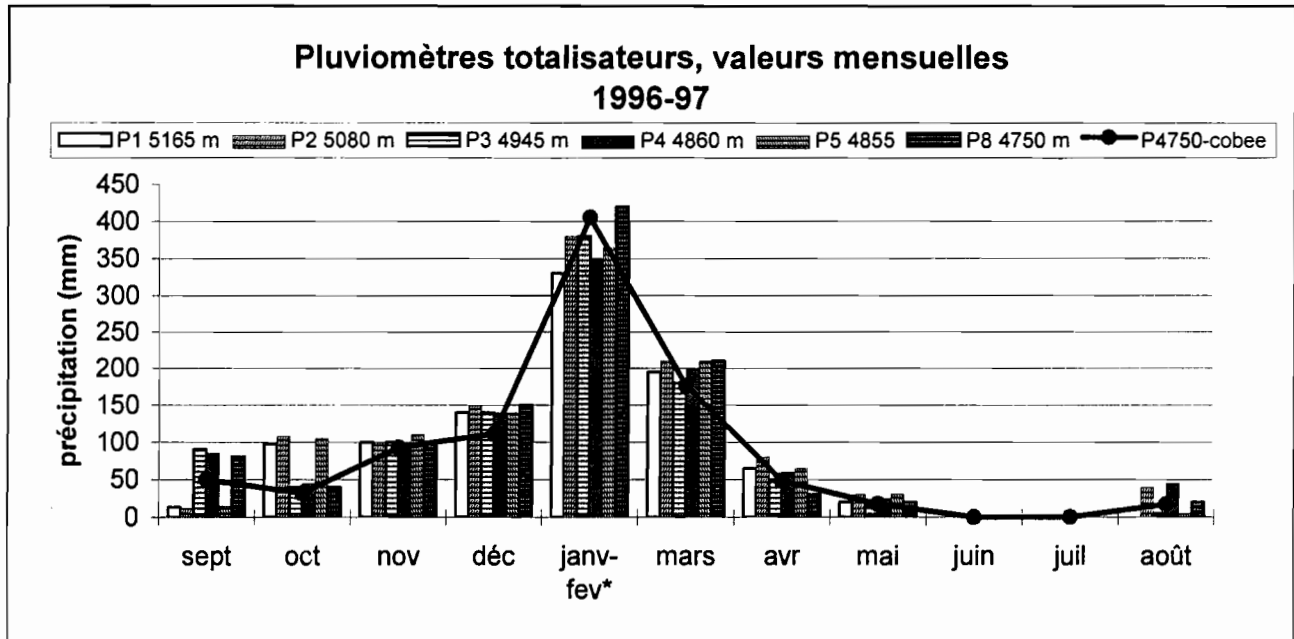
E. 2.1. Pluviomètres totalisateurs, pluviomètre de la COBEE à la Plataforma (4750 m) et station pluviométrique à 4830 m

Les différences entre les précipitations mensuelles enregistrées par l'ensemble des pluviomètres répartis dans le bassin versant et à la Plataforma (totalisateurs P1 à P8 et pluviomètre de la COBEE à 4750 m) sont au maximum de 50 mm d'eau (mois d'octobre), et ne font pas apparaître de gradient d'altitude (Cf. figure E.2). On peut noter que les mesures du pluviomètre de la COBEE à 4750 m ne sont pas plus similaires à celles du pluviomètre P8 situé à 10 m de distance qu'à celles des autres pluviomètres.

Au cours des mois de juin et de juillet aucun des pluviomètres n'enregistre la moindre précipitation, et des pertes non négligeables sont observées dans certains pluviomètres totalisateurs (pertes non prises en compte dans les tableaux et la figure E.2) :

- Pertes en juin : P1, 40mm / P3, 15mm / P4, 10mm
- Pertes en juillet : P1, 5mm / P3, 25mm / P5, 5mm

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. Ainsi ces chiffres montrent que tout au long de l'année, et plus particulièrement en saison sèche, les précipitations mesurées sont potentiellement sous-estimées de quelques dizaines de millimètres.



* aucune mesure des pluviomètres totalisateurs n'étant disponible en janvier, nous ne pouvons distinguer les précipitations de janvier de celles de février.

Figure E.2

Les différences entre les pluies annuelles mesurées par l'ensemble des pluviomètres (pluviomètres totalisateurs, celui de la COBEE à 4750 m et celui relevé lors des visites à 4830 m) sont de l'ordre de 200 mm d'eau, soit 20 % de dispersion environ (Cf. tableaux E.2 et E.3, figure E.3). De ces différences ne se dégage aucun gradient selon l'altitude, masqué sans doute par les effets de site (en particulier l'exposition au vent).

Ainsi les précipitations annuelles mesurées par P1 sont 13,5 % inférieures à celles mesurées par P2, qui est situé 85 m plus bas sur la même moraine. Ce phénomène avait déjà été constaté au cours des années précédentes : P2 30 % plus faible que P1 en 1993-94, 10 % plus faible en 1994-95, et 18 % plus faible en 1995-96. Les dissemblances des matériels, que se soit la couleur (gris et noir) ou la hauteur (P1 est 20 cm plus haut), ne peuvent expliquer de tels écarts. Sans doute l'influence de la vitesse du vent sur la captation des précipitations est très importante : 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. Cet effet de site expliquerait également la forte évaporation constatée au pluviomètre P1.

Valeurs annuelles pour l'ensemble des pluviomètres 1996-97

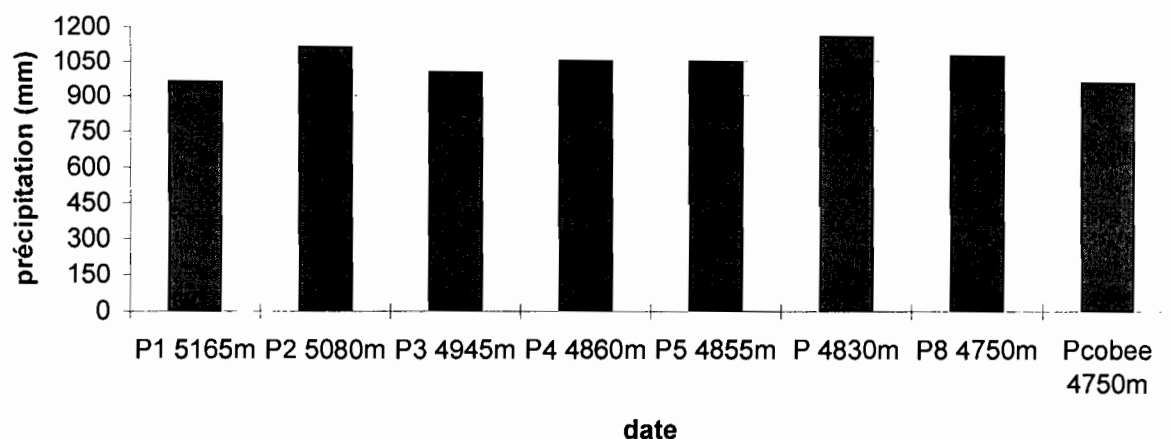


Figure E.3

	P1 5165 m	P2 5080 m	P3 4945 m	P4 4860 m	P5 4855 m	P8 4750 m
sept-96	13	12	90	85	15	80
oct-96	110	120	130	130	120	120
nov-96	210	220	230	230	230	220
déc-96	350	370	370	370	370	370
janv-97*						
févr-97	680	750	750	720	735	790
mars-97	875	960	930	920	945	1000
avr-97	940	1040	980	980	1010	1030
mai-97	960	1070	995	1005	1040	1050
juin-97	960	1070	995	1005	1040	1050
juil-97	960	1070	995	1005	1040	1050
août-97	960**	1110	1000	1050	1045	1070

* aucune mesure n'a été effectuée en janvier

** la mesure du P1 du mois d'août présente une valeur aberrante non retenue, ainsi le cumul annuel de ce pluviomètre est sous estimé de quelques dizaines de millimètres au plus.

Tableau E.2 : Valeurs mensuelles cumulées des pluviomètres totalisateurs

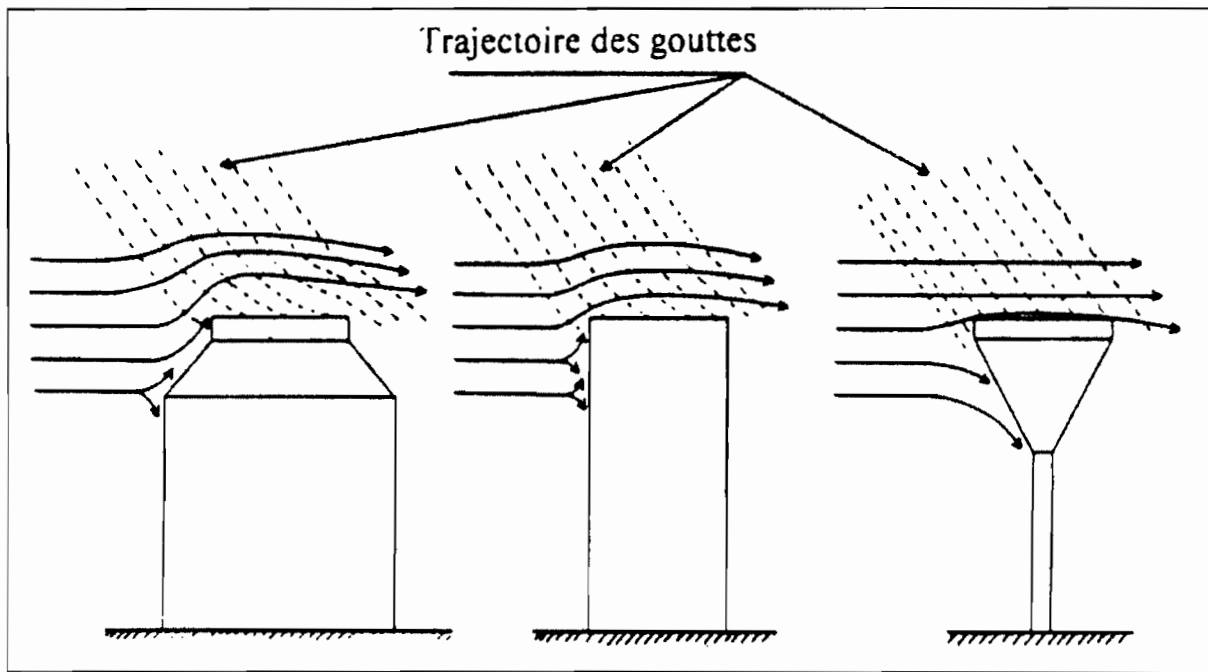
date	Vol. (ml)	Hauteur d'eau (mm)
12-sept	65	1
17-sept	0	0
19-sept	0	0
04-oct	4700	64
18-oct	700	10
22-oct	175	2
30-oct	1670	23
18-nov	7080	97
02-déc	2110	29
16-déc	4370	60
23-déc	1900	26
02-janv	4400	60
07-janv	2850	39
09-janv	190*	3
22-janv	7830	107
03-févr	5150	71
18-févr	10750	147
21-févr	1350	18
08-mars	8820	121
19-mars	5780	79
11-avr	8350	114
23-avr	1740	24
30-avr	500	7
22-mai	1530	21
27-mai	580	8
05-juin	0	0
22-juin	0	0
26-juil	40	1
14-août	1450	20
26-août	270	4
total	84350	1155

* neige fraîche, en quantité non mesurée

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

La figure E.4 met également en évidence le rôle du site et, ou, de la forme des collecteurs sur la captation des précipitations : 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. chapitre B.3.2), 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 (Cf. chapitre B.3.2). Les mesures cumulées sur l'ensemble de l'année hydrologique à 4855 m et à 4860 m sont environ 10 % plus faibles qu'à 4830 m.

Selon Guyot (1995) : « Différentes études (Viton, 1970 ; O.M.M., 1990) montrent que l'effet du vent sur le coefficient de captation dépend de la forme du pluviomètre [comme l'indique le schéma page suivante]. Les formes cylindriques ou cylindroconiques avec le sommet du cône tourné vers le haut, sont à éviter. Par contre, les pluviomètres de forme conique ou tronconique reposant sur un support de faible encombrement ont l'avantage de ne pas perturber les filets d'air passant au-dessus de la bague collectrice. »



Modification du champ des précipitations à l'avant et au-dessus de pluviomètres de forme différente ; (d'après Viton, 1970)

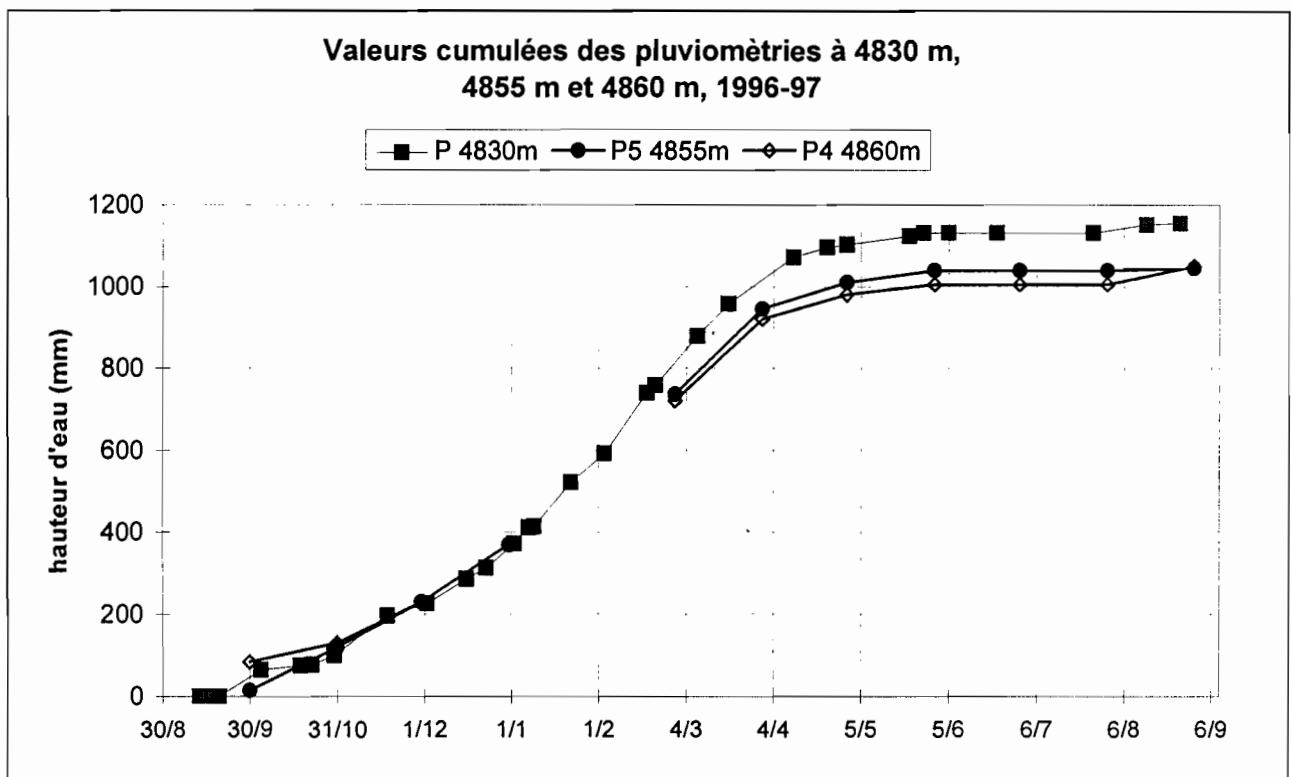


Figure E.4

E. 2.2. Comparaison avec les précipitations enregistrées à proximité du glacier Chacaltaya

Sur le modèle du rapport n°49 de l'année 94-95, comparons les précipitations mensuelles enregistrées par le pluviomètre de la COBEE à la Plataforma avec celles enregistrées par les pluviomètres P6 et P7 situés sur les moraines du glacier Chacaltaya (Cf. figure E.5). Comme en 1994-95, les précipitations sur le glacier Chacaltaya sont plus faibles que sur le Zongo (156 mm de moins sur l'année). Cette différence est vraisemblablement liée à l'effet d'abri pour le versant du glacier Chacaltaya situé sous le vent de reliefs, alors que le pluviomètre de la Plataforma est directement exposé aux masses d'air provenant d'Amazonie. Cependant contrairement à 94-95, on ne peut relever ici une augmentation des précipitations en saison sèche à Chacaltaya par rapport au Zongo.

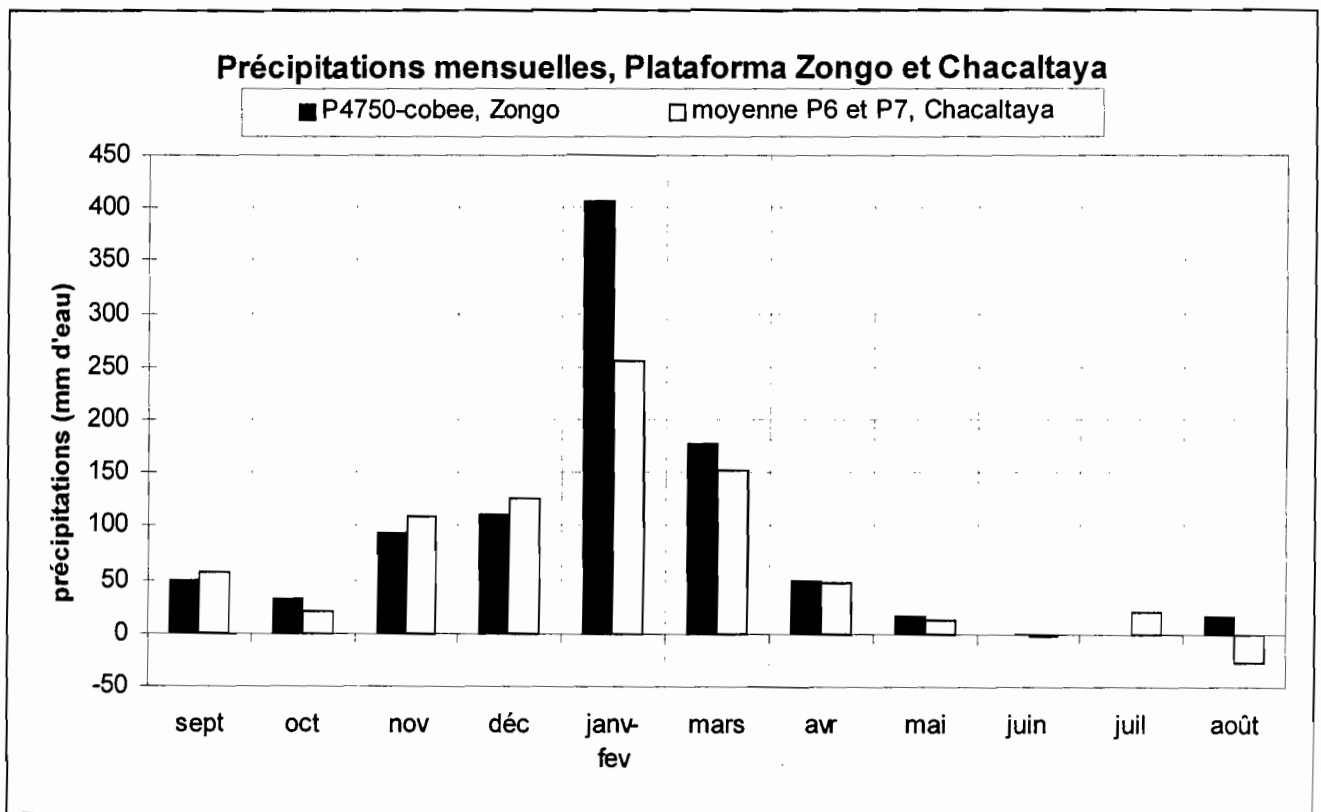


Figure E.5

E. 2.3. Comparaison avec les cycles précédents, pluviomètre de la COBEE à la Plataforma (4750 m)

Selon le tableau E.4 le cycle 1996-97 est celui qui a connu les plus fortes précipitations depuis le début du programme, après 1993-94. Cependant les mesures de la COBEE de 1993-94 ne sont pas disponibles et ont été remplacés dans le tableau par les mesures à 4830 m (Cf. rapport n°49, p.50). En ce qui concerne les pluviomètres totalisateurs, 1996-97 est l'année des mesures les plus fortes avec 92-93 dont le total est plus élevé de 9 mm (Cf. tableau K.13).

La figure E.6 représente en pourcentage du total annuel la distribution mensuelle des pluies pour les cycles 1996-97, 1992-93 (cycle représentatif des 6 années de mesures tant pour la distribution des pluies au cours des saisons que pour le total annuel ; Cf. tableau E.4), et 1991-92 qui est marqué par un événement « El Niño ». Le cycle 1996-97 connaît un total annuel légèrement supérieur à 1992-93 (+3 %) et s'en démarque par des précipitations plus élevées en fin de saison des pluies (février et mars, période de fortes radiations), et plus faibles au cours de la saison sèche, en particulier au mois d'août (Cf. figure E.7). L'année 1991-92, bien plus sèche que 1996-97 (28 % de moins sur l'année), est marquée par des déficits en mars et en avril, et par des précipitations significatives en juin et en juillet.

Ainsi l'année hydrologique 1996-97, marquée par une situation « La Niña » au début 1997 et dont le total annuel des pluies est un des plus élevés de la série, se distingue de la moyenne actuelle par une fin de saison des pluies excédentaire suivie d'un hiver très sec.

Année	déc. - mars (mm)	mai - août (mm)	Précipitation annuelle (mm)
91-92	422 (62%)	88 (13%)	686
92-93	618 (67%)	67 (7%)	920
93-94*	582 (60%)	94 (10%)	968
94-95	563 (78%)	24 (3%)	723
95-96	562 (71%)	54 (7%)	791
96-97	694 (73%)	35 (4%)	951
Moyenne	574 (68%)	60 (7%)	840

Notes : entre parenthèses sont mentionnés les pourcentages du total annuel

* Les observations de la COBEE n'étant pas fiables en 93-94, ce sont les mesures du pluviomètre à 4830 m qui sont présentées ici (Cf. rapport n°49, p.50).

Tableau E.4 : précipitations annuelles à la Plataforma (COBEE, 4750m) depuis 1991

**Pluviomètres de la COBEE (4750m), pourcentages du total annuel
Comparaison des cycles 91/92, 92/93 et 96/97**

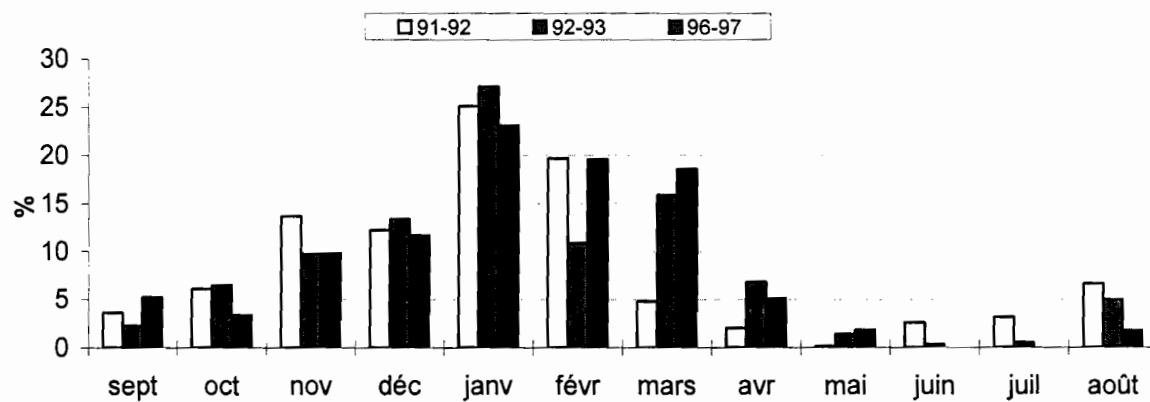


Figure E.6

**Pluviomètres de la COBEE (4750m), valeurs mensuelles
Comparaison des cycles 91/92, 92/93 et 96/97**

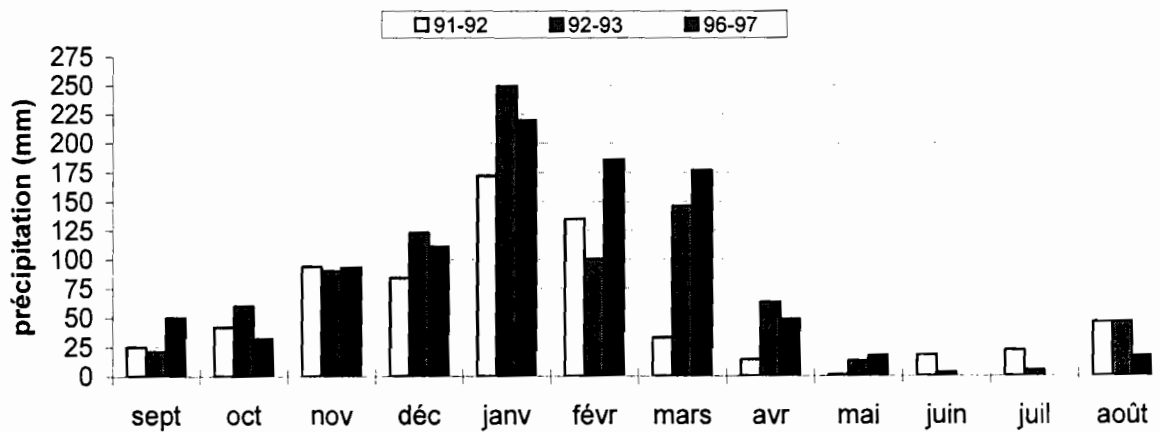


Figure E.7

F. BILAN RADIATIF

F. 1. Notations

Le bilan radiatif à la surface du glacier peut s'écrire :

$$R_n = SW\downarrow - SW\uparrow + LW\downarrow - LW\uparrow$$

avec : R_n , radiation nette.

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

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

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

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

On définit aussi l'albédo $a = SW\uparrow / SW\downarrow$, rapport entre les radiations solaires réfléchie et incidente, $SW\downarrow\uparrow$ le bilan en courtes longueurs d'onde, et $LW\downarrow\uparrow$ le bilan en grandes longueurs d'onde. Les flux qui apportent de l'énergie à la surface sont comptés comme valeurs positives.

Les mesures disponibles aux différentes altitudes sont (Cf. chap. B, inventaire de l'équipement du glacier) :

- 4750 m : $SW\downarrow$ (station Mevis à la Plataforma)

- 5025 m : $SW\downarrow$ et $SW\uparrow$ (station Campbell sur le glacier installée seulement jusqu'en octobre 1996)

- 5150 m : R_n , $SW\downarrow$ et $SW\uparrow$ (station Campbell sur le glacier)

- 5550 m : R_n , $SW\downarrow$ et $SW\uparrow$ (station Campbell sur le glacier)

Les deux termes $LW\downarrow$ et $LW\uparrow$ ne sont pas mesurés directement : le premier est estimé par des formules semi-empiriques et le second par des formules physiques.

F. 2. Valeurs journalières

F. 2.1. Radiation solaire incidente maximale journalière à 5150 m et 5550 m

La figure F.1 montre que les maxima journaliers sont largement supérieurs à la radiation extraterrestre maximale correspondant à un angle d'incidence nul (la différence atteint 500W/m^2). Cette amplification de l'énergie reçue en limite d'atmosphère, déjà observée dans les deux précédents rapports d'activité (Rapport N°49 et N°55), ne peut s'expliquer que par les réflexions sur les parois rocheuses et neigeuses, et par l'effet loupe des nuages (Hastenrath, 1978). De plus cet effet est sous-estimé ici puisque le pyranomètre installé à 5150 m sature pour les valeurs dépassant 1780W/m^2 (les notices n'indiquent rien sur les limites de saturation de l'appareil).

Au cours de l'année les maxima suivent l'évolution de SWextraMax, et sur le modèle des rapports n°49 et 55 si on suppose que les valeurs les plus faibles correspondent à SW incidente sans les effets de loupe ou de réflexions sur les parois, alors on peut estimer que l'absorption de la couche atmosphérique située au dessus de 5150 m est inférieure à 200 W/m^2 (se reporter en particulier au mois de juin qui n'a connu aucune précipitation).

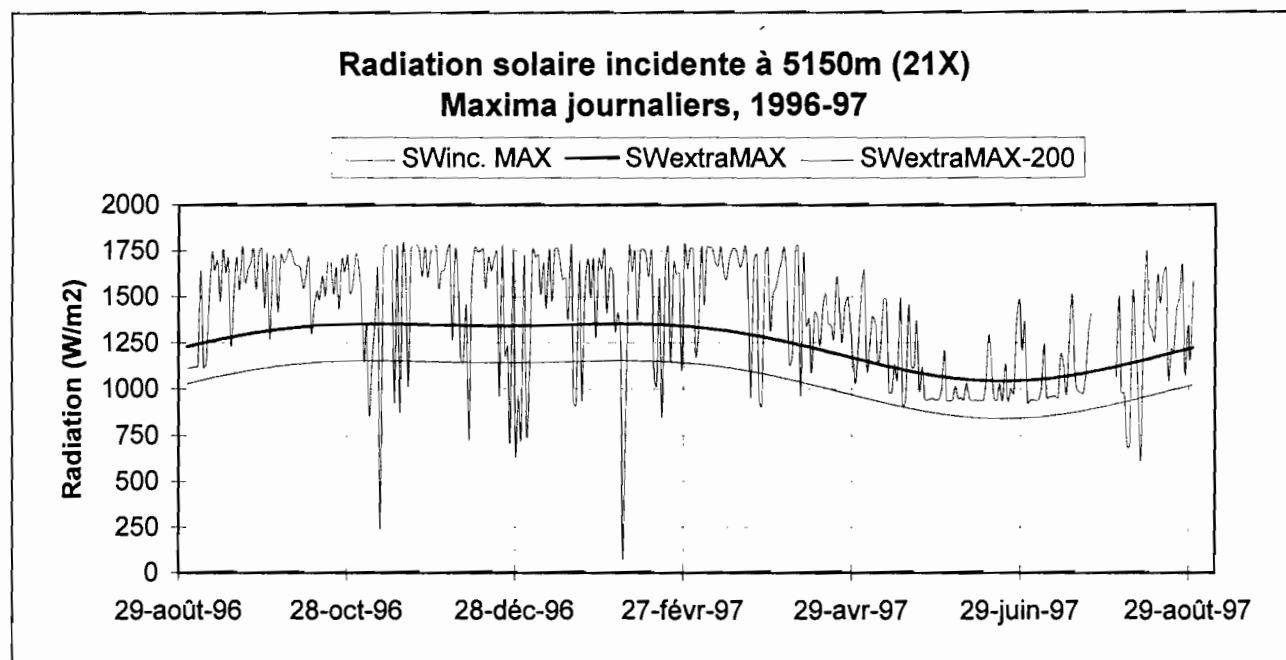


Figure F.1

L'évolution de SW incident maximale à 5550 m est différente de celle enregistrée à 5150 m (Cf. figure F.2, le coefficient de détermination entre les deux séries est égal à 0,58). En particulier le pyranomètre à 5550 m ne sature pas et certains maxima dépassent 2000 W/m^2 . Si on observe la période d'avril à juin, l'absorption de la couche atmosphérique au dessus de 5550 m est d'environ 200 W/m^2 ; valeur supérieure à l'atténuation jusqu'à 5150 m. Ainsi les appareils sont mal calibrés, ou bien les effets locaux (réflexions sur les parois, effets de loupe...) jouent un rôle prépondérant dans la radiation solaire incidente mesurée. Les deux stations sont situées sur des emplacements plats de même exposition (sud environ), et la station à 5150 m est entourée de parois réfléchissant les radiations solaires : séracs en amont, parois rocheuses en rive gauche et glaciaires en rive droite, alors que la station à 5550 m est seulement à proximité de séracs en amont.

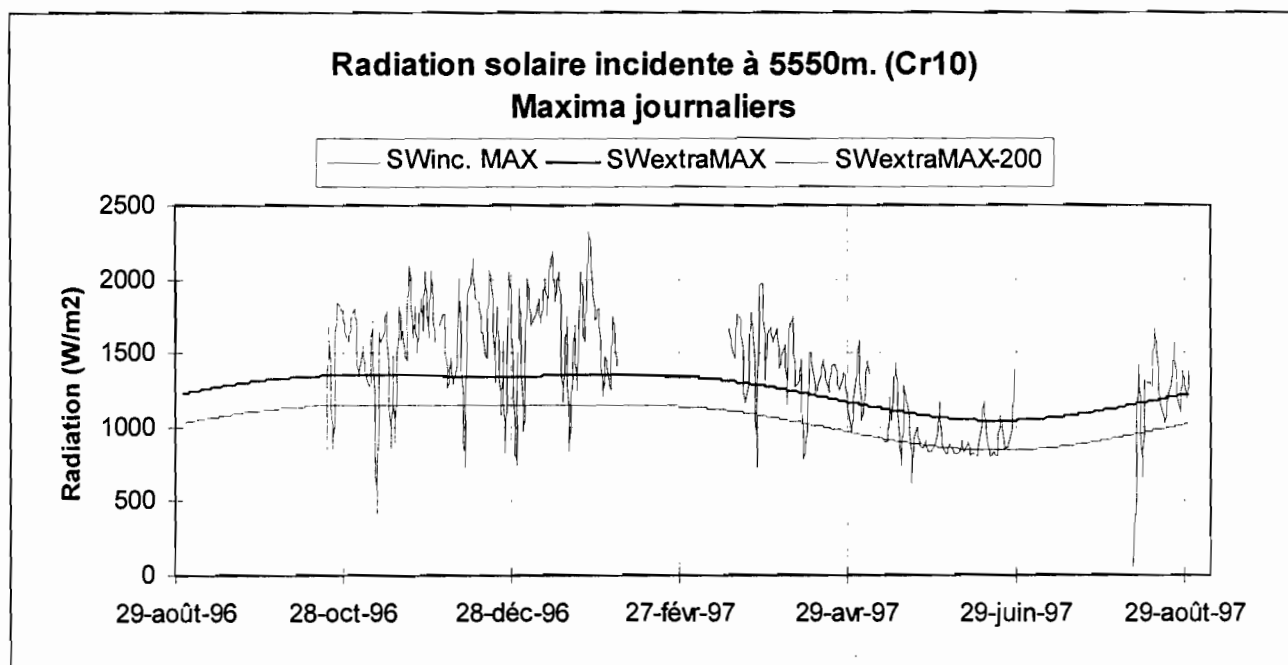


Figure F.2

F. 2.2. Albédo minimum journalier à 5150 m, 5550 m et 5025 m

Comme les années précédentes on s'intéresse à la valeur minimale journalière de l'albédo (correspondant à l'angle d'incidence minimum du rayonnement solaire), qui est la valeur la plus représentative de l'état de surface du glacier. A 5150 m la valeur de l'albédo mesurée est souvent surestimée à cause des phénomènes de saturation du pyranomètre orienté vers le ciel, et ce particulièrement en saison des pluies lorsque la radiation solaire incidente est la plus forte.

La figure F.3 montre que les périodes de hausse de l'albédo à 5150 m correspondent généralement avec les périodes de précipitations à 4750 m. L'influence des précipitations sur l'albédo se fait par effet de seuil (quelle que soit la quantité des précipitations, si la neige fraîche est persistante l'albédo augmente à 0,9), c'est pourquoi le coefficient de détermination entre ces deux séries est très faible ($r^2=0,18$). La transformation de la neige, même sèche à température négative, est rapide : l'albédo ne dépasse jamais 0,8 durant plus d'une journée et atteint des valeurs inférieures à 0,6 généralement un jour après les chutes de neige. Au début du mois d'octobre les températures positives enregistrées à 5150 m sont associées à des baisses très rapides de l'albédo jusqu'à des valeurs proches de 0,2 ; sans doute la couche de neige accumulée le mois précédent a-t-elle fondu, laissant apparaître la surface de glace (l'albédo de la glace sale est de l'ordre de 20%, Paterson, 1994, p. 59). Concernant les températures journalières représentées sur cette figure, il faut noter que ce sont des moyennes sur 24h incluant les nuits.

Des valeurs aberrantes apparaissent sur cette figure : le 29 mars et les 10 et 11 avril 97 l'albédo minimum mesuré est proche de 0,02, or à aucun moment de l'année hydrologique les capteurs de la station à 5150 m n'ont été enfouis sous la neige. Le 27 mars, SW réfléchi suit l'évolution de SW incidente et atteint en fin de matinée la valeur de 500 W/m², l'albédo minimum enregistré étant égal à 0,7 (Cf. figure F.4-a). Au cours de la matinée du 28 mars, SW réfléchi augmente régulièrement jusqu'à 300 W/m² puis marque un palier alors que SW incidente atteint des valeurs similaires à celles du jour précédent (600 W/m² au maximum), et l'albédo minimum baisse à 0,3 (Cf. figure 4-b). Le 29 mars, alors que SW incidente augmente régulièrement jusqu'à 924 W/m² à 13h30, SW réfléchi reste nulle jusqu'à la fin de matinée et ne dépasse pas 150 W/m² au cours de l'après-midi ;

l'albédo minimum enregistré n'est plus que de 0,016 (Cf. figure F.4-c). Le mois de mars est un mois qui connaît de nombreuses précipitations (Cf. figure E.1) ; le pluviomètre de la COBEE à 4750 m enregistre des précipitations les 17, 28 et 29 mars (respectivement 12 mm, 12 mm et 1 mm d'eau, Cf. tableau E.1). Ainsi durant la fin du mois de mars la surface du glacier à 5150 m est recouverte de neige (neige transformée le 21 avril et neige fraîche le 11 avril, Cf. tableau A.1), et SW réfléchi est sous-estimée le 29 mars mais aussi sans doute le 28 mars. Cette dérive brutale des mesures de SW réfléchi vers des valeurs trop faibles reste inexplicée.

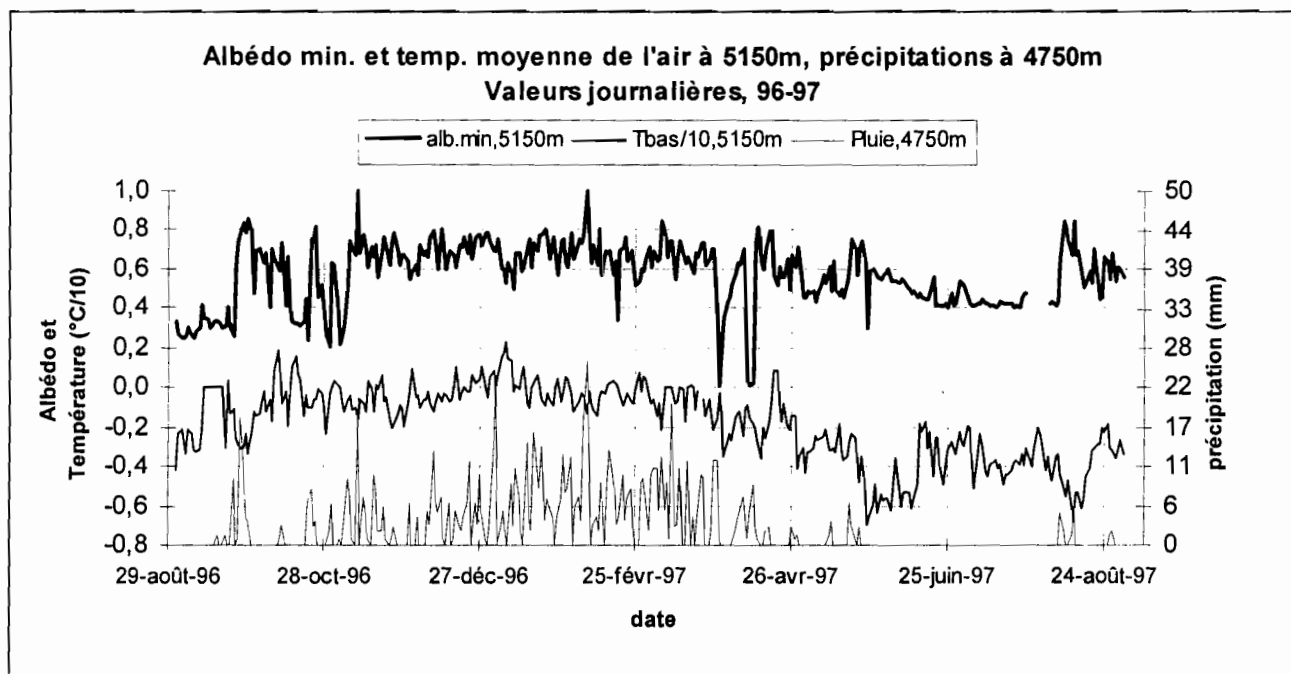


Figure F.3

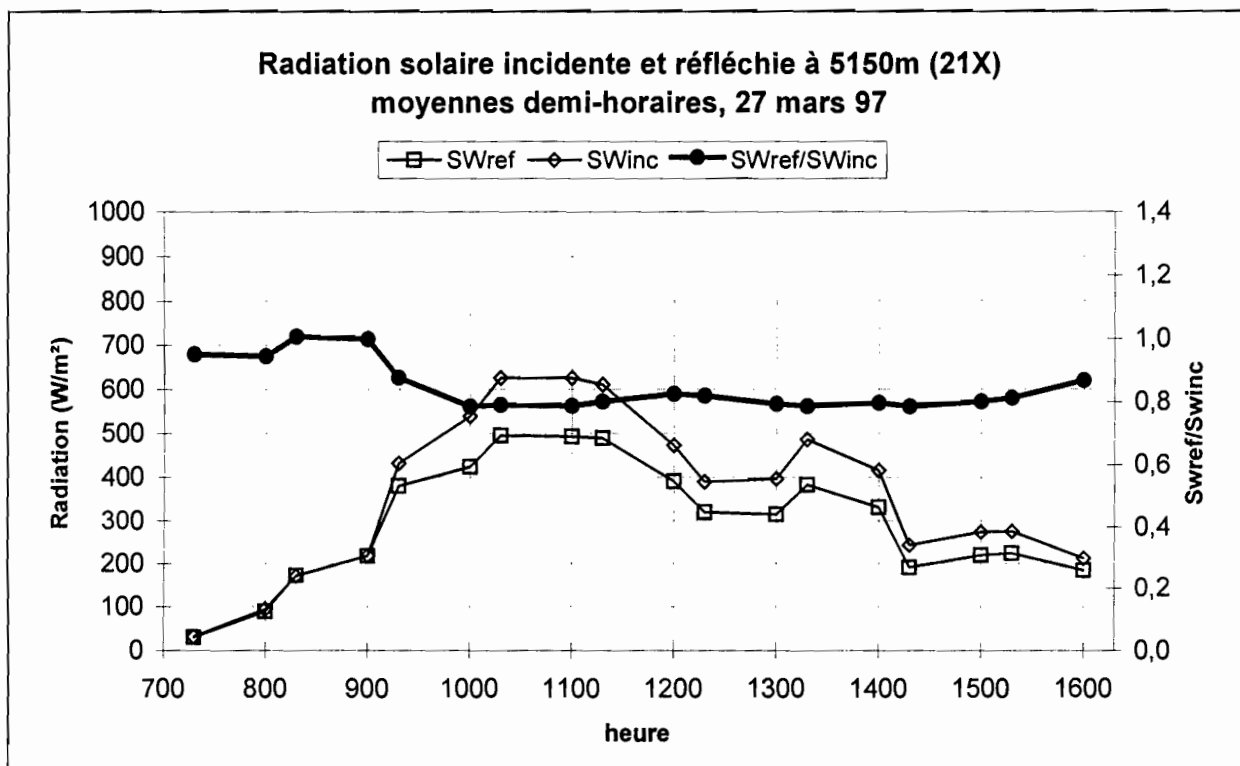


Figure F.4-a

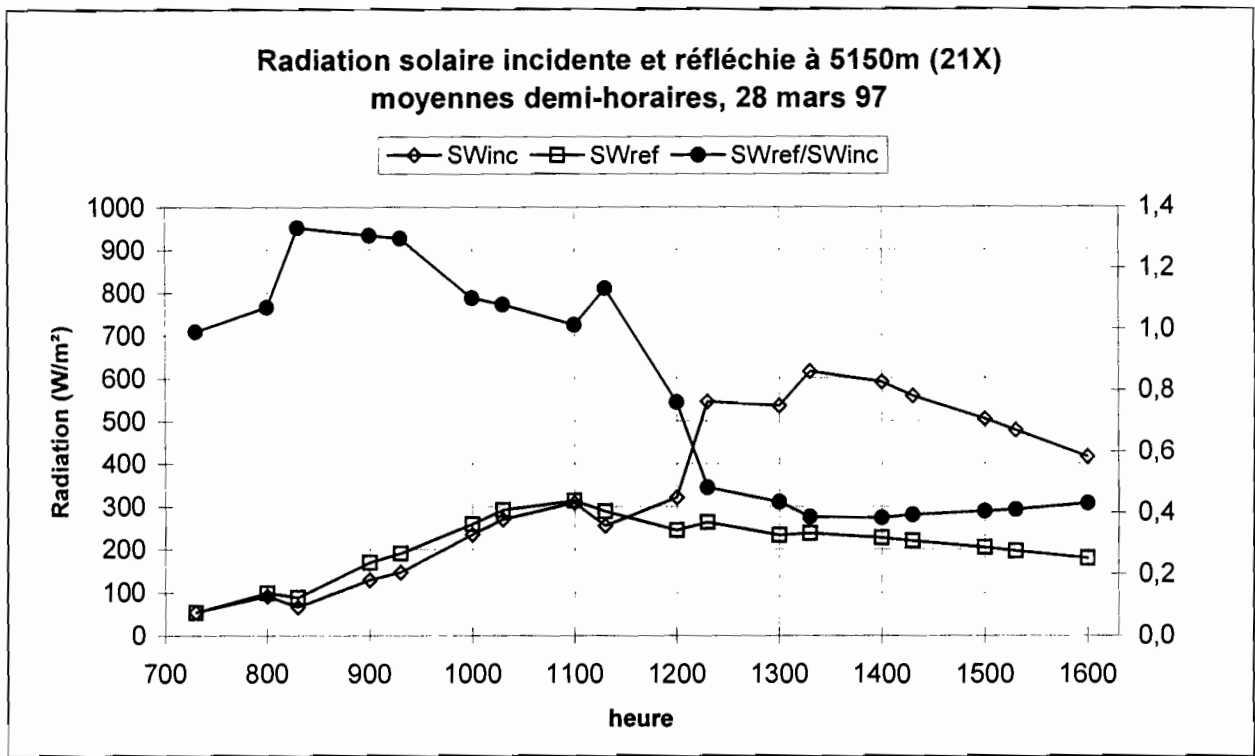


Figure F.4-b

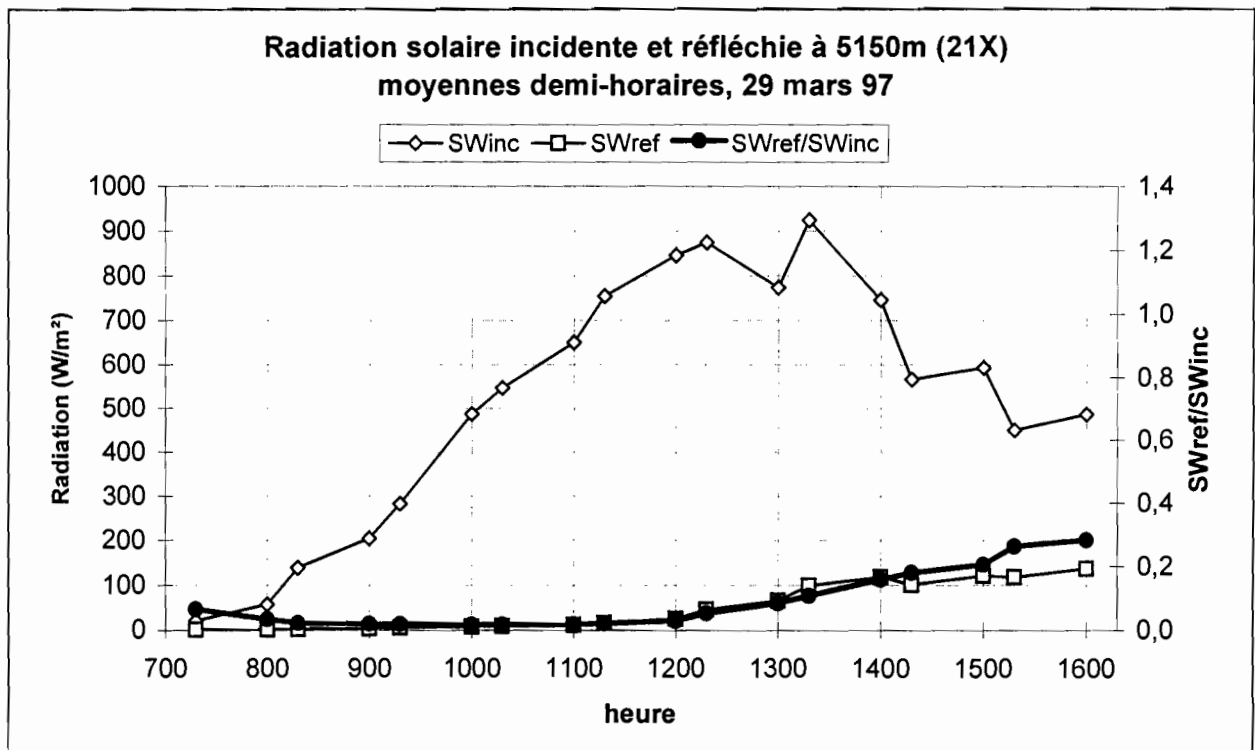


Figure F.4-c

Les albédos mesurés à 5550 m en 96-97 (Cf. figure F.5) sont bien plus faibles que ceux de 95-96, qui entre les mois de mai et d'août 1996 ne descendaient jamais en dessous de 0,6 (Cf. rapport d'activité N°55, p.58). La longue période de lacunes du 30 janvier au 16 mars 1997 est due à l'ensevelissement des capteurs sous la neige (Cf. chapitre C.2.3).

L'évolution de l'albédo est parfois très brutale, ainsi au cours du mois de juin 1996 on observe une chute de l'albédo de 0,8 à 0,2 du jour au lendemain : la surface de glace a-t-elle été mise à nu par la fonte de la couche de neige superficielle ou par l'action du vent ?, est-ce un problème de mesure ? Plus nombreuses qu'à 5150 m des valeurs d'albédo inférieures à 0,2 sont enregistrées à la

fin des mois d'octobre et de décembre 1996, ainsi qu'au milieu du mois d'avril 97. Au vue des températures mesurées à cette altitude aucun enfouissement des capteurs n'est observé au cours de ces périodes (Cf. chapitre C.2.3), et l'origine de ces valeurs trop faibles reste inconnue.

Au cours du mois de juin des hausses brutales de l'albédo dépassant 0,7 (alors qu'aucune précipitation n'est enregistrée par les pluviomètres du bassin versant, Cf. figure E.2) contrastent avec une baisse générale jusqu'à des valeurs proches de 0,2. Or les pyranomètres semblent fonctionner correctement puisque la figure F.10 ne fait pas apparaître de baisse du quotient des moyennes journalières SW_{ref}/SW_{inc} (ce quotient reste compris entre 0,6 et 1). On peut noter qu'à la suite de l'enfouissement par la neige de la station entre le 30 janvier et le 16 mars les mesures de températures à 5550 m étaient anormalement élevées en mai, juin et juillet (Cf. figure C.26), ainsi durant cette période il se peut que les problèmes de mesures de la radiation et de la température soient liés à un dysfonctionnement général de la centrale d'acquisition.

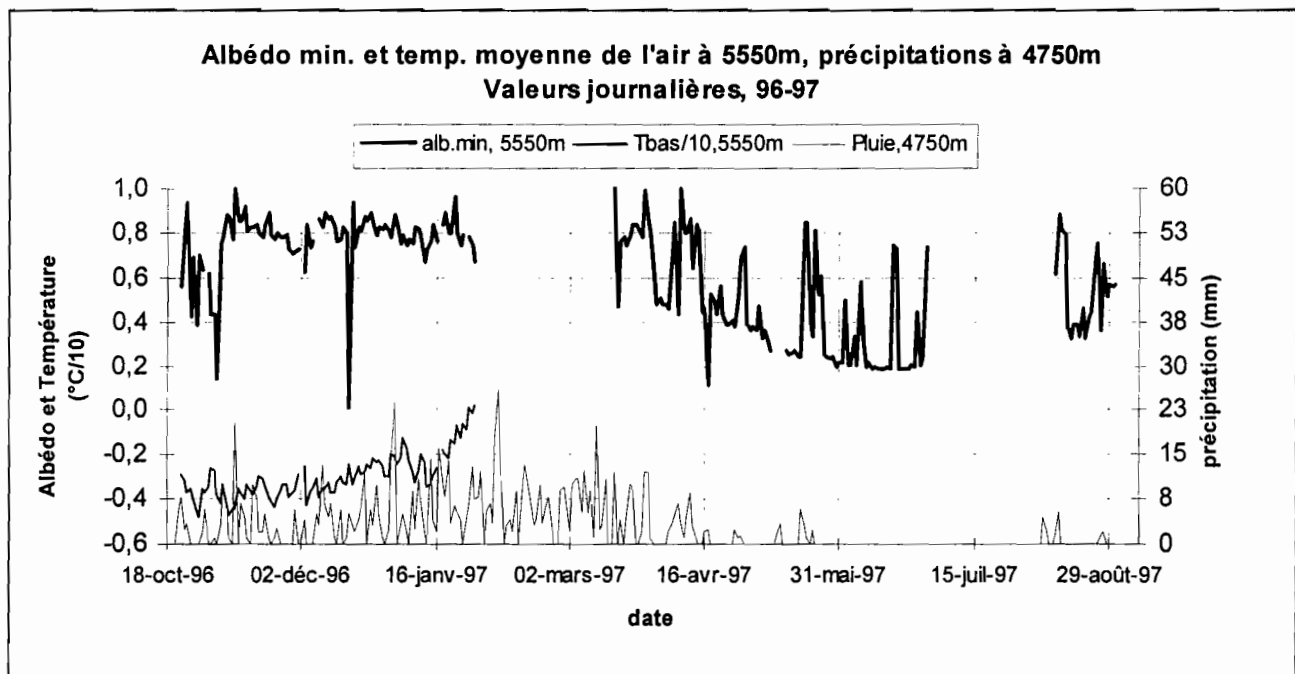
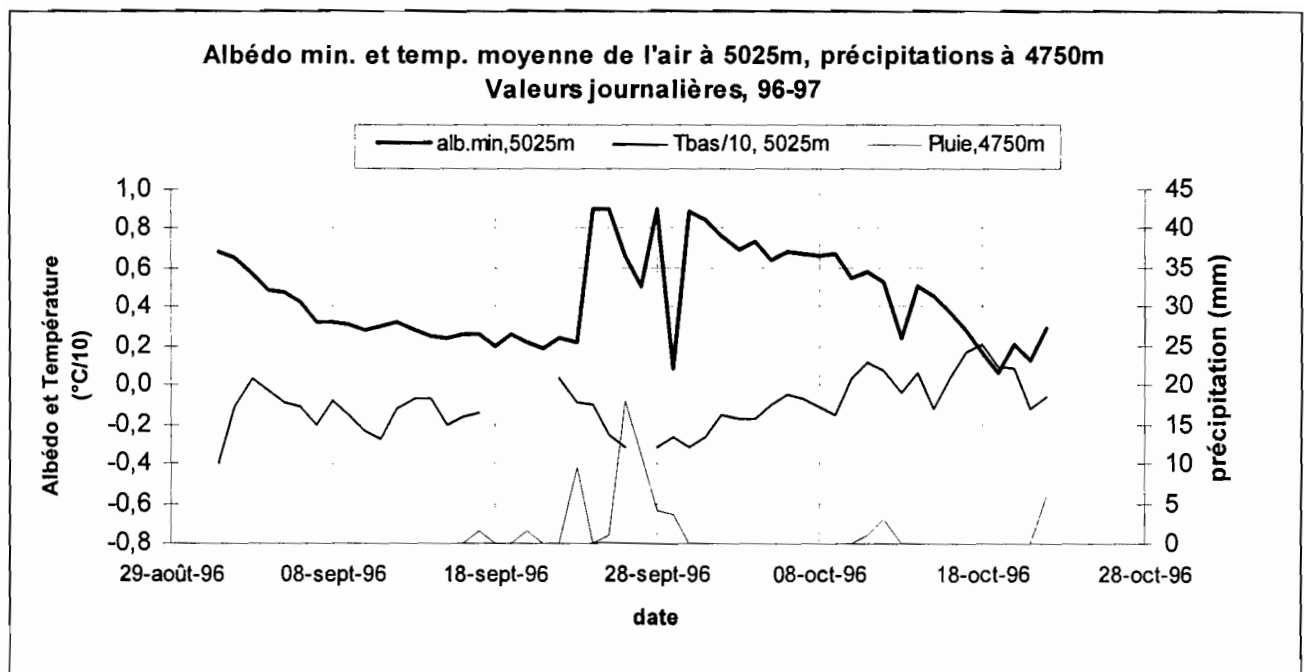


Figure F.5

La figure F.6 présente l'albédo minimum journalier enregistré à 5025 m, mesures seulement disponibles jusqu'au 22 octobre 1996. Sur cette figure des mesures négatives d'albédo aux dates du 24, 25 et 28 septembre ont été remplacées par la valeur 0,9 (le pyranomètre orienté vers le ciel étant recouvert de neige) au vue des précipitations mesurées à 4750 m : 10 mm d'eau le 23, 18 mm et 11 mm d'eau respectivement les 26 et 27 septembre.

Le 29 septembre, l'albédo minimum journalier égal à 0,086 et enregistré à 5h00 du matin est sans doute faux. D'autres heures étonnantes d'enregistrement de l'albédo minimum apparaissent : le 13 octobre le minimum journalier de 0,24 est enregistré à 2h19, les 17 et 18 octobre les minima respectivement égaux à 0,28 et à 0,17 sont enregistrés à 6h00. On peut remarquer que la baisse de l'albédo à la suite des chutes de neige de la fin du mois de septembre est lente : égal à 0,88 le 30 septembre l'albédo n'atteint la valeur de 0,55 que le 10 octobre.

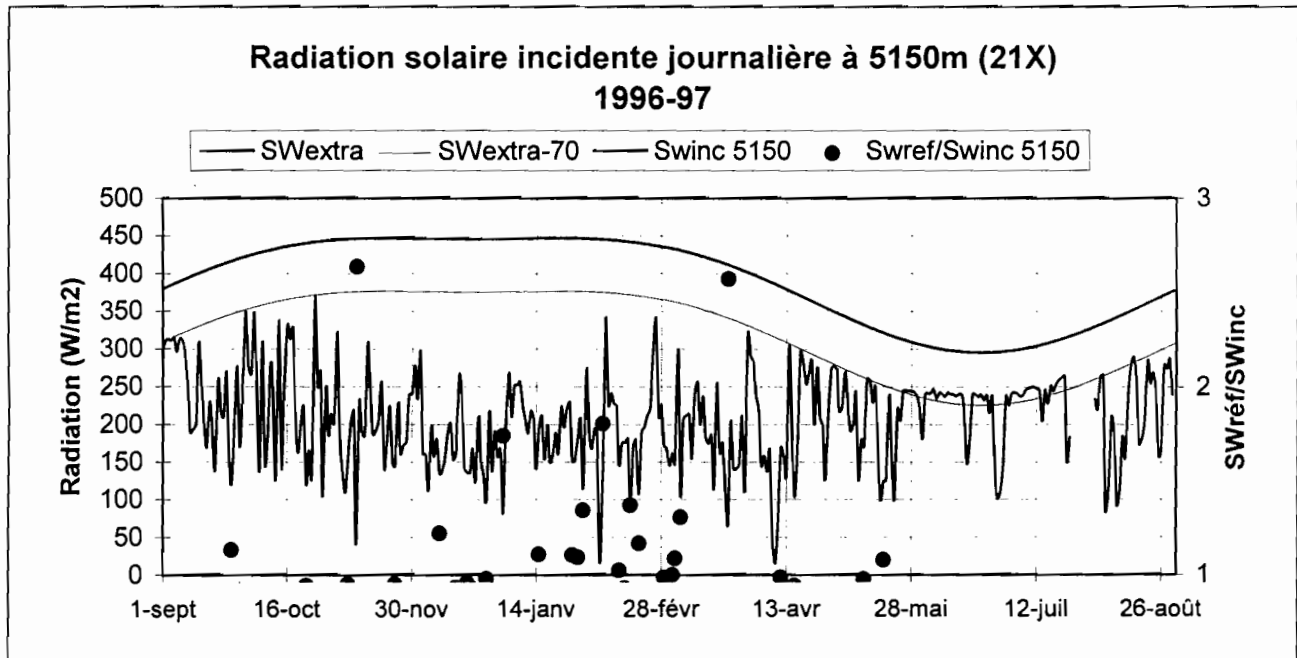


F. 2.3. Radiation solaire incidente, moyennes journalières à 4750 m, 5150 m et à 5550 m

Pour une quinzaine de dates de l'année hydrologique, la moyenne journalière de SW réfléchi est plus élevée que celle de SW incidente (Cf. axe secondaire des ordonnées de la figure F.7 représentant le quotient SW réfléchi / SW incidente - Cf. tableau F.1). Ces périodes sont plutôt situées en saison des pluies et correspondent toutes à des journées de précipitations à 4750 m, sauf le 24 mars 1997 (Cf. tableau E.1). Ainsi il se peut que le capteur orienté vers le ciel soit recouvert de neige et une correction des SW incidentes sous-estimées est possible à partir des mesures de SW réfléchi et d'un albédo fixé à 0,9. Pourtant pour toutes ces journées à l'exception du 10 novembre 1996 et du 07 mars 1997 l'albédo minimum journalier est inférieur à 0,8, ce qui exclut la persistance de neige fraîche en surface (Cf. tableau F.1).

Considérons le mois de janvier, mois où les journées de $SW_{réf}/SW_{inc}$ supérieurs à 1 sont les plus nombreuses. Les flèches de la figure F.8 montrent que toutes ces journées correspondent à des minima de la moyenne entre 6h30 et 8h30 de la radiation solaire incidente. Ce sont les seules journées du mois pour lesquelles cette moyenne est inférieure à 50 W/m^2 , avec la journée du 18 janvier pour laquelle le quotient $SW_{réf}/SW_{inc}$ est égal à 0,9. Ainsi en début de matinée le pyranomètre orienté vers le ciel, parfois recouvert de givre ou de neige, peut sous-estimer SW incidente sans que des précipitations importantes soient impliquées. Les moyennes SW incidente entre 11h30 et 13h30 de ces journées ne sont en général pas des minima : le givre ou la neige recouvrant le capteur a alors fondu (Cf. figure F.8).

Ainsi la correction des valeurs sous-estimées de SW incidente à partir de SW réfléchi et d'un albédo fixé à 0,9 n'est justifiable que pour les mesures de début de matinée lorsque le capteur ne fonctionne pas correctement, et lorsqu'en raison d'un angle d'incidence élevé du rayonnement solaire l'albédo est élevé quel que soit l'état de surface. En ce qui concerne les moyennes journalières une telle correction n'est pas justifiée et donc pas appliquée ici.



Remarque : de nombreuses lacunes de la saison des pluies dues à des problèmes de recouvrement par la neige du pyranomètre orienté vers le ciel ont été remplacées sur cette figure par les mesures de SWréfléchie divisées par un albédo fixé à 0,9

Figure F.7

Date	Swref/SWinc 5150m	Albédo minimum journalier, 5150m
26/09	1.1	0.70
10/11	2.6	0.90
10/12	1.2	0.72
02/01	1.7	0.69
15/01	1.1	0.76
27/01	1.1	0.75
29/01	1.1	0.67
31/01	1.3	lacune
07/02	1.8	0.77
17/02	1.4	0.64
20/02	1.2	0.71
05/03	1.1	0.64
07/03	1.3	0.84
24/03	2.6	0.62
19/05	1.1	0.76

Tableau F.1

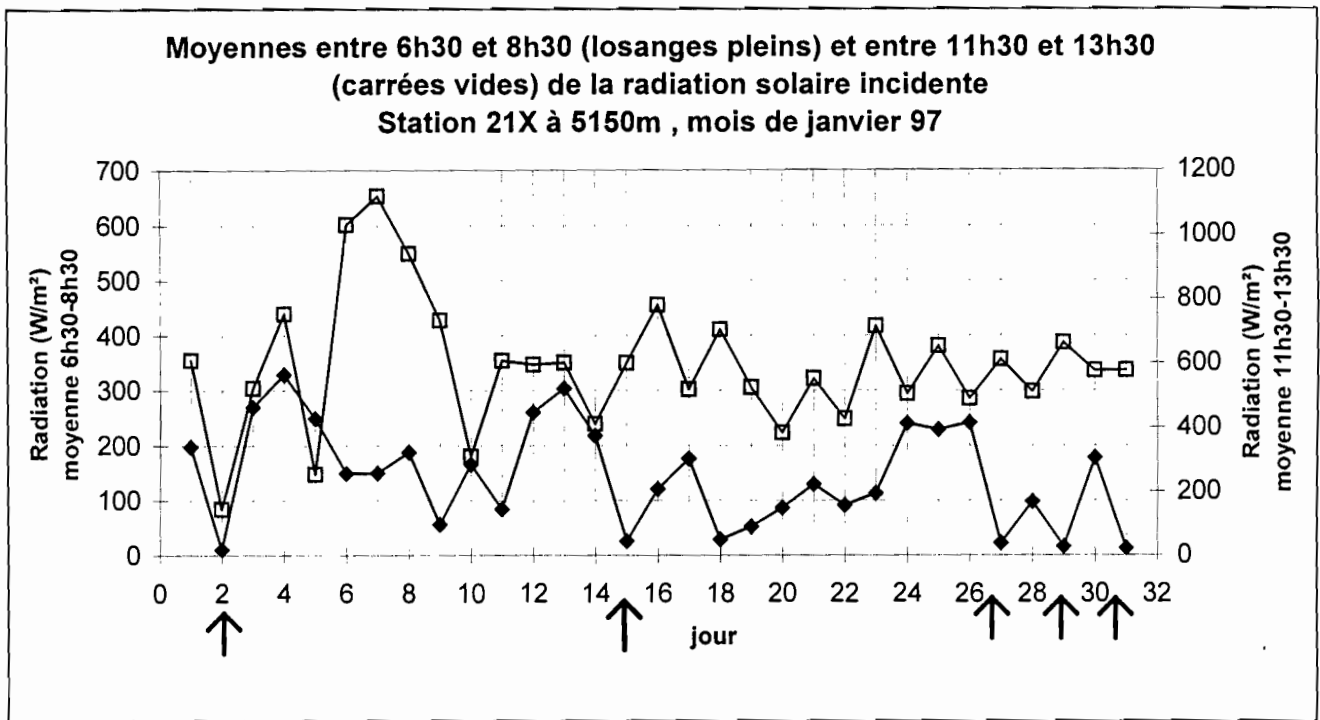


Figure F.8

Les figures F.7, F.9 et F.10, représentant la radiation solaire incidente journalière respectivement à 5150, 4750 et 5550 m, montrent que les moyennes journalières suivent une évolution moins saisonnière que les maxima. Les valeurs enregistrées sont inférieures à SWextra, et donc en moyenne l'effet loupe des nuages serait atténué. Sur le modèle des rapports n°49 et 55, si on considère que les maxima enregistrés en saison sèche (lorsque l'absorption et la diffusion de la radiation solaire par les nuages est réduite) sont représentatifs de la part d'absorption de la couche atmosphérique au-dessus de la station de mesure, alors les ajustements par translation de la courbe SWextra font apparaître une absorption d'environ 70 W/m^2 au dessus de 5150 m, et de 90 W/m^2 au dessus de 5550 m (résultats similaires à ceux obtenus en 1995-96). Ces résultats sont absurdes et la station à 5150 m enregistre des énergies incidentes plus fortes qu'à 5550 m à cause de problèmes de calibrage des appareils ou à cause des effets de sites (en particulier les réflexions sur les parois environnantes) masquant des phénomènes de plus grande échelle. Ces deux effets sont sans doute liés aux faibles coefficients de détermination obtenus entre les différentes séries de mesures de la radiation solaire incidente : $r^2=0,66$ entre les séries à 4750 m et à 5150 m, $r^2=0,43$ entre les séries à 5150 m et à 5550 m, et $r^2=0,56$ entre les séries à 4750 m et à 5550 m.

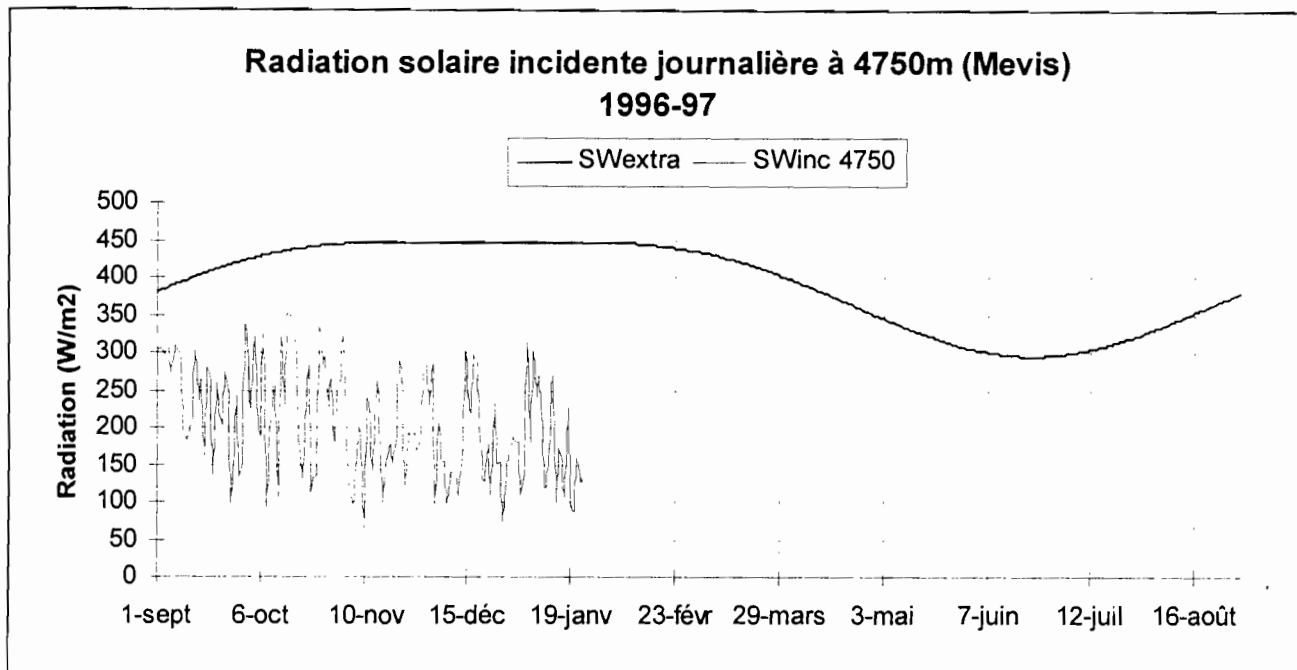


Figure F.9

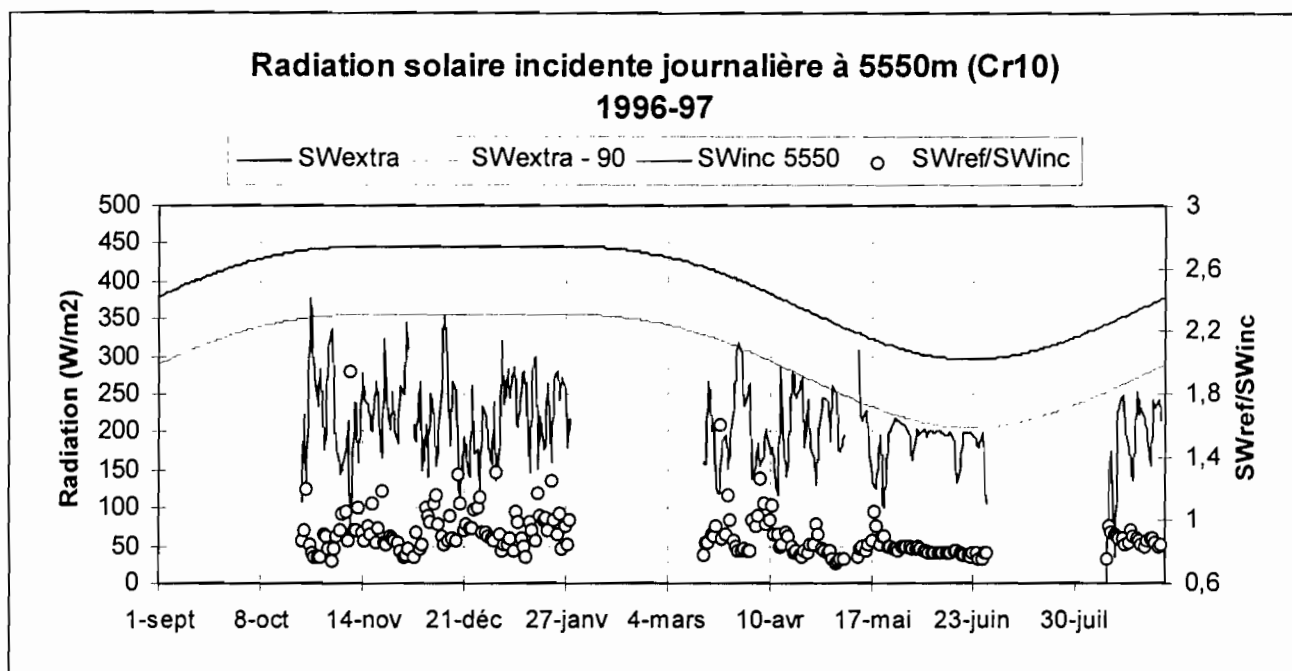
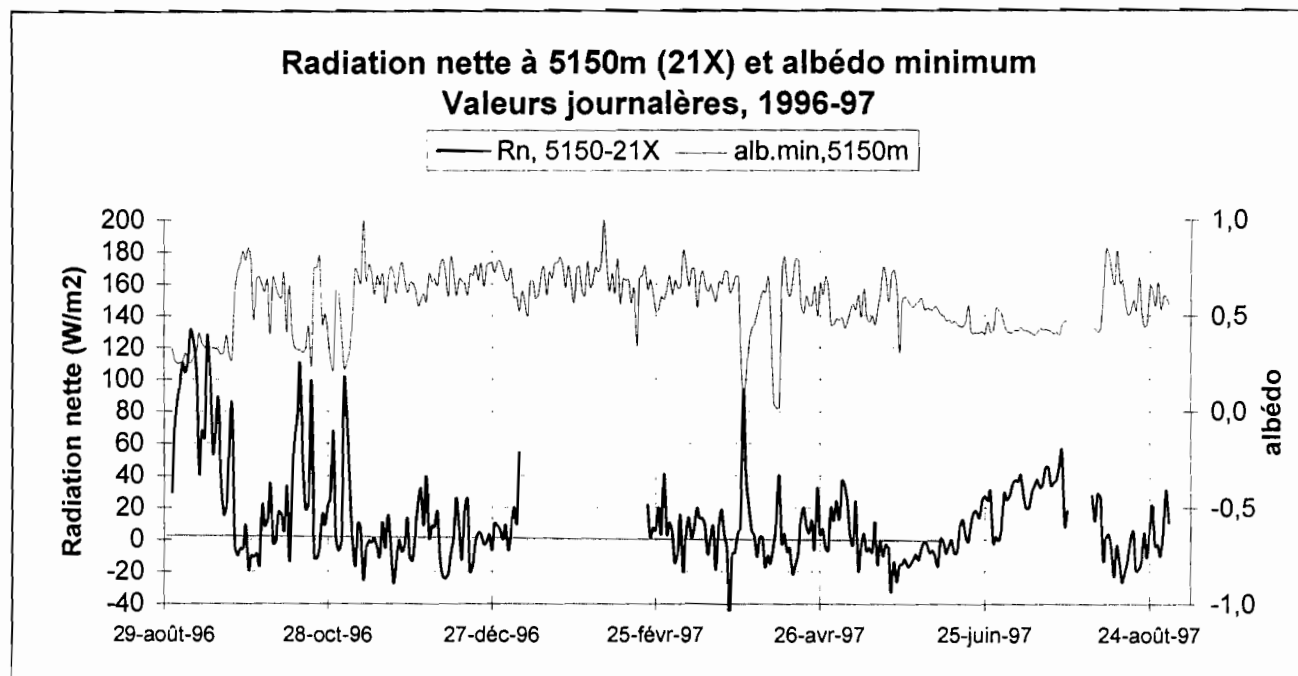


Figure F.10

F. 2.4. Radiation nette journalière à 5150 m et à 5550 m

Nous avons vu au chapitre F.2.3 que la radiation solaire incidente dépend beaucoup des effets de sites : parois environnantes, exposition et inclinaison de la surface. L'albédo varie beaucoup selon l'aspect de la surface du glacier. L'émissivité de l'atmosphère étant faible (entre 0,2 et 0,6 environ), le bilan d'énergie radiative en grandes longueurs d'onde est dominé par l'émission de la surface du glacier (l'émissivité de la glace est égale à 1). S'il y a fusion en surface la température de surface du glacier est uniforme à 0°C, donc les pertes infrarouge de la glace sont uniformes également. Ainsi ce sont les effets de site (exposition et inclinaison de la surface) et l'état de transformation de la neige qui contrôlent la variabilité spatiale de la radiation nette

La figure F.11 montre que l'évolution de R_n à 5150 m (valeurs comprise entre -40 et $+125$ W/m^2) est liée aux précipitations : lorsque l'albédo est fort, R_n diminue. Les R_n les plus élevés apparaissent début septembre et mi-octobre lorsque la surface du glacier est la plus « noire ».



Remarque : le bilanmètre a été débranché involontairement du 07 janvier au 21 février 1997 (Cf. chapitre B.5.1)

Figure F.11

A 5550 m, R_n évolue tout au long de l'année entre -40 W/m^2 et $+60$ W/m^2 sans suivre d'effet saisonnier marqué (Cf. figure F.12), et les faibles valeurs correspondent aussi aux périodes de hausse de l'albédo.

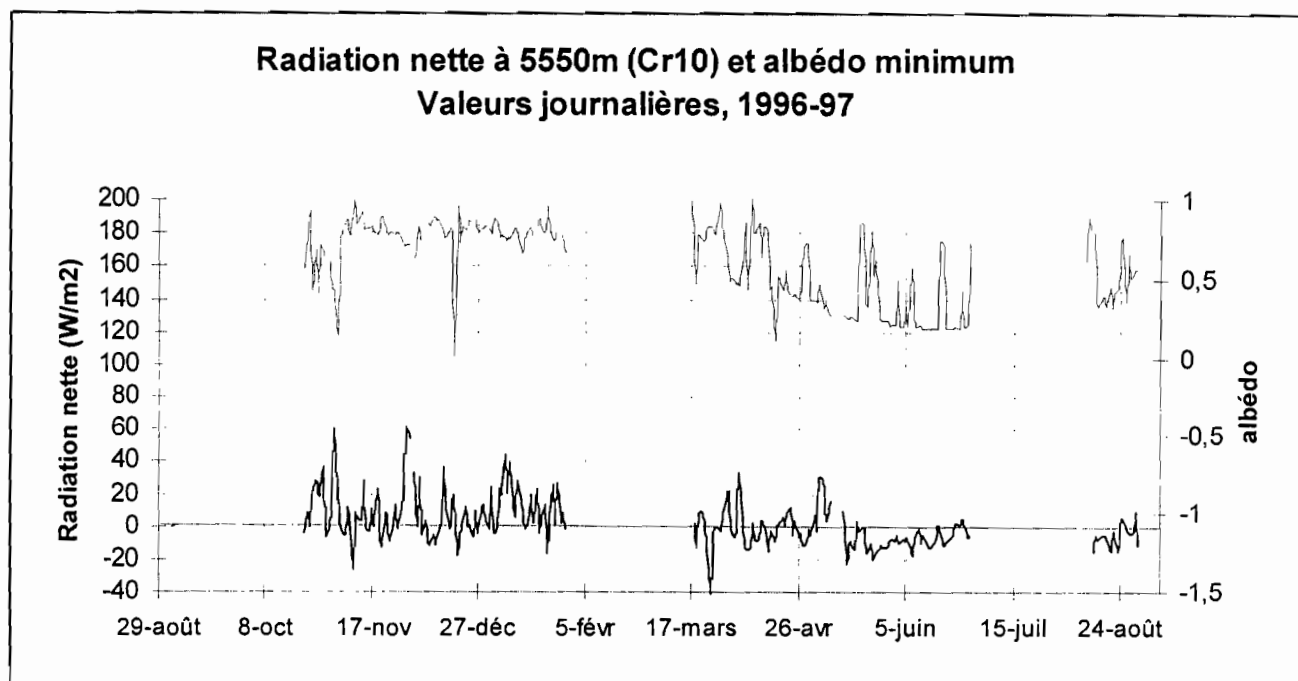


Figure F.12

L'évolution de la différence entre la radiation nette à 5150 m et à 5550 m n'est visiblement pas saisonnière (Cf. figure F.13). En moyenne cette différence est de $1,8$ W/m^2 ce qui correspond à la fonte d'une lame d'eau de 25 cm de hauteur. Cependant les mois de juillet et de septembre

correspondant aux maxima de radiation reçue à 5150 m sont inclus dans les lacunes de mesures à 5550 m, et ce calcul n'est donc pas représentatif de l'année complète.

Malgré la forte influence des effets locaux sur Rn, le coefficient de détermination égal à 0,45 entre les séries à 5150 m et à 5550 m est comparable aux r^2 entre les séries de mesures de SW incidente (Cf. chapitre F.2.3).

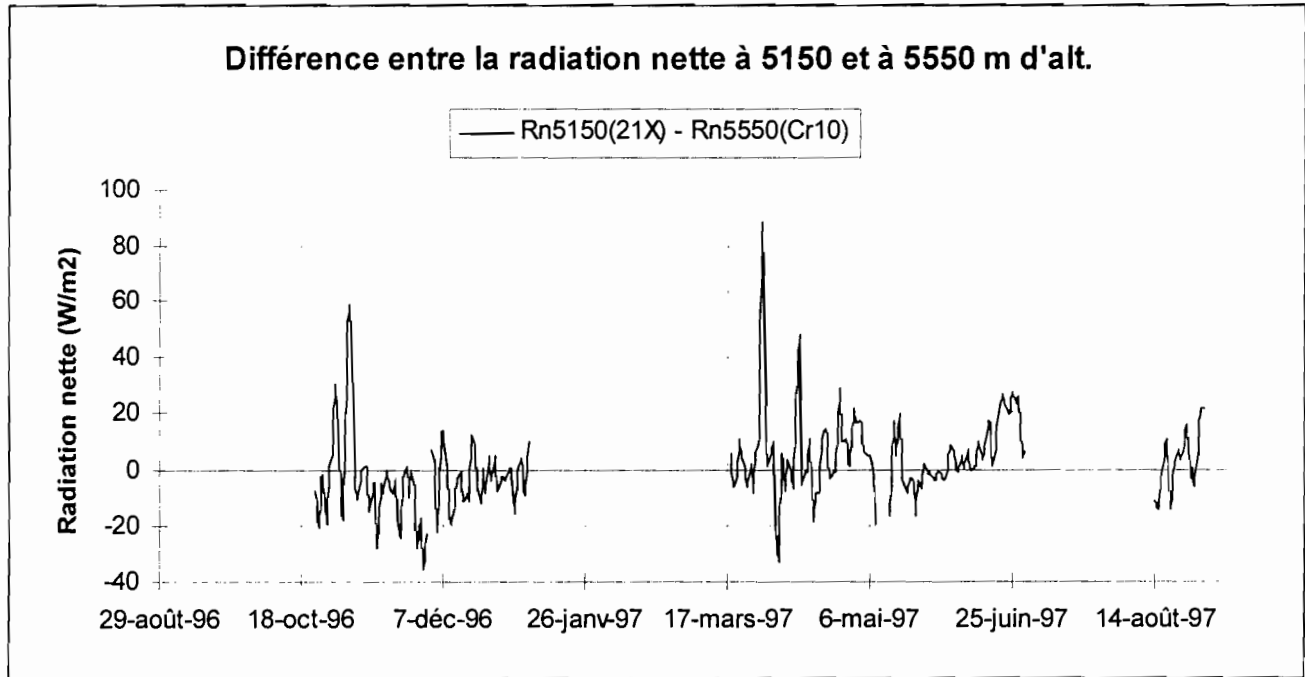


Figure F.13

F. 3. Valeurs mensuelles

F. 3.1. Radiation nette et albédo mensuel

Les valeurs mensuelles de Rn enregistrées à 5150 m et à 5550 m sont proches (Cf. figure F.14, tableau F.2). A 5150 m, on retrouve au niveau mensuel l'influence de l'albédo sur Rn : les mois de septembre 96 et juillet 97 correspondent aux plus faibles albédos (environ 0,4) et aux plus forts Rn (respectivement 59 et 32 W/m²). Par contre à 5550 m le maximum de la radiation nette mensuelle est obtenu en janvier (11 W/m²), qui est un mois d'albédo élevé (supérieur à 0,7). A cette même altitude les mois d'avril, mai et juin semblent atypiques puisque les évolutions de l'albédo et de Rn y sont parallèles (le mois de juin, mois sans aucune précipitation pour tous les pluviomètres du bassin versant, correspond aux minima de l'albédo et de Rn).

La moyenne annuelle de l'albédo à 5150 m est proche de celle à 5550 m (valeurs proches de 0,6, Cf. tableau F.2). En 95-96, année de plus faibles précipitations qu'en 96-97 (Cf. tableau E.4), la moyenne annuelle de l'albédo à 5150 m (0,52) est plus faible qu'en 96-97, et celle à 5550 m est plus élevée (0,76 : moyenne seulement d'avril à août 1996, donc sans doute sous-estimée).

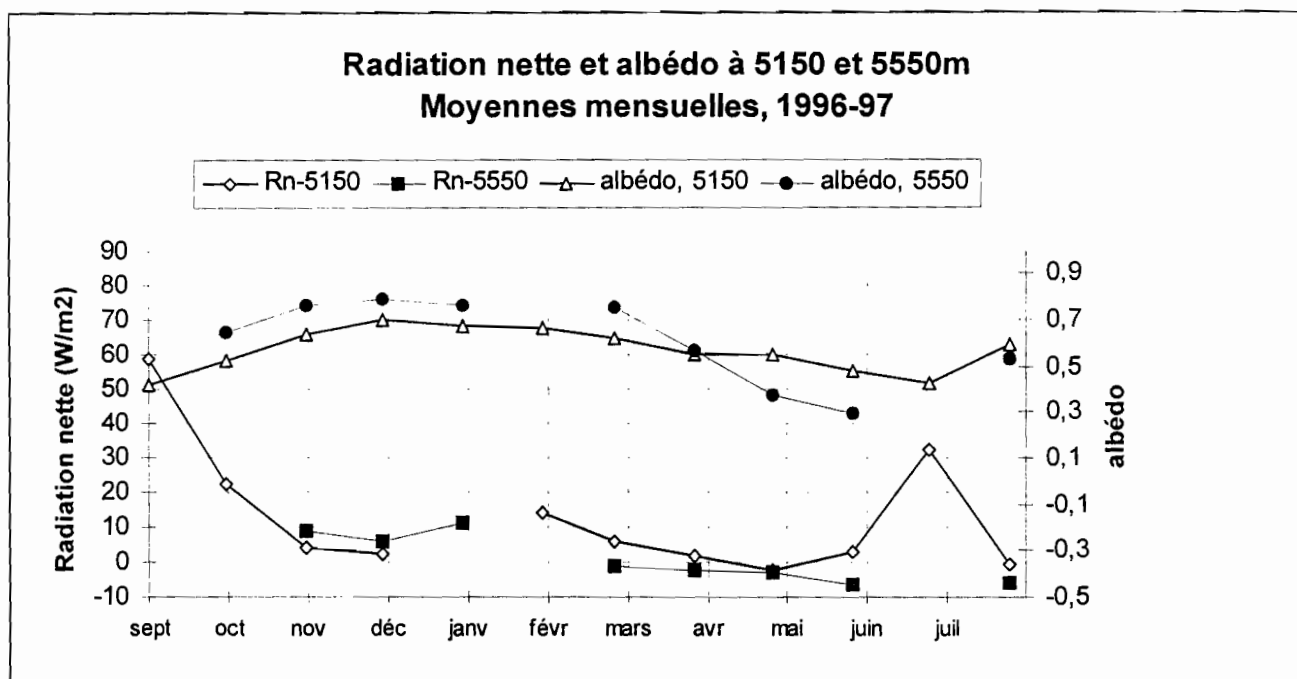


Figure F.14

Radiation nette (W/m²) et albédo à 5150 et 5550m Moyennes mensuelles, 1996-97

Mois	Rn-5150	Rn-5550	albédo, 5150	albédo, 5550
sept-96	59		0,41	
oct-96	22		0,52	0,64
nov-96	4	9	0,63	0,76
déc-96	3	6	0,70	0,79
janv-97		11	0,67	0,76
févr-97	14*		0,67	
mars-97	6	-1	0,62	0,75
avr-97	2	-2	0,55	0,57
mai-97	-2	-3*	0,55	0,38
juin-97	3	-7*	0,48	0,29
juil-97	32*		0,43	
août-97	0	-6	0,60	0,54
moyenne	13	1	0,57	0,61

* lacunes de quelques jours au cours du mois

Tableau F.2

La moyenne mensuelle élevée de la radiation nette de juillet se démarque des moyennes des autres mois, qui sont assez faibles relativement aux années précédentes (Cf. figure F.15). En effet au cours de l'hiver, qui a été très sec, des pénitents de 30 cm de hauteur se sont développés à la surface du glacier (Cf. tableau A.1), provoquant de faibles albédos (la moyenne de l'albédo de juillet est la plus faible de l'année après celle de septembre, Cf. tableau F.2).

Radiation nette mensuelle à 5150m
Récapitulatif des quatre derniers cycles

—□— Rn 95/96 —△— Rn 94/95 —○— Rn 93/94 —◆— Rn 96/97

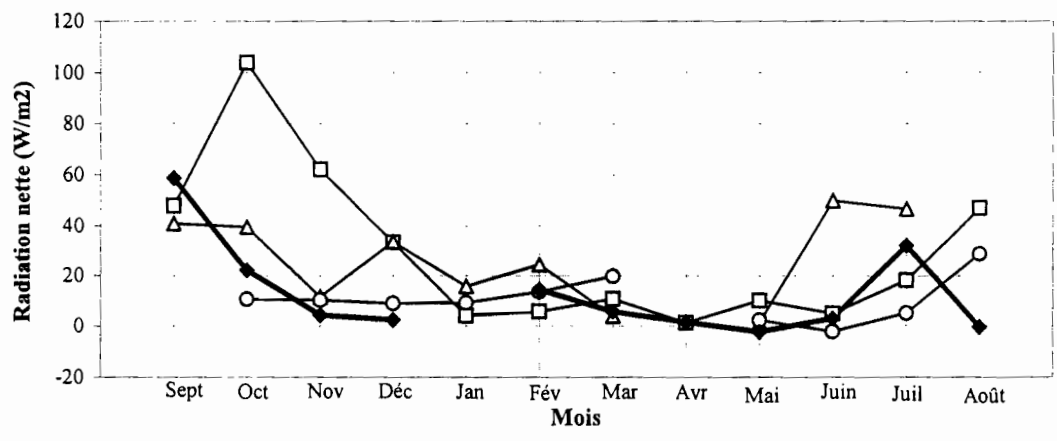


Figure F.15

G. DEBITS

Durant cette année hydrologique, le contrôle des débits du bassin versant s'est poursuivi, 50 mètres en dessous du front glaciaire, grâce aux enregistrements du limnigraphe OTT R20 de la station "4830". Le fonctionnement de cet appareil a été satisfaisant de septembre à début juillet, où un arrêt occasionna une lacune de trois semaines. Remis en activité fin juillet le limnigraphe subit deux nouveaux arrêts en août, de deux et six jours, encadrant une période de 17 jours au cours de laquelle les faibles variations journalières de niveaux d'eau ne sont pas apparues normalement corrélées aux variations enregistrées à l'échelle COBEE aval (Ribstein et al., 1995; Berthier, 1998). Les défauts d'enregistrement, résultant de ces incidents successifs, totalisent 46 jours en 1997, pour lesquels la nécessité d'une reconstitution est donc apparue.

G.1. Débits instantanés

Les oscillations journalières, caractéristiques du régime glaciaire, et la saisonnalité marquée des débits (liée aux fortes variations de rayonnement et de température; cf informe 55) sont toujours observables durant l'année hydrologique 96-97 (fig. G.1). Le tableau G.1 permet de comparer les débits extrêmes instantanés de l'année à ceux des années antérieures.

Tableau G.1

Débits minima et maxima instantanés des six dernières années

Années	Qmax (l.s ⁻¹)	Qs max (l.s ⁻¹ /km ²)	Date	Qmin (l.s ⁻¹)	Qs min (l.s ⁻¹ /km ²)	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

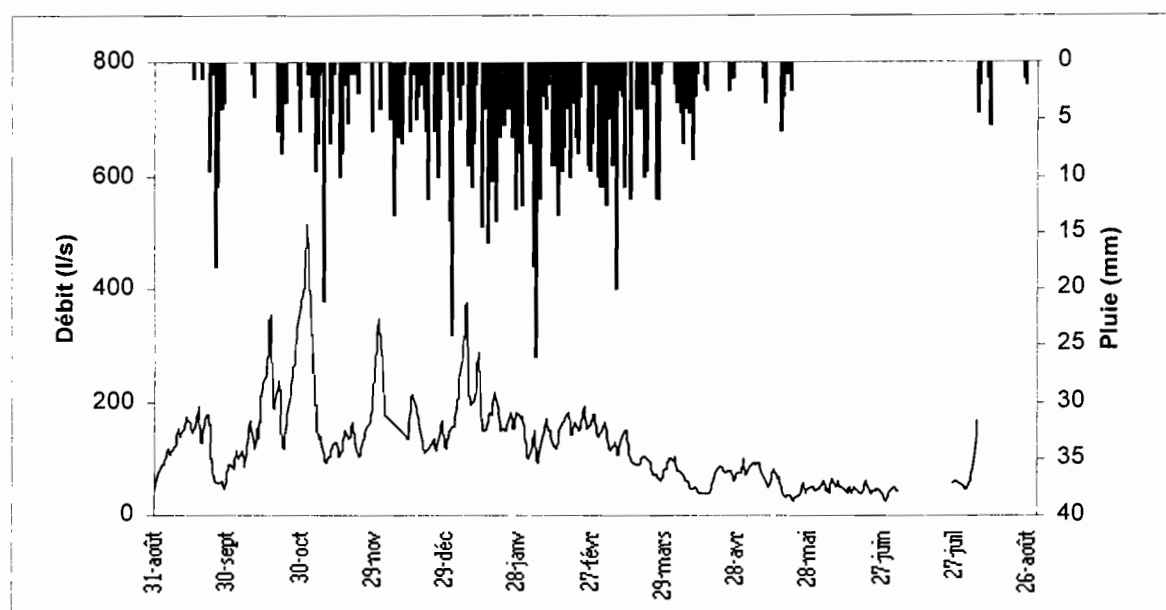
Qs: Débit spécifique (rapporté à une surface de bassin de 2,97 km²)

Le débit maximum instantané n'est pas remarquable pour une année Niña puisqu'il se situe seulement en quatrième position des six années observées. Le débit minimum apparaît quant-à lui élevé si on le compare à celui de la Niña 92-93. Dans les deux cas les débits extrêmes instantanés de cette année surviennent très précocement début novembre et mi juin (lacunes importantes en juillet et août).

G.2. Débits journaliers

Les débits moyens journaliers et les pluies journalières de la Plata forma (4750 m), présentés simultanément (fig. G.1), permettent d'apprécier la relation pluie-débit qui apparaît aussi mauvaise en 1996-1997 qu'au cours des années précédentes ($r^2 = 4,2 \cdot 10^{-5}$; $n = 336$). Alors qu'en 1995-1996 une certaine relation de cause à effet existait en décembre-janvier entre les deux facteurs, cette année le lien est difficilement perceptible pour quelques événements de janvier. En revanche la fréquence des jours de pluie de cette année Niña (plus de deux sur trois entre début décembre et fin mars), et la limitation du rayonnement qui en résulte, semblent bien expliquer la faible hydraulicité de l'année.

Figure G.1
Débits journaliers à 4830 et pluies à la plataforma (4750)



Les débits moyens journaliers du tableau G.2, à l'origine de la figure G.1, permettent d'identifier les valeurs moyennes journalières extrêmes (tab. G.3). Les valeurs entre parenthèses sont des valeurs reconstituées (§ G.4.2) consécutivement à des absences d'enregistrement du limnigraphe ou, comme du 9 au 25 août, à des enregistrements défectueux de l'appareil.

Tableau G.3

Débits moyens journaliers minima et maxima des six dernières années

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

Tableau G.2
Débits moyens journaliers au limnigraphe 4830

Jour	Sep 96	Oct 96	Nov 96	Déc 96	Janv 97	Fév 97	Mars 97	Avril 97	Mai 97	Juin 97	Juil 97	Août 97
1	42	58	393	249	144	154	177	83	75	44	31	48
2	59	89	402	305	156	118	177	98	100	45	43	47
3	74	86	514	345	160	98	147	96	70	45	48	52
4	90	81	451	240	186	127	137	101	74	61	42	62
5	89	112	264	179	220	147	156	79	86	41	43	110
6	104	100	231	174	299	104	162	77	91	46	(77)	166
7	117	115	174	170	351	91	149	70	89	40	(77)	(75)
8	105	85	134	165	372	122	123	61	91	63	(83)	(69)
9	121	107	138	161	251	157	115	59	91	48	(93)	(41)
10	130	138	97	156	195	169	127	55	73	61	(98)	(40)
11	153	168	93	152	209	148	111	48	60	49	(81)	(17)
12	139	118	104	147	234	148	105	50	50	50	(65)	(19)
13	158	151	103	143	285	128	131	46	51	43	(57)	(39)
14	174	136	125	138	218	118	149	38	63	37	(54)	(30)
15	165	184	127	134	148	142	145	38	83	49	(60)	(33)
16	163	227	102	198	156	155	116	41	65	40	(64)	(48)
17	146	258	105	212	174	163	98	39	66	48	(67)	(71)
18	167	315	114	181	179	167	93	38	43	42	(68)	(71)
19	192	350	150	163	178	179	89	45	37	40	(72)	(57)
20	136	204	134	145	215	143	88	61	32	41	(83)	(78)
21	127	187	146	126	178	140	93	75	35	46	(95)	(91)
22	167	236	162	108	150	163	102	85	33	59	(87)	(82)
23	177	173	132	117	151	150	103	84	25	39	(82)	(88)
24	123	129	101	125	152	155	94	80	33	39	(67)	(71)
25	93	117	117	127	147	174	93	74	35	44	(65)	(55)
26	64	162	129	133	180	192	70	78	42	42	(92)	(38)
27	55	228	134	114	157	151	72	76	58	47	56	-
28	56	261	155	161	152	162	70	61	40	39	62	-
29	62	267	165	168	179		61	65	45	33	61	(55)
30	44	318	212	126	169		78	74	49	26	58	(57)
31		380		118	174		82		50		53	(55)
Moyenne (l.s⁻¹)	116	179	180	167	197	145	113	66	59	45	(68)	(60)
Ecart type (l.s⁻¹)	45	86	112	54	59	24	33	19	22	8,1	14	30
Qms (l.s⁻¹.km⁻²)	39	60	61	56	66	49	38	22	20	15	(23)	(20)

Le débit moyen journalier maximum, enregistré à la même date précoce que l'année dernière, le 3 novembre, est le plus faible des six années observées. Sa valeur inférieure de 20% à celles des années 1994 et 1995 est proche de celle de 1993. Le débit moyen journalier minimum, parmi les plus soutenus, apparaît également de façon très précoce le 23 mai.

G.3. Débits mensuels et annuels

G.3.1 Débits mensuels

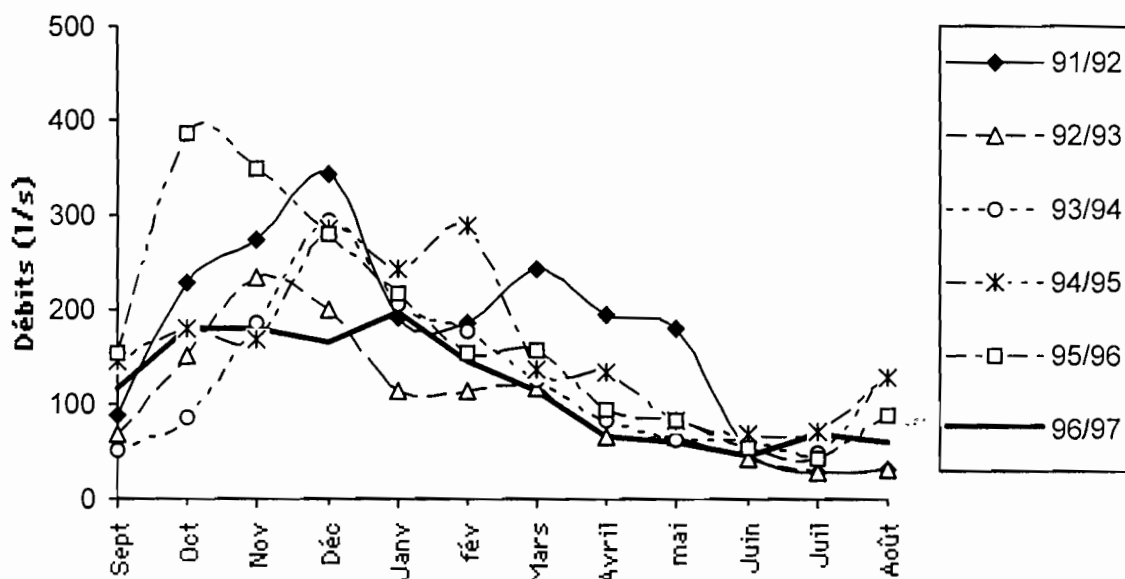
Le tableau G.4 et la figure G.2 qui rapprochent la valeur mensuelle des débits 96/97 de celles des autres années font ressortir les principales caractéristiques de cette nouvelle année Niña.

Tableau G.4
Débits mensuels des six dernières années

Mois	91/92	92/93	93/94	94/95	95/96	96/97
<i>Sept</i>	88,1	67,8	52,2	147	154	116
<i>Oct</i>	230	152	84,9	179	387	179
<i>Nov</i>	274	234	187	168	350	180
<i>Déc</i>	342	201	295	285	281	167
<i>Janv</i>	192	114	207	242	218	197
<i>fév</i>	185	114	176	289	155	145
<i>Mars</i>	243	116	126	137	156	113
<i>Avril</i>	194	66,8	81,9	134	95	66
<i>mai</i>	179	65,1	62,7	84	82	59
<i>Juin</i>	52,7	42,2	61,7	68	54	45
<i>Juil</i>	28,2	29,2	47,2	71	43	(68)
<i>Août</i>	32,8	31,3	132,3	130	89	(60)
Module (l.s⁻¹)	170,1	102,8	126,2	161,2	172,0	116,2
Qms (l.s⁻¹.km⁻²)	57,3	34,6	42,5	54,3	57,9	39.1

Les débits sont parmi les plus faibles de la période observée. Ils se distinguent de ceux de la précédente année Niña, 92-93, par des valeurs de saison chaude globalement plus soutenues, dans la moyenne de celles des autres années, sauf au moment du maximum en novembre-décembre. Les écoulements d'automne, faibles, à nouveau équivalents à ceux de 92-93, précèdent des écoulements d'hiver plus soutenus, dans la moyenne de ceux des autres années. Sans être la plus marquée de la période observée, la Niña 96-97 se caractérise donc par les plus faibles variations saisonnières de débits.

Figure G.2
Comparaison des débits mensuels des six dernières années



G.3.2 Débits annuels

Les modules du tableau G.4 confirment que cette année a bien présenté les écoulements les plus faibles, après ceux de 92-93. Le bilan de masse glaciaire de cette année, établi dans les mêmes conditions que les années précédentes (coefficient de ruissellement de la moraine: 0,8) fait ressortir un bilan négatif de 397 mm, sensiblement plus important que celui de 92-93.

Tableau G.5
Bilan hydrologique des six dernières années

Années	Module (l.s ⁻¹)	Précipitation annuelle (mm)	Apport moraine (l.s ⁻¹)	Apport glacier (l.s ⁻¹)	Apport glacier (mm)	Bilan masse (mm)
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	120,4	1051	24,0	96,4	1448	-397

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)

Bien qu'en situation "Niña" l'année 96/97 ne parvient pas à imposer un bilan de masse glaciaire positif (accumulation supérieure à l'ablation). Malgré une pluviosité comparable à celle de

92/93, le bilan glaciaire apparaît cette année 3,5 fois plus défavorable; sa valeur absolue restant toutefois relativement limitée.

G. 4 Reconstitution statistique des débits

G.4.1 Corrélations avec les paramètres climatiques

Les paramètres les plus performants, identifiés les précédentes années, expliquant les débits de ce bassin glaciaire, ont été utilisés à nouveau pour tenter de reconstituer les lacunes des débits journaliers. Ces paramètres étaient dans l'ordre d'importance: la température à 5150 (T_{5150}), le rayonnement net (R_n), le rayonnement extra terrestre (R_{extra}), la pluviosité et la différence des rayonnements incidents et réfléchis ($SW_{inc} - SW_{réf}$):

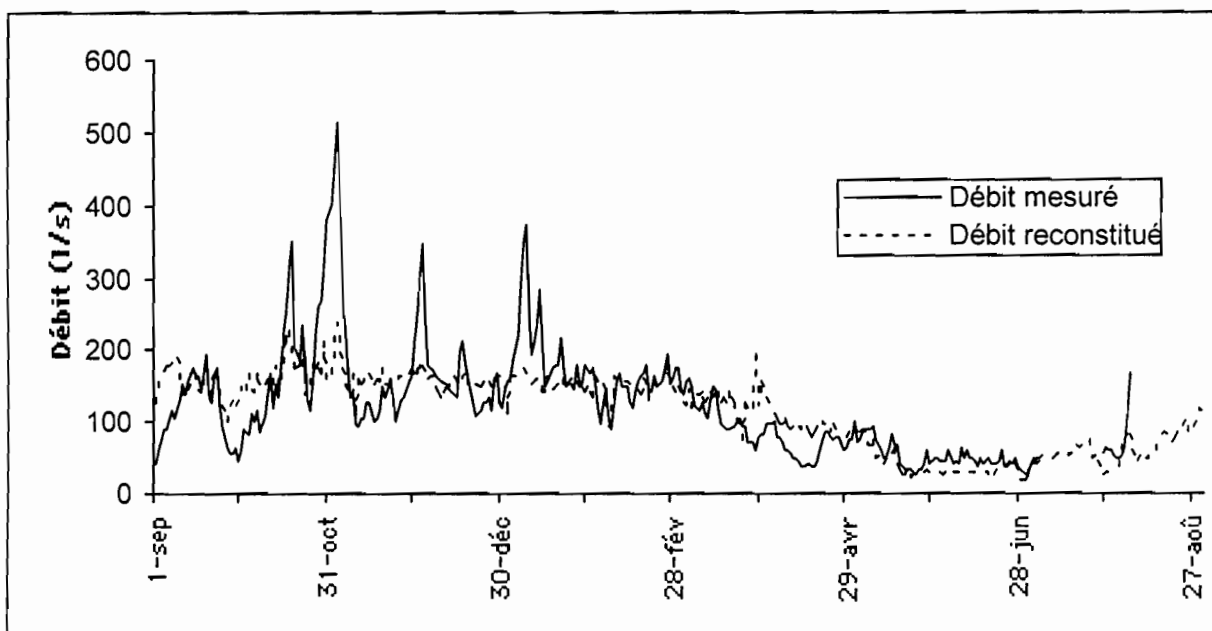
$$\text{Débit} = -0,997 * \text{Pluie} + 0,002 * T_{5150} + 0,223 * R_n + 1,001 * R_{extra} + 0,330 * (SW_{inc} - SW_{réf}) - 293,3$$

La relation est de moins bonne qualité cette année, puisque pour 274 ensembles de valeurs le coefficient de détermination n'est que de 0,51. La figure G.3, qui présente simultanément les débits reconstitués et les débits mesurés, fait ressortir, de façon encore plus nette que l'année dernière, la faiblesse de la relation, en particulier pour les pics d'écoulements de la saison humide et les plus basses eaux d'automne et de printemps. Un essai de corrélation n'incluant pas le rayonnement extra-terrestre altère logiquement la qualité de la relation ($r^2 = 0,16$). A échelle annuelle le module reconstitué reste cependant d'assez bonne qualité ($114,6 \text{ l.s}^{-1}$) comparé au module calculé à partir des débits observés journaliers ($120,2 \text{ l.s}^{-1}$).

Figure G.3

Reconstitution du débit journalier par corrélation multiple

$$\text{Débit} = -0,997 * \text{Pluie} + 0,002 * T_{5150} + 0,223 * R_n + 1,001 * R_{extra} + 0,330 * (SW_{inc} - SW_{réf}) - 293,3$$



G.4.2 Corrélations hydrologiques avec le Tubo

La mauvaise qualité des relations multiples précédentes conduit à la recherche d'autres liaisons plus performantes pour les débits journaliers. Une relation essentiellement fondée sur les débits, à différents instants, du canal Tubo, hémisnaire du glacier Zongo, non saturé à cette période de l'année, est apparue comme la solution la plus fiable. Néanmoins le gel matinal, qui occasionne fréquemment en hiver une embâcle au "V" jaugeur du limnigraphe, fait préférer à la mesure à 7 h du canal Tubo celle à 7 h du canal Alpaca, issu lui aussi de l'englacement du Huayna Potosi (versant est). Quatre débits ont ainsi été retenus pour la corrélation (tenant compte de l'expérience d'auto-corrélation des "INFORMES" antérieurs); trois débits issus de l'échelle COBEE du Tubo: celui de la veille à 15h, celui du jour à 15h et celui du lendemain à 7h; ainsi que le débit du jour à 7h de l'Alpaca (Berthier, 1998). Une précision supplémentaire est apportée qui distingue les jours de gel des jours sans. La différenciation s'effectue à partir de la valeur relative des débits à sept heures des canaux Tubo et Alpaca. Au cours des jours sans gel, et seulement dans ce cas, la relation des débits suit la première bissectrice à une constante près (15 l.s^{-1}). Deux équations ont donc été utilisées pour reconstituer les débits des mois de juillet et d'août 1997 (tab. G.2). La première, relative aux jours de gel, s'applique au 25 juillet, et aux 30 et 31 août:

$$Q_{\text{limni}} = 0,08 * Q_{\text{COB } 15\text{h } J-1} + 0,295 * Q_{\text{Alp } 7\text{h } J} + 0,221 * Q_{\text{COB } 15\text{h } J} + 0,113 * Q_{\text{COB } 7\text{h } J+1} + 21,64$$

(n = 142, r₂ = 0,61)

La seconde, relative aux jours sans gel, où seules les valeurs du Tubo (suffisamment explicatives puisque non soumises au gel matinal) sont utilisées, s'applique à vingt jours de juillet, entre le 6 et le 26, et à vingt trois jours d'août à partir du 7; les 27 et 28 n'ayant pu être reconstitués faute de données:

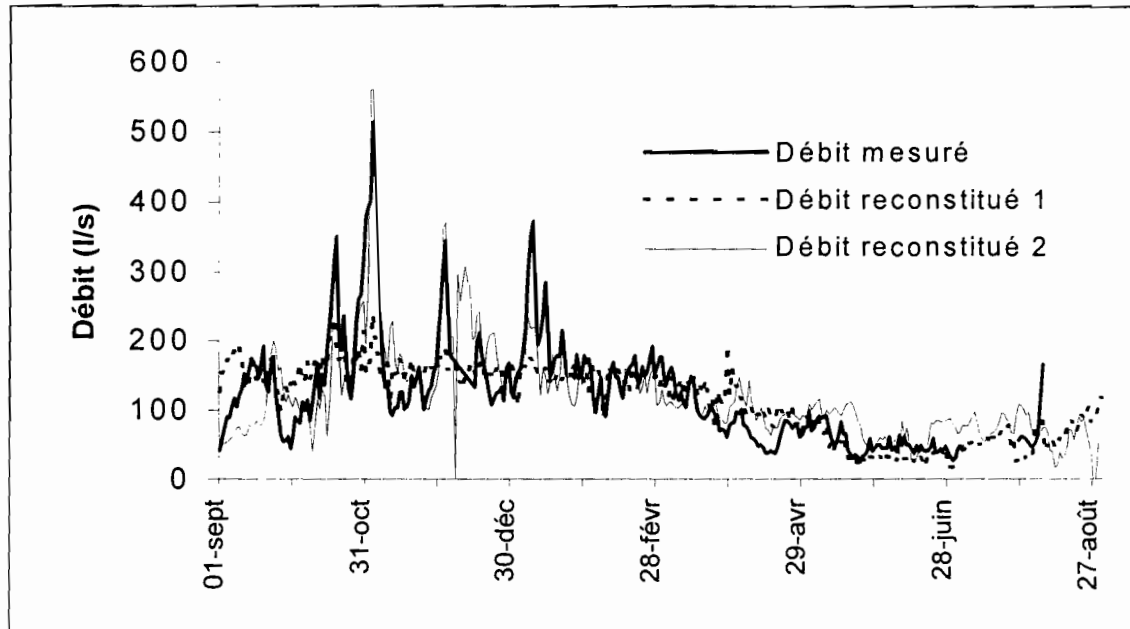
$$Q_{\text{limni}} = 0,171 * Q_{\text{COB } 15\text{h } J-1} + 0,352 * Q_{\text{COB } 7\text{h } J} + 0,354 * Q_{\text{COB } 15\text{h } J} + 0,408 * Q_{\text{COB } 7\text{h } J+1} - 2,56$$

(n = 852, r₂ = 0,79)

La figure G.4 permet de comparer les résultats de cette nouvelle reconstitution (débit reconstitué 2) à ceux de la précédente (débit reconstitué 1) durant l'année hydrologique 1996-1997. Si l'amélioration est certaine pour les débits les plus élevés de printemps, elle semble beaucoup plus discutable concernant les débits de décembre et de saison froide, de fin juin à mi septembre. Malgré ces réserves le gain apparaît bien réel si l'on compare la nouvelle valeur du module reconstitué ($120,4 \text{ l.s}^{-1}$) à celle du module observé ($120,2 \text{ l.s}^{-1}$).

Figure G.4

Reconstitutions comparées des débits journaliers



H. HUMIDITE RELATIVE DE L'AIR

L'examen des données issues de la station 21X à 5150 m a montré que l'emploi des hygromètres capacitifs (basés sur le principe de la variation de la capacité d'un condensateur) n'était pas adapté au milieu glaciaire (Cf. rapport n°55). En effet si ces capteurs ont l'avantage d'être sensibles uniquement à l'humidité de l'air et d'être très peu affectés par la température (surestimée par la station 21X car mesurée sous abri et sans ventilation, Cf. rapport n°55), ils ont l'inconvénient d'être sensibles au gel et de saturer pour de fortes humidités relatives (la réponse linéaire est dégradée pour une humidité relative supérieure à 80 %, Guyot 1995). Les psychromètres constitués de thermocouples ventilés permettent de disposer de mesures fiables de la pression de vapeur d'eau à différentes altitudes : stations Cr10 à 5150 m (mesures basses et hautes) et à 5550 m (mesures basses).

La station Mevis à 4750 m comprend également un capteur d'humidité relative à 190 cm du sol. Selon sa notice la précision du capteur est de l'ordre de 3 %, mais le capteur est sans doute un hygromètre du même type que ceux de la 21X.

H. 1. Précision sur les données

L'estimation de la précision des mesures de la pression de vapeur n'a pas été entreprise dans les rapports précédents. Du point de vue technique plusieurs points doivent être vérifiés :

- 1- L'alimentation en eau du thermomètre humide est-elle assurée en continu ? N'y a-t-il pas de problème de gel du réservoir ? Ces points sont faciles à vérifier et en général ne posent pas de problème.
- 2- Le mélange eau-alcool (10%) utilisé pour prévenir le gel, ne modifie-t-il pas les mesures ? Normalement non (Wagnon, communication personnelle).
- 3- Les températures sèches et humides sont-elles correctement étalonnées entre elles ?
- 4- La ventilation est-elle correctement assurée et égale pour tous les capteurs ?

Les équations psychrométriques reliant les pressions de vapeur aux températures sèches et humides sont les suivantes (*formule de Regnault*, Queney, 1974, p.131) :

Pression de vapeur saturante : $e_{\text{sat}} = a \cdot \text{EXP}(b.T / (c+T))$ (mb)

Pression de vapeur : $e = e_{\text{sat}}(\text{Thum}) - 0.00001 \cdot \gamma \cdot p \cdot (T_{\text{sec}} - \text{Thum})$ (mb)

où les températures sont exprimées en degré °C et :

- a = 6.1078 mb
- b = 17.08085
- c = 234.175°C
- $\gamma = 66$
- p = 540 mb (pression atmosphérique à 5150m)

Le coefficient psychométrique $\gamma = 66$ correspond à une vitesse de ventilation de 4 m/s (Guyot, 1995). Ainsi si le moteur de la ventilation est trop faible pour fournir une vitesse de circulation de 4 m/s, la pression de vapeur est surestimée. L'erreur commise peut être importante : « La non prise en compte de la vitesse de ventilation pour un psychromètre à ventilation naturelle, peut conduire à des erreurs allant jusqu'à une surestimation de la tension de vapeur de l'ordre de 20 % » (Guyot 1995, p.51).

Par différentiation des équations psychrométriques par rapport à la température, on peut estimer les incertitudes de et de_{sat} :

$$de_{sat} = \pm (e_{sat}(T) \cdot b.c / (c+T)^2 \cdot dT)$$

$$de = \pm (e_{sat}(Thum) \cdot b.c / (c+Thum)^2 \cdot dThum + f.p.(dTsec + dThum))$$

Considérant $e_{sat} = 5$ mb (ordre de grandeur de la pression de vapeur saturante à 0°C), $Thum = 0^\circ C$ et $dT = \pm 0,3^\circ C$ (incertitude sur la température mesurée à 5150 m selon Wagnon et al., soumis), on obtient $de_{sat} = \pm 0,1$ mb et $de = \pm 0,3$ mb.

Pour $dT = \pm 0,5^\circ C$, on calcule $de_{sat} = \pm 0,16$ mb et $de = \pm 0,5$ mb.

On note que la mesure directe de la différence (Tsec - Thum) par un montage différentiel, c'est à dire en mesurant la température humide non pas par rapport à la température de référence mais par rapport à la température sèche, permettrait de diviser par deux l'incertitude sur la mesure.

De même, si on s'intéresse à l'humidité relative H, on a :

$$dH = [(de \cdot e_{sat}) - (e \cdot de_{sat})] / (e_{sat})^2 \approx \pm 13 \%, \text{ pour : } e = e_{sat} = 5 \text{ mb, } de_{sat} = \pm 0,16 \text{ mb et } de = \pm 0,5 \text{ mb.}$$

H. 2. Moyennes journalières à 5150 m, 5550 m et 4750 m

La figure H.1 montre que l'humidité relative mesurée 30 cm au dessus de la surface du glacier à 5550 m reste toute l'année supérieure à celle mesurée à 5150 m (valeurs comprises entre 75 % et 100 % d'humidité). Les évolutions des moyennes journalières à 5150 m des humidités relatives (Cf. figure H.1) et des différences entre températures sèches et humides (Cf. figure H.2), ne font pas apparaître d'effet saisonnier. Par contre à 5550 m l'humidité relative semble augmenter en saison des pluies (Cf. figure H.1). Il faut cependant noter que seules les mesures à 5150 m constituent une série fiable et complète sur l'année, puisque nous avons vu qu'à partir de la fin du mois de janvier les mesures de températures sèches à 5550 m étaient difficiles à interpréter (Cf. chapitre C.2.3)

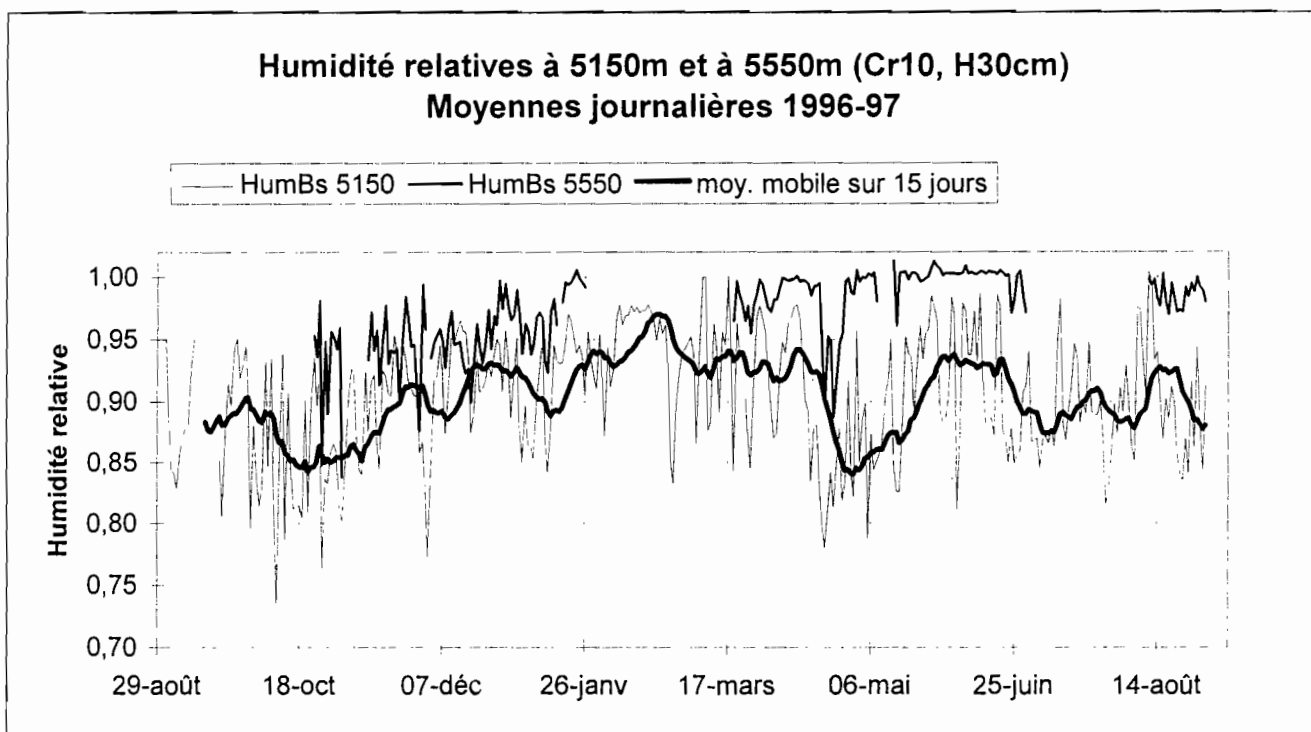
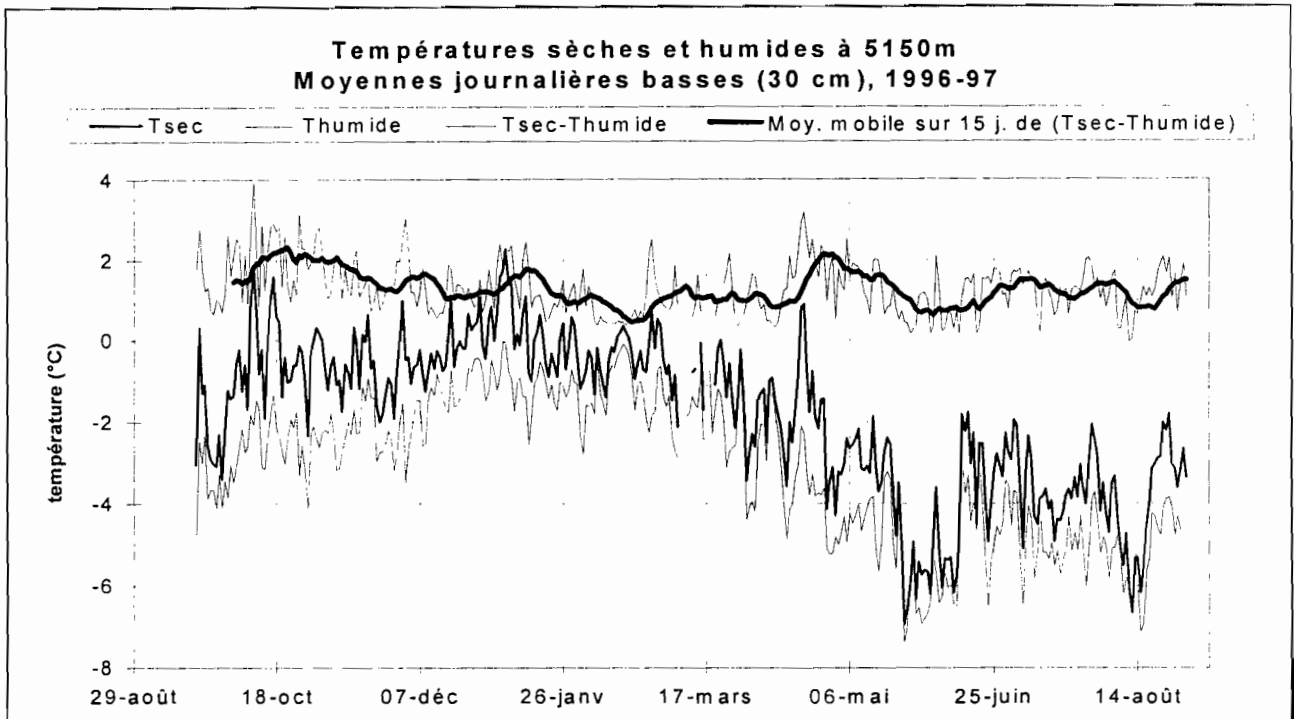
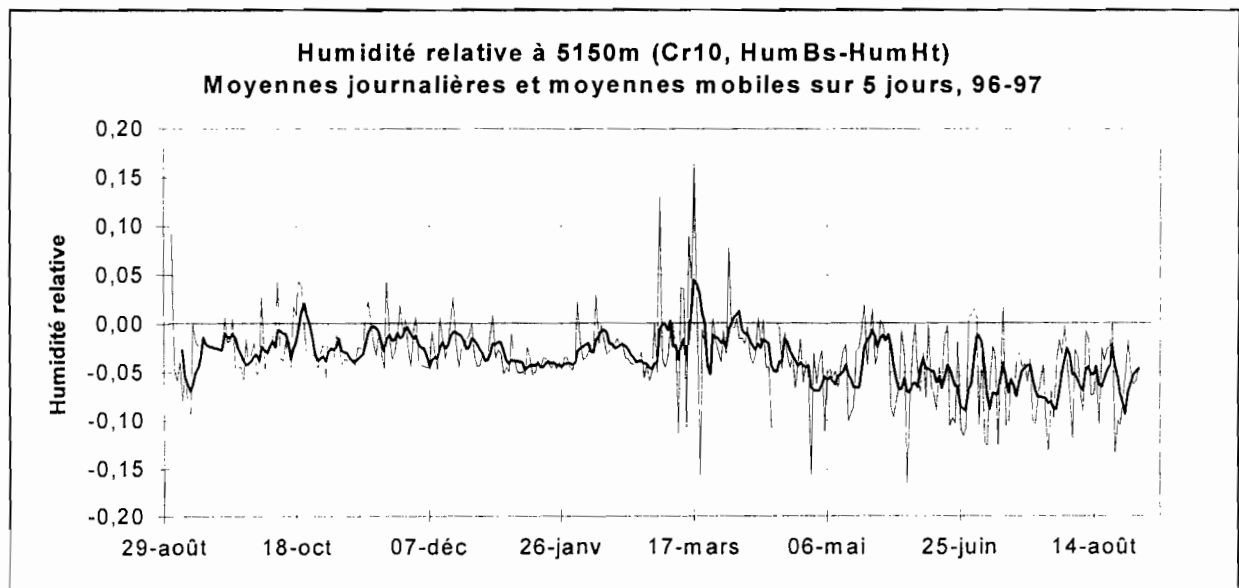


Figure H.1



La figure H.3 montre qu'en général au cours de l'année hydrologique 96-97 et sans que l'on puisse mettre en évidence d'effet saisonnier clair, le gradient d'humidité entre 30 et 180 cm est légèrement positif à 5150 m d'altitude (+ 3% en moyenne), ce qui correspond à une situation d'évaporation / sublimation.



L'humidité relative mesurée hors du glacier à 4750 m d'altitude reste inférieure à celle mesurée à 5150 m, et son évolution suit une plus grande variabilité de septembre à la fin du mois de janvier (valeurs comprises entre 10 et 90%, Cf. figure H.4). La période des mesures est trop courte pour que l'on puisse y déceler un effet saisonnier.

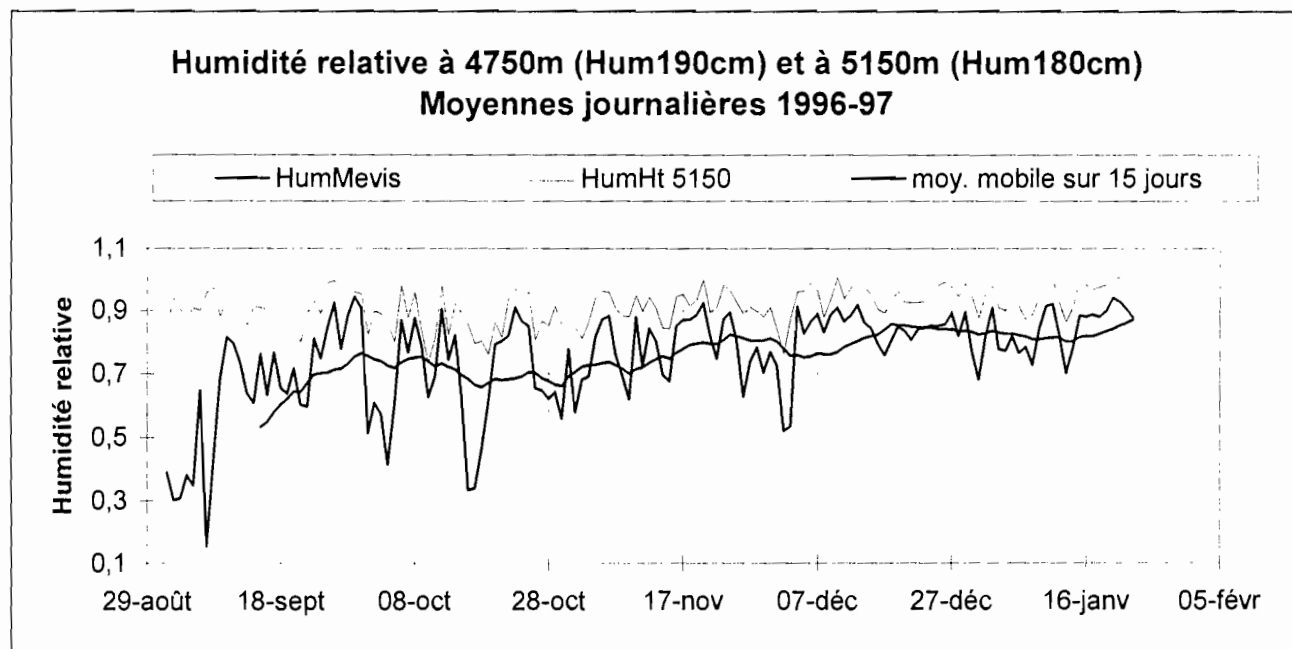


Figure H.4

H. 3. Moyennes mensuelles à 5150 m

Les moyennes mensuelles de l'humidité à 5150 m d'altitude sont comprises entre 87 et 97%, soit dans un intervalle de l'ordre de grandeur de la précision dH calculée au chapitre H.1 (Cf. figure H.5, tableau H.1), et selon ces mesures l'air est donc proche de la saturation tout au long de l'année sans effet saisonnier apparent.

A 5150 m la moyenne annuelle de la pression de vapeur est très proche de celle de l'année dernière (la différence est de deux centièmes de millibar, Cf. tableau H.1). La moyenne annuelle de la pression de vapeur à 5150 m est plus élevée que celle à 5550 m, ce qui est en accord avec la décroissance de la pression de vapeur saturante avec l'altitude. Les moyennes annuelles des humidités relatives à 5150 m et à 5550 m sont quasiment égales et proches de 100 %. En fait des différences de l'ordre du pourcentage pour les humidités relatives ou du dixième du millibar pour les pressions ne sont pas significatives.

Mois	HumMevis	Hum5150, Haut	Hum5550, Bas
sept.	0,65	0,92	
oct.	0,68	0,87	
nov.	0,78	0,91	0,94
déc.	0,82	0,94	0,95
janv.	0,85	0,96	0,97
fév.		0,97	
mars		0,94	
avril		0,92	
mai		0,94	
juin		0,97	
juil.		0,95	
août		0,96	
moyenne	0,76	0,94	0,95
	Pvapeur4750 (mb)	Pvapeur5150 (mb)	Pvapeur5550 (mb)
moyenne 96-97	*	4,64	4,45
moyenne 95-96	4,79	4,62	**

* depuis l'installation d'un nouveau programme le 24 janvier 97, la station Mevis calcule directement l'humidité relative

** non calculée

Tableau H.1

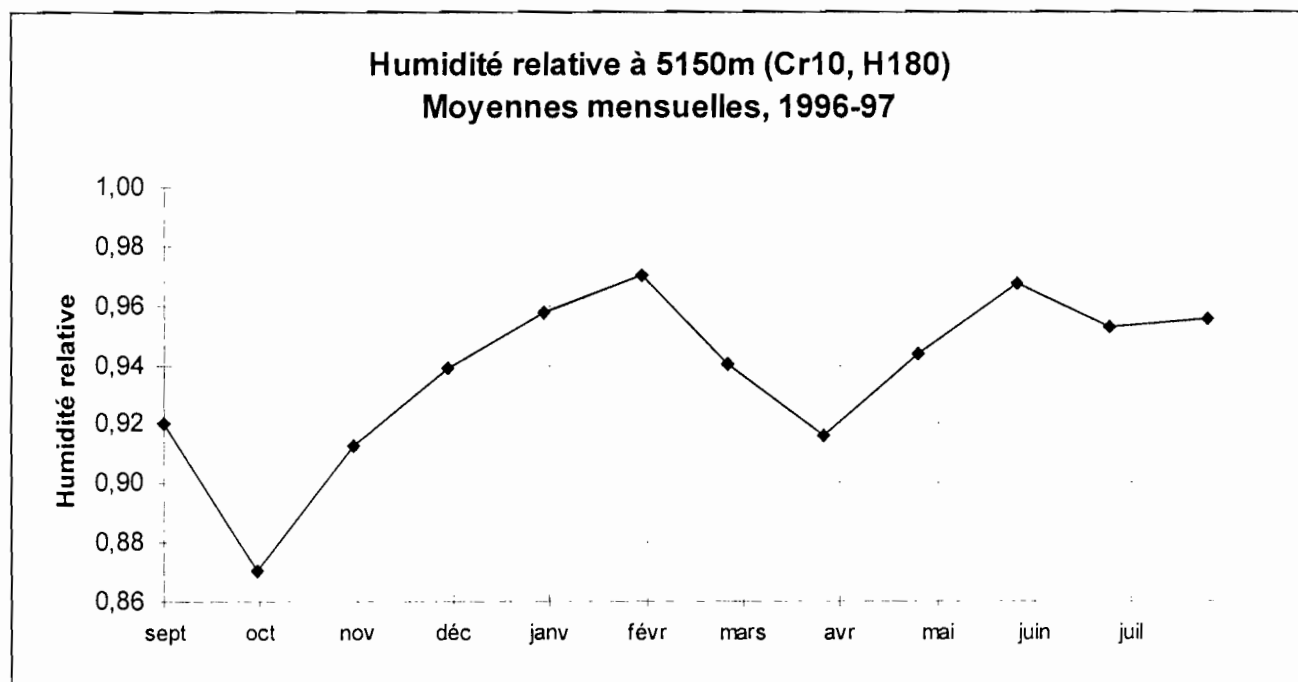


Figure H.5

I. VITESSE ET DIRECTION DU VENT

I. 1. Mesures disponibles

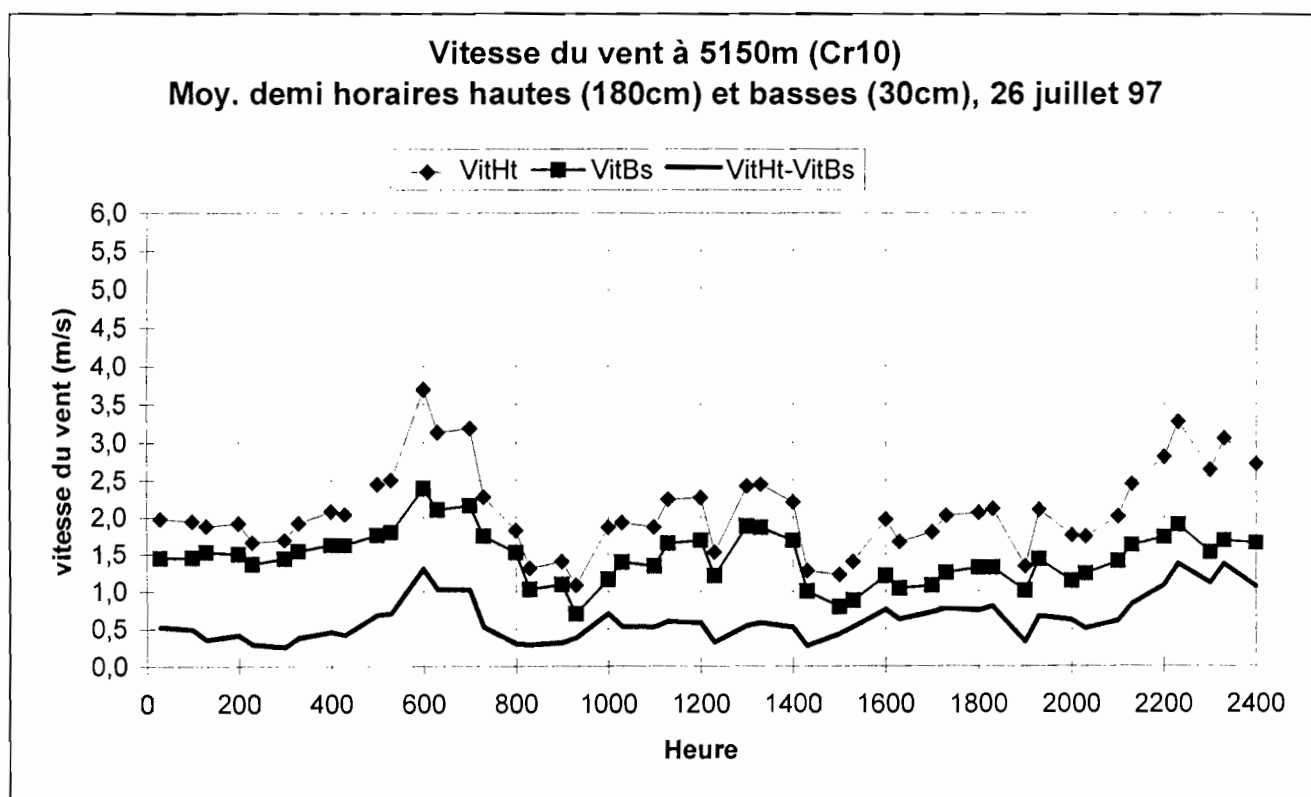
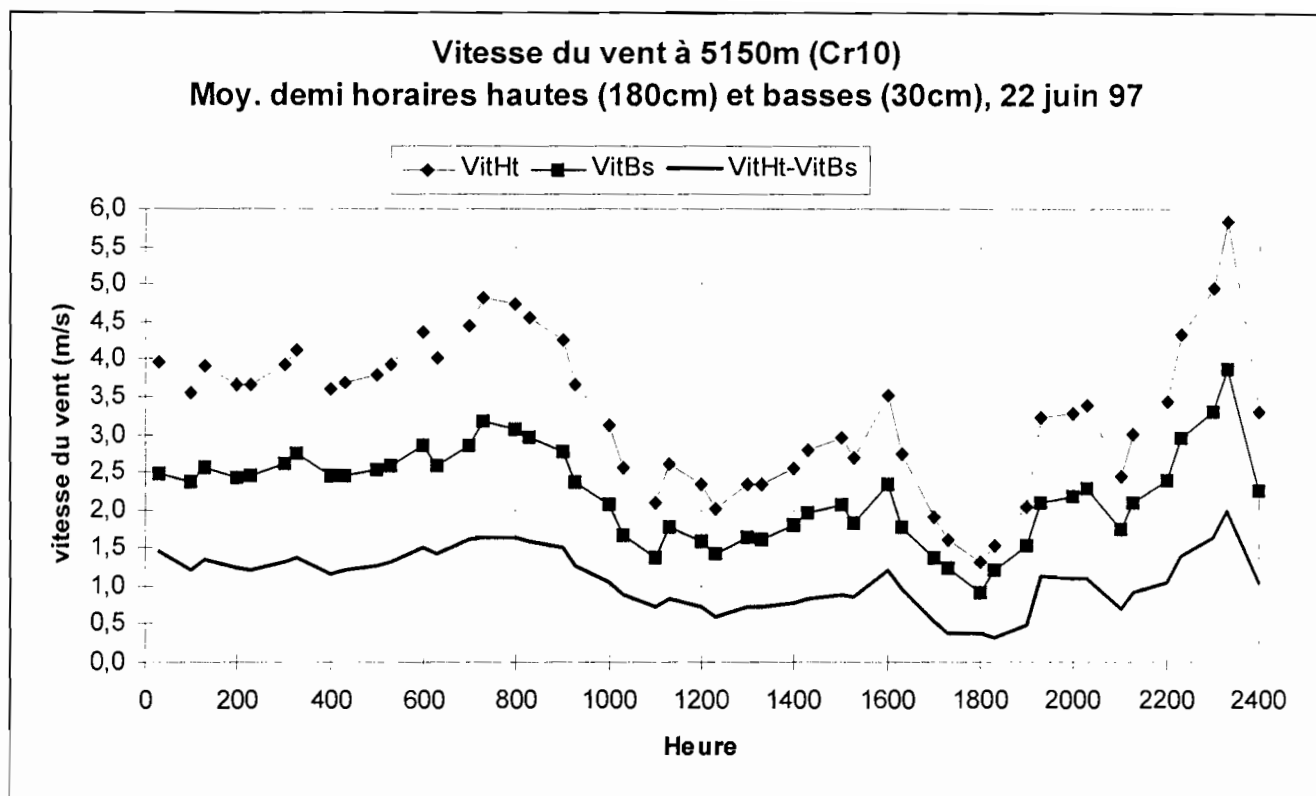
Les mesures disponibles concernent la Plataforma et le glacier (Cf. chapitre B) :

- 1- Plataforma (4750 m) : vitesse du vent à 230 cm de hauteur
- 2- Front du glacier (5025 m) : vitesse du vent à 240 cm de hauteur du 25 juillet au 22 octobre 1996.
- 3- Station Campbell à 5150 m : direction et vitesse du vent à 30 et 180 cm de hauteur.
- 4- Station Campbell à 5550 m : direction et vitesse du vent à 250 cm de hauteur à partir du 23 octobre 1996

I. 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 pour deux journées de la saison sèche : 22 juin et 26 juillet 97 (journées de beau temps, Cf. introduction). La vitesse mesurée à 30 cm de hauteur est toujours plus faible que celle mesurée à 180 cm, en raison du frottement de surface (le 22 juin la vitesse haute est comprise entre 1,5 et 6 m/s, le 26 juillet entre 1 et 3,5 m/s, respectivement lors de ces deux journées la vitesse basse est comprise entre 1 et 3,5 m/s, et entre 0,5 et 2,5 m/s, Cf. figures I.1 et I.2).

Selon les mesures du 22 juin le gradient de la vitesse du vent semble plus fort la nuit que la journée, lorsque les vitesses sont plus faibles (la différence maximale de vitesse entre les deux hauteurs est environ de 2 m/s à 23h). Cette tendance ne se retrouve pas à travers les mesures du 26 juillet et on peut juste noter ce jour là que ce gradient semble augmenter pour les vitesses élevées. Il semble pour ces deux exemples que le vent forcisse entre 6h et 8h et entre 21h et 24h (vent catabatique).



On dispose des moyennes demi-horaires des mesures de la direction du vent, ainsi si les mesures oscillent autour de 0°C (vent du Nord) la moyenne enregistrée peut être de 180°C . Ces mesures sont donc potentiellement fausses pour des directions Nord, sans que l'on puisse les corriger. Nous ne présentons ci-dessous que les mesures d'une journée : le 22 juin 97. Le 8 janvier 98 le programme de la station Cr10 a été modifié afin d'enregistrer une mesure de la direction du vent haut chaque demi-heure, et non plus une valeur moyenne.

La direction du vent est d'environ Nord-Ouest toute la journée du 22 juin, à l'exception de valeurs isolées du Sud-Ouest en fin d'après midi (à 16h et 18h, Cf. figure I.3). L'absence de valeurs au delà de 340° peut provenir du problème d'enregistrement évoqué ci-dessus (en supposant cependant de grandes variations de la direction autour du 0° sur des périodes de 30 mn). La différence entre les directions hautes et basses (axe secondaire) est nulle de 0 à 10h00, puis connaît de fortes fluctuations atteignant jusqu'à -100° à 16h00 et vers 23h30. Le premier écart de -100° à 16h00 semble provenir d'un « retard » de 30 mn de la girouette basse.

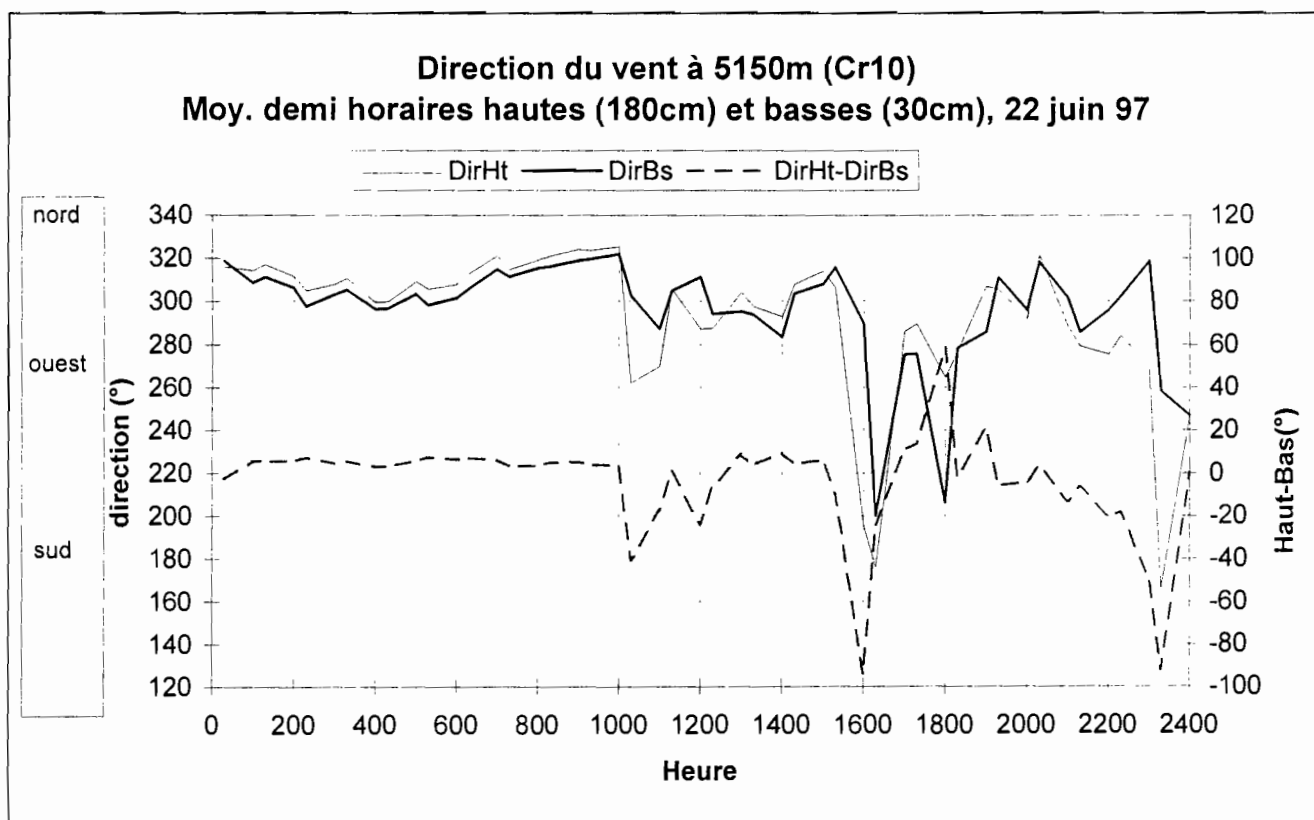


Figure I.3

I. 3. Valeurs journalières à 4750 m, 5025 m, 5150 m et 5550 m

La figure I.4 représente les moyennes journalières des mesures hautes à 5150 m, soit les mesures de la station 21X corrigées selon l'équation (E) : $1,2709 \cdot V_{ht} + 0,0457$, et celles de la Cr10. L'équation (E) a été obtenue par corrélation simple entre les mesures des deux capteurs de la 21X placés à même hauteur du 22 août au 22 octobre 96 (Cf. chapitre B.5.1). Le coefficient de corrélation entre les séries de la Cr10 et de la 21X est très élevée ($r^2=0,994$, $n=114$ points), pourtant la vitesse mesurée par la 21X est systématiquement plus élevée que celle mesurée par la Cr10 : la différence moyenne sur les quatre mois est de 0,42 m/s.

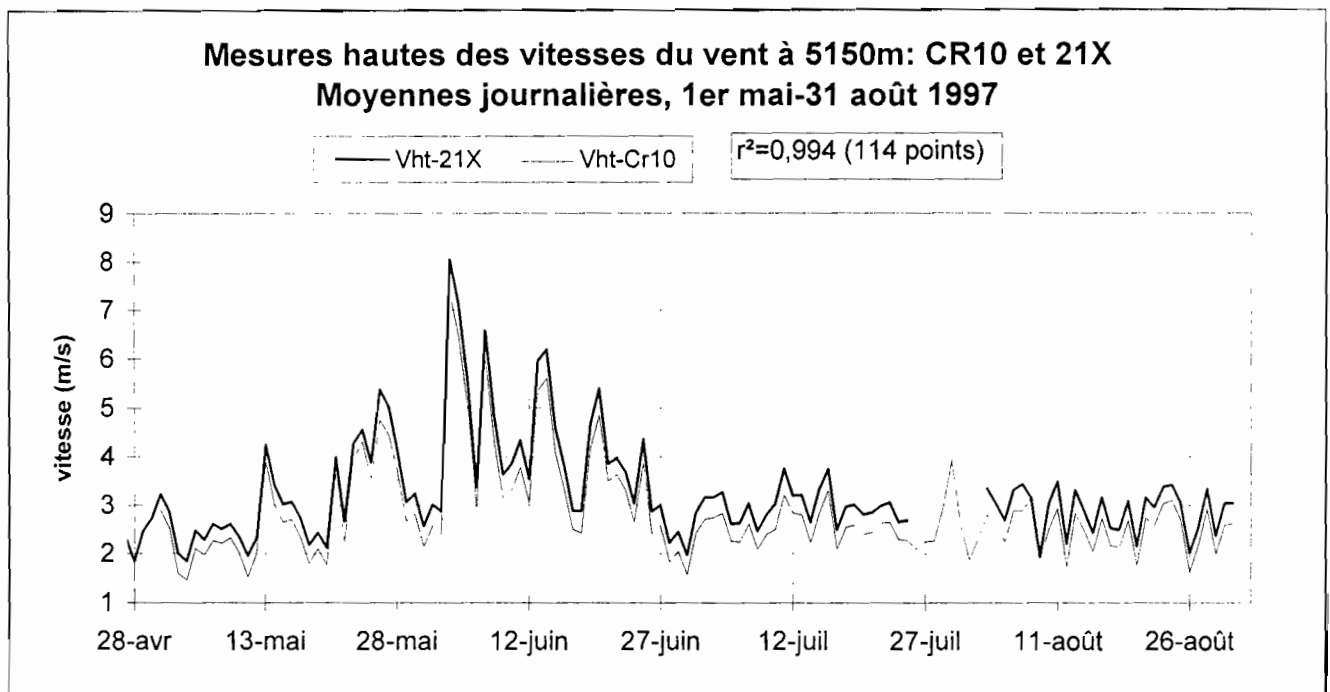
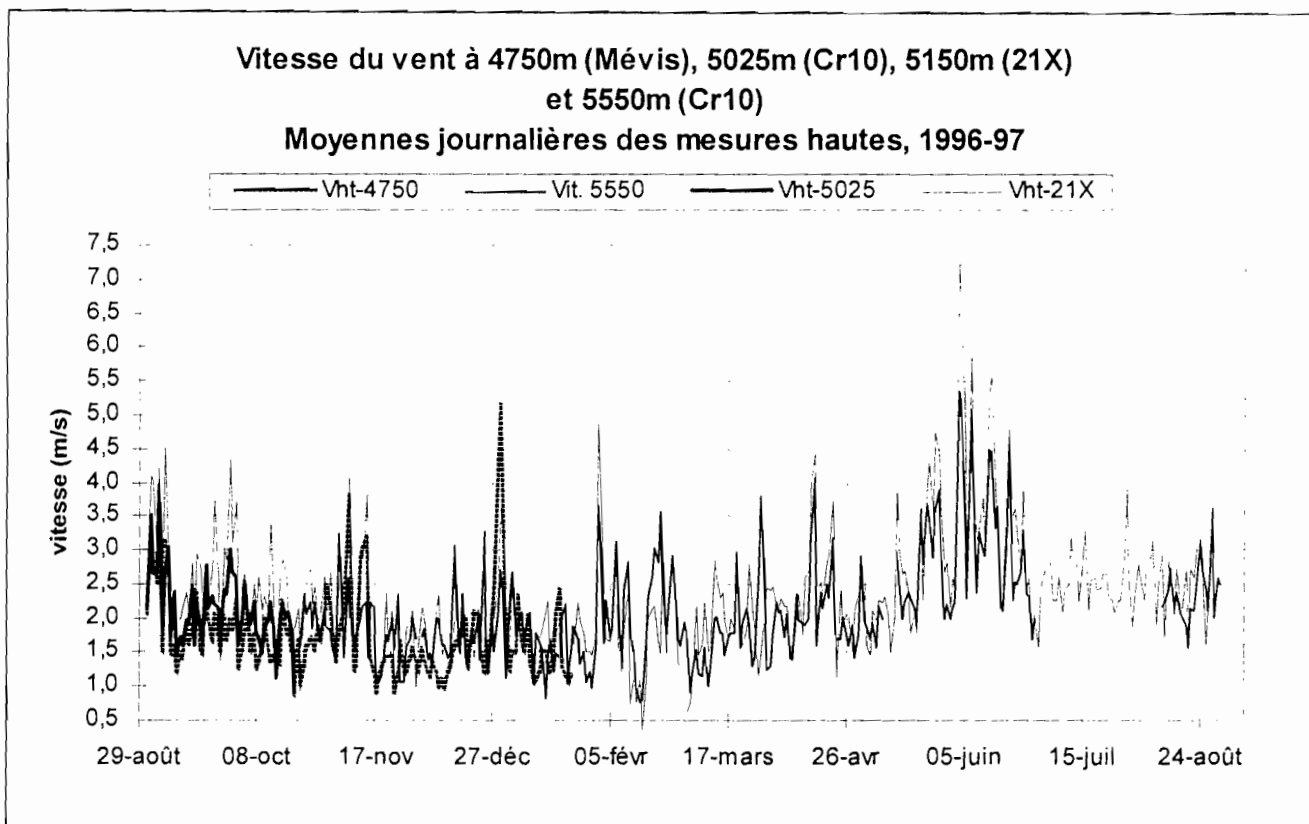


Figure I.4

La figure I.5, représentant l'ensemble des mesures disponibles, fait apparaître une augmentation des vitesses en saison sèche (le maxima atteignant 8 m/s est mesuré à 5150 m au début du mois de juin). Les mesures sont assez homogène dans l'ensemble, mais la station 21X semble présenter des mesures plus élevées que les autres stations (problème déjà mentionné au paragraphe précédent). En 1995-96 la correction des mesures hautes de la station 21X n'était pas effectuée, c'est pourquoi les coefficients de corrélation entre 5150 m et les séries à 4750 m, 5025 m et 5550 m sont bien plus élevés cette année que l'année dernière (Cf. tableau I.1).

r^2 est supérieur à 0,65 entre 5150 m et 5550 m, ainsi qu'entre 4750 m et 5025 m. r^2 est proche de 0,5 entre 5150 m et 5025 m, ainsi qu'entre 5150 m et 4750 m. Les séries à 4750 m et à 5550 m sont les seules à ne pas être corrélées entre elles. Ainsi le régime des vents semble homogène entre la Plataforma et la partie basse du glacier exposée au Sud-Est (jusqu'à environ 5100 m), alors que la partie supérieure du glacier exposée au Sud serait soumise à un régime différent.



Remarque : la courbe représentant Vht-21X prend en compte les changements intervenus lors de la période de calibration du capteur haut du 22 août 96 au 1^{er} mars 97 (Cf. chapitre B.5.1). Ainsi du 01 septembre au 22 octobre 96 sont représentées les données du capteur bas de la 21X placé à hauteur du capteur haut, et du 22 octobre 96 au 1^{er} mars 97 sont représentées les données d'un troisième capteur géré par la station Cr10.

Figure I.5

r ²	4750m	5025m	5150m (21X)	5550m
4750m	1	*	<i>0,13 (320 pts)</i>	
5025m	0,65 (51 pts)	1	<i>0,05 (38 pts)</i>	<i>0,07 (38 pts)</i>
5150m (21X)	0,42 (150 pts)	0,55 (51 pts)	1	<i>0,53 (130 pts)</i>
5550m	0,09 (148 pts)	**	0,67 (241 pts)	1

* non calculé

** pas de période de recoupement

Tableau I.1 : les chiffres en italiques correspondent à l'année 95-96, les chiffres en caractères gras correspondent à l'année 96-97

Les moyennes journalières de la direction du vent mesurée à 5550 m (site de la série la plus complète) font apparaître un léger effet saisonnier (Cf. figure I.5) ; une direction Sud-Est durant la saison des pluies (les précipitations sont liées à la convection de masses d'air venant de la vallée du Zongo) et plutôt Sud, Sud-Ouest en saison sèche. Cet effet saisonnier a été relevé dans le rapport n°55 (p.91). Ces valeurs sont également potentiellement fausses à cause du problème d'enregistrement évoqué au chapitre I.2, mais les risques d'erreur de 180° (Sud au lieu de Nord) sont cette fois très faibles pour des moyennes journalières. De plus à 5550 m, cette erreur est exclue puisque aucune valeur n'est proche du Nord.

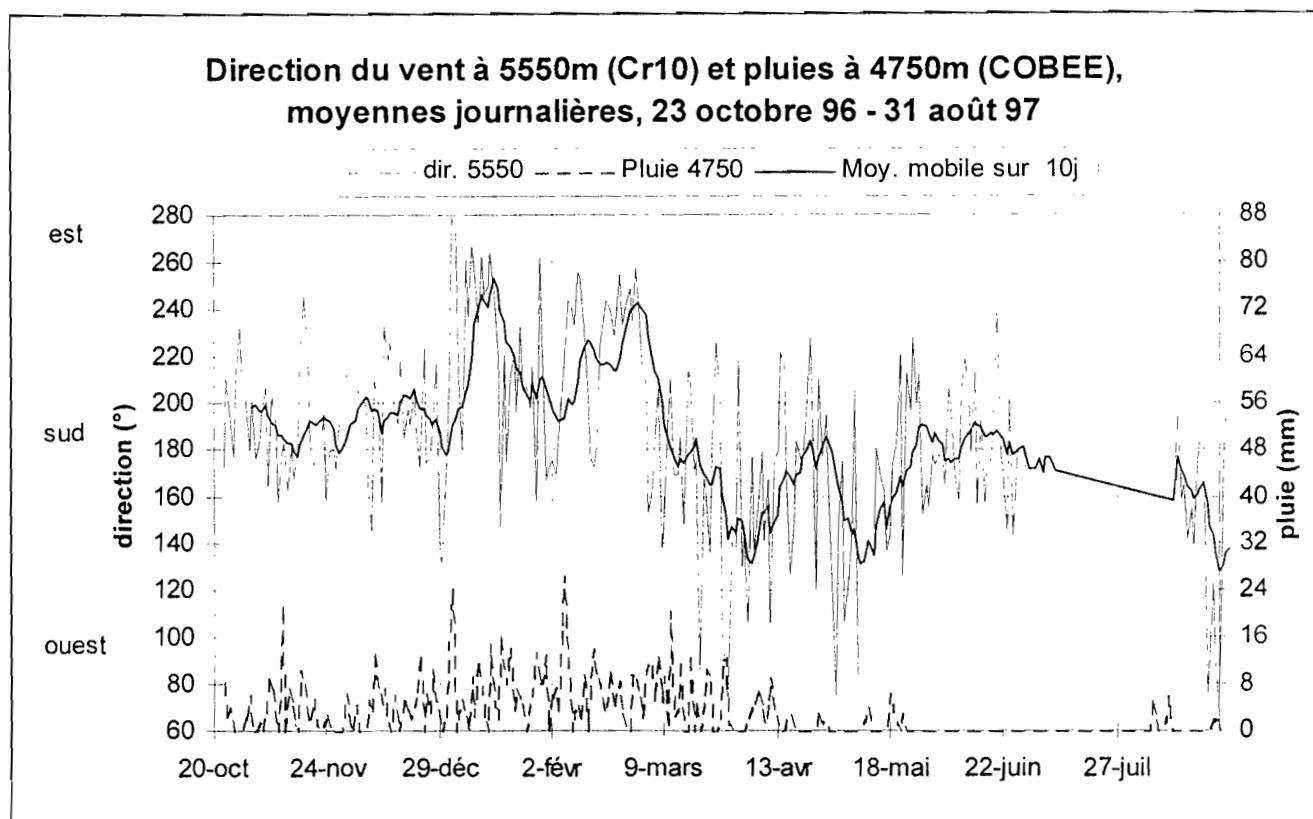


Figure I.6

I. 4. Valeurs mensuelles à 4750 m, 5150 m et 5550 m

La série complète des moyennes mensuelles à 5150 m (21X) fait bien apparaître l'effet saisonnier de la vitesse du vent, soit une augmentation en saison sèche (Cf. tableau I.2, figure I.7). Les vitesses les plus importantes des toutes les séries sont enregistrées à cette altitude : le maximum est enregistré par la station 21X au mois de juin (4,15 m/s).

Les moyennes annuelles à 4750 m et à 5550 m sont très proches de leur équivalent de l'année 1995-96 (Cf. tableau I.2). Les données de 1995-96 à 5150 m ne sont pas corrigées par l'équation (E), c'est pourquoi à cette altitude on note une différence importante entre les moyennes annuelles des deux derniers cycles.

Mois	Vit. 4750m (Mévis)	Vit. haut 5150m (Cr10)	Vit. Haut 5150m (21X)	Vit. 5550m
sept.	1,98		2,74	
oct.	1,59		2,26	
nov.	1,79		2,00	1,79
déc.	1,75		1,90	1,83
janv.	1,49 ¹		1,49	1,61
fév.			1,64 ²	2,18
mars			1,88	1,75
avril			2,50	2,07
mai		2,69	3,07	2,49 ⁴
juin		3,67	4,15	3,13
juil.		2,58	2,98 ³	
août		2,47	2,90	2,35 ⁵
moyennes	1,72	2,85	2,46	2,13
moy. 95-96	1,66		1,85	2,31

Lacunes :

- ¹ la dernière semaine du mois
- ² les 10 derniers jours du mois
- ³ la dernière semaine du mois
- ⁴ 4 jours répartis dans le mois
- ⁵ les 10 premiers jours du mois

Tableau I.2

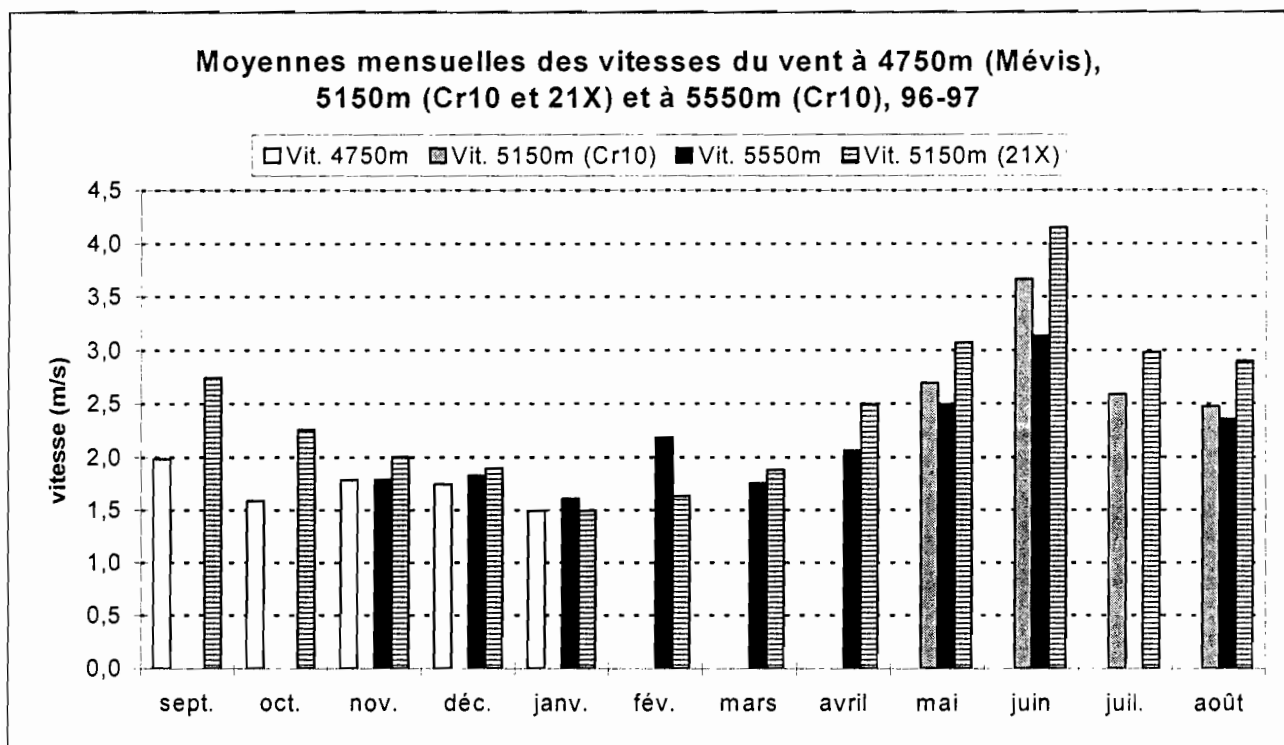


Figure I.7

J. MESURES DE LA SONDE A ULTRASON A 5150 M

Sur l'année 1996-97 les mesures de la sonde à ultrason (mesure de la distance entre le sol et le capteur une fois par demi heure) sont très incomplètes à cause de nombreux dysfonctionnements, et d'une panne du 5 avril 1997 jusqu'à la fin de l'année hydrologique (Cf. figure J.1). Peu de remarques sur ce capteur sont contenues dans les rapports de visite, mais les rapports du 8 et du 21 mars 1997 (mentionnant respectivement des hauteurs de la sonde de 61 et 74 cm) permettent de vérifier que la panne du mois d'avril n'est pas précédée d'une période de dégradation des données. Les données postérieures au 3 mars ont été corrigées afin de prendre en compte une baisse du capteur de 123,5 cm effectuée ce jour là (Cf. rapport de visite du 03/03/97).

Du début novembre à fin mars, l'accumulation nette à 5150 m est d'environ 2 m de neige selon les mesures de la sonde (Cf. figure J.1), soit environ 0,8 m d'eau pour une densité de la neige égale à 0,4. A 5150 m sur le glacier du Zongo, Wagnon et al. (soumis) obtiennent sur l'année 96-97 un bon accord entre l'ablation calculée par une étude du bilan d'énergie (Aa), et l'ablation calculée à partir des mesures des balises et de la sonde à ultra son (b) associées aux mesures pluviométriques (Ac) ($Aa=1*(b+Ac)-5.3$, $r^2=0,86$). Selon leurs calculs des termes du bilan énergétique, on obtient à 5150 m une ablation de 45 cm d'eau pour les mois de novembre à mars. Selon les mesures de la sonde et cette estimation de l'ablation, les précipitations neigeuses sur cette période sont donc de 1,25 m d'eau. Les mesures correspondantes des pluviomètres P1 (5165 m) et P2 (5080 m), situés sur la moraine en rive droite du glacier (Cf. figure A.1), sont respectivement de 765 mm d'eau et de 840 mm d'eau (Cf. tableau E.2), soit des valeurs 30 à 40 % plus faibles. Les différences sont liées : a) à l'imprécision sur le calcul des termes du bilan d'énergie, b) à la prise en compte d'une densité constante égale à 0,4, c) à la répartition irrégulière de la neige accumulée à la surface du glacier, en grande partie à cause du vent, et d) à la sous-évaluation des précipitations par les pluviomètres situés sur la moraine (Cf. chapitre E.2.1).

La figure J.1 montre que l'ablation du mois de septembre mesurée par la sonde (ablation presque nulle) est beaucoup plus faible que celle mesurée par les balises les plus proches (20 cm de neige ou de glace selon la balise B1, et 50 cm pour la moyenne des émergences des balises B1 et B2). Cette différence pourrait provenir d'une modification de la position du capteur, liée à la diminution rapide de sa hauteur de 20 cm à la fin du mois de septembre. Cependant l'élévation brutale de l'albédo jusqu'à 0,86 à la fin de ce mois (Cf. figure J.2) montre que ce changement de hauteur est dû à des précipitations neigeuses. En fait les différences de mesures entre la sonde et les balises en septembre sont sans doute dues à l'action du vent, qui participe à une répartition irrégulière de la neige à la surface du glacier. Ainsi le rapport du 30/08/96 mentionne une tempête intervenue la nuit précédente, le lendemain a été un jour très venté (rapport du 31/08/96), après une période de beau temps de nouvelles précipitations sont intervenues à la fin du mois (rapports du 17 et du 19 septembre 96).

A l'exception du mois de septembre, les différences entre les changements mensuels d'élévation de la surface mesurés par la sonde et ceux mesurés par les balises B1 et B2 semblent être de l'ordre de 20 cm de neige ou de glace par mois.

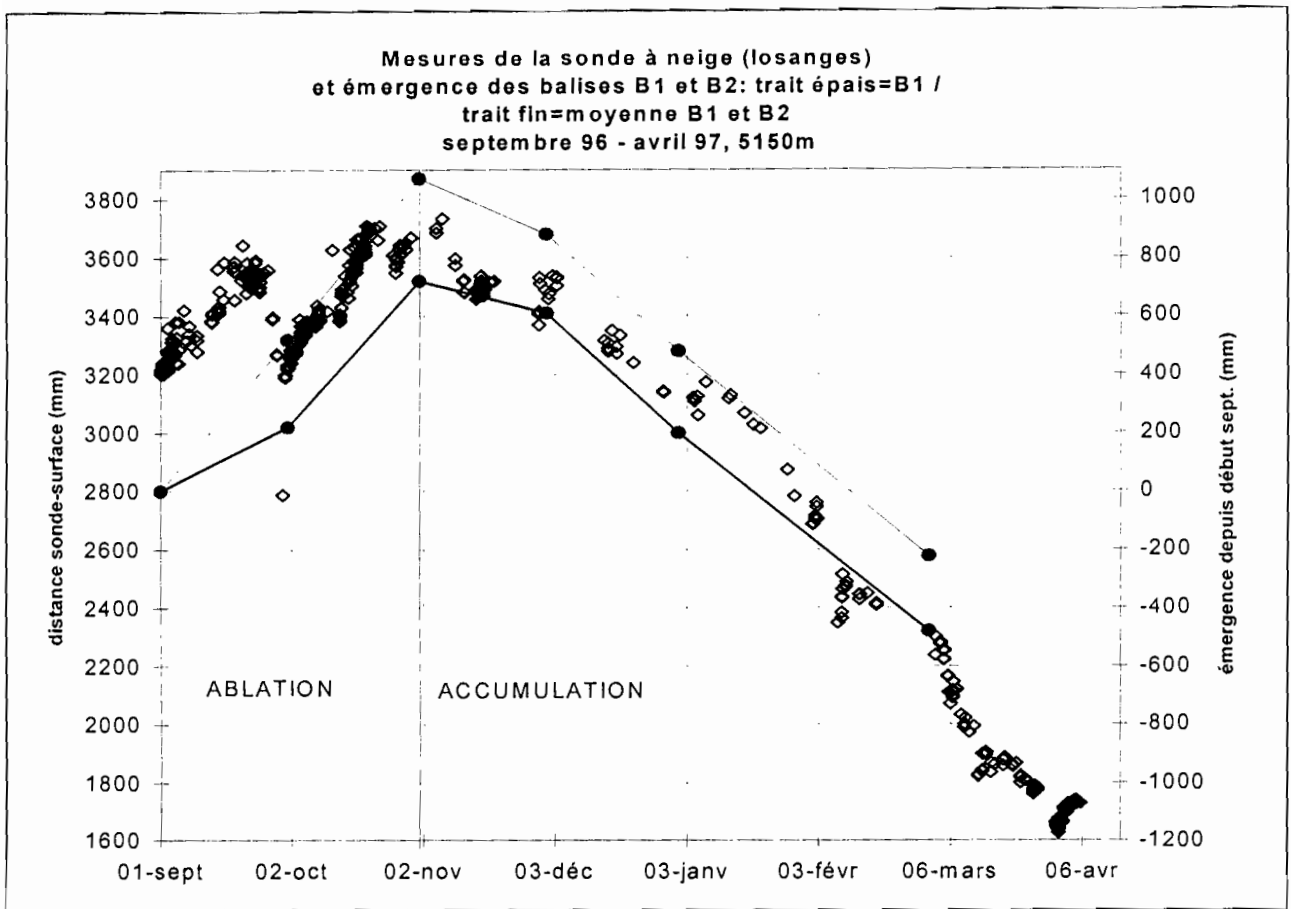


Figure J.1

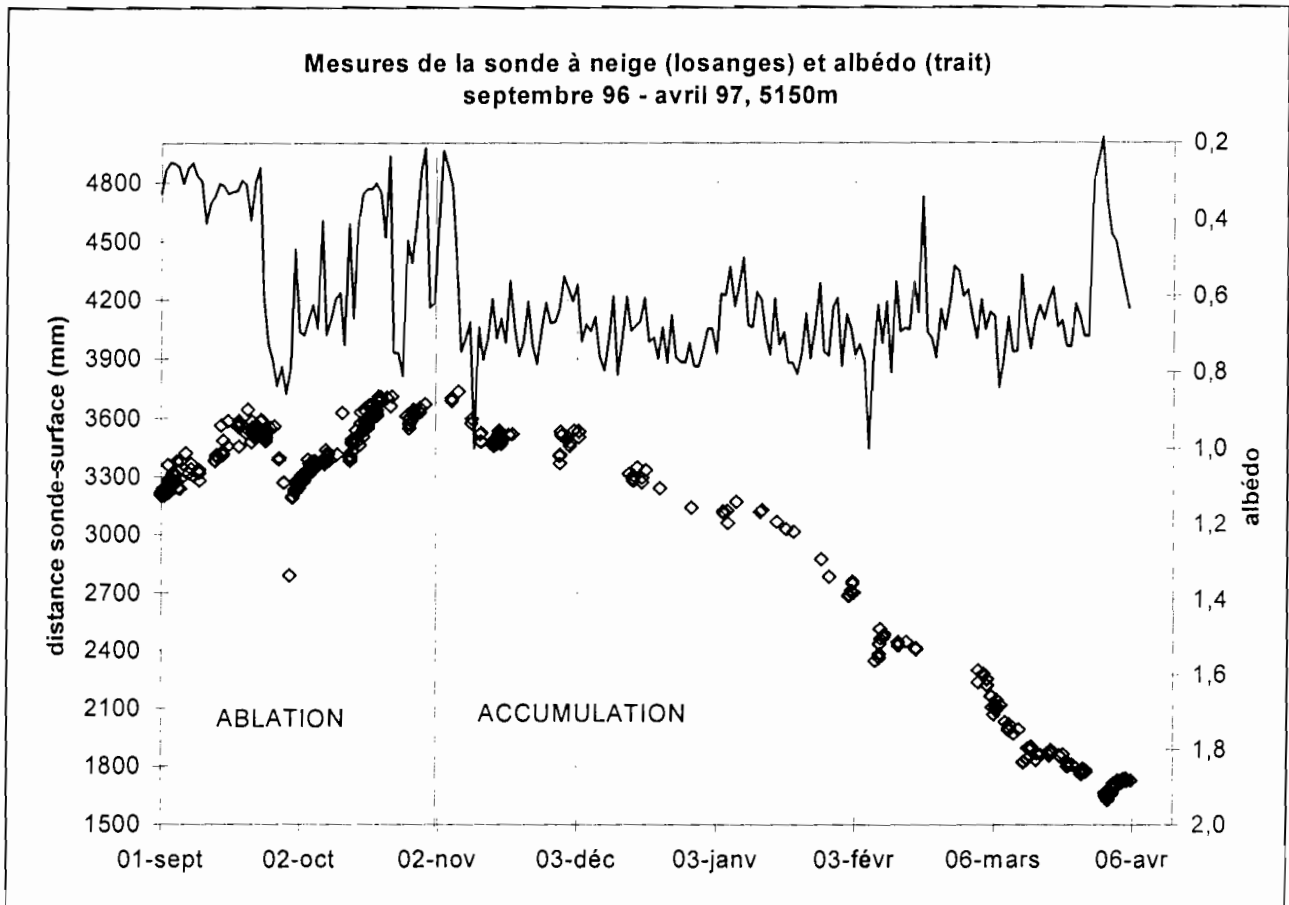


Figure J.2

K. GLACIOLOGIE

K.1 L'accumulation nette

Il s'agit du bilan d'accumulation sur l'ensemble du glacier en fin de saison des pluies et du bilan net en zone d'accumulation en fin d'année hydrologique, estimés par forages et mesures densimétriques complétés par des mesures directes de hauteurs de neige par enfoncement d'une sonde jusqu'à la couche de septembre de l'année précédente.

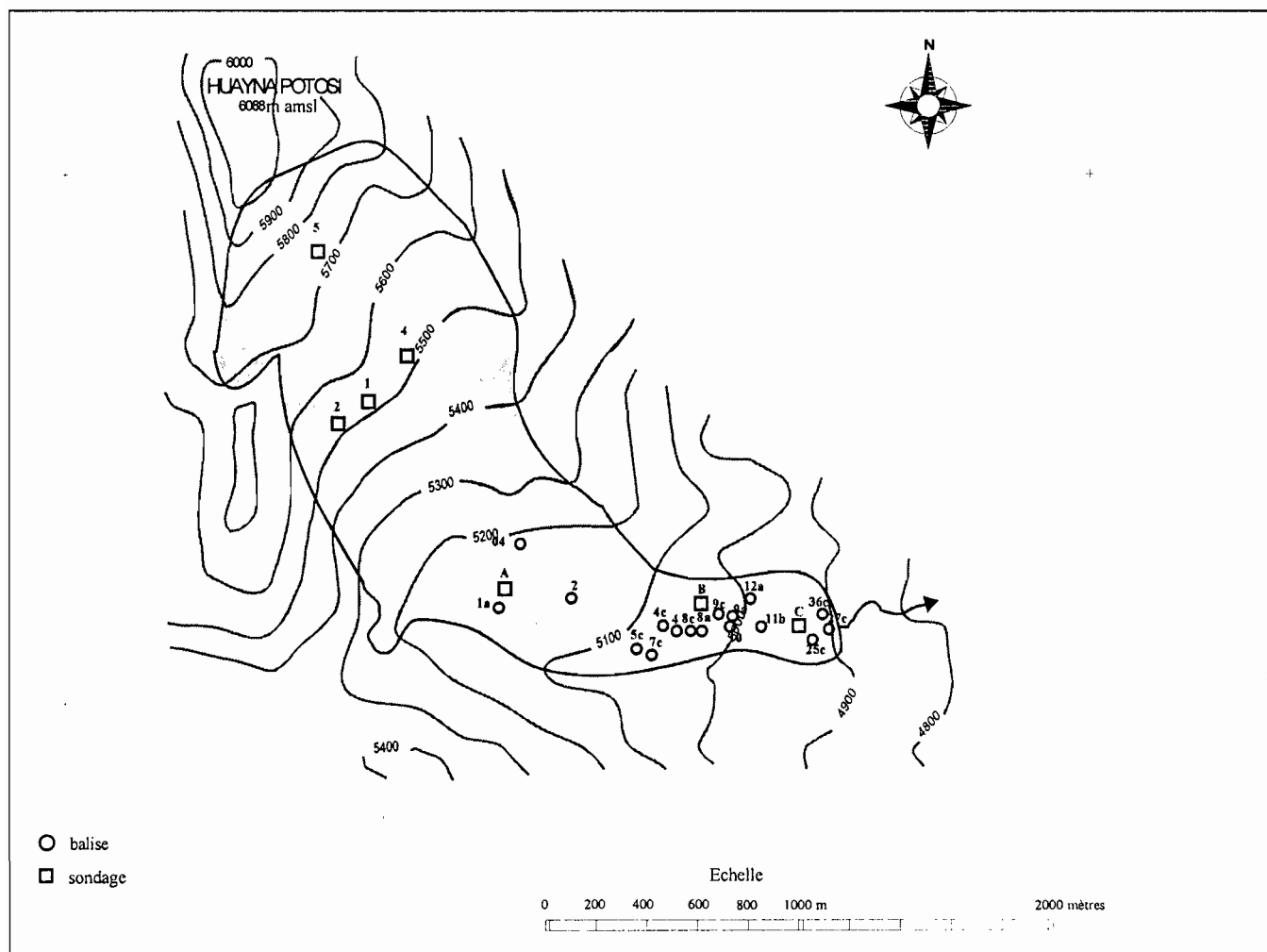


Figure K.1

• L'accumulation mesurée en fin de saison des pluies :

La mission du 29 au 30 mai 1997 a permis de mesurer en quatre sites de la zone supérieure du glacier l'accumulation nette de septembre à mai. Sur les sites 1, 4 et 5 des puits ont été creusés, sur le site 2 des sondages ont été réalisés (emplacements des puits : figure K.1, résultats des mesures : figures K.2 à K.4 et tableaux K.1 à K.3).

La mission réalisée le 16 avril 1997 a permis de mesurer l'accumulation nette de septembre à avril en un site proche de la ligne d'équilibre : sondage A, et en deux sites de la zone d'ablation : sondages B et C (tableaux K.4 à K.6).

Sondage 1 : Altitude : 5520 m. ; site : station Campbell ; accumulation nette : 1541 mm d'eau (mai 97)

L (cm)	L cum.. (cm)	Pb (g)	Pn (g)	Vol.(cm3)	D (g/cm3)	WE (mm)
16,3	16,3	638	112	540,9	0,21	33,8
6,0	22,3	576	81	199,1	0,41	24,4
16,3	38,6	730	235	540,9	0,43	70,8
16,3	54,9	705	210	540,9	0,39	63,3
16,3	71,2	740	245	540,9	0,45	73,8
16,3	87,5	763	268	540,9	0,50	80,8
16,3	103,8	719	224	540,9	0,41	67,5
16,3	120,1	761	266	540,9	0,49	80,2
16,3	136,4	759	264	540,9	0,49	79,6
16,3	152,7	764	269	540,9	0,50	81,1
16,3	169,0	755	260	540,9	0,48	78,4
16,3	185,3	795	300	540,9	0,55	90,4
16,3	201,6	790	295	540,9	0,55	88,9
16,3	217,9	783	288	540,9	0,53	86,8
16,3	234,2	799	304	540,9	0,56	91,6
80,0	314,2				0,56	449,6
314,0					0,49	1541

Tableau K.1

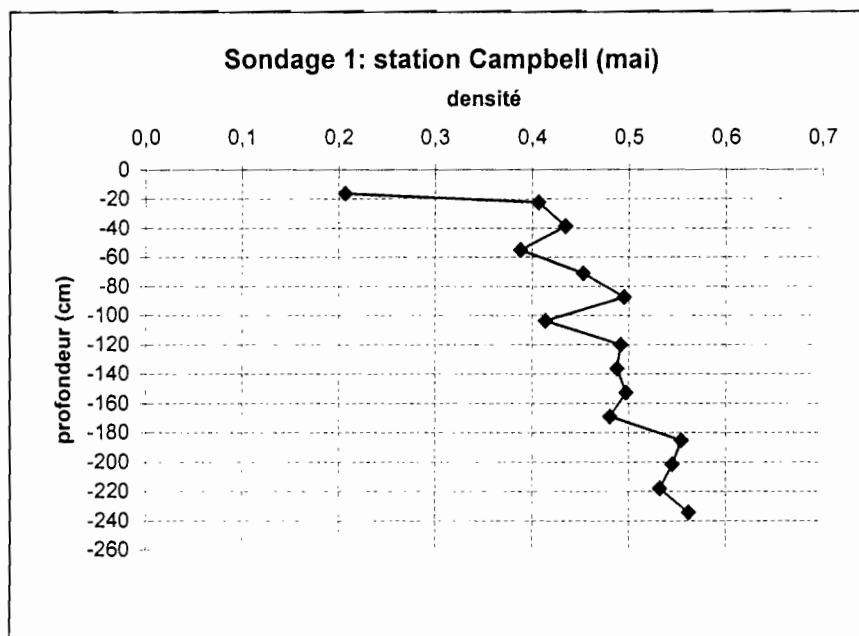


Figure K.2

Sondage 4 : Altitude : 5520 m ; site : Combe Est ; accumulation nette : 1215 mm d'eau (mai 97)

L (cm)	L cum.(cm)	Pb (g)	Pn (g)	Vol.(cm3)	D (g/cm3)	WE (mm)
16,3	16,3	644	118	540,9	0,22	35,6
16,3	32,6	719	193	540,9	0,36	58,2
14,3	46,9	719	193	474,5	0,41	58,2
14,3	61,2	682	156	474,5	0,33	47,0
16,3	77,5	741	215	540,9	0,40	64,8
16,3	93,8	749	223	540,9	0,41	67,2
16,3	110,1	741	215	540,9	0,40	64,8
16,3	126,4	749	223	540,9	0,41	67,2
16,3	142,7	749	223	540,9	0,41	67,2
16,3	159,0	797	271	540,9	0,50	81,7
16,3	175,3	759	233	540,9	0,43	70,2
16,3	191,3	797	271	540,9	0,50	81,7
90,0	281,6				0,50	450,9
281,6					0,43	1215

Tableau K.2

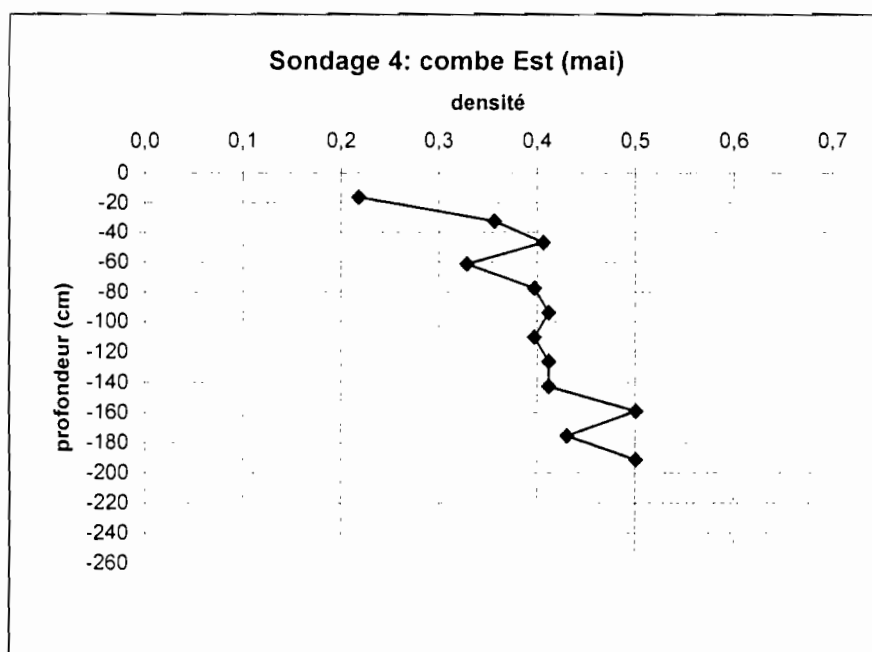


Figure K.3

Sondage 2 : Altitude : 5520 m ; site : rive droite ; accumulation nette : 1130mm d'eau (mai 97)

Trois sondages avec la sonde à neige ont été réalisés à cet emplacement, les hauteurs relevées sont les suivantes : 220 cm, 250 cm et 270 cm. Si on applique la densité moyenne de celles des deux autres puits à cette même altitude (sondage 1 et 4), soit une densité de 0.46, à la hauteur moyenne de celles de ces trois sondages, soit environ 245 cm, on obtient une accumulation nette de 1130 mm d'eau.

Sondage 5 : Altitude : 5700 m ; site : pied de la pente sud du Sommet Sud ; accumulation nette : 1256 mm d'eau (mai 97)

L (cm)	L cum.(cm)	Pb (g)	Pn (g)	Vol.(cm ³)	D (g/cm ³)	WE (mm)
16,3	16,3	664	138	540,9	0,26	41,6
16,3	32,6	696	170	540,9	0,31	51,2
16,3	48,9	700	174	540,9	0,32	52,4
16,3	65,2	718	192	540,9	0,35	57,9
16,3	81,5	722	196	540,9	0,36	59,1
16,3	97,8	736	210	540,9	0,39	63,3
16,3	114,1	736	210	540,9	0,39	63,3
16,3	130,4	734	208	540,9	0,38	62,7
16,3	146,7	744	218	540,9	0,40	65,7
16,3	163	758	232	540,9	0,43	69,9
16,3	179,3	744	218	540,9	0,40	65,7
16,3	195,6	756	230	540,9	0,43	69,3
16,3	211,9	782	256	540,9	0,47	77,1
16,3	228,2	776	250	540,9	0,46	75,3
16,3	244,5	780	254	540,9	0,47	76,5
65,0	309,5				0,47	305,2
					0,40	1256

Tableau K.3

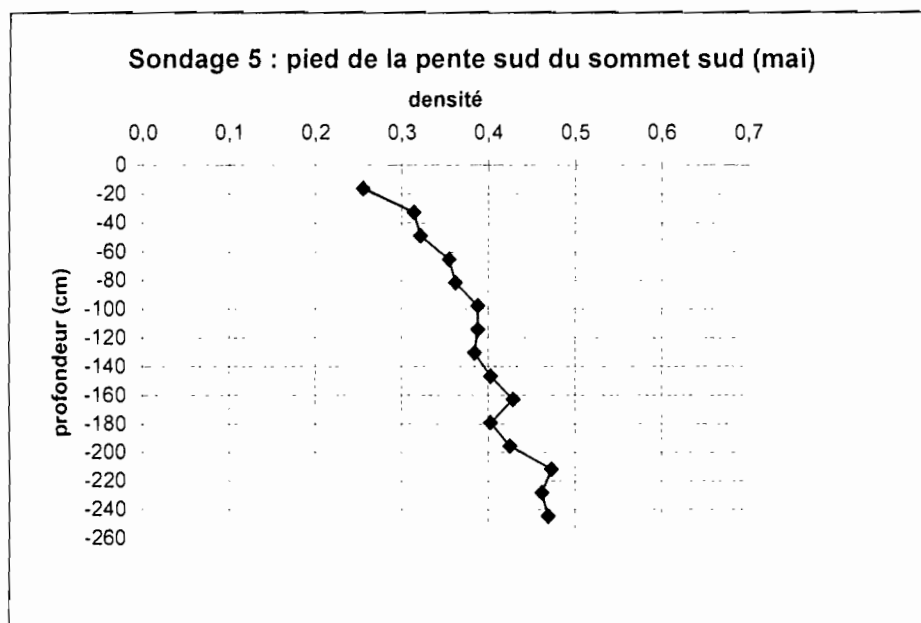


Figure K.4

Sondage A : altitude : 5150m ; site : station campbell ; accumulation nette : 956 mm d'eau (avril 97)

L(cm)	Vol(cm3)	Pb(g)	Pn(g)	d	we(mm)
16.3	524.4	691	163	0.31	50.7
16.3	524.4	750	222	0.42	69.0
16.3	524.4	761	233	0.44	72.4
16.3	524.4	768	240	0.46	74.6
16.3	524.4	782	254	0.48	79.0
16.3	524.4	772	244	0.47	75.8
16.3	524.4	798	270	0.51	83.9
16.3	524.4	789	261	0.50	81.1
16.3	524.4	794	266	0.51	82.7
16.3	524.4	808	280	0.53	87.0
16.3	524.4	803	275	0.52	85.5
16.3	524.4	834	306	0.58	95.1
4	128.7	590	62	0.48	19.3
199.6				0.48	956

Tableau K.4

Hauteur de neige mesurée par sondage : 200 cm, soit 960 mm d'eau pour une densité moyenne de la neige de 0,48.

Sondage B : altitude : 5050m ; site : plateau inférieur (balise 9) ; accumulation nette : 656 mm d'eau (avril 97)

L(cm)	Vol(cm3)	Pt(g)	Pn(g)	d	we(mm)
14.3	460.0	688	160	0.35	49.7
16.3	524.4	731	203	0.39	63.1
16.3	524.4	759	231	0.44	71.8
16.3	524.4	770	242	0.46	75.2
16.3	524.4	771	243	0.46	75.5
16.3	524.4	787	259	0.49	80.5
16.3	524.4	807	279	0.53	86.7
16.3	524.4	817	289	0.55	89.8
11.3	363.5	731	203	0.56	63.1
139.7				0.47	656

Tableau K.5

Hauteur de neige mesurée par sondage : 140 cm, soit 658 mm d'eau pour une densité moyenne de la neige de 0,47.

Sondage C : altitude : 4850m ; site : langue terminale du glacier (balise 25) ; accumulation nette : 48 mm d'eau (avril 97)

L(cm)	Vol (cm3)	Pt (g)	Pn (g)	d	we (mm)
13.3	427.9	682	154	0.36	47.9
13.3				0.36	48

Tableau K.6

Hauteur de neige mesurée par sondage : 20 cm, soit 72 mm d'eau pour une densité moyenne de la neige de 0,36.

Tableau récapitulatif des accumulations nettes en fin de saison des précipitations :

Sites :	Altitude (m)	Accumulation nette (mm d'eau)
sondage 5 (pied de la voie des français)	5700	1256
sondage 1 (st. Campbell)	5520	1541
sondage 4 (combe Est)	5520	1215
sondage 2 (rive droite)	5520	1130*
sondage A (st. Campbell)	5150	956
sondage B (plateau inférieur)	5050	656
sondage C (langue terminale)	4850	48

* mesure obtenue uniquement par sondages

Les sondages 1,4,5 et 2 ont été mesurés du 29 au 30 mai 97 ; les sondages A, B et C ont été mesurés le 16 avril 97.

Tableau K.7

Le tableau récapitulatif K.7 ne fait apparaître au dessus de 5500 m aucun gradient selon l'altitude de l'accumulation durant la saison des pluies, sans doute en raison des effets de site tels que l'action du vent, les phénomènes de suraccumulation aux pieds des parois... La moyenne des trois valeurs d'accumulation mesurées à 5520 m est de 1300 mm d'eau et la dispersion de ces trois mesures est d'environ 20 %. On peut attribuer le déficit du sondage 4 à une exposition Est, qui reçoit davantage de radiation solaire en saison des pluies (en saison des pluies les matinées sont en général plus dégagées que les après-midi), et celui du sondage 2 aux réflexions du rayonnement solaire sur la paroi rocheuse qui borde le glacier en rive droite. Mais on peut aussi attribuer la forte accumulation du site Campbell 5520 m aux avalanches provenant de séracs en amont.

• Bilan net de l'année hydrologique en zone d'accumulation

La mission du 19 septembre 1997 a permis de mesurer le bilan net de l'année hydrologique dans les 3 mêmes sites de la zone d'accumulation où les puits ont été effectués en mai 97 (figures K.5 à K.7, tableaux K.8 à K.10).

Sondage 1 : Altitude : 5520 m. ; site : station Campbell ; accumulation nette : 1476 mm d'eau (septembre 97)

L (cm)	L cum(cm)	Pb (g)	Pn (g)	Vol.(cm ³)	D (g/cm ³)	WE (mm)
16,3	16,3	704	178	540,9	0,33	53,6
16,3	32,6	731	205	540,9	0,38	61,8
16,3	48,9	714	188	540,9	0,35	56,7
15,8	64,7	726	200	524,3	0,38	60,3
16,3	81,0	736	210	540,9	0,39	63,3
14,3	95,3	738	212	474,5	0,45	63,9
14,8	110,1	728	202	491,1	0,41	60,9
15,8	125,9	732	206	524,3	0,39	62,1
14,8	140,7	716	190	491,1	0,39	57,3
16,3	157,0	758	232	540,9	0,43	69,9
15,8	172,8	748	222	524,3	0,42	66,9
16,3	189,1	758	232	540,9	0,43	69,9
14,8	203,9	768	242	491,1	0,49	72,9
15,3	219,2	778	252	507,7	0,50	75,9
13,3	232,5	774	248	441,3	0,56	74,7
90,0	322,5			2986,5	0,56	505,7
	322,5				0,46	1476

Tableau K.8

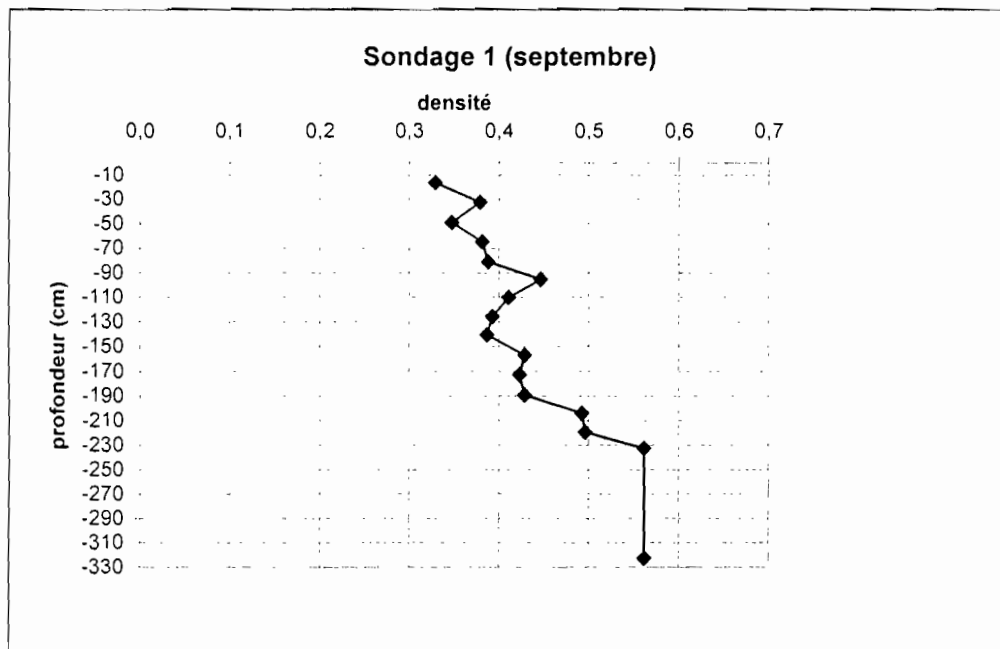


Figure K.5

Sondage 4 : Altitude : 5520 m ; site : Combe Est ; accumulation nette : 1268 mm d'eau (septembre 97)

L (cm)	L cum(cm)	Pb (g)	Pn (g)	Vol.(cm3)	D (g/cm3)	WE (mm)
16,3	16,3	676	150	540,9	0,28	45,2
15,3	31,6	718	192	507,7	0,38	57,9
11,3	42,9	756	230	375,0	0,61	69,3
15,3	58,2	736	210	507,7	0,41	63,3
16,3	74,5	714	188	540,9	0,35	56,7
16,3	90,8	760	234	540,9	0,43	70,5
16,3	107,1	726	200	540,9	0,37	60,3
16,3	123,4	752	226	540,9	0,42	68,1
16,3	139,7	770	244	540,9	0,45	73,5
16,3	156,0	766	240	540,9	0,44	72,3
16,3	172,3	780	254	540,9	0,47	76,5
16,3	188,6	778	252	540,9	0,47	75,9
13,3	201,9	764	238	441,3	0,54	71,7
15,8	217,7	792	266	524,3	0,51	80,2
16,3	234,0	800	274	540,9	0,51	82,6
16,3	250,3	796	270	540,9	0,50	81,4
15,8	266,1	796	270	524,3	0,51	81,4
16,3	282,4	794	268	540,9	0,50	80,8
	282,4				0,45	1268

Tableau K.9

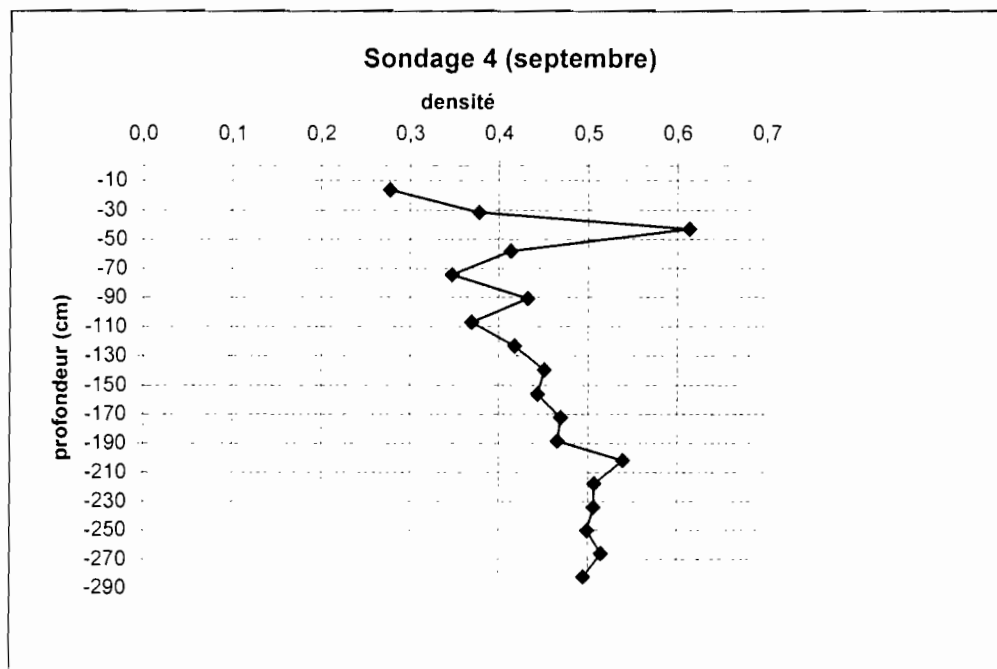


Figure K.6

Sondage 5 : altitude : 5700 m ; site : pied de la pente sud du Sommet Sud ; accumulation nette : 1225 mm d'eau (septembre 97)

L (cm)	L cum(cm)	Pb (g)	Pn (g)	Vol.(cm3)	D (g/cm3)	WE (mm)
15,3	15,3	645	119	507,7	0,23	35,9
16,3	31,6	681	155	540,9	0,29	46,7
12,3	43,9	678	152	408,2	0,37	45,8
16,3	60,2	702	176	540,9	0,33	53,0
16,3	76,5	716	190	540,9	0,35	57,3
16,3	92,8	712	186	540,9	0,34	56,1
14,3	107,1	711	185	474,5	0,39	55,8
14,3	121,4	732	206	474,5	0,43	62,1
16,3	137,7	750	224	540,9	0,41	67,5
15,8	153,5	740	214	524,3	0,41	64,5
15,8	169,3	753	227	524,3	0,43	68,4
14,3	183,6	740	214	474,5	0,45	64,5
13,3	196,9	756	230	441,3	0,52	69,3
13,3	210,2	752	226	441,3	0,51	68,1
80,0	290,2				0,51	409,7
	290,2				0,42	1225

Tableau K.10

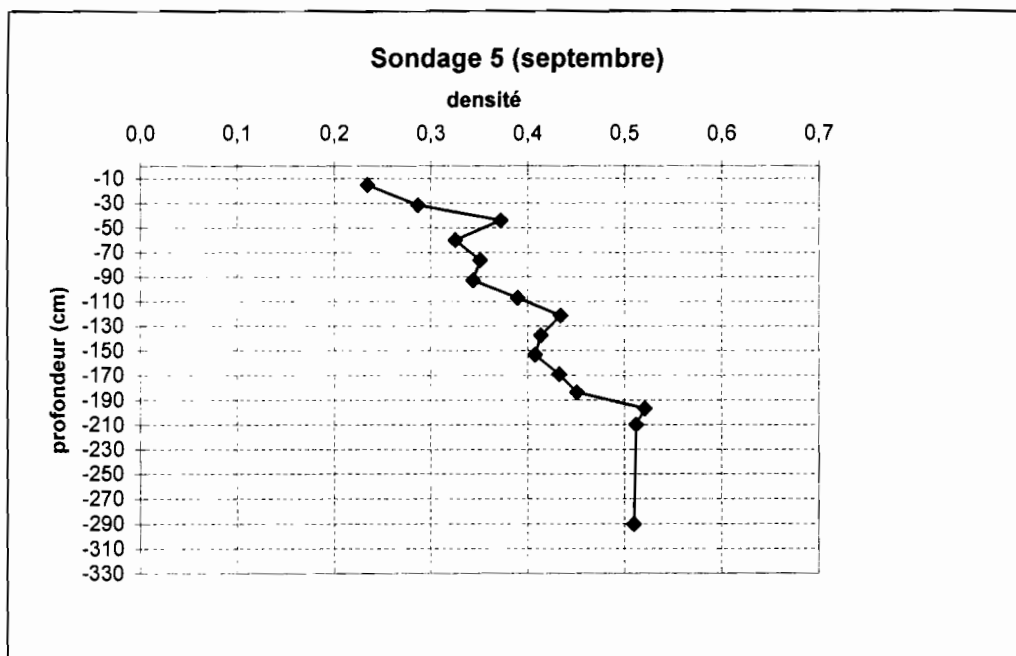


Figure K.7

Les densités moyennes obtenues sont plus faibles que celles de l'année dernière (tableau K.11), puisqu'en avril 1996 les densités moyennes à 5520 m étaient supérieures à 0,48 (rapport. N°55, p.105). La densité est plus faible à 5700 m qu'à 5520 m en mai et en septembre, et pour les puits 5 et 4 on note une augmentation de la densité entre mai et septembre.

Sites	5700 (5)		5520 (4)		5520 (2)		5520 (1)	
mois	05	09	05	09	05	09	05	09
densité	0.40	0.42	0.43	0.45	<i>0.46</i>		0.49	0.46
mm d'eau	1256	1225	1215	1267	<i>1130</i>		1541	1475

Chiffres en italique : les mesures densimétriques non pas été effectuées, on a retenu une densité de 0.46 constante dans tout le manteau neigeux.

Note : les numéros des puits sont indiqués entre parenthèses

Tableau K.11 : synthèse des densité moyennes et des accumulations nettes relevées sur les 4 sites de la zone supérieure du Glacier de Zongo

Comme l'année dernière (rapport. N°55, p.100) les valeurs de mai et septembre sont proches : la différence maximale est de 70 mm d'eau, soit 5%, et correspond au sondage 5520-1 de la station Campbell (figure K.8).

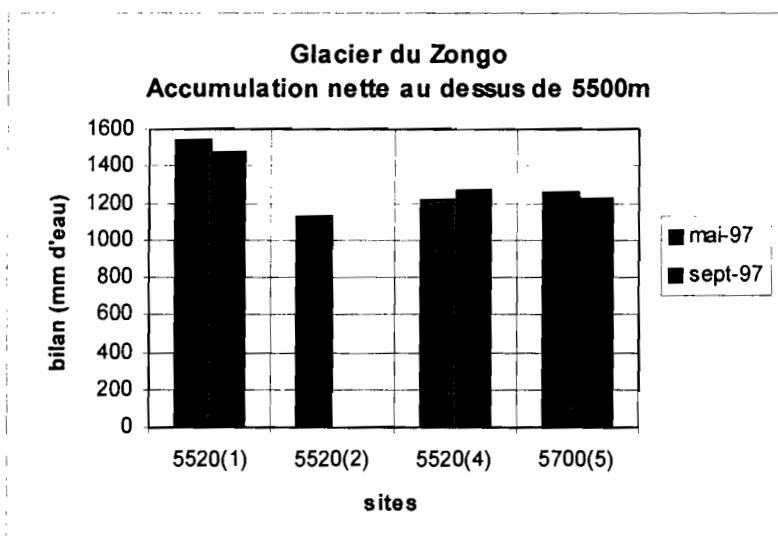


Figure K.8

K.2 Le bilan de masse du glacier

La figure K.1 présente le réseau de mesure utilisé (emplacements des balises et des sondages) afin de déterminer le bilan net du glacier pour l'année hydrologique 1996-97. En zone d'accumulation 4 sondages ont été effectués le 19 septembre 1997 (les mesures de ces sondages ont été présentées dans le chapitre K.1), et 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.

Lors des calculs de bilan de masse de 1991 à 1996, les mesures des balises du front du glacier (25, 27, 36) étaient appliquées aux secteurs 4900-5000m et 5000-5100m, celles des balises 4, 5, 7, 8,9, 10, 11 et 12 au secteur 5100-5200m, et celles des balises 1, 2, 04 et 03 au secteur 5200-5300m. Entre 5300 et 5500m, une interpolation linéaire était réalisée entre la valeur 5200-5300m et les sondages à 5520m. En fait cette méthode reposait sur des altitudes de balises non reliées au système topographique national (IGM). Au vue des mesures topographiques effectuées en septembre 1995, qui ont permis de corriger ces altitudes en les abaissant de 50 m, le calcul des bilans de masse doit être à présent effectué de la manière suivante :

1. 4850-5000 m : balises du front (25, 27, 36)
2. 5000-5100 m : balises 4, 5, 8, 9, 10, 7, 11, 12
3. 5100-5200 m : balises 1, 2 et 04
4. 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.
5. 5500-5600 m : moyenne des valeurs des sondages Campbell (5520 m) et Combe Est (5520 m)
6. 5600-5700 m : moyenne des valeurs 5500-5600 m et 5700-5800 m.
7. 5700-5800 m, 5800-5900 m et 5900-6000 m : mesure du sondage au pied de la voie des français à 5700 m.

La détermination de l'altitude de la ligne d'équilibre (ELA) à la fin de chaque 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 K.9, tableau K12).

Cette figure fait apparaître un gradient du bilan net selon l'altitude dans la zone d'ablation égal à environ 2000 mm d'eau par 100 m. Ce résultat est proche des gradients en zone d'ablation sur le glacier Lewis au Kenya ; égal à environ 2200 mm d'eau / 100 m en 1993 (Glacier Mass Balance Bulletin, 1994, p.40), et sur le glacier « 15 » de l'Antizana en Equateur ; égal à 2300 mm / 100 m en 1995 (Siemond et al., 1997, p.37).

En 1996-97 toutes les balises de Chacaltaya sont en zone d'ablation, et leur mesure fait apparaître un gradient de 700 mm d'eau / 100 m (Francou et al., 1998, chapitre 3), qui est une valeur proche des gradients observés dans les Alpes. En effet l'étude de la série de bilans de 1975 à 1996 sur quatre profils de la zone d'ablation du glacier d'Argentière à 1850, 2400, 2550 et 2700 m d'altitude (massif du Mont Blanc, France) a permis de calculer une sensibilité de $0,725 \pm 0,05$ m d'eau / 100 m (Sicart, rapport de DEA, 1997, p.20). Selon Kaser (1996) le gradient élevé du bilan net selon l'altitude observé sur les glaciers tropicaux est dû à l'apport continu d'énergie par chaleur sensible et aux faibles variations au cours de l'année des altitudes de la ligne de névé et de l'isotherme 0°C. La très petite taille du glacier de Chacaltaya (de superficie 3 fois plus faible que le glacier Lewis et 25 fois plus faible que le glacier du Zongo) explique sans doute son faible gradient du bilan pour un glacier tropical.

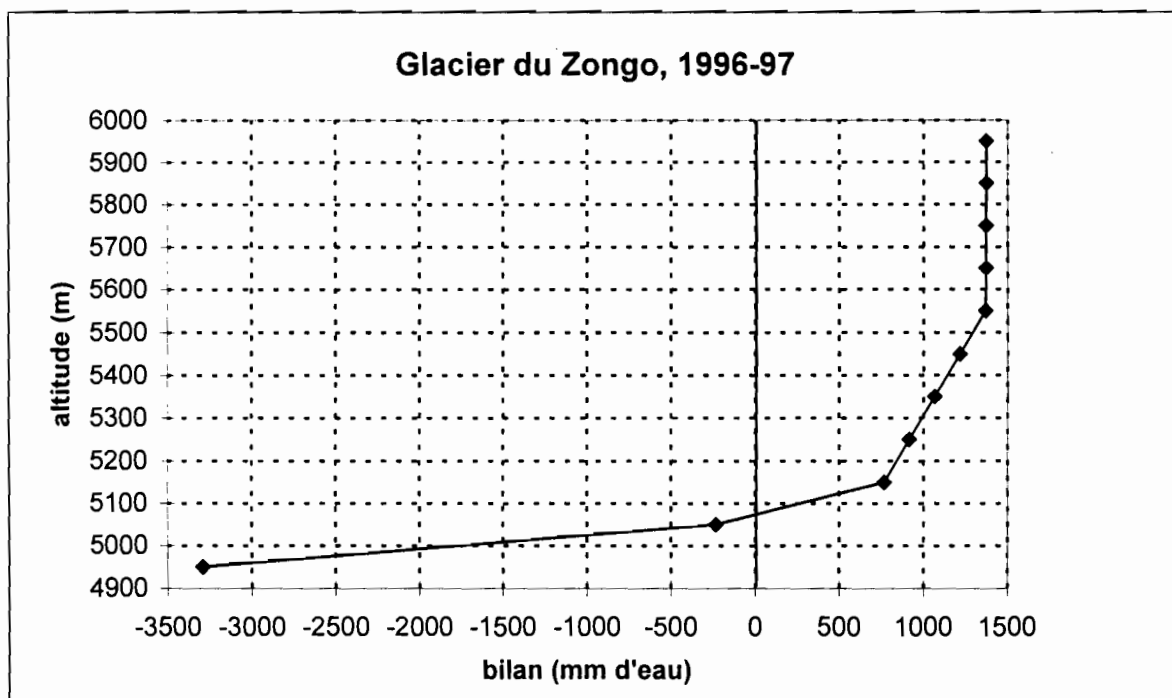


Figure K.9

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

Tableau K.12 : Bilan en fonction de l'altitude

La réévaluation des bilans de masse entraîne une augmentation des anciennes valeurs de 500 mm d'eau en moyenne pour les 5 années hydrologiques antérieures à 96-97 (augmentation comprise entre +350 et +600 mm) :

1. Les mesures des balises du front (plus fortes ablations mesurées sur le glacier) ne sont plus appliquées qu'au secteur 4900-5000 m.
2. Les secteurs 5000-5100 m et 5100-5200 m, les premiers concernés par les modifications du mode de calcul, représentent à eux seuls 25,5 % de la superficie totale du glacier.
3. L'interpolation effectuée entre 5200 et 5500 m amène une modification des bilans jusqu'à 5500 m.

Le tableau K.13 récapitule les données corrigées du glacier du Zongo. Le tableau K.14 permet une comparaison avec les données du glacier du Chacaltaya. En 1996 le bilan de masse du Zongo est le plus positif mesuré depuis le début du programme NGT (valeurs réévaluées), alors que pour le glacier du Chacaltaya le bilan est déficitaire (son bilan le plus élevé est celui de 1992-93).

Glacier du Zongo, récapitulatif depuis 1991 (valeurs réactualisées)

Année	Bn (1)	Σ Bn (2)	P (3)	A (4)	Q (5)	ELA (6)	AAR (7)	Term. (8)
	mm d'eau	mm d'eau	mm	mm	mm	m	%	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
Moyenne	-175		926	1101	1805			

Tableau K.13

Glacier de Chacaltaya, récapitulatif depuis 1991

Année	Bn (1)	Σ Bn (2)	P (3)	A (4)	ELA (6)	AAR (7)	Term. (8)
	mm d'eau	mm d'eau	mm	mm	m	%	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
Moyenne	-995		703	1974			

Tableau K.14

- (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.*
- (4) *Ablation spécifique ($A=P-Bn$)*
- (5) *Débit spécifique du 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*

La figure K.10 montre que les bilans du Zongo ont toujours été supérieurs à ceux de Chacaltaya, et que la différence entre ces bilans a augmenté de 1991 à 1997 (passant de 266 à 1456 mm d'eau). Cette accentuation de l'écart entre les bilans des deux glaciers se retrouve aussi sur la figure K.11, représentant les évolutions des bilans spécifiques cumulés des deux glaciers depuis 1991. Ainsi en 6 années hydrologiques, le glacier du Chacaltaya accuse une perte de masse cumulée 6 fois plus importante que celle du glacier du Zongo. On peut évoquer plusieurs éléments d'explication à ces évolutions différentes :

- Les réseaux de mesures ont été amélioré au fil du programme, en particulier en ce qui concerne les mesures en zone d'accumulation du glacier du Zongo.

- Le glacier de Chacaltaya reçoit en moyenne 200 mm d'eau en moins que le glacier du Zongo (tableaux K.13 et K.14), car il est plus éloigné de la source d'humidité située en Amazonie.

- La réduction importante de la taille du glacier de Chacaltaya depuis 1982 accentue l'importance du rayonnement réfléchi par les parois rocheuses environnantes. De plus, la haute altitude à laquelle s'est maintenue la ELA ces dernières années (au dessus de 5300 m depuis 1993) a placé la plus grande partie de ce glacier en zone d'ablation.

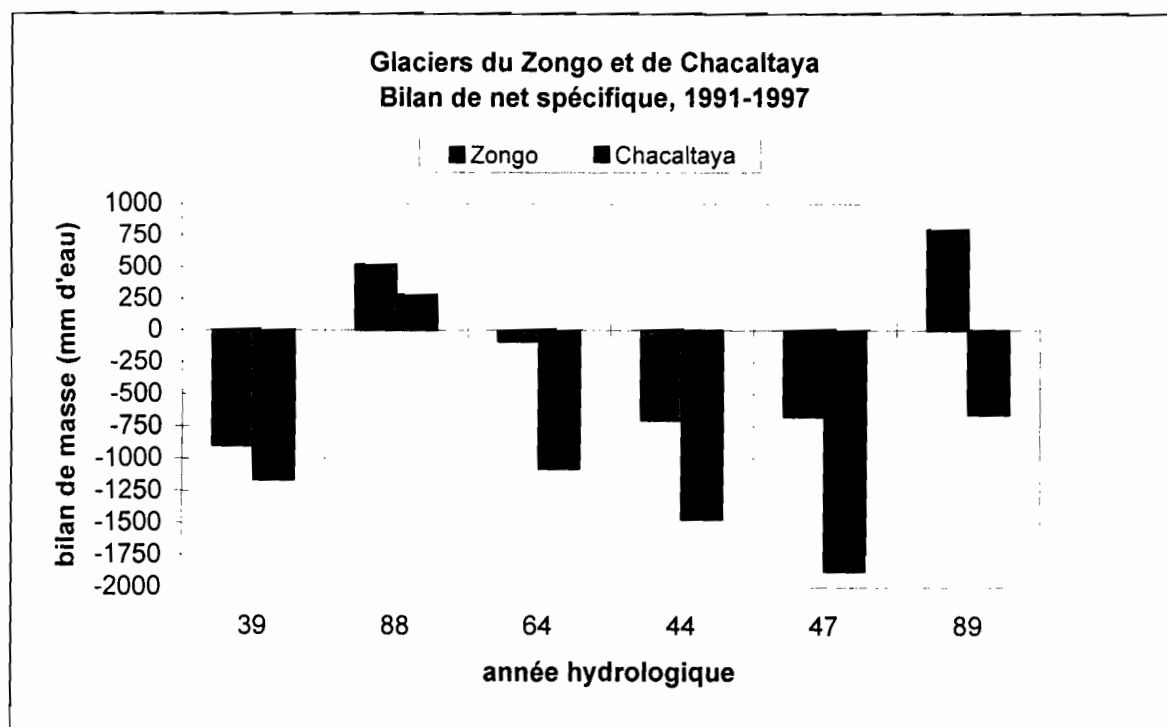


Figure K.10

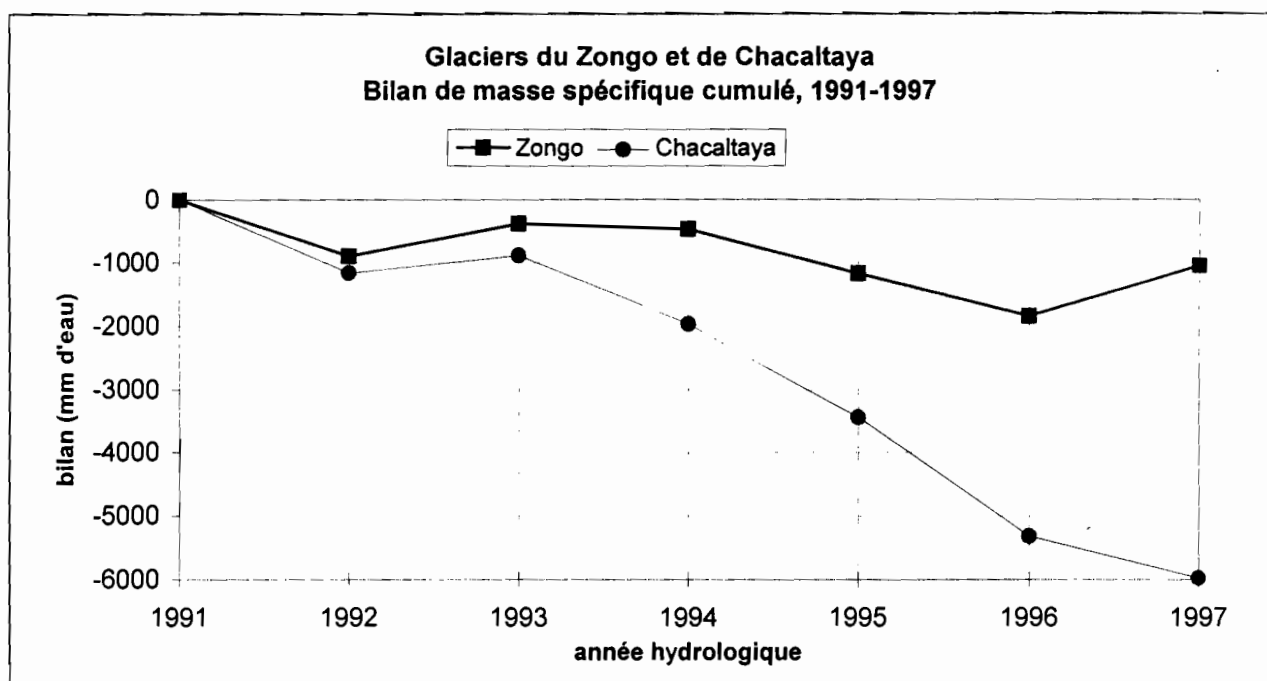


Figure K.11

La réévaluation des bilans de masse du Zongo entraîne une baisse de la ELA₀ de 100 m (la nouvelle ELA₀ est de 5250 m : figure K.12 et rapport. N°55, p.111). La pente de la droite interpolant la variation de l'altitude de la ligne d'équilibre selon le bilan de masse est de - 0.27 m/mm d'eau ($R^2=0,97, n=6$).

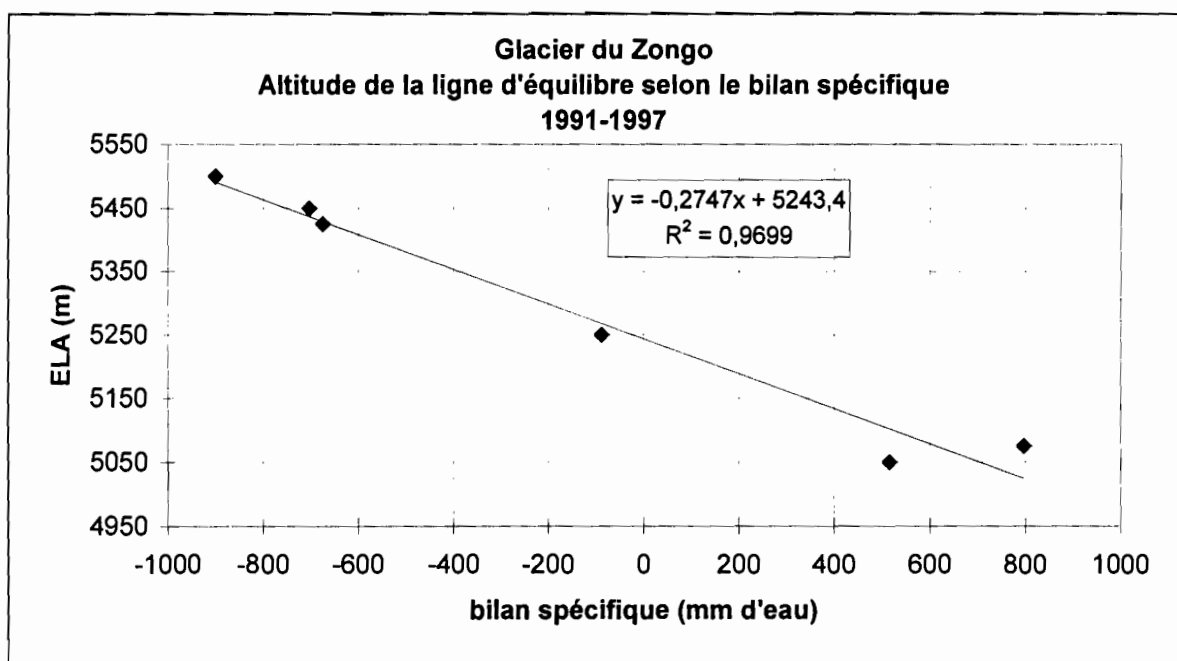


Figure K.12

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 K.13), résultat similaire au glacier Chacaltaya (Francou et al., chap. 3.6). Ainsi en état d'équilibre stationnaire, les bilans par unité de surface dans la zone d'accumulation sont en valeurs absolues deux fois plus faibles que ceux de la zone d'ablation. Considérons les bilans nets pondérés par les surfaces pour une année proche de l'état d'équilibre (1993-94, $B_n = -88$ mm d'eau, $AAR = 64\%$, tableau K.12), on calcule :

- en zone d'ablation : le bilan moyen est de -135 mm d'eau / m²

- en zone d'accumulation : le bilan moyen est de +40 mm d'eau / m²

Le rapport entre les deux valeurs est supérieur à 3 : a) le bilan net de 1993-94 n'est pas nul, mais négatif, b) l'échantillonnage des mesures n'est pas le même en zone d'ablation et en zone d'accumulation (beaucoup moins de points de mesures sont effectués en zone d'accumulation), et c) il faudrait intégrer les transferts de matière de la zone haute vers la zone basse (on peut noter que l'année précédente le bilan net était positif : + 516 mm d'eau).

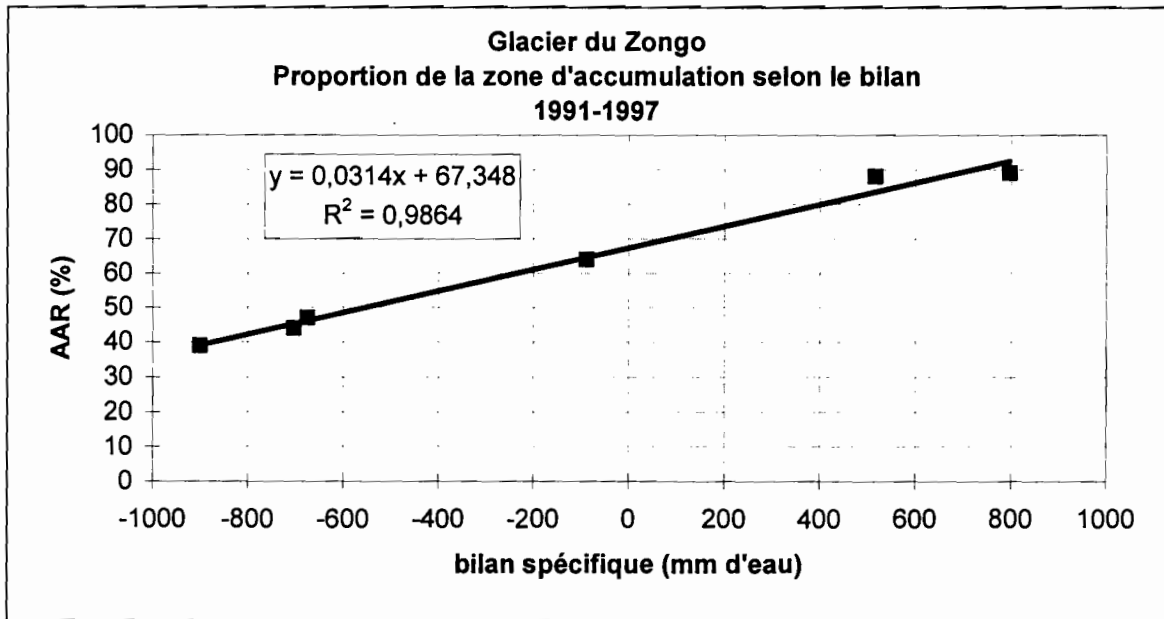


Figure K.13

K.3 Comparaison entre bilan net spécifique et débit spécifique

La réévaluation des bilans masse par le nouveau mode de calcul amène une augmentation de la différence entre débit du torrent émissaire et ablation sur le glacier (Q-A), différence toujours positive depuis 1991 (tableau K.13). Ainsi en 1996-97 la différence (Q-A) est la plus élevée de la série : 1144 mm d'eau, alors qu'en moyenne depuis 1991 elle est de 703 mm d'eau. Or si on admet une sublimation non négligeable sur le glacier, l'ablation doit être supérieure au débit.

Les mesures présentées dans le tableau K.13 sous-estiment les précipitations sur le bassin versant dans son ensemble à cause : a) des effets de site (chapitre E.2.1), et b) des emplacements des pluviomètres totalisateurs, qui sont situés dans la partie basse du bassin en dessous de 5200 m d'altitude (si on admet une augmentation des précipitations avec l'altitude). Ainsi la sous-estimation de l'ablation spécifique est sans doute due en partie à la sous-estimation des précipitations par les pluviomètres. En partie seulement puisqu'en 1992-93, année de précipitations très proches de 1996-97 (10 mm d'eau de différence), la différence (Q-A) est presque deux fois plus faible que le maximum de 1996-97 en raison d'un bilan net et d'un débit plus faibles (tableau K.13).

D'autre part une étude critique des calculs des bilans de masse sur le glacier du Zongo a montré que le bilan net spécifique est sans doute surestimé d'une centaine de millimètres d'eau (donc $A=P-B_n$ sous-estimé) et que l'incertitude sur le bilan net pouvait atteindre ± 250 mm (Sicart, 1996, p.30). Ainsi la différence entre les bilans nets de 1992-93 et de 1996-97 serait de l'ordre de grandeur de l'incertitude sur les calculs.

K.4 Topographie

Cette année la topographie a été réalisée par le cabinet *Jaime Cari Silva* (financement de la COBEE) au début du mois de novembre 1997. Les points d'appui de la polygonale sont les mêmes que ceux des mesures topographiques de septembre 1996 (Cf. tableau K.15).

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	50005.752	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	pylone de HT

Tableau K.15 : Coordonnées des points de la polygonale du Glacier du Zongo (valeurs de 95)

- **Le recul du glacier (1991-97).**

Afin d'estimer les fluctuations du front du glacier, on a prolongé des limites du front en 1991 jusqu'aux limites de novembre 97 puis mesuré sur la carte 1/2500, les 11 segments des mesures de l'année précédente (rapport N°55, p.115). Par moyenne des 11 mesures, on obtient une estimation du recul cumulé du front depuis 1991 (tableau K.16, figures K.14 et K.15). Le recul cumulé mesuré depuis 1991 est de 55,2 m, soit 9,2 m/an en moyenne. Le plus fort recul annuel mesuré est celui du cycle 1996-97, soit 15,6 m.

Si on considère une épaisseur de glace moyenne d'environ 20 mètres sur les 50 premiers mètres du glacier à partir du front, et une périphérie extérieure de 320 m entre les points de référence des mesures des fluctuations du front ($X = 820150$, $Y = 592900$ / $X = 8200450$ et $Y = 592900$), un recul cumulé de 55 m correspond à une perte de 15 cm d'eau sur l'ensemble du glacier. La perte cumulée du glacier est de 1 m d'eau depuis 1991 (figure K.11). Ainsi selon ce calcul élémentaire le recul du front depuis 1991 représente environ 15% des pertes de masse cumulées du glacier.

On note que reculs du front et bilans nets spécifiques évoluent de façon non corrélées. Le recul enregistré cette année est le plus important depuis 1991, alors que le bilan est le plus positif de la série. Cela peut être lié à l'amincissement de la langue terminale suite aux bilans négatifs de ces dernières années, ainsi que peut être à une baisse des vitesses de la glace au front (point qui serait à vérifier).

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

Tableau K.16 : Mouvements du front du Glacier du Zongo entre août 1991 et novembre 1997 (moyennes des 11 mesures réparties le long du front du glacier)

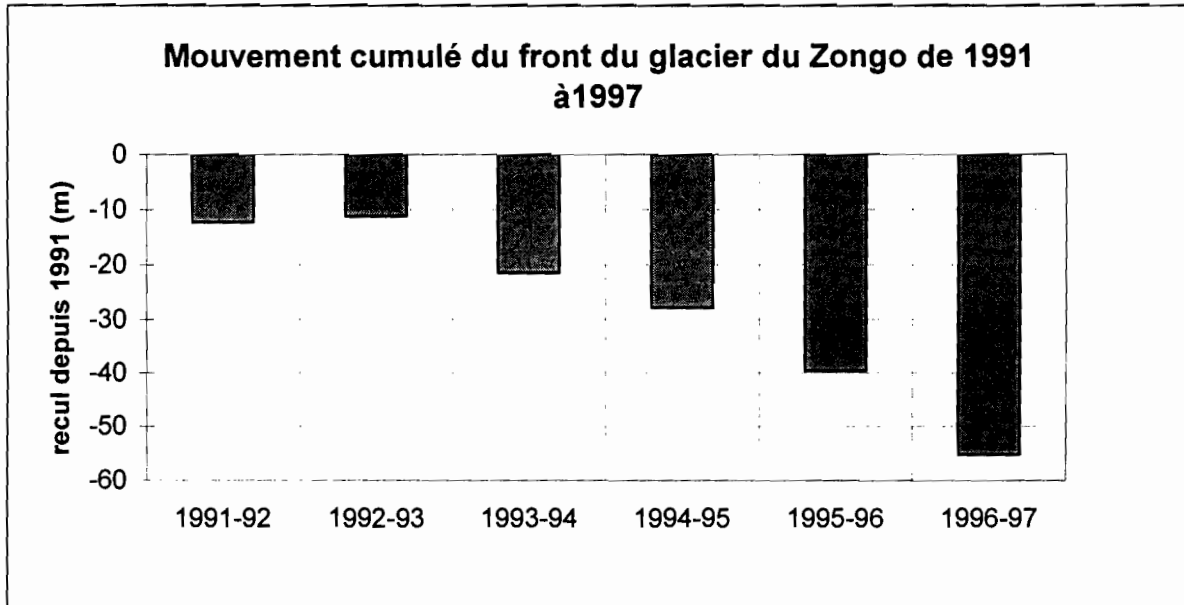


Figure K.14

Glacier du Zongo : fluctuations du front de 1991 à 1997

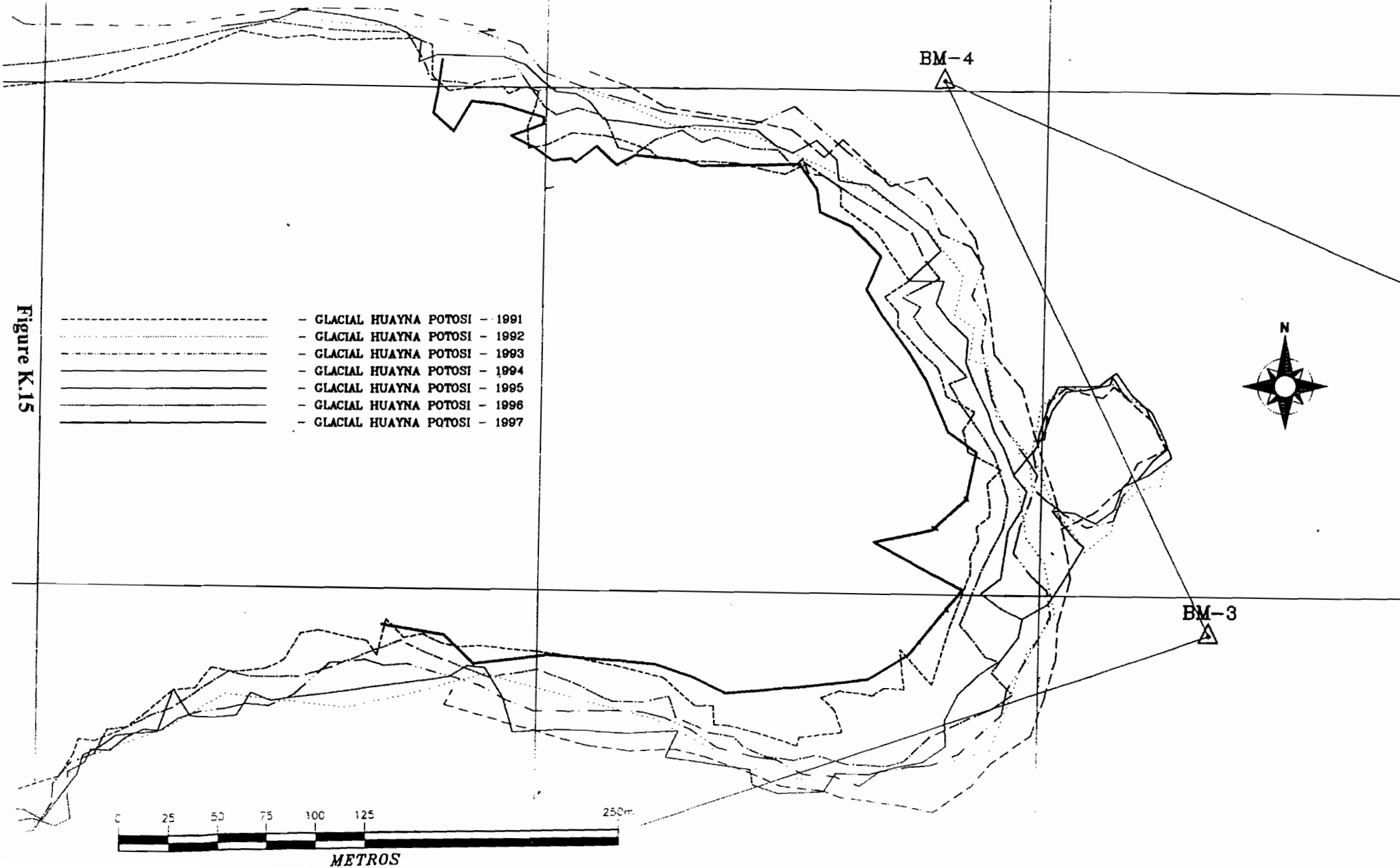


Figure K.15

L. CONCLUSION

L'année hydrologique 1996-97 est caractérisée par le bilan de masse du glacier du Zongo et les précipitations dans le bassin versant les plus élevés mesurés depuis le début du programme « Neige et Glaciers Tropicaux » en 1991 (tableau K.13). En particulier les fortes précipitations de la saison des pluies sont associées à de faibles débits, modérant l'effet saisonnier de l'écoulement annuel (chapitre G).

Cette année, le dispositif de mesure réparti sur le bassin versant du glacier n'a pas été élargi (chapitre B). Depuis la perte des mesures de février à septembre 1997, une carte magnétique est utilisée pour récupérer les données de la station Mévis (4750 m), mais la présence d'eau dans la coupole du pyranomètre perturbe toujours les mesures. La série de mesures du limnigraphe à 4830 m comprend de longues périodes de lacunes, environ 60 jours au total, liées à des problèmes d'appareillage et aux travaux effectués par la COBEE en août 1997. Sur la station Campbell 21X à 5150 m, le pyranomètre orienté vers le ciel doit être changé à cause d'une trop faible étendue de mesure (chapitre F.2.1). La station Campbell qui fonctionnait à 5025 m depuis le 25 juillet 1996, a été installée à la fin du mois d'octobre 1996 sur le glacier « 15 » de l'Antizana (Equateur). A 5550 m, les perturbations et les lacunes des mesures de la station Campbell ont été le plus souvent liées à l'enfouissement des capteurs sous la neige (chapitre C.2.3).

Au vue des résultats des mesures topographiques du front du glacier en septembre 1995, une nouvelle méthode de calcul des bilans de masse a été adoptée. La réévaluation des anciens résultats amène en moyenne sur les bilans de masse des 5 premières années une augmentation de 500 mm d'eau (chapitre K.2).

La principale modification du dispositif de mesure intervenue à la suite de l'année hydrologique 96-97 concerne la station Campbell à 5550 m, qui a été complétée en décembre 1998 par un deuxième psychromètre et une batterie 12V/100A couplée à un panneau solaire, destinée à assurer une alimentation continue aux moteurs de ventilation des thermocouples.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Berthier E., 1998 - Reconstitution des débits de 3 bassins glaciaires des Andes boliviennes. *Rapport de stage de Magistère*.
- Berton P., Wagnon P., Francou B., Pouyaud B., Baldivieso H., 1997 - Mesures météorologiques, hydrologiques et glaciologiques sur le glacier Zongo, année hydrologique 95/96. *Rapport n°55, ORSTOM-Bolivie*.
- Francou B., Ramirez E., Mendoza J., Guereca J., Miranda G., Noriega L., 1998 - El Glaciar de Chacaltaya, investigaciones glaciologicas (1991-1997). *Informe n°56, ORSTOM-Bolivie*.
- Guyot G., 1995 - Chapitre VII :la mesure des facteurs climatiques, *Rapport INRA, Bioclimatologie*.
- Hastenrath S., 1978 - Heat-budget measurements on the Quelccaya ice cap, Peruvian Andes. *Journal of glaciology*, 20, 82, 85-97.
- Kaser G., Hastenrath S., Ames A., 1996 - Mass balance profiles on tropicales glaciers, *Zeitschrift fur Gletscherkunde und Glazialgeologie, Innsbruck*.
- Lliboutry L., 1965 - Traité de glaciologie, *Masson, 2 tomes*.
- Organisation Météorologique Mondiale, 1991 - Guide des instruments et des méthodes d'observation météorologiques, *Cinquième édition, Genève, O.M.M. N°8*.
- Paterson W.S.B., 1994 - The Physics of glaciers, *Pergamon Press*.
- Queney P., 1974 - Eléments de Météorologie, *Masson, Paris*.
- Ribstein P., Tiriau E., Francou B., Saravia R., 1995 - Tropical climate and glaciary hydrology : a case study in Bolivia. *Journal of Hydrology* 165, 221-234.
- Rigaudière P., Ribstein P., Francou B., Pouyaud B., Saravia R., 1995 - Mesures météorologiques, hydrologiques et glaciologiques sur le glacier Zongo, année hydrologique 93/94. *Rapport n°43, ORSTOM-Bolivie*.
- 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., 1996 - Optimisation d'un réseau de balises afin d'estimer le bilan de masse, Glacier Zongo, Cordillère Royale de Bolivie. *Projet de fin d'étude de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne*.
- Sicart J.E., 1997 - Bilans de masse glaciaire au cours du « Petit Age de Glace ». *Rapport de DEA « Climat et physico-chimie de l'atmosphère », Grenoble*.
- Siemond H., Francou B., Ayabaca E., De la Cruz A., Chango R., 1997 - El glaciar 15 del Antizana (Ecuador), Investigaciones glaciologicas 1994-1997, *Rapport ORSTOM-Equateur*.

Viton P., 1970 - Pluviomètres et pluviographes utilisés par la Météorologie Nationale, in *Techniques d'Etude des Facteurs Physiques de la biosphère, Institut National de la Recherche Agronomique, Paris (France), I.N.R.A. Pub. 70-4.*

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

Wagnon P., Ribstein P., Francou B., Pouyaud B., soumis - The annual cycle of the energy balance of a bolivian glaciari, implications on tropical glaciology. *Journal of Geophysical Research.*

World Glacier Monitoring Service, 1994 - Glacier Mass Balance Bulletin N°3 (1992-1993). *IAHS (ICSI), UNEP, UNESCO.*