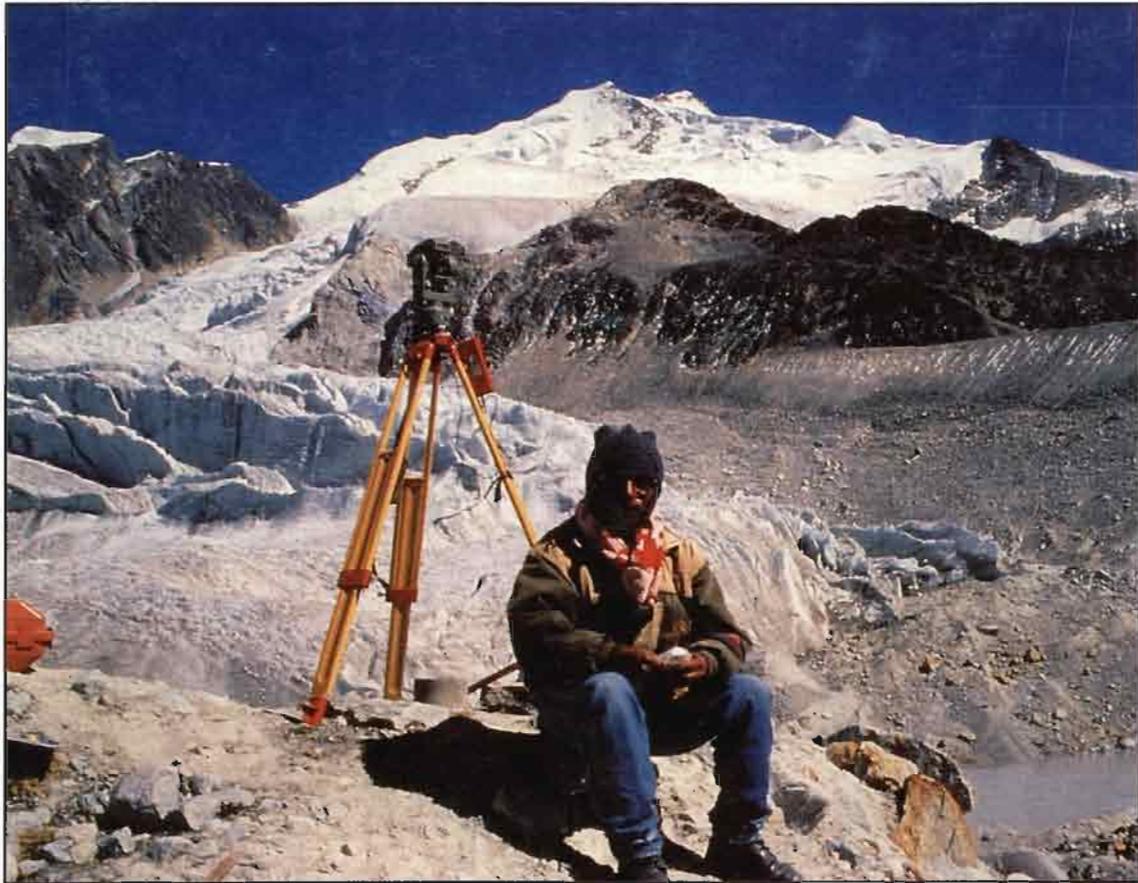


INFORME 55

ORSTOM - BOLIVIE



Topografía del Glaciar de Zongo (1996)

MESURES METEOROLOGIQUES, HYDROLOGIQUES & GLACIOLOGIQUES SUR LE GLACIER DE ZONGO ANNEE HYDROLOGIQUE 1995 - 96

P. BERTON (ORSTOM)

P. WAGNON (ORSTOM)

B. FRANCOU (ORSTOM)

B. POUYAUD (ORSTOM)

H. VALDIVIESO (COBEE)

JANVIER 1997

SOMMAIRE

A. INTRODUCTION	1
B. INVENTAIRE DE L'EQUIPEMENT DU GLACIER	2
<i>B.1 Station pluviométrique à 4750 m</i>	2
<i>B.2 Station météorologique à 4750 m</i>	2
<i>B.3 Station hydrologique à 4830 m</i>	4
<i>B.4 Station météorologique à 5025 m</i>	4
<i>B.5 Stations météorologiques à 5150 m</i>	6
<i>B.6 Station météorologique à 5550 m</i>	11
<i>B.7 Mesures réalisées sur la moraine</i>	12
<i>B.8 Mesures réalisées lors des missions ponctuelles sur le glacier</i>	13
<i>B.9 Conclusion</i>	15
C. TEMPERATURES DE L'AIR	17
<i>C.1 Températures instantanées</i>	17
C.1.1 Températures ventilée et non-ventilée à 5150 m, sur glacier	17
C.1.2 Températures à 5150 m, sur et hors glacier	25
<i>C.2 Températures journalières</i>	28
C.2.1 Températures journalières sous abri, non-ventilées à 4750 m	28
C.2.2 Températures journalières ventilées à 5025 et 5150 m	28
C.2.3 Températures journalières non-ventilées à 5150 et 5550 m	29
C.2.4 Températures journalières non-ventilées à 4750 et 5150 m, hors glacier	30
C.2.5 Récapitulatif des gradients et comparaison avec les années antérieures	33
C.2.6 Températures journalières ventilées et non-ventilées à 5150 m	34
<i>C.3 Températures minimales et maximales journalières</i>	35
C.3.1 Minima et maxima à 4750 m	35
C.3.2 Minima et maxima à 5150 m, sur glacier	37
C.3.3 Minima et maxima à 5550 m, sur glacier	38
<i>C.4 Températures mensuelles et annuelles</i>	39
C.4.1 Valeurs mensuelles	39
Comparaison avec les années précédentes	41
C.4.2 Valeurs annuelles	42
D. TEMPERATURES DANS LE MANTEAU NEIGEUX ET LA GLACE	43
<i>D.1 Valeurs instantanées</i>	43
D.1.1 Thermocouples 21X	43
D.1.2 Thermocouples CR10	47
<i>D.2 Conclusion</i>	50

E. PRECIPITATIONS	51
E.1 Valeurs journalières	51
E.2 Valeurs mensuelles et annuelles	52
E.2.1 Pluviomètre totalisateurs	52
E.2.2 Gradients pluviométriques	54
F. BILAN RADIATIF	55
F.1 Rappels	55
F.2 Valeurs maximales enregistrées	55
F.2.1 Etude de la radiation solaire incidente maximale journalière	56
F.3 Valeurs journalières	57
F.3.1 Albédo	57
F.3.2 Radiation solaire incidente	59
F.3.3 radiation nette	60
F.4 Valeurs mensuelles	62
F.4.1 Radiation nette et albédo mensuels	62
F.4.2 Radiations solaires incidente et réfléchie mensuelles	64
F.5 Durées avec la radiation solaire incidente supérieure à un seuil	65
G. DEBITS	68
G.1 Valeurs instantanées	68
Débits extrêmes instantanés	69
G.2 Valeurs journalières	69
G.3 Valeurs mensuelles et annuelles	72
G.3.1 Débits mensuels	72
G.3.2 Débits annuels	73
Bilan hydrologique	73
G.4 Etude statistique	73
G.4.1 Corrélations multiples	73
G.4.2 Autocorrélation	75
H. PRESSION DE VAPEUR D'EAU	77
H.1 Valeurs instantanées	77
H.2 Valeurs journalières	82
H.2.1 Comparaison entre 4750 et 5150 m	82
H.2.2 Comparaison entre 5025 et 5150 m	83
H.3 Valeurs mensuelles	85
H.4 Conclusion	86
I. VITESSE ET DIRECTION DU VENT	87
I.1 Vitesse du vent	87
I.1.1 Valeurs instantanées	87
I.1.2 Valeurs journalières	88
I.1.3 Valeurs mensuelles	90
I.2 Direction du vent	91
I.3 Conclusion	91

J. MESURES DE LA SONDE A ULTRASON	92
<i>J.1 Ablation / Accumulation à 5150 m</i>	92
<i>J.2 Conclusion</i>	93
K. GLACIOLOGIE	94
<i>K.1 L'accumulation</i>	94
L'accumulation mesurée en fin de saison des précipitations	94
L'accumulation de fin d'année hydrologique	100
<i>K.2 Le bilan de masse du glacier</i>	106
<i>K.3 Comparaison entre le bilan net spécifique et débit spécifique</i>	114
<i>K.4 Topographie</i>	115
<i>K.5 Conclusion</i>	117
L. CONCLUSION	118
<i>Bibliographie</i>	119

A. INTRODUCTION

Ce rapport est la mémoire des mesures réalisées durant l'année hydrologique 95/96 (du 01-sept-95 au 31-août-96) sur le glacier du ZONGO. Il reprend le plan des précédents rapports (rapports ORSTOM n°43 et n°49), à savoir une présentation du dispositif de mesure mis en oeuvre cette année, et une présentation critique des mesures de chacun des paramètres enregistrés.

• Situation

Nom du glacier : Zongo.

Pays : Bolivie.

Position : Huayna Potosi - Cordillère Royale.

Coordonnées : 16°15'S 68°10'W.

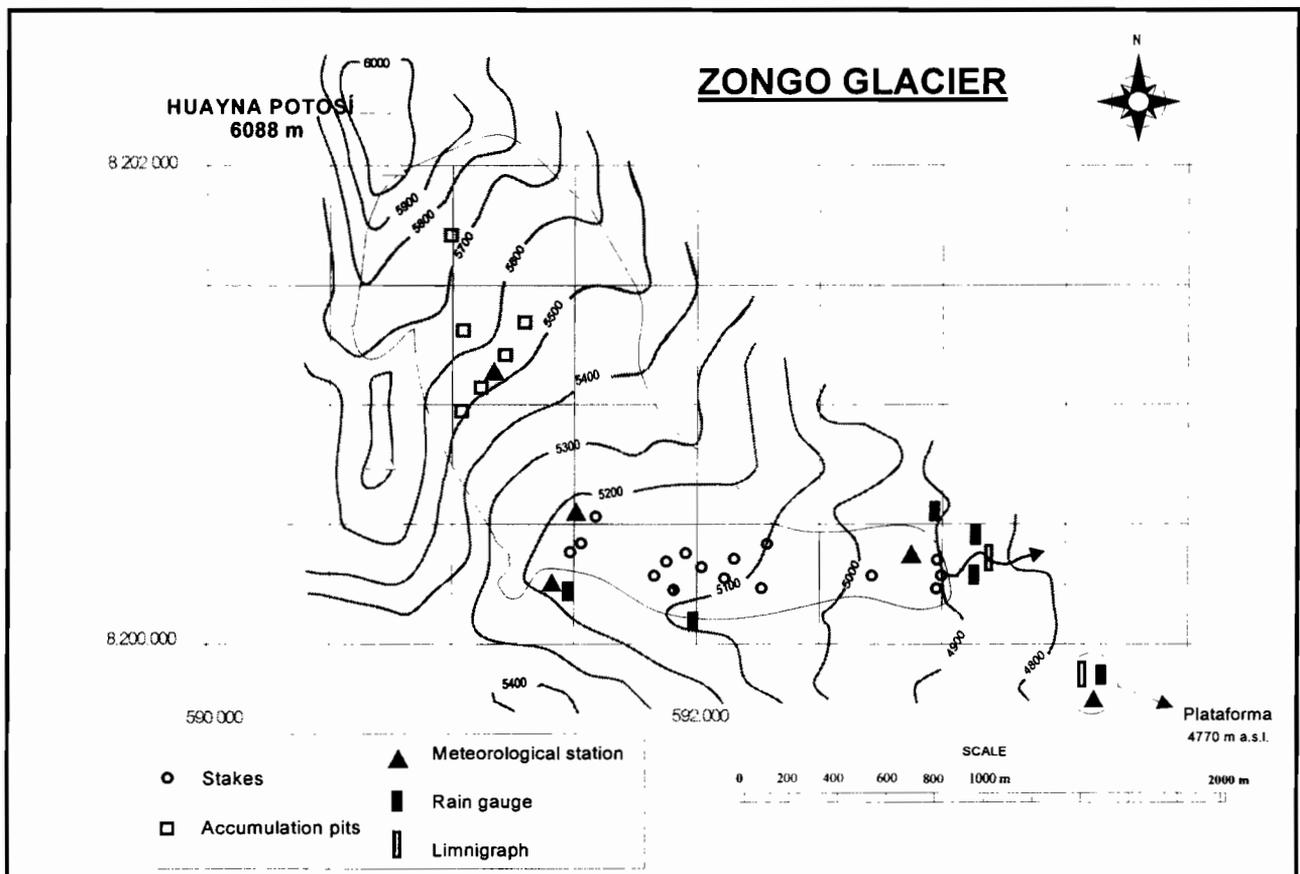
Surface du bassin versant étudié : 3 km².

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.



Glacier en 1996 et emplacement du réseau de balises, des puits à neige et des stations (d'après Sicart, 1996, modifié).

B. INVENTAIRE DE L'EQUIPEMENT DU GLACIER

Nous présentons ici tout le dispositif de mesures météorologiques et hydrologiques dont nous avons disposé cette année sur le glacier du Zongo.

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

Nous disposons de données pluviométriques à la plateforme Zongo située à environ 150 mètres (en dénivelée) du front du glacier à 4750 mètres d'altitude.

• Descriptif

Il existe le dispositif de mesure 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.

2. Un pluviomètre totalisateur relevé chaque mois.

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

• Données recueillies

1. Pluie journalière à 4750 mètres, plus des observations (heure des précipitations, type de temps).

2. Pluie mensuelle à 4750 mètres.

• Lacunes dans les données

Aucune lacune n'est à déplorer cette année.

B. 2. Station météorologique à 4750 mètres

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

B. 2.1. Thermographe à bande papier

• Données recueillies

Nous disposons de la mesure de la température de l'air enregistrée en continu. Nous exploitons uniquement sa moyenne journalière. Néanmoins les données instantanées sont disponibles.

• Lacunes

Aucune lacune n'est à déplorer cette année.

B. 2.2. Station MEVIS

• Descriptif

Il s'agit d'une station météorologique THIES-CLIMA (Allemagne) modèle : DL15 V2.00 qui possède les capteurs suivants:

1. Sonde de température située à 190 cm du sol (marque : *Thies*, référence : *Hygro-Thermogeber, 1.1005.51.515*).

2. Sonde d'humidité relative située à 190 cm du sol (marque : *Thies*, référence : *Hygro-Thermogeber, 1.1005.51.515*).

3. Pluviomètre à augets basculeurs situé à 200 cm du sol (marque : *Thies*, référence : *Niederschlagsgeber, 5.4032.30.007*, intensité maximale : 7 mm par min, sensibilité : Une impulsion par 0,1 mm d'eau).

4. Pyranomètre courtes longueurs d'ondes situé à 155 cm du sol, orienté vers le ciel (marque : *Thies*, référence : *Pyranometer CM3, 7.1415.03.000*).

5. Anémomètre situé à 230 cm du sol (marque : *Thies*, référence : *Windgeber 4.3303.10.007*).

6. Sonde de température, Pt 100 située à - 1 mètre dans le sol (marque : *Thies*, référence : *Temperaturgeber, 2.1235.00.000*).

L'alimentation en énergie est assurée par une batterie 12,5 V couplée avec un panneau solaire (3W).

• Données recueillies

Nous disposons des moyennes demi-horaires et journalières suivantes :

1. La température sèche de l'air à 190 cm du sol.
2. L'humidité de l'air à 190 cm du sol.
3. Précipitations et de leurs intensités.
4. La radiation solaire incidente.
5. La vitesse du vent à 230 cm du sol.
6. La température du sol.
7. La température humide de l'air
8. L'évaporation.

• Lacunes dans les données

Aucune lacune n'est à déplorer cette année. Seuls des problèmes de déstockage des données, à partir du 08/03/96, nous ont obligés à calculer « manuellement » la température humide de l'air et l'évaporation à partir des autres données. Le programme de la station ne l'ayant pas fait automatiquement, comme prévu.

B. 3. Station hydrologique à 4830 mètres

Cette station est située à environ 70 mètres en dénivelée et à 250 mètres en distance du front du glacier.

B. 3.1. Station limnimétrique

• Descriptif

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

• Données recueillies

Nous disposons du débit instantané du torrent émissaire du glacier.

• Lacunes dans les données

Nous constatons quatre périodes de lacunes cette année :

- du 26/09/1995 à 17h40 au 03/10/1995 à 9h30
- du 31/01/1995 à 8h50 au 05/02/1996 à 9h08
- du 23/02/96 à 0h00 au 01/03/96 à 13h55

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 classique 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).

• Données recueillies

Pluie mensuelle à 4850 mètres.

• Lacunes dans les données

Aucune lacune n'est à déplorer cette année.

B. 4. Station météorologique portable à 5025 mètres

Cette station est située dans la partie terminale du glacier, côté « rive gauche », au milieu des énormes crevasses caractéristiques du front du glacier. Cette station a été mise en place le 25/07/96, pour une durée indéterminée. Du fait de son statut (station « portable »), elle sera amenée à changer de place, voire de glacier dans l'avenir, à l'occasion de mission ponctuelle.

• Descriptif

Il s'agit d'une station de mesure CR 10 - CAMPBELL (GB) qui possède 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'ondes 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'ondes 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 : Les hauteurs des différents capteurs sont évidemment variables au cours de la saison (ablation/accumulation). Les hauteurs citées ci-dessus sont celles du jour de leur installation. Ces hauteurs sont ensuite régulièrement relevées lors des visites de routine (tous les 15 jours). De plus, les capteurs sont « montés » ou « descendus » au cours de la saison.

Cette remarque vaut pour toutes les autres stations installées sur le glacier.

Le temps de scrutation est de 15 secondes. Elle 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. Il ne faut donc pas oublier que la nuit et les journées de nébulosité importante, les températures enregistrées ne sont pas ventilées. La validité des mesures, dans ces conditions et en particulier pour la température humide, est à considérer avec précaution.

• 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.

Ainsi que les 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.

Et les minima journaliers des températures sèches et humides, hautes et basses, ainsi que de 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	60	195	110	240
08/08/96	avant : 70 après : 60	avant : 205 après : 195	avant : 120 après : 110	avant : 250 après : 240
14/08/96	avant : 102 après : 65	avant : 237 après : 200	avant : 152 après : 115	avant : 282 après : 245
17/09/96	avant : 140 après : 70	avant : 275 après : 205	avant : 190 après : 120	avant : 320 après : 250

• Lacunes dans les données

Les lacunes concernent les données de la girouette. Ce capteur est hors d'usage. Par ailleurs, aucune lacune n'est à déplorer.

B. 5. Stations météorologiques à 5150 mètres

A cette altitude, deux stations de mesures météorologiques sont en place. L'une datant du 06/09/95 (la « 21X ») et l'autre du 25/03/96 (la « CR10 »). Elles sont situées toutes les deux au même endroit sur le glacier (voir plan de situation).

B. 5.1. Station Campbell 21X

• Descriptif

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

1. Un hygrothermomètre 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, gamme de longueurs d'ondes mesurée : de 0,25 à 60 µm)

2. Un hygrothermomètre situé à 180 cm du sol (*mêmes caractéristiques que le précédent*)

3. Un bilanmètre situé à 80 cm du sol. (marques : REBS, références : Q-6 net radiometer)

4. Un pyranomètre courtes longueurs d'ondes dirigé vers le ciel, situé à 80 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 80 cm du sol. (*mêmes caractéristiques que le précédent*)

6. Une girouette située à 220 cm du sol.

7. Un anémomètre situé à 40 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 220 cm du sol (marques : Wales)

9. Une sonde à neige pour connaître en continu l'ablation ou l'accumulation sur le site de mesure. Et donc pour connaître chaque jour la hauteur des capteurs (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 temperature probe*, précision : < ± 0.4 °C)

Le temps de scrutation est de 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 la journée. De fait, l'autonomie est "quasiment infinie". (en énergie, pas en stockage)

• Modifications survenues au cours de l'année hydrologique

Hauteurs des capteurs :

La dernière modification a eu lieu le 25/03/96, où les deux hygro-thermomètres ont été relevés. Ensuite, les différents capteurs sont restés fixes les uns par rapport aux autres.

jour	hygro-thermomètre bas (cm)	hygro-thermomètre haut (cm)	anémomètre bas (cm)	anémomètre haut (cm)	bilanmètre (cm)	pyranomètre (cm)
14/09/95	15	165	43	223	82	87
05/02/96			40		82	85
01/03/96	0	150	25	200	60	65
25/03/96	avant : -20 après : 30	avant : 130 après : 180	5 non modif.	180 non modif.	40 non modif.	45 non modif.
27/05/96	40	190	15	190	50	55
30/05/96	60	210	45	225	80	85
01/07/96	92	238	70	248	105	110
25/08/96	150	300	130	310	165	170
12/09/96	140	290	115	300	160	165

Autres :

Le 22/08/96, l'anémomètre « bas » a été placé à coté de l'anémomètre « haut » (à 220 cm du sol) afin d'étudier la corrélation de leur mesure. Un autre anémomètre a été placé en lieu et place de ce dernier, il est géré par la station CR10 (anémomètre de marque *Met One*, modèle : *014A*, précision : < ± 1.5 %). Ce changement est prévu pour une durée d'un mois, ensuite l'anémomètre « bas » retrouvera sa place à 40 cm du sol à côté du troisième anémomètre.

• Données recueillies

Nous disposons des moyennes demi-horaires et journalières suivantes :

1. La température de l'air non ventilé 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 220 cm de la surface.

4. La radiation courtes longueurs d'ondes incidente et réfléchi à 120 cm de la surface.
5. La radiation nette toutes longueurs d'ondes à 80 cm de la surface.
6. La température à l'interface neige/glace.
7. Ablation / accumulation

Ainsi que les 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. La vitesse du vent.
4. Les radiations courtes longueurs d'onde incidente et réfléchi.

Et les minima journaliers des températures non ventilées, des humidités relatives, hautes et basses et de l'albédo.

• Lacunes dans les données

Aucune lacune n'est à déplorer cette année.

B. 5.2. Station Campbell CR10

Cette station météorologique a été installée le 28/03/96. Elle est située sur le même site que la « 21X », à environ 6 mètres de cette dernière. Les parties « capteurs » et « enregistrement des données » sont séparées. Concrètement, il existe un mât supportant les différents capteurs et 10 mètres plus loin, un second mât supportant la centrale de mesure. Cette configuration a l'avantage de ne pas perturber le « milieu mesuré » (état de surface de la neige en particulier) lors de la récupération des données. Elle évite également la perturbation « thermique » due au chauffage de la boîte CR 10.

• Descriptif

Il s'agit d'une station de mesure CR10 - CAMPBELL (GB), couplée avec un multiplexer pour augmenter le nombre de mémoires. Le temps de scrutation est de 15 secondes. Elle possède les capteurs suivants :

1. Un bilanmètre situé à 55 cm 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 psychromètre ventilé à 25 cm du sol (marques : prototype INRA - Bordeaux)
3. Un psychromètre ventilé à 175 cm sol (*mêmes caractéristiques que le précédent*)
4. Des thermocouples Cuivre/Constantan à -20, -30, -50, -70 cm : dans la neige; -100, -150 et -270 cm : dans la glace.
5. Des sondes platine à -20, -30, -50, -70 et -150 cm dans la neige/glace (dispositif de mesures prêté par le LGGE de Grenoble)

Les thermocouples Cu/Cst et les sondes Pt dans la neige/glace ont été installés ensemble, au même endroit. Les couples thermocouples/sondes Pt, ainsi formés, installés dans la neige à -20, -30, -50 et -70 cm de profondeur ont été placés au centre d'un cylindre (diamètre : 30 cm, longueur : 40 cm) métallique, peint en blanc et placé horizontalement. Ceci afin de protéger ces capteurs de températures des radiations pouvant traverser le manteau neigeux. De plus, on a placé une petite

plaque métallique (3 cm × 5 cm) peinte en blanc sur les sondes platines, et une autre de 2 cm × 3 cm sur les thermocouples pour accroître leur inertie thermique. L'alimentation en énergie de la centrale d'acquisition des données nous a posé quelques problèmes. En effet cette dernière consomme relativement beaucoup, du fait de la présence du multiplexer. A deux reprises, la centrale s'est trouvée sans énergie, avec les pertes de données qui s'en suivent. À présent un panneau solaire de 3W est en parallèle avec une batterie de 12V/6Ah, et l'autonomie est « quasiment infinie ». Concernant l'alimentation des psychromètres ventilés, elle est assurée par un panneau solaire de 3 W. Donc, là aussi, les températures sèches et humides enregistrées ne sont ventilées que les journées assez dégagées. Un panneau solaire de 43 W couplé avec une batterie de 12V/100Ah a été installé le 12/09/1996 pour assurer une ventilation permanente.

• Modifications survenues au cours de l'année hydrologique

hauteurs des capteurs:

jour	psychro bas (cm)	psychro haut (cm)	bilanmètre (cm)
28/03/96	25	175	55
27/05/96	60	210	90
30/05/96	avant : 60 après : 35	avant : 210 après : 185	90
01/07/96	56	204	74
08/08/96	avant : 75 après : 35	avant : 225 après : 180	avant : 95 après : 55
14/08/96	40	185	66
25/08/96	50	195	75
12/09/96	59	204	65

autres:

- Implantation de réservoirs plus grands pour les psychromètres ventilés, le 01/07/96. Leur autonomie dépend du type de temps : moins d'un mois en saison sèche, et plus d'un mois en saison humide.
- Implantation d'un panneau solaire en parallèle de la batterie alimentant la centrale d'acquisition des données, le 25/07/96.
- Essai concernant la température de référence des thermocouples mesurant la température dans la neige/glace. Au lieu d'utiliser la T_{ref} interne de la centrale CR 10, nous avons tenté de mesurer directement la température du bornier du multiplexer avec un thermocouple, et de nous en servir comme température de référence. La tentative a débuté le 09/04/96 et s'est terminée le 15/05/96, vu les résultats peu encourageants (pour plus de précision, voir les rapports des visites de routines).

• 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 radiation nette toutes longueurs d'onde à 60 cm de la surface.
4. La température à 20, 30, 50, 70, 100, 150 et 270 cm de profondeur dans la neige (pour les quatre premières) et dans la glace (pour les trois dernières).

Ainsi que les maxima et minima journaliers suivants :

1. Les températures sèches et humides de l'air à 30 et 180cm de la surface.
2. La radiation nette à 60 cm du sol.

• Lacunes dans les données

Nous avons à déplorer deux périodes de lacunes depuis l'installation de cette station et pour cette année hydrologique :

du 27/05/96 au 04/06/96 et
du 06/07/96 au 18/07/96.

Ceci à cause, pour les deux fois, de problème d'alimentation de la centrale (batterie vidée).

Remarque : Le fait de bénéficier d'un « storage module » en parallèle de la centrale pour décharger en continu les données s'est avéré très intéressant. Sans ce dispositif, nous aurions perdu toutes les données alors stockées dans la mémoire interne de la CR 10. Ici, nous n'avons perdu aucune donnée « enregistrées ». Les périodes de lacunes correspondent uniquement aux temps d'arrêts de la centrale, où simplement rien n'a été enregistré.

B. 5.3. Station portable

La station météorologique CR 10 - Campbell portable (celle qui fonctionne à l'heure actuelle à 5025 m, au front du glacier) a été testée et utilisée du 26/03/96 au 15/05/96. Nous avons donc enregistré les mêmes types de données déjà décrites.

• Données recueillies

Nous disposons des moyennes toutes les 5 minutes (du 26/03/96 au 25/04/96), toutes les 15 minutes (du 25/04/96 au 15/05/96) et journalières des paramètres suivants :

1. La température sèche ventilée de l'air à 50 et 200 cm de la surface.
2. La température humide ventilée de l'air à 50 et 200 cm de la surface.
3. La vitesse et la direction du vent à 250 cm de la surface.
4. La radiation courtes longueurs d'ondes incidente à 120 cm de la surface.
5. La radiation courtes longueurs d'ondes réfléchie à 120 cm de la surface.
6. L'albédo.

Ainsi que les maxima journaliers de :

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

Et les minima journaliers des températures sèches et humides, hautes et basses, ainsi que de l'albédo.

• Modifications survenues au cours de l'année hydrologique

hauteurs des capteurs :

jour	psychro bas (cm)	psychro haut (cm)	pyranomètres (cm)	anémomètre (cm)
26/03/96	30	200	80	250
09/04/96	10	180	60	230
15/05/96	découverte à terre ...			

• Lacunes dans les données

Aucune lacune n'est à déplorer, sauf pour les données issues de la girouette. Ce capteur a cessé de fonctionner au troisième jour de l'installation de la station.

B. 6. Station météorologique portable à 5550 mètres

Cette station est située dans la partie d'accumulation du glacier à 5550 mètres d'altitude au pied de la voie des Français. Cette station a été mise en place le 23/04/96 et pour une durée de 5/6 mois, jusqu'à la prochaine saison des pluies. Ensuite elle est destinée à aller en Équateur, pour équiper le glacier « 15α » de l'Antisana.

• Descriptif

Il s'agit d'une station de mesure CAMPBELL (GB) de type CR10 qui possède les capteurs suivants:

1. Une sonde platine de température non ventilée située à 200 cm du sol (marques : Campbell, références : 107 temperature probe, précision : $< \pm 0.4$ °C)
2. Un bilanmètre situé à 60 cm 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)
3. Un anémomètre-girouette situé à 250 cm du sol. (marque : Campbell, référence : 05103 Wind Monitors, précision : ± 0.3 m s^{-1} de 1 à 60 m s^{-1} pour la vitesse, ± 3 ° pour la direction)
4. 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 μm à 1.1 μm)
5. 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 μm à 1.1 μm)

Le temps de scrutation est de 15 secondes. L'alimentation en énergie de la centrale est assurée par une batterie 12V/6Ah. Elle n'a pas encore été changée. L'autonomie semble être de l'ordre de 5/6 mois.

• Données recueillies

Nous disposons des moyennes demi-horaires et journalières suivantes :

1. La température de l'air à 200 cm de la surface.
2. La radiation courtes longueurs d'ondes directe à 120 cm de la surface.
3. La radiation courtes longueurs d'onde réfléchie à 120 cm de la surface.
4. La radiation nette toutes longueurs d'onde à 60 cm de la surface.
5. La vitesse et la direction du vent à 250 cm de la surface.
6. l'albédo

Ainsi que les maxima journaliers de :

1. La température de l'air à 200 cm de la surface.
2. La radiation nette à 60 cm de la surface.
3. La vitesse du vent à 250 cm de la surface.

Et les minima journaliers de :

1. La température de l'air à 200 cm de la surface.
2. La radiation nette à 60 cm de la surface.
3. La radiation courtes longueurs d'ondes directe à 120 cm de la surface.
4. La radiation courtes longueurs d'ondes réfléchie à 120 cm de la surface.
5. l'albédo.

• Lacunes dans les données

Aucune lacune n'est à déplorer cette année.

B. 7. Mesures réalisées sur la moraine

Nous mesurons la température de l'air (sous abri) et les précipitations sur la moraine, ceci en différents endroits.

B. 7.1. Mesure de température

• Descriptif

Nous mesurons la température de l'air, sous abri, sur la moraine à 5165 mètres d'altitude, avec un thermomètre OMNIDATA (sonde Pt).

• Données recueillies

Nous obtenons grâce à cet appareil une moyenne de la température de l'air sur deux heures.

• Lacunes dans les données

Les seules périodes de lacunes qui sont à déplorer cette année coïncident avec les périodes durant lesquelles il nous faut « descendre » l'appareil pour le dépouiller de ses données. Celles-ci sont les suivantes :

Du 27/09/95, 8h00 au 03/10/95, 16h00
Du 13/12/95, 14h00 au 20/12/95, 22h00
Du 01/03/96, 12h00 au 08/03/96, 14h00
Du 27/05/96., 12h00 au 30/05/96, 14h00
Du 08/08/96, 10h00 au 14/08/96, 16h00

B. 7.2. Mesures cumulées des précipitations

Un réseau de pluviomètres totalisateurs est installé sur les moraines autour du glacier à différentes altitudes de façon à apprécier le gradient de précipitation.

• Descriptif

Ces pluviomètres sont localisés au niveau de la zone d'ablation et sont relevés chaque début de mois. Les altitudes des pluviomètres sont les suivantes :

P1 : 5165 m, moraine droite.

P2 : 5080 m, moraine droite.

P3 : 4945 m, moraine gauche.

P4 : 4860 m, juste en amont de la station limnimétrique, à gauche.

P5 : 4855 m, juste en amont de la station limnimétrique, à droite.

P6 : 4750 m, à la Plataforma.

Caractéristiques : Nous possédons deux types de pluviomètres totalisateurs.

Type I : diamètre = 50 cm, hauteur = 100 cm, couleur noire (P2 et P6).

Type II : diamètre = 50 cm, hauteur = 120 cm, couleur gris - métal (P1, P3, P4, P5)

• Données recueillies

Pluie mensuelle suivant l'altitude et l'exposition.

B. 8. Mesures réalisées lors de mission ponctuelle sur le glacier.

En plus du réseau de mesures existant, nous avons effectué au cours de l'année trois missions ponctuelles sur le glacier à 5150 et à 5550 mètres. Le but de ces missions était de réaliser des observations et des mesures de micro-météorologie précises. Ceci afin (1) d'avoir accès à des données que nous n'enregistrons pas (sublimation, fusion, nébulosité, températures de surface de l'air et de la neige/glace en particulier) et (2) d'évaluer la fiabilité des mesures enregistrées par nos stations. La chronologie des missions a été la suivante :

Mission 0 : à la fin de la saison sèche, du 06/09/95 au 08/09/95.

Mission I : pendant la saison des pluies, du 25/03/96 au 29/03/96, à 5150 m d'altitude.

Mission II : à la transition saison des pluies / saison sèche, du 23/04/96 au 25/04/96 à 5550 m d'altitude.

Mission III : pendant la saison sèche (où il a fait un temps de saison des pluies), du 22/08/96 au 26/08/96, à 5150 m d'altitude.

B. 8.1. Mesures d'évaporation et de sublimation

Nous estimons la perte de masse par évaporation / sublimation grâce à des lysimètres. Ils ont un diamètre de 175 mm (surface $\approx 24053 \text{ mm}^2$) et une hauteur de 65 mm (volume $\approx 1.56 \text{ dm}^3$). Leur mise en place est la suivante : on essaie de reconstituer une densité et une surface semblable à celles existantes (chose quasiment impossible en présence de glace). De plus, on « enterre » dans la neige le lysimètre, de telle manière que sa surface supérieure affleure. La mesure, à intervalles de temps réguliers, de la masse totale du lysimètre grâce à une balance de précision ($\pm 1 \text{ g}$ jusqu'à 500 g, et $\pm 2 \text{ g}$ de 500 à 1000 g) nous permet, par différence, d'estimer la perte ou le gain par évaporation, sublimation ou condensation.

Ces mesures ont été conduites lors des quatre missions. De plus, lors de la saison sèche, des lysimètres ont été laissés en place sur une durée d'environ un mois à 5150 m sur le glacier. Ils étaient mesurés lors des visites de routine (environ tous les 10 jours), ceci quand aucunes précipitations n'étaient soupçonnées sur le glacier entre deux passages. Par exemple, entre le 18/07 et le 08/08/96.

B. 8.2. Mesures de fusion

Trois techniques ont été mises en oeuvre pour évaluer la fusion lors de la mission III.

La première consiste à mesurer l'eau de fonte que l'on récupère dans les lysimètres.

La seconde s'appelle « boîte à fusion ». 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 inférieur, lui, étanche. On remplit la partie supérieure de neige, on « enterre » le tout à la manière des lysimètres. On mesure alors, chaque soir, l'eau de fonte contenue dans le bac inférieur. Les dimensions de la partie recevant la neige sont égales à : 49 cm \times 49 cm \times 15 cm.

La troisième s'appelle « mini bassin versant ». Il s'agit de « fabriquer », à même le glacier, une surface de quelques m^2 , isolée du reste du glacier du point de vue du ruissellement de fusion. Concrètement nous avons choisi une pente de neige/glace et creusé quatre rigoles dans la glace. Deux rigoles supérieures, pour dériver le ruissellement de l'eau fusion provenant de l'amont. Et deux rigoles inférieures pour capter l'eau de fusion provenant de ce « mini bassin versant » ainsi créé. On a isolé de cette façon un carré d'environ 4 m \times 4 m.

B. 8.3. Mesures de températures de surface

Lors de la mission III, nous avons cherché à mesurer la température sèche de l'air et de la neige/glace à l'interface air/neige ou glace.

- Température sèche de l'air à la surface :

Elle a été mesurée par le psychromètre ventilé portable, prêté par l'Universität Innsbruck (caractéristiques inconnues) à environ 1 cm de la surface.

- Température de la neige/glace à la surface :

Elle a été mesurée par deux appareils. (1) par quatre sondes platines « LGGE », qui avaient été utilisées pour mesurer la température du manteau neigeux par la station CR 10 à 5150 m, mais mises à jour du fait de l'ablation. (2) par un thermomètre numérique à sonde (marque : ADIP, modèle : PN2A s, caractéristique : Pt 100 Ω à 0°C, précision : inconnue, néanmoins il affiche 0/-0.1 °C lorsque sa sonde est plongée dans de la glace fondante). Ces cinq sondes étaient placées sur la surface de neige/glace et justes recouvertes par un peu de neige. Ainsi, la protection vis à vis de la radiation solaire était inexistante, il convient donc de considérer avec précaution les valeurs obtenues la journée.

B. 8.4. Mesures du gradient de la température sèche de l'air

Lors de la mission III, nous avons cherché à estimer le gradient de la température sèche de l'air. Ceci avec le psychromètre ventilé portable (voir ci-dessus), en mesurant la température sèche de l'air à différentes hauteurs : 1, 20, 50, 100, 150 cm.

B. 8.5. Observations météorologiques diverses : direction du vent, nébulosité, ...

Lors de toutes les missions, nous avons essayé de faire le plus d'observations météorologiques possibles, le jour et plus ponctuellement la nuit. En particulier, nous avons estimé, à vue, la nébulosité (de 1/10 en 1/10 : 0/10 correspondant à ciel sans nuages et 10/10 à une couverture nuageuse obstruant tout le ciel), et les changements dans le régime des vents.

B. 9. Conclusion

Le glacier Zongo a connu cette année un accroissement important de son dispositif de mesures. En effet, exactement trois nouvelles stations météorologiques ont été installées sur ce dernier : une permanente à 5150 mètres, une « mobile » à 5025 mètres et une provisoire à 5550 mètres. Ceci représente également un accroissement substantiel de nouvelles données. Ces dernières, avec celles collectées lors des missions de mesures *in-situ* constituent la base fiable et nécessaire à l'établissement d'un modèle hydrologique numérique.

Pour résumer, nous pouvons dresser la liste des paramètres que nous mesurons :

<u>Température de l'air sous abri :</u>	à 4750 m (deux mesures différentes) à 5165 m (sur la moraine) à 5150 m (sur le glacier, deux mesures « basse » et « haute ») à 5550 m (sur le glacier)
<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 »)
<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 »)
<u>Humidité relative :</u>	à 4750 m à 5150 m (sur le glacier, mesures « basse » et « haute »)
<u>Radiation solaire directe et réfléchi :</u>	à 4750 m (hors du glacier, SW↓ seule) à 5025 m (sur le glacier) à 5150 m (sur le glacier) à 5550 m (sur le glacier)

<u>Radiation nette :</u>	à 5150 m (sur le glacier, deux mesures) à 5550 m (sur le glacier)
<u>Vitesse du vent :</u>	à 4750 m (sur le glacier, + direction) à 5025 m (sur le glacier) à 5150 m (sur le glacier, mesures « basse » et « haute ») à 5550 m (sur le glacier, + direction)
<u>Pluie :</u>	à 4750 m à 4850 m à 5000 m à 5165 m
<u>Débit du torrent émissaire du glacier :</u>	à 4850 m

C. TEMPERATURES DE L'AIR

Nous allons présenter ici les différentes données que nous possédons concernant la température de l'air. Pour mémoire, nous enregistrons la température de l'air hors glacier à 4750 (deux mesures) et 5165 m (une mesure), et sur le glacier même à 5025, 5150 (deux mesures) et 5550 m (une mesure).

C. 1. Températures instantanées

Les valeurs dites « instantanées » sont en fait les moyennes demi-horaires issues des stations météorologiques Campbell à 5025, 5150 et 5550 m, de la station Mevis à 4750 m et de la moyenne toutes les deux heures de l'OmniData à 5165 m sur la moraine.

C. 1.1. Températures ventilée et non-ventilée à 5150 m, sur glacier

Les valeurs demi-horaires de la température mesurée à 5150 m, par les thermomètres non ventilés et ventilés, sont présentés ici. Nous avons représenté trois périodes de 7 jours :

La première période en saison des pluies : la première semaine d'avril.

La seconde en saison sèche : la dernière semaine de juin.

La dernière hors année hydrologique 95-96 : la dernière semaine de septembre 96, elle correspond en « théorie » à la fin de la saison sèche, cette semaine fut typiquement une semaine de saison des pluies. Sa place dans ce présent rapport se justifie par le fait que ce sont les premières données issues de mesures ventilées jour ET nuit. En effet, avant le mois de septembre 96, la ventilation n'était assurée ni pendant la nuit, ni pendant les périodes de mauvais temps. Un nouveau dispositif d'alimentation électrique, plus conséquent (batterie de camion + panneau solaire 43W), rend ce problème caduc. Pour chaque période, nous présentons les graphiques « Températures basses ventilée et non-ventilée », « Températures hautes ventilée et non-ventilée » et une représentation (indirecte) du gradient vertical de la température : « Les différences $(T_{bs}-T_{ht})_{\text{ventilée}}$ et $(T_{bs}-T_{ht})_{\text{non-ventilée}}$ »

- Avril 96

C'est la seule période où les deux types de mesures ont été réalisés à la même côte par rapport à la surface : 30 cm pour la mesure basse et 180 cm pour la mesure haute.

La température non ventilée est plus grande que la température ventilée (figure C.1 et C.2). Et ceci est plus marqué pour les mesures basses que pour les mesures hautes. Les plus grandes différences surviennent la journée vers 12h00 où un pic de la température non-ventilée peut apparaître (expliqué par une forte radiation solaire qui chauffe tout l'abri du capteur). Néanmoins on remarque une différence de 1 à 2°C entre les deux mesures également la nuit, moment où l'influence du rayonnement est nul et la ventilation inexistante, donc là où les capteurs devraient être équivalents. Cette différence est plus marquée pour la mesure basse. Erreur de calibration ?

Concernant la différence entre les températures basses et hautes (figure C.3), pour les deux types de mesures, nous pouvons faire les remarques suivantes.

1- Températures non-ventilées : la température basse est souvent plus grande que la « haute » durant la journée. Cette différence peut atteindre 2°C vers midi. La nuit la différence est négative, mais il y

à des exceptions. On note aussi la présence de points très singuliers : le 2 et le 5 en début d'après-midi. Ces points sont la conséquence des pics de température précédemment cités.

2- Le même gradient évalué à partir des mesures ventilées est plus « lisse ». Il ne connaît pas de saut brutal et reste compris entre -3°C et 1°C (valeurs concernant la différence). La nuit, nous avons une température basse plus froide que la « haute » de façon bien marquée (de l'ordre de 2°C), et la journée, aux heures les plus « chaudes », la température basse dépasse légèrement la mesure haute (de l'ordre du $\frac{1}{2}^{\circ}\text{C}$).

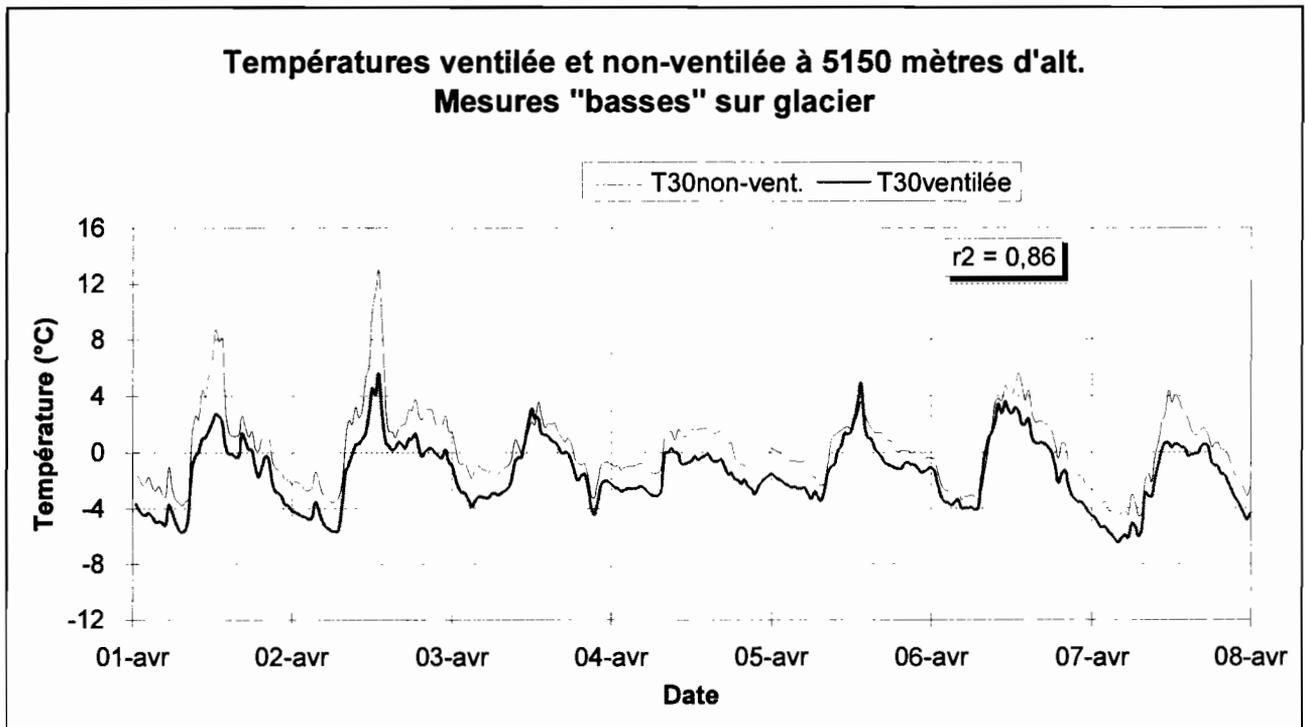


Figure C.1

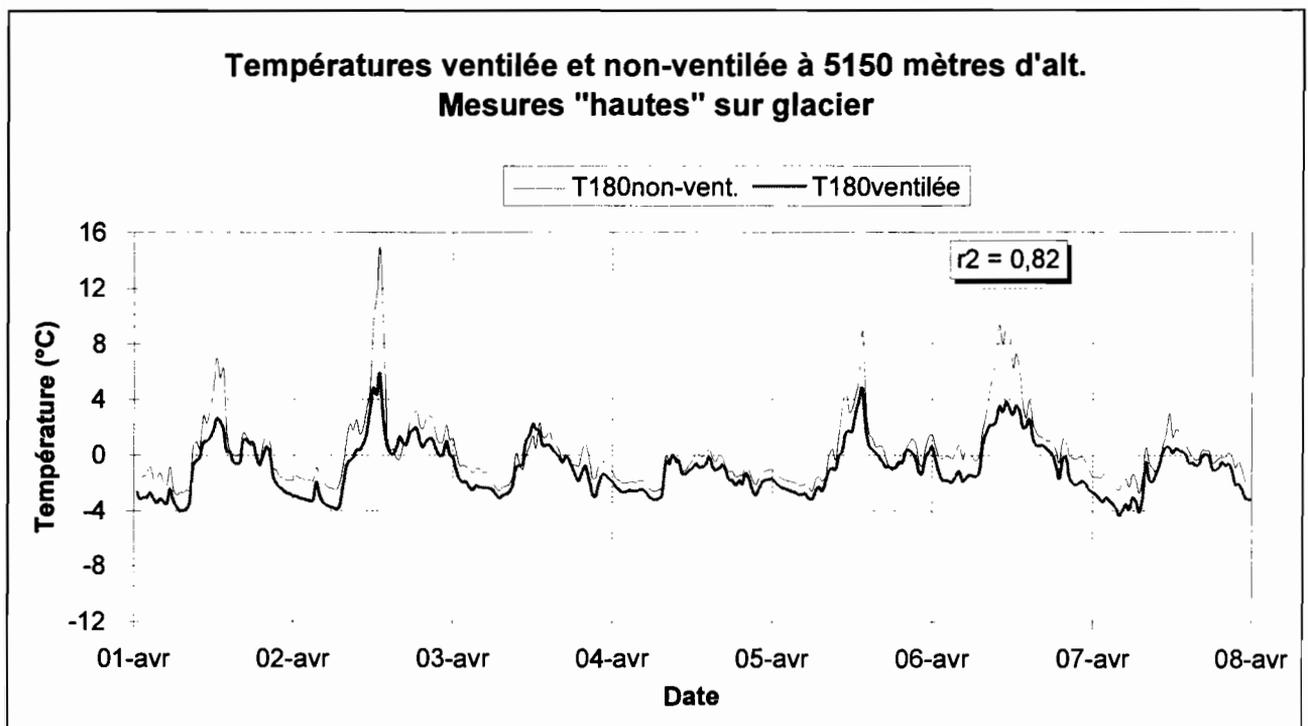


Figure C.2

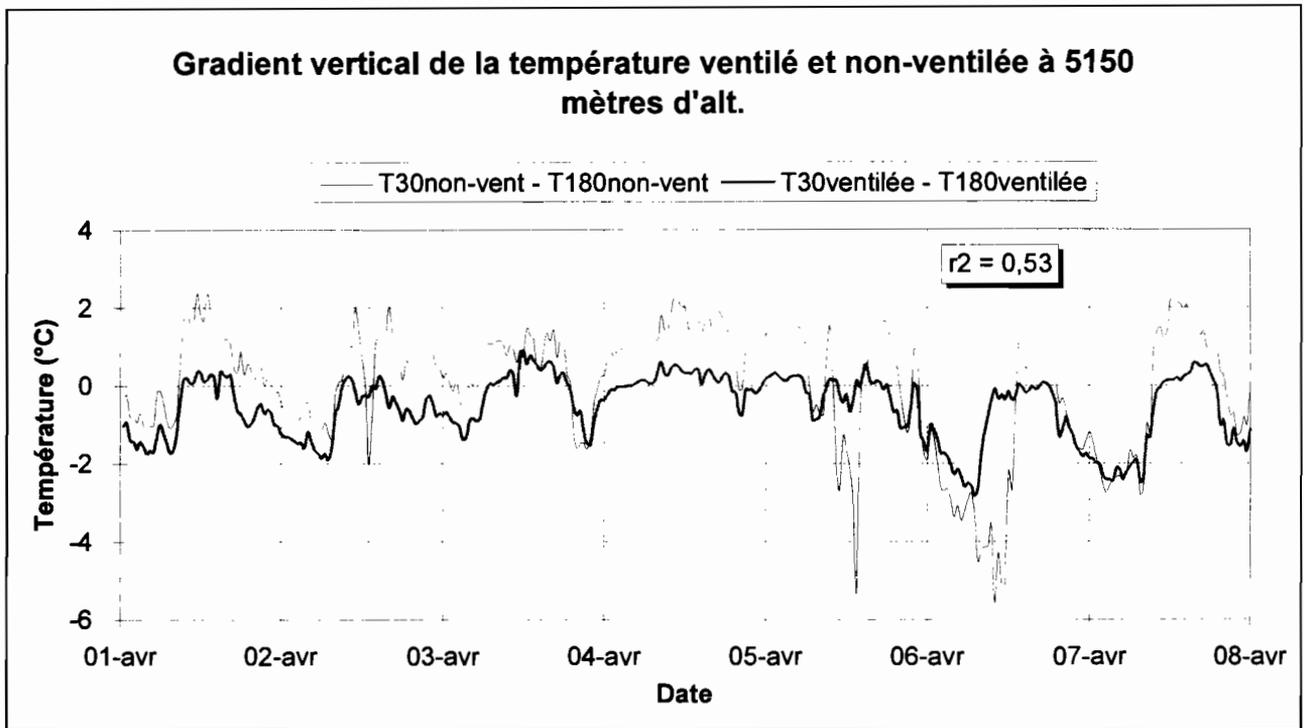


Figure C3

- Juin 96

La dernière semaine de juin 96, il y avait un écart de 15 cm entre les capteurs (mesure basse ventilée : 55 cm, non-ventilée : 70 cm et mesure haute ventilée : 205 cm, non-ventilée : 220 cm). Celle-ci semble assez minime pour pouvoir néanmoins faire quelques comparaisons. Les courbes sont tracées volontairement sur la même échelle que précédemment pour pouvoir apprécier les écarts entre les différentes périodes.

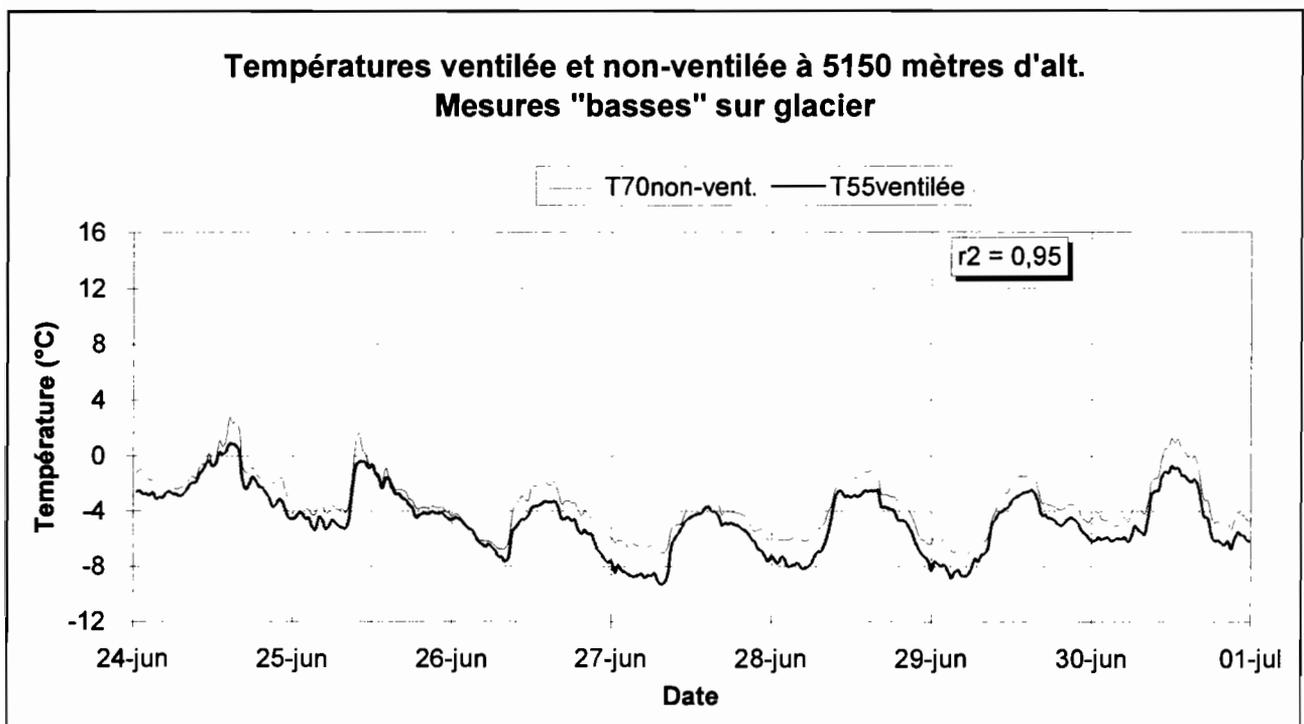


Figure C.4

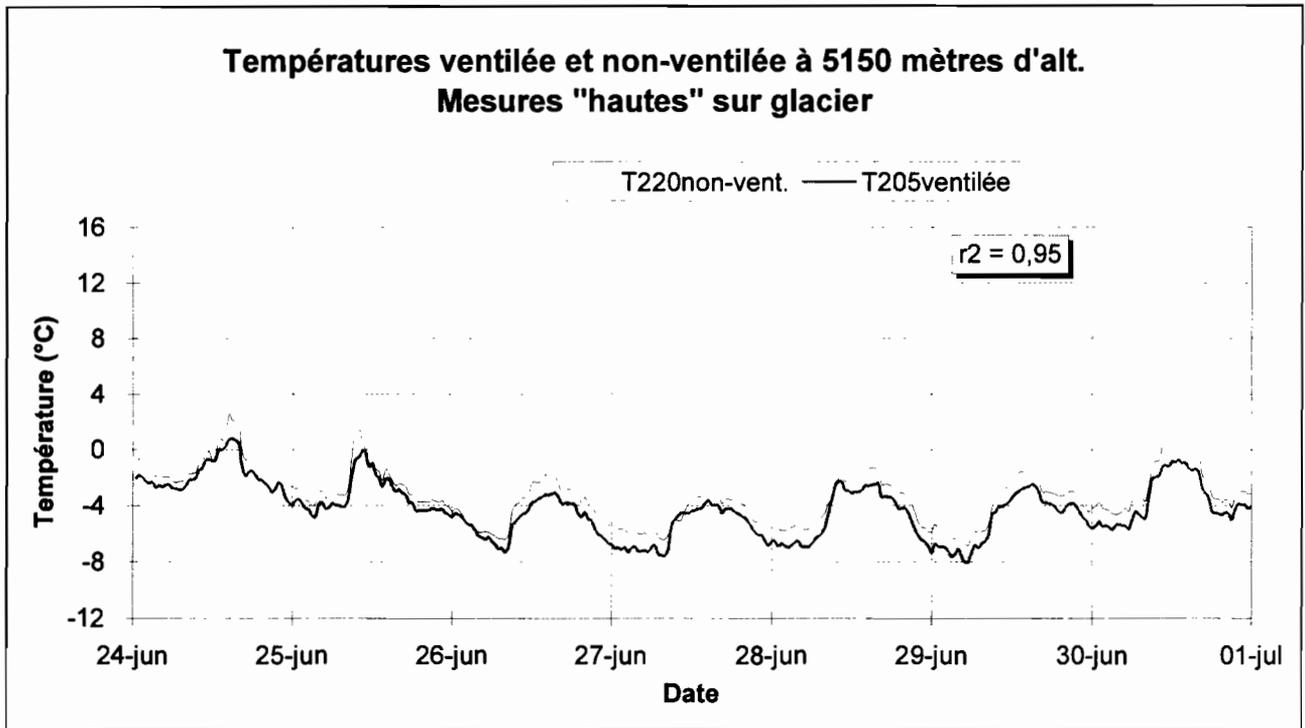


Figure C.5

Les deux types de mesures sont très bien corrélés ($r^2=0.95$, $n=335$). La température non-ventilée est toujours plus grande que la « ventilée » (figure C.4 et C.5). Les pics de la température non-ventilée au milieu de la journée ont disparu. Par contre, nous retrouvons une différence entre les deux mesures la nuit et elle est sensiblement identique aux précédentes (environ 2°C pour la mesure basse et 1°C pour la mesure haute).

Il y a néanmoins des durées de plusieurs heures pendant lesquelles les deux mesures sont très proches l'une de l'autre, par exemple entre le 25 juin 11h00 au 26 juin 11h00 (épisode neigeux) les valeurs sont très proches.

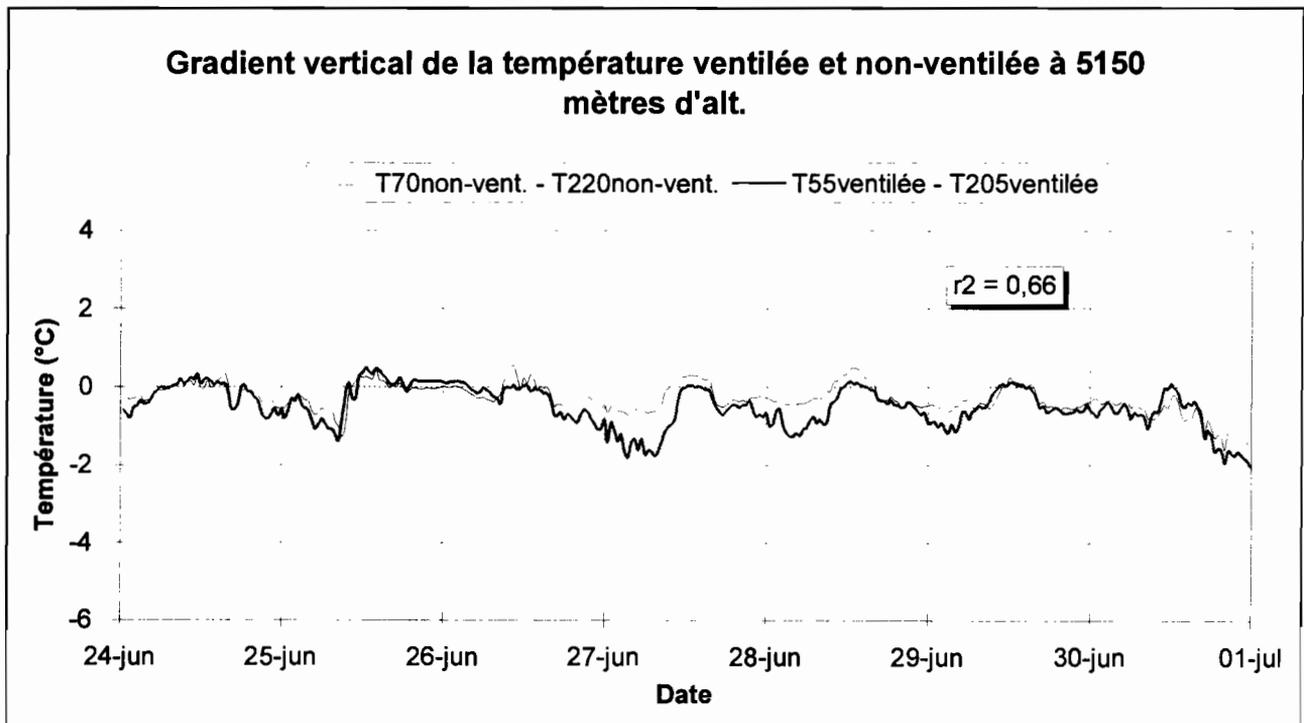


Figure C.6

Concernant les gradients verticaux de température (figure C.6), ils sont très proches l'un de l'autre malgré une corrélation médiocre ($r^2=0.66$, $n=335$). La nuit, la température basse est inférieure de 1 / 2°C à la température haute, et la journée, elle s'en rapproche et la dépasse très légèrement parfois.

- Septembre 96

Comme il l'a été déjà dit, les mesures de températures ventilées recueillies depuis mi-septembre sont « garanties » ventilées 24h/24h. Il était donc intéressant d'avoir une série comparative pour évaluer l'influence de la ventilation.

A cette période, malheureusement, les hauteurs des capteurs étaient très différentes d'une station à l'autre : 50 cm et 200 cm pour les psychromètres ventilés, et 130 et 280 cm pour les hygromètres, soit 80 cm de différence. Afin néanmoins de pouvoir comparer les deux mesures, nous avons interpolé (linéairement) la mesure ventilée entre 50 et 200 cm, pour estimer une valeur de la température à 130 cm et ainsi la comparer avec son homologue non-ventilée. La même procédure a été conduite entre 130 et 280 cm pour estimer une valeur de la température non-ventilée à 200cm. Les résultats sont tracés figures C.7 et C.8.

Les valeurs non-ventilées sont toujours plus importantes que les « ventilées » la journée, cette différence est plus marquée à 200 cm du sol et on retrouve les pics de températures au milieu de la journée. L'élément nouveau est la bonne concordance des valeurs ventilées et non-ventilées la nuit : nous n'avons plus les 2°C d'écart observés durant les deux périodes précédentes (la corrélation sur les valeurs nocturnes est de 0,9 pour la mesure « 200cm ») Si ce fait se confirme, nous pourrions compléter les données des températures ventilées la nuit, lorsque la ventilation n'était pas assurée, par les valeurs de la température non-ventilée.

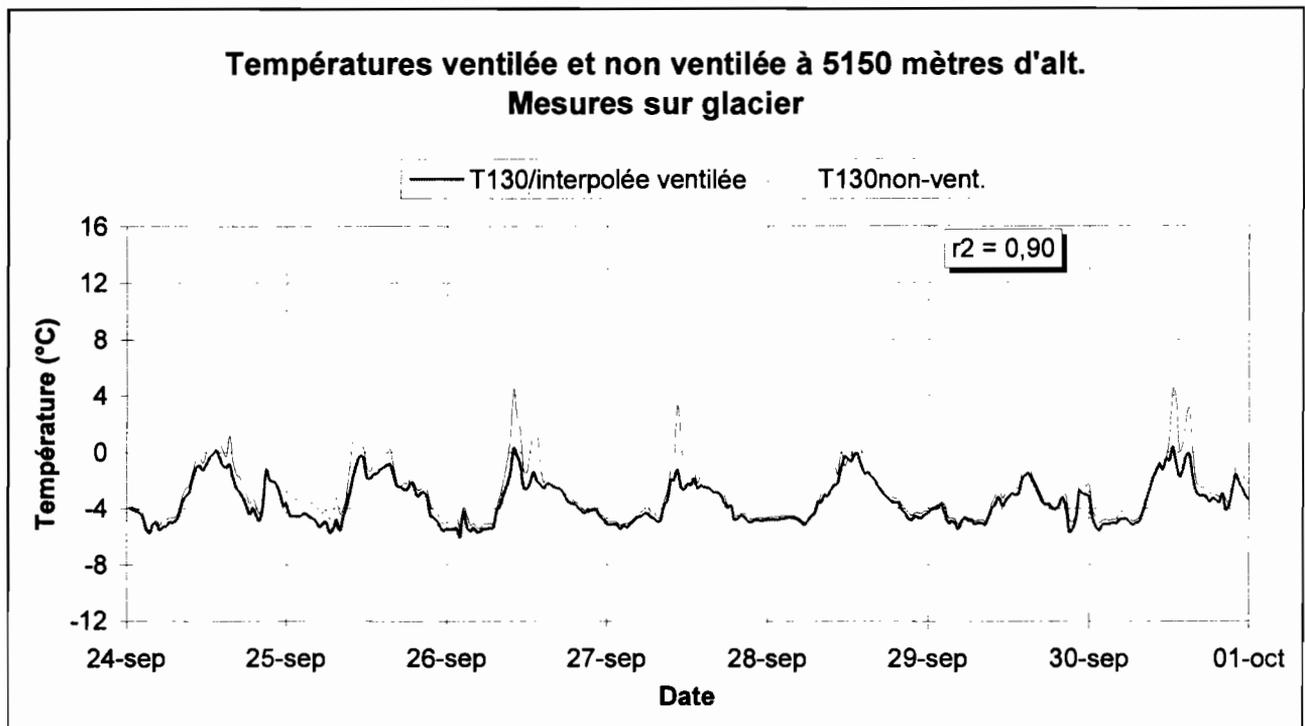


Figure C.7

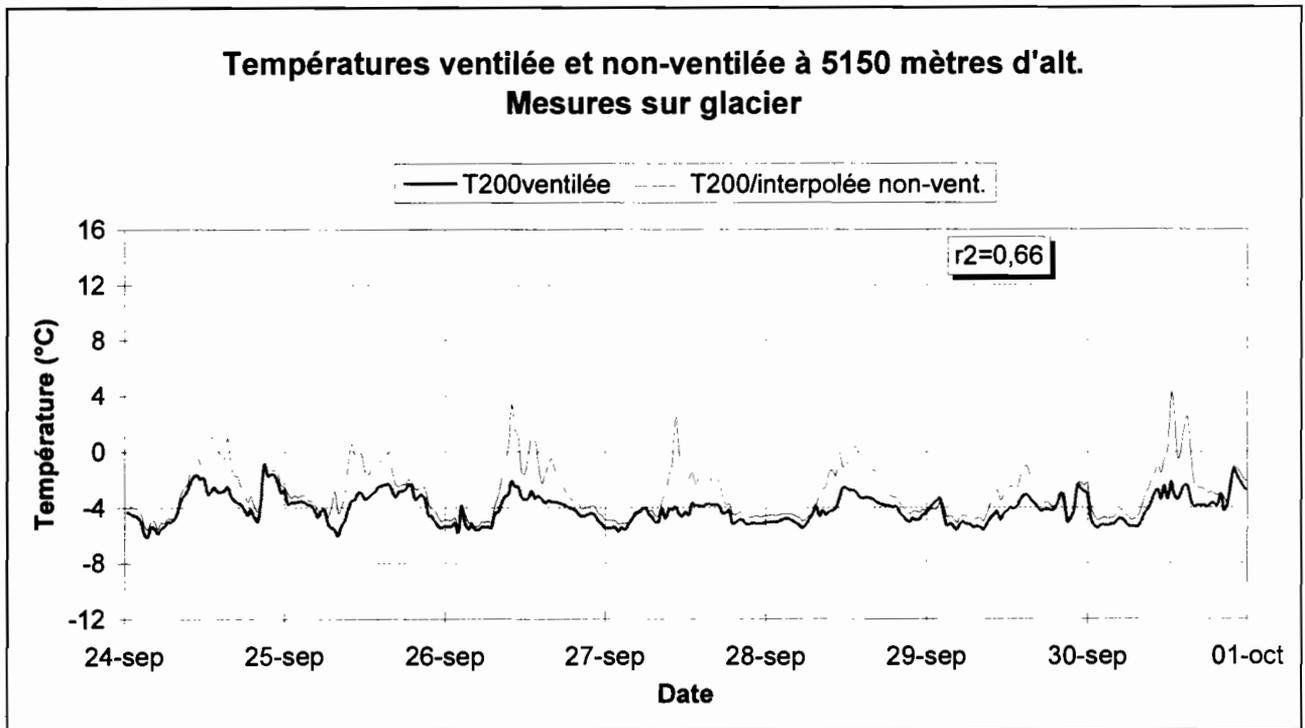


Figure C.8

Concernant le gradient vertical (figure C.9), son évaluation à partir des températures non-ventilées est comprise entre 0 (la nuit) et -1°C (la journée) pour 0,7 m d'élévation. Celui évalué à partir des températures ventilées est très différent, c'est la seule période où il est bien plus grand (en valeur absolue) que son homologue non-ventilé. Il est compris entre $+1$ (la nuit) et -3°C (le jour) pour 0,7m. d'élévation. C'est étonnamment élevé.

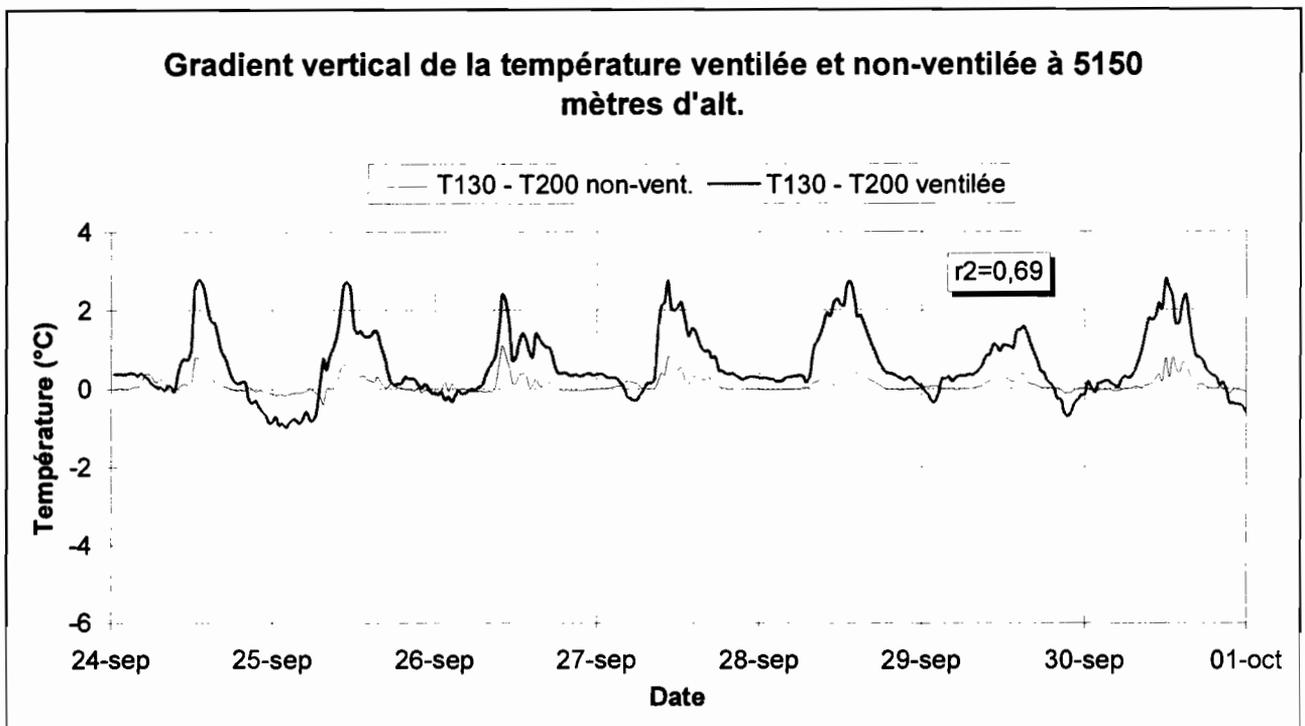


Figure C.9

• **Evolution de la différence (Tbs - Tht)**

L'évolution de la différence (Tbs - Tht) est tracée, pour les deux types de mesures sur les figures C.10 et C.11. Mise en garde : aucune correction quant à la hauteur des capteurs n'est appliquée, il s'agit des données « brutes ». Les deux figures ne couvrent pas la même période, la station CR10 ayant été mise en service le 28/03/96. La différence (Tbs - Tht)_{ventilée} montre une certaine continuité (très négative la nuit, juste positive en milieu de journée) depuis son installation jusqu'à la mi-août. Ensuite la tendance s'inverse, la différence atteint +6°C la journée et entre 0 et -2°C la nuit. On peut simplement noter que c'est justement à la mi-août que le temps est devenu plus perturbé sur le glacier.

La différence (Tbs - Tht)_{non-ventilée} a connu un tel changement, mais pas à la même période... L'amplitude de cette dernière a été plus forte entre février et avril 96. Elle a connu aussi des périodes où elle était plutôt positive (de novembre 95 à janvier 96) et des périodes où elle était plutôt négative (juin et juillet 96).

Les raisons de ces variations demeurent inconnues.

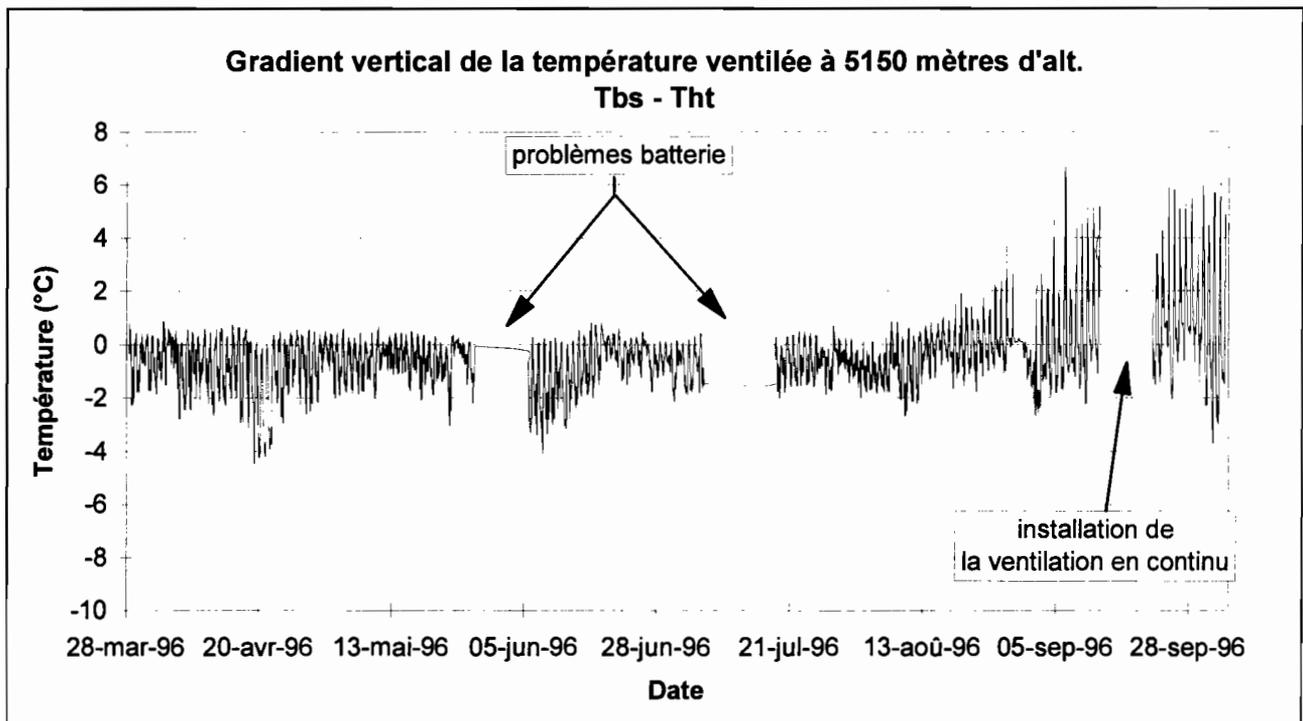


Figure C.10

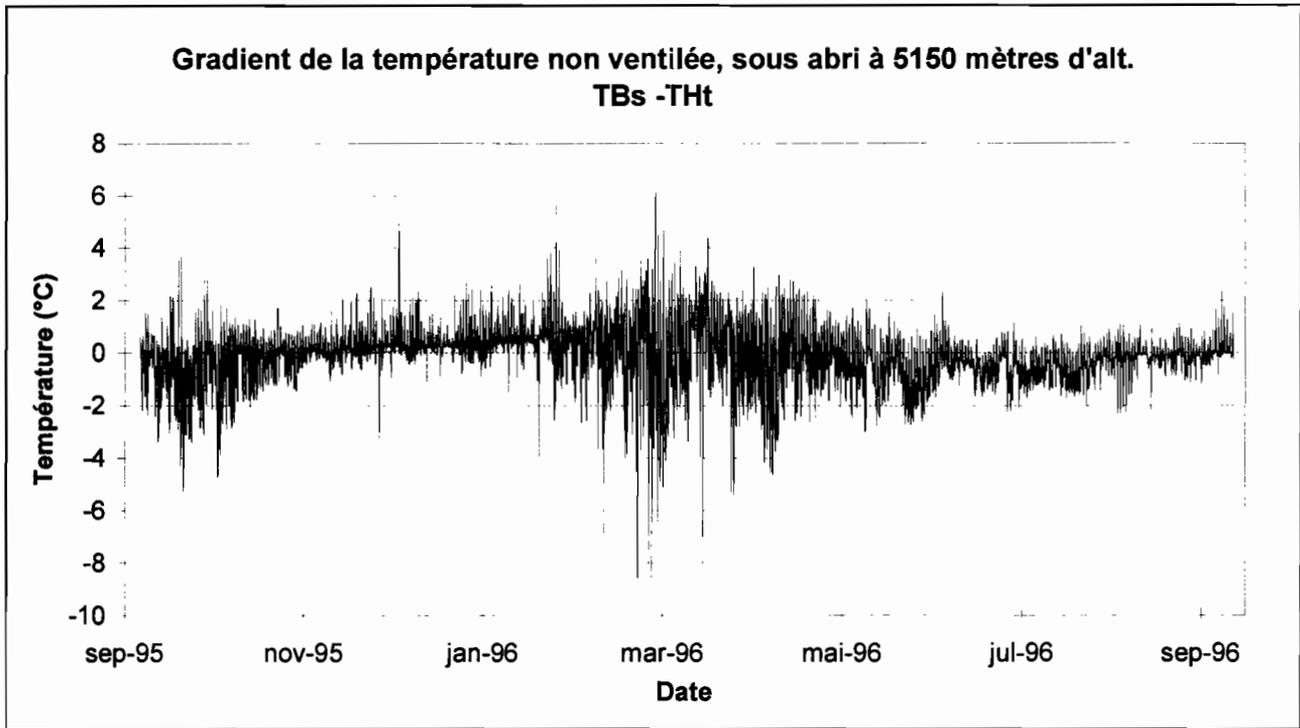


Figure C.11

- Conclusion - synthèse

1- La ventilation permet d'obtenir des valeurs plus proches de la « réalité » aux heures où la radiation solaire est la plus forte. Néanmoins pendant la saison sèche et aux périodes les plus froides (juin-juillet) les deux mesures, ventilée et non-ventilée, sont très proches.

2- Les mesures faites la nuit avec ventilation sont très proches de celles faites sans ventilation. Ces dernières peuvent donc être considérées comme justes, la nuit.

3- Le gradient vertical semble très variable au cours de l'année, même si la tendance, quelles que soient les saisons, reste la même : gradient positif la nuit et négatif le jour.

C. 1.2. Température de l'air à 5150 m, sur et hors glacier

Nous disposons de l'enregistrement de la température de l'air à 5150 m sur le glacier et à 5165 m hors du glacier. Nous allons mener une comparaison semblable à celle du rapport 94/95. Nous pourrions ainsi confronter les résultats des deux années. La mesure sur le glacier est celle du thermomètre non-ventilé haut de la station 21X et la mesure hors du glacier est celle de l'enregistreur *Omnidata*.

Nous avons sélectionné quatre périodes de 15 jours : les quinze premiers jours de novembre 95, de janvier 96, d'avril 96 et les quinze derniers jours de juillet.

Les résultats sont tracés sur les figures C.12 à C.15.

Les conclusions de l'année dernière se trouvent confirmées cette année. A savoir, la température au-dessus de la moraine est systématiquement plus faible que celle au-dessus du glacier la journée. La nuit, par contre les deux mesures concordent, et seuls les jours entièrement dégagés montrent une température de moraine plus grande (première semaine de nov-95 et 17/07 - 31/07). Les corrélations entre ces deux mesures sont comparables à celles établies l'an dernier.

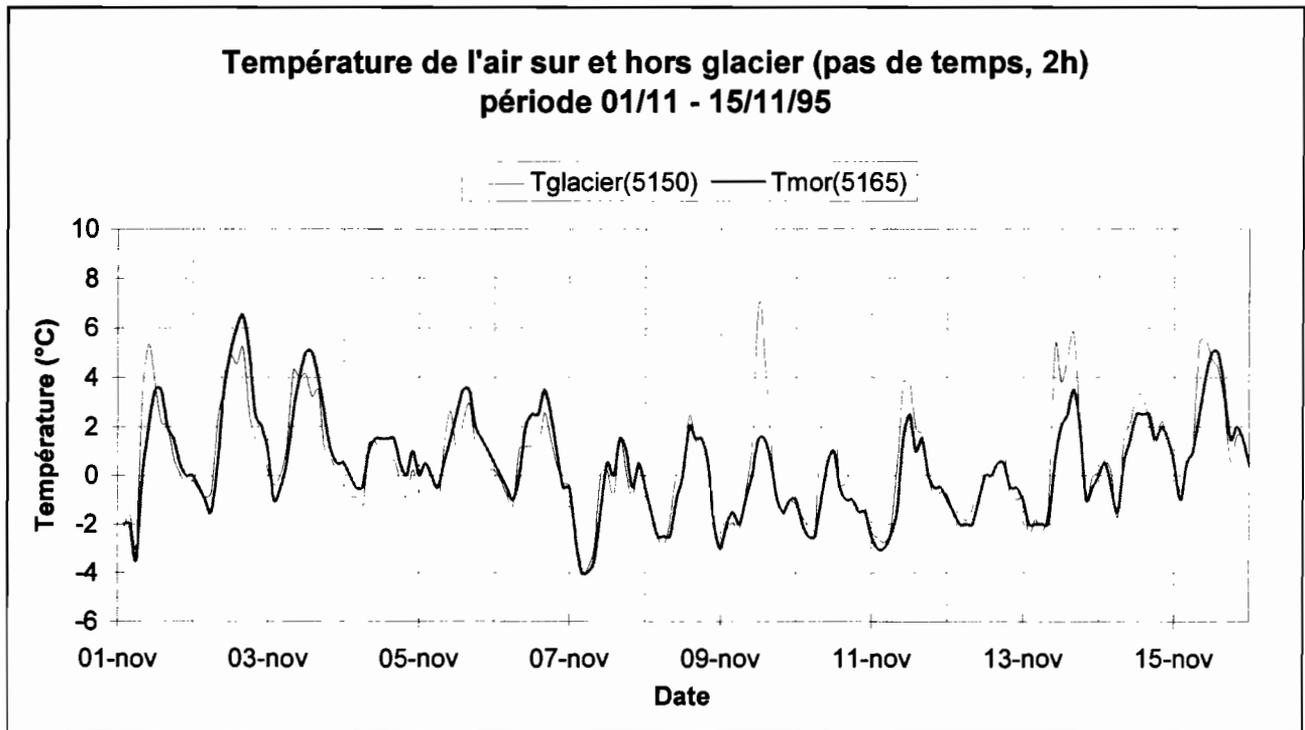


Figure C.12

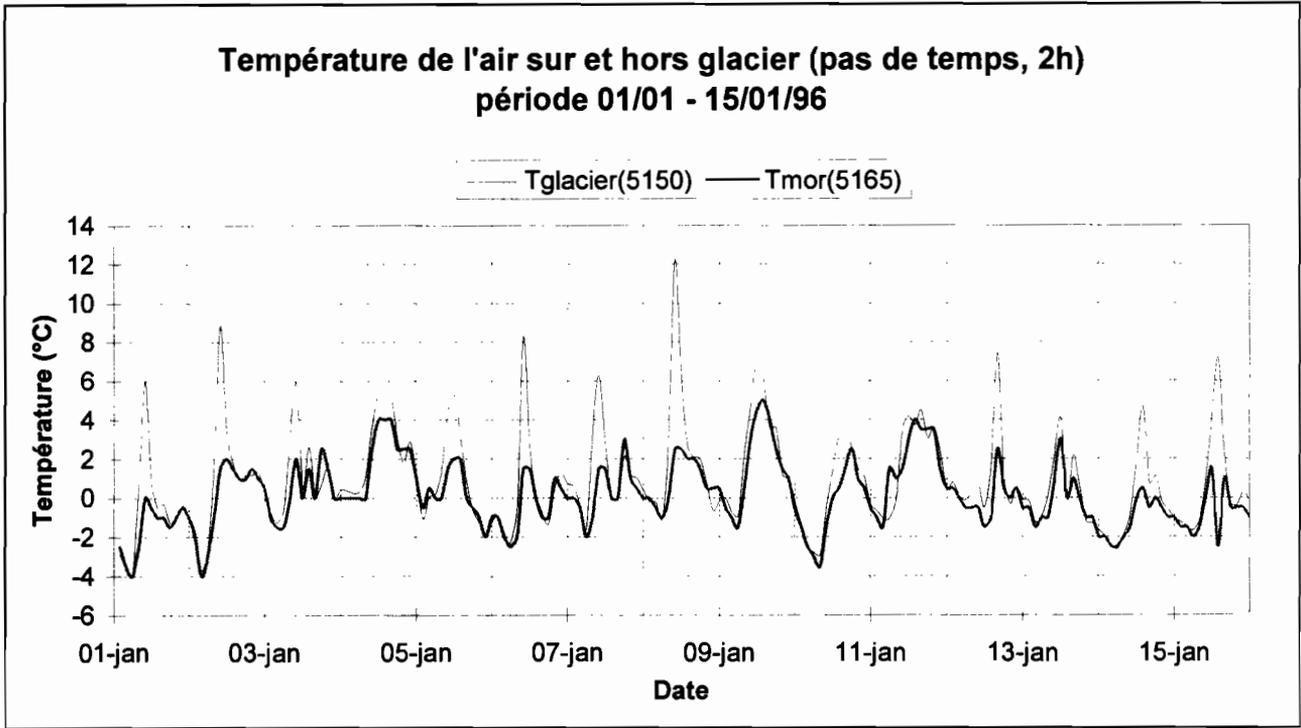


Figure C.13

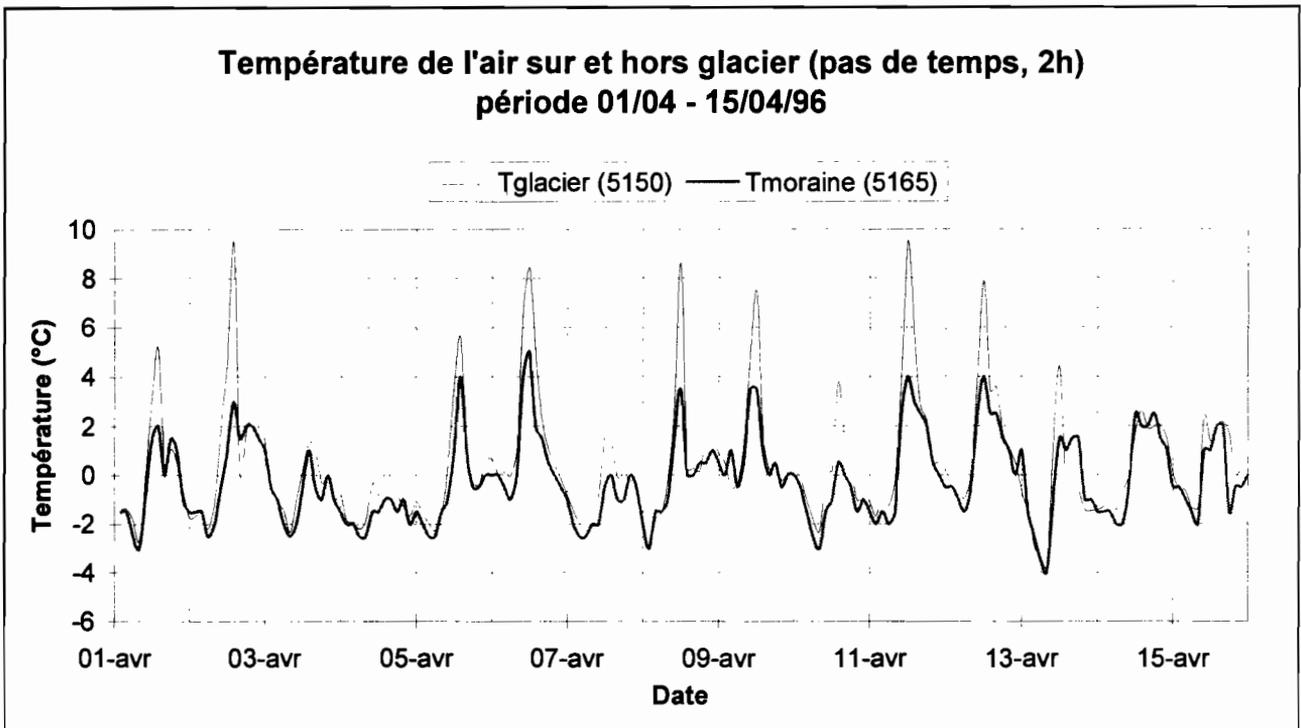


Figure C.14

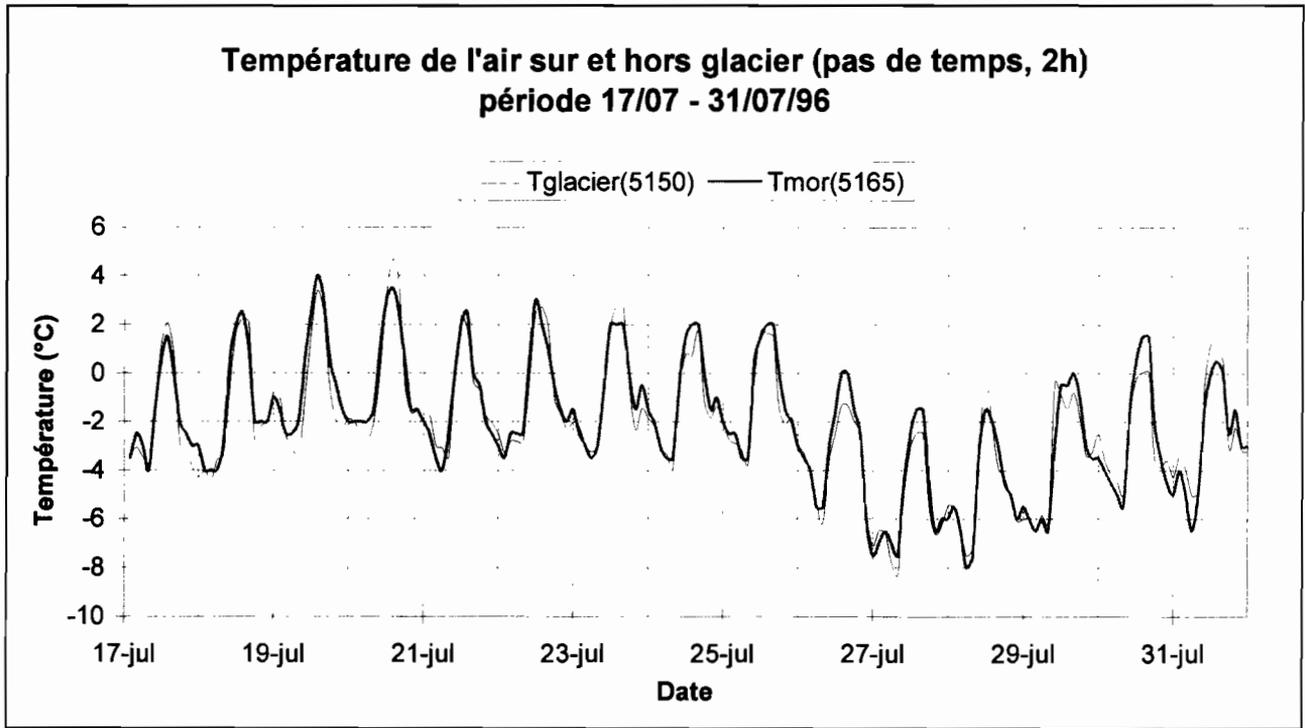
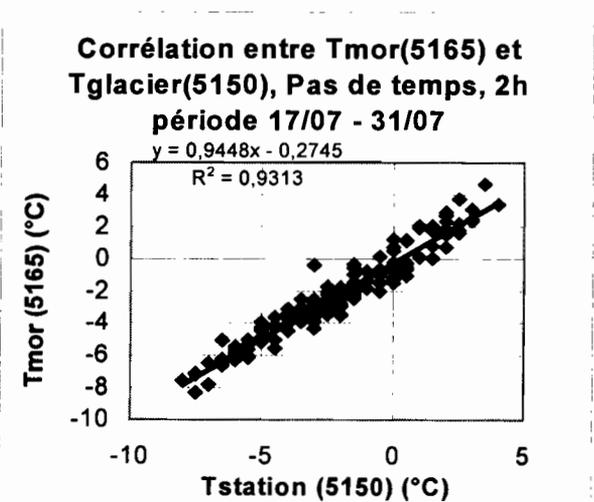
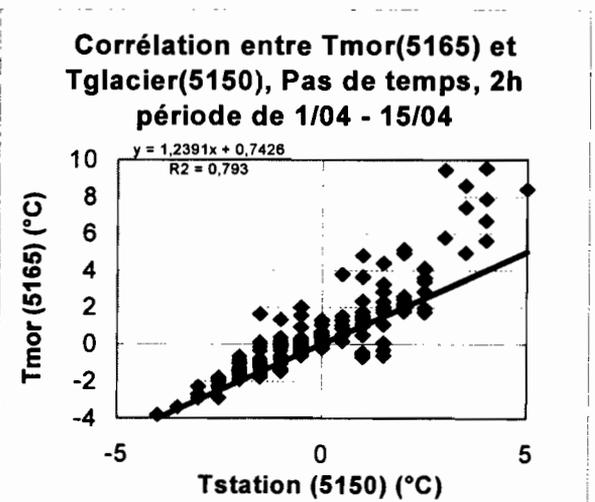
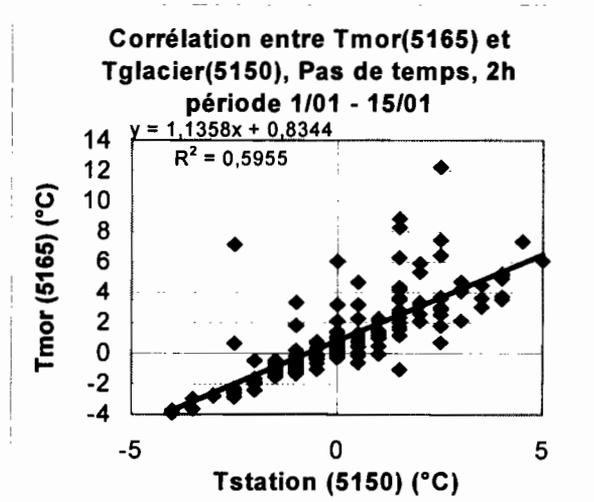
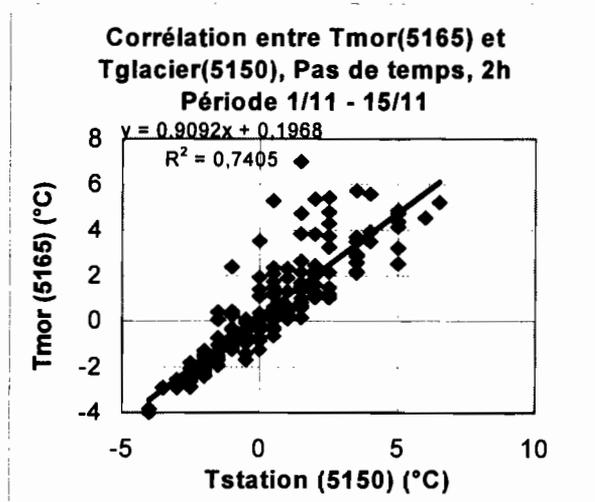


Figure C.15



C. 2. Températures journalières

En plus des moyennes journalières des données précédentes, nous disposons de la moyenne journalière de la température enregistrée à la plateforme à 4750 mètres d'alt. par le thermographe papier (§.2.1). Cette moyenne a été réalisée à partir de la corrélation entre la moyenne du minimum et maximum journalier et la moyenne journalière des moyennes toutes les deux heures de la température (rapport n°49). Nous avons reconduit la même équation de corrélation établie par P. Wagnon, cette dernière fournissant de bons résultats lors du dépouillage des trois premiers mois (sept, oct et nov 96).

C. 2.1. Températures journalières sous abri, non-ventilées à 4750 m

Nous disposons à la plateforme de deux mesures de la température de l'air : une mesure par l'intermédiaire du thermographe papier et l'autre par la sonde de température de la station Mevis. Ces deux mesures ne sont donc pas réalisées avec les mêmes types de capteurs et à des hauteurs différentes. Est-ce suffisant pour expliquer une telle différence dans les résultats? Les deux courbes sont corrélées à 0,52 (n = 320), ce qui est très médiocre. De plus leurs moyennes sur l'année sont égales à +3,1°C pour le thermographe et à 1,9°C pour la Mevis (figure C.16).

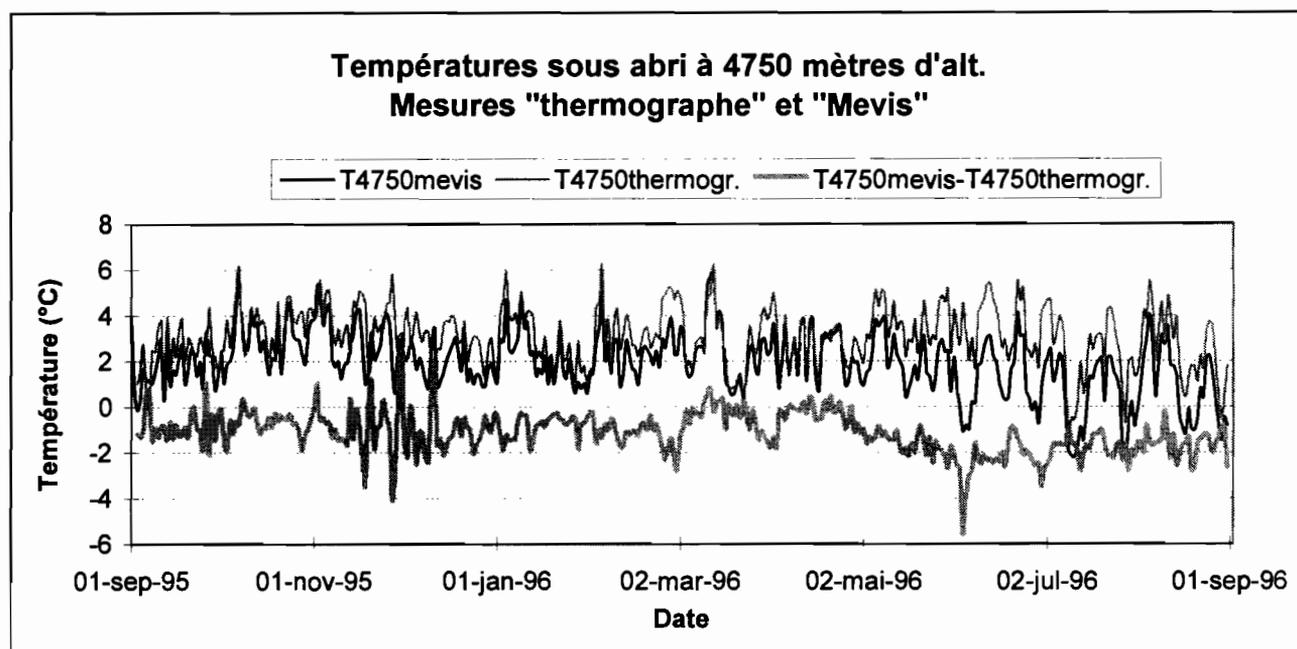


Figure C.16

C. 2.2. Températures journalières ventilées à 5025 et 5150 m

Depuis le 26/07/96, nous possédons des mesures ventilées de la température à 5025 m. Nous pouvons donc essayer d'approcher le gradient de température entre 5025 et 5150. Car à ces deux altitudes, nous disposons de capteurs et un site de mesure de même nature (psychromètres ventilés sur glacier)

La corrélation des mesures hautes est de $r^2 = 0.49$ (n = 36) (figure C.17).

Pour les mesures basses, elle est de $r^2 = 0.73$ (n = 36) (figure C.18).

La différence entre les mesures hautes est de l'ordre de 3 °C, alors que pour les mesures basses, elle n'atteint que 1°C en moyenne. On ne peut estimer raisonnablement un gradient de température entre ces deux altitudes. Cette si grande différence est due en partie au problème d'alimentation électrique

Il est difficile de se prononcer sur la saisonnalité du gradient, la série étant assez limitée, néanmoins il semble qu'il atteigne son maximum en juin-juillet, au plus fort de la saison sèche.

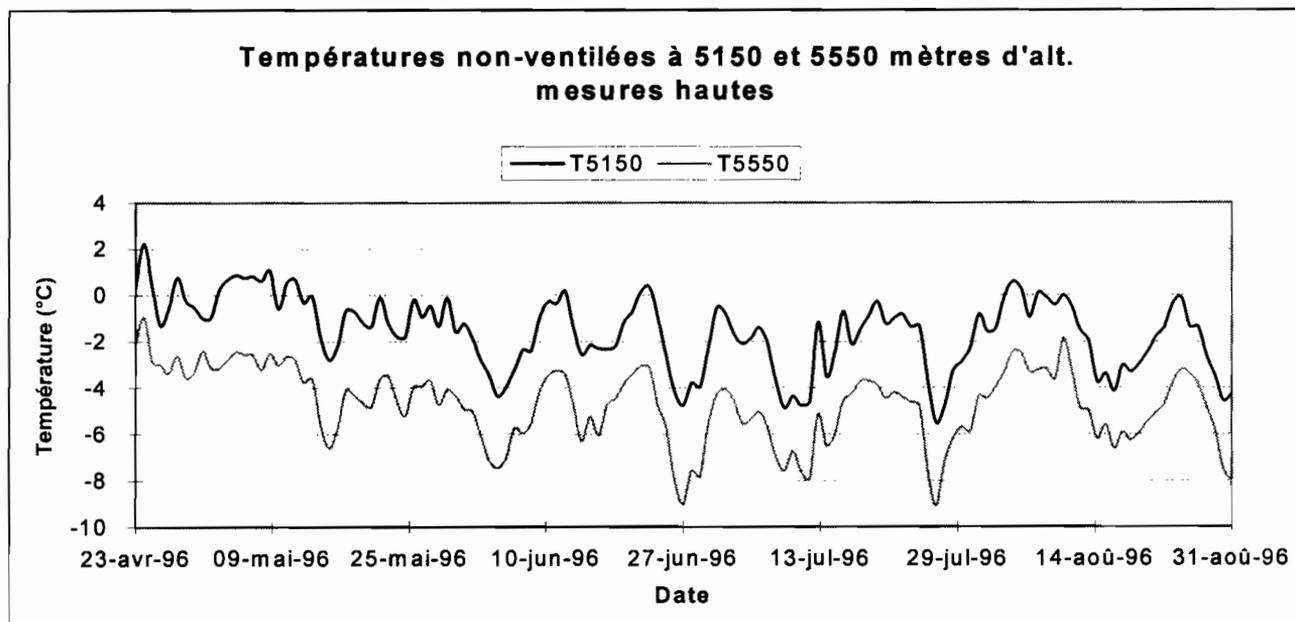


Figure C.19

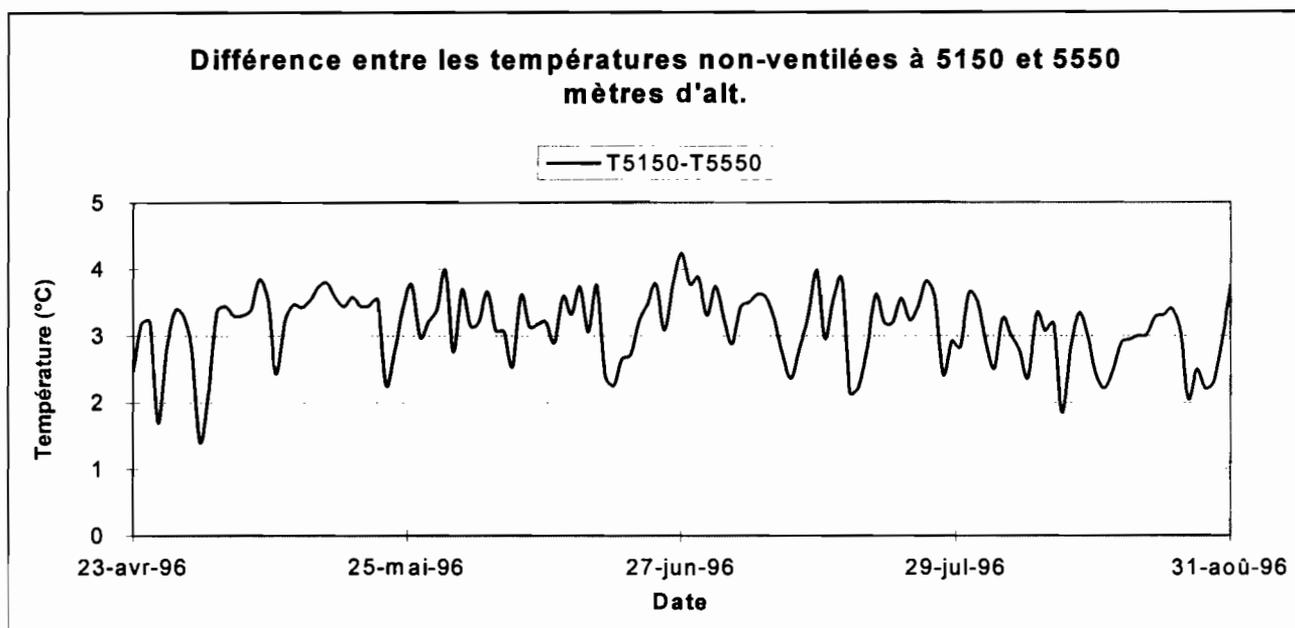


Figure C.20

C. 2.4. Températures journalières non-ventilées à 4750 et 5150 m, hors du glacier.

Nous pouvons là aussi tenter une estimation du gradient de température entre 4750 et 5150 mètres d'alt., les mesures étant faites hors du glacier (à la Plataforma et sur la moraine) et bien que les capteurs ne soient pas les mêmes (thermographe papier et sonde Pt à 4750, et enregistreur électronique Omnidata à 5165 m). Néanmoins, toutes les mesures sont non-ventilées et réalisées sous abri.

• Mesures « thermographe » et « Omnidata »

Les manques dans la courbe $T_{5150\text{moraine}}$ correspondent aux lacunes inhérentes au dépouillement de l'Omnidata (fig.C.21). En mettant « bout à bout » les séries complètes, nous obtenons une corrélation entre les deux mesures égale à $r^2 = 0,43$ ($n = 313$). Ces deux températures sont donc peu corrélées.

Si nous traçons la différence $T_{4750} - T_{5150}$ (fig. C.22), on devine une certaine saisonnalité (gradient maximal en juin-juillet entre 5150 et 5550). La moyenne sur la période étudiée de cette différence de $3.83\text{ }^{\circ}\text{C}$ fournit une estimation du gradient thermique : $- 0,97\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{m}$.

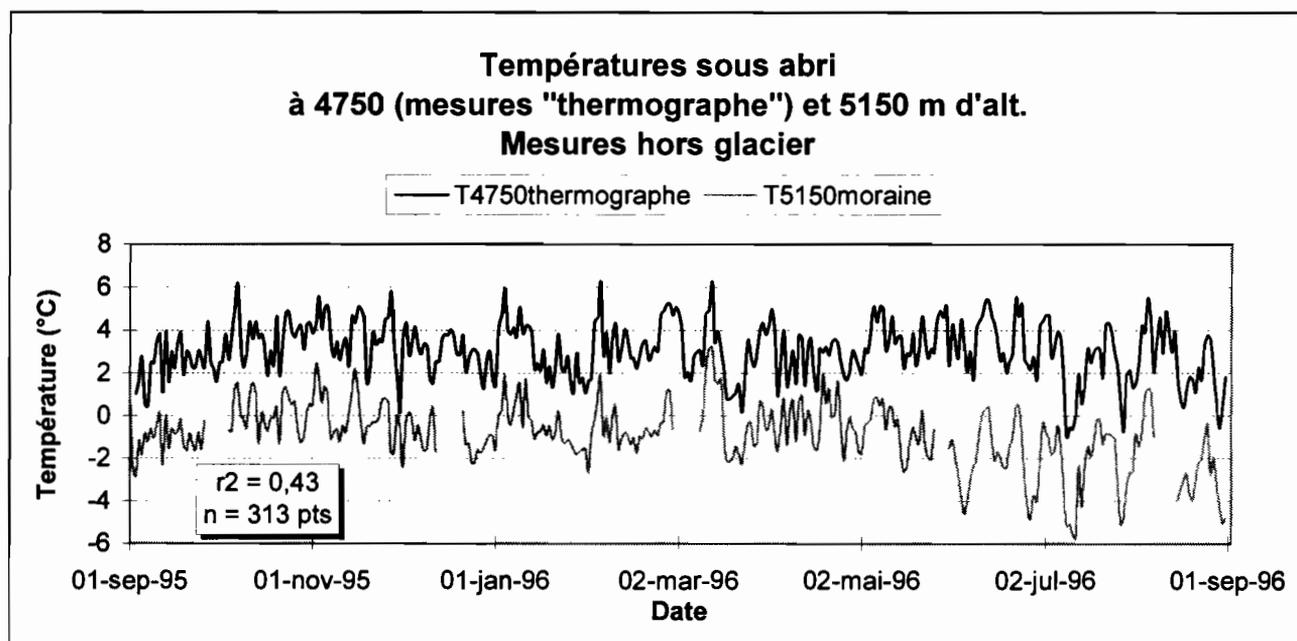


Figure C.21

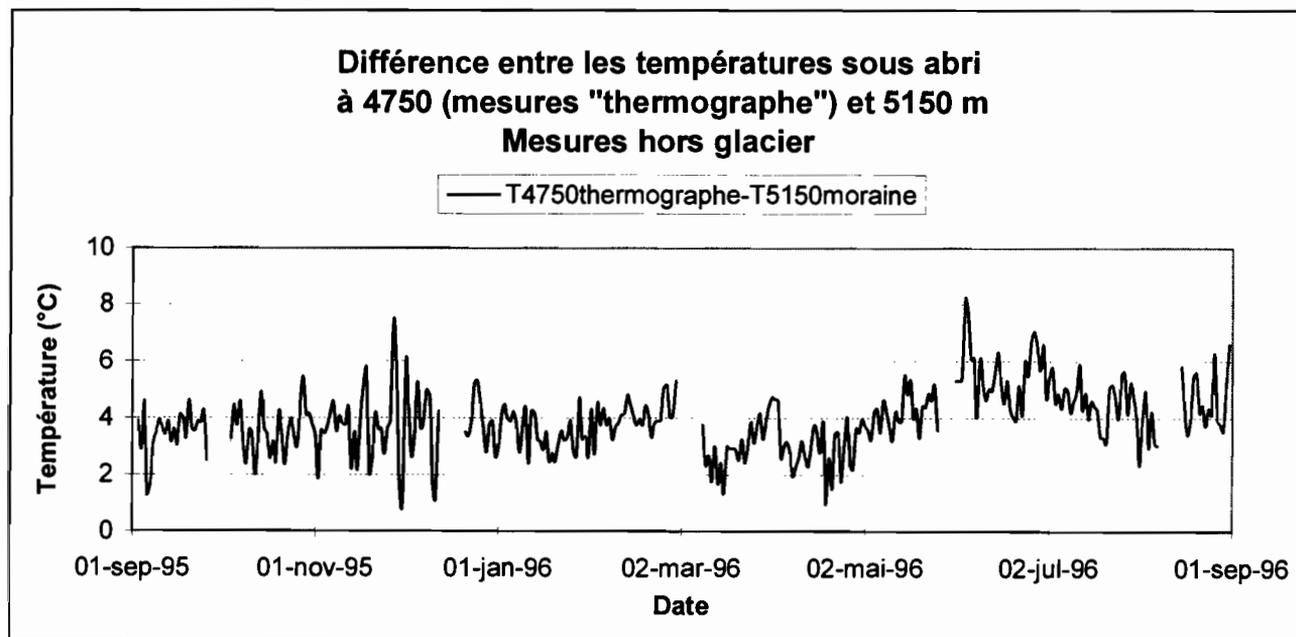


Figure C.22

• Mesures « Mevis » et « Omnidata »

La comparaison entre les mesures « Omnidata » et « Mevis » est très différente. Premièrement, les deux mesures brutes sont beaucoup mieux corrélées, $r^2 = 0,86$, $n = 331$ (fig. C.23). Et deuxièmement, la différence entre les valeurs enregistrées aux deux altitudes est plus ou moins constante, égale à $2,7\text{ °C}$ tout au long de l'année (fig. C.24). Elle ne laisse apparaître aucune saisonnalité. En moyenne annuelle, le gradient thermique est évalué à $0,68\text{ °C}/100\text{m}$ à partir de ces données.

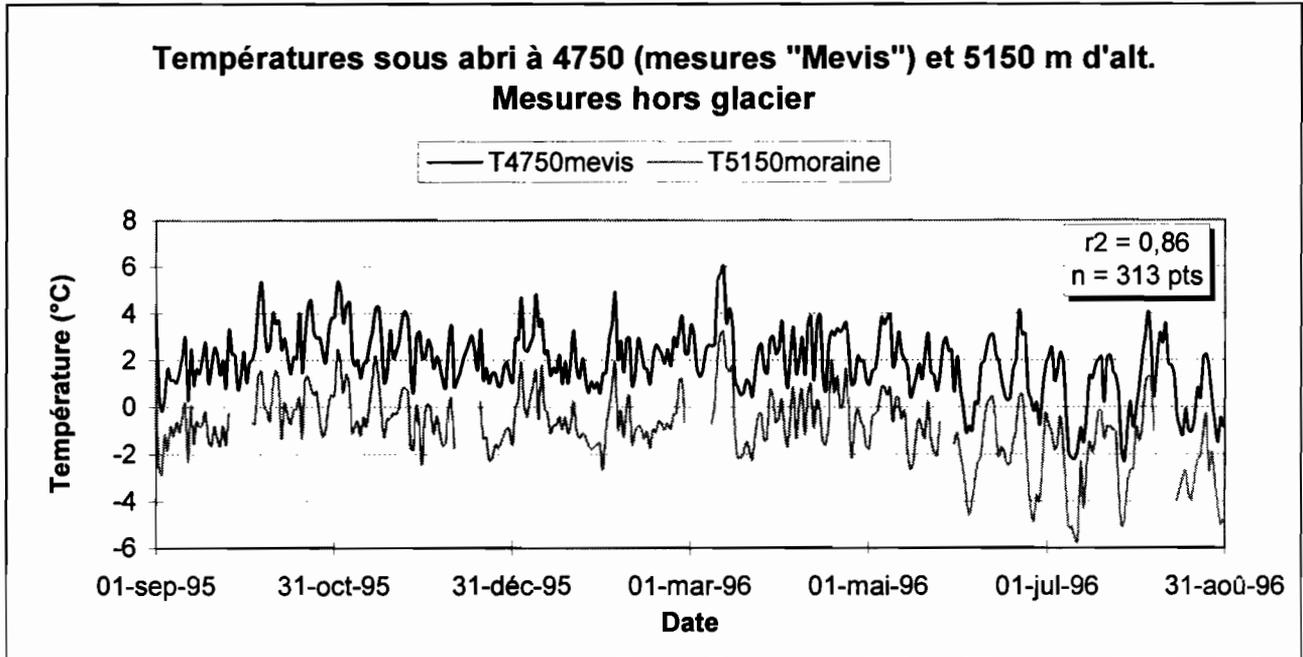


Figure C.23

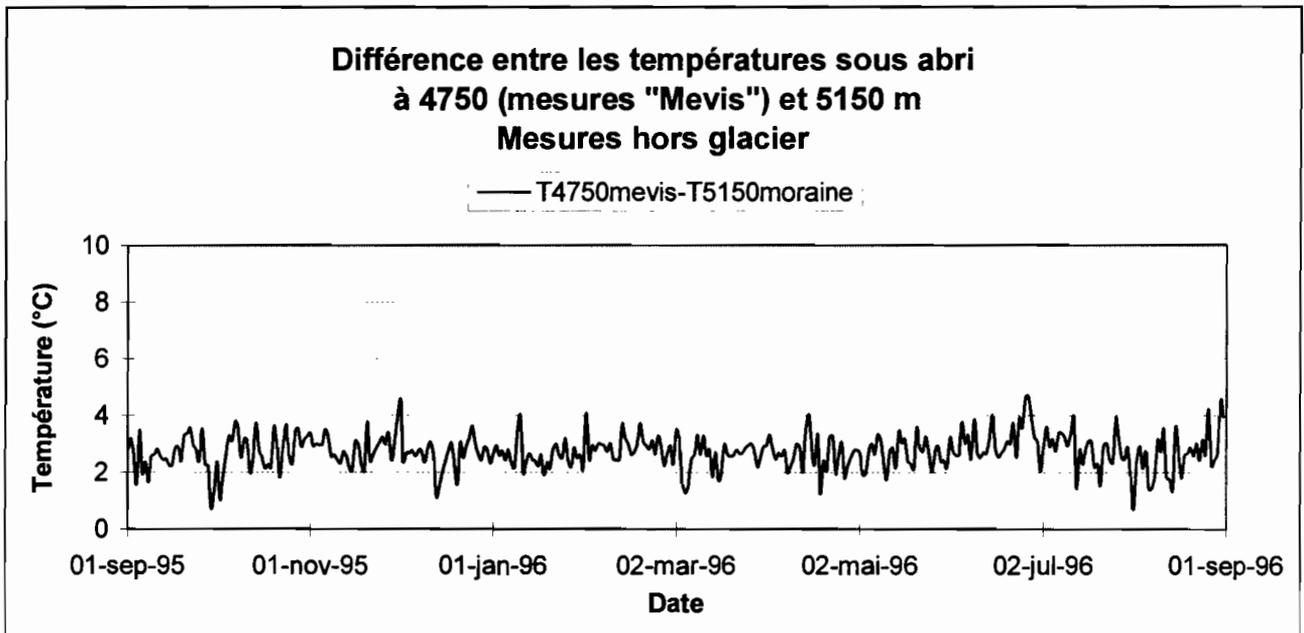


Figure C.24

C. 2.5. Récapitulatif des gradients et comparaison avec les années antérieures

Cette année, nous avons pu estimer le gradient de température avec l'altitude entre 4750 et 5150 m, pour chacun des mois de l'année, et entre 5150 et 5550 m, pour les cinq derniers (tableau C.1).

Le gradient 4750/5150_{thermographe} se démarque des autres par des valeurs de gradients plus fortes (en valeur absolue) ainsi que par des variations plus brutales.

Le gradient 5150/5550 n'a pu être estimé qu'à partir du mois d'avril, néanmoins nous pouvons déjà remarquer qu'il paraît bien en phase avec celui de 4750/5150_{Mevis}. Les années futures préciseront ce point. La figure C.25 illustre ce tableau.

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

	grad (T) - 4750/5150m. (°C/100m) mesures « Thermographe » et « Omnidata »	grad (T) - 4750/5150m. (°C/100m) mesures « Mevis^o » et « Omnidata »	grad(T) - 5550/5150m. (°C/100m)
Sept	-0,87	-0,67	
Oct	-0,89	-0,73	
Nov	-0,91	-0,71	
Dec	-0,97	-0,66	
Jan	-0,86	-0,65	
Fev	-1,02	-0,73	
Mar	-0,74	-0,64	
Avr	-0,75	-0,66	-0,71
Mai	-1,04	-0,66	-0,81
Juin	-1,39	-0,80	-0,82
Juil	-1,16	-0,70	-0,80
Août	-1,08	0,65	-0,72
Moyenne annuelle	-0,97	-0,68	-0,78

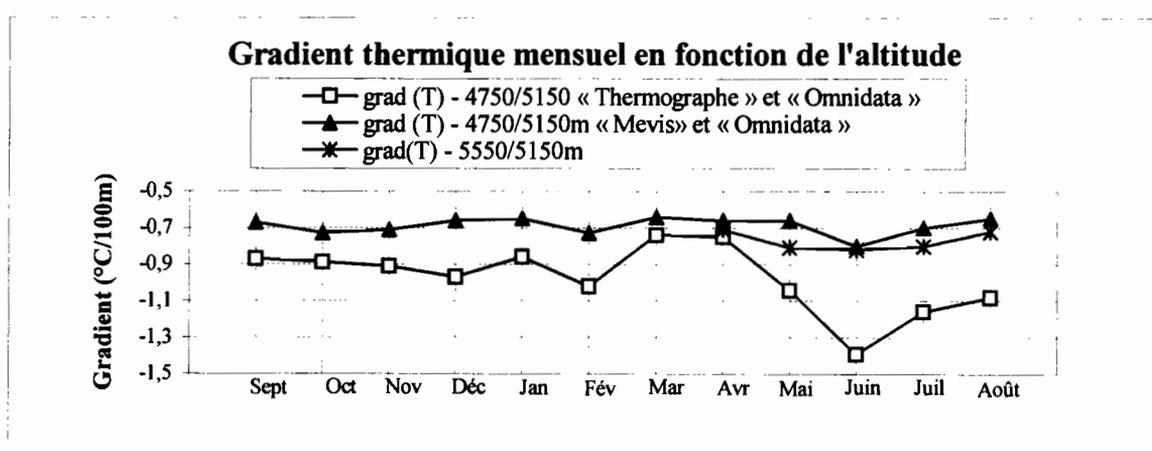


Figure C.25

Par rapport aux années précédentes, le gradient 4750/5150_{thermographe} est le plus élevé jamais enregistré (tableau C.2). Il semble même augmenter d'années en années depuis trois ans. Cela peut sans doute être attribué au thermographe lui-même. En effet, à la lumière des paragraphes C.2.1., C.2.4. et C.2.5., on peut légitimement avoir quelques doutes sur la fiabilité des enregistrements de ce capteur.

Tableau C.2
Comparaison des moyennes annuelles du gradient thermique

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

C. 2.6. Températures journalières ventilées et non-ventilées à 5150 m.

Depuis le 28/03/96 des psychromètres ventilés sont installés à 5150 m à proximité des thermomètres à sonde platine sous abri gérés par la 21X. La figure C.26 montre une comparaison entre les mesures « hautes » réalisées par ces deux capteurs. La moyenne de leur différence est égale à 2 °C. La corrélation entre les deux mesures est égale à : $r^2 = 0,59$ (n = 134).

Une corrélation simple ne suffit pas à expliquer les écarts observés, alors que cette dernière donnait de bons résultats pour les valeurs demi-horaires. Nous pouvons par contre établir les corrélations multiples suivantes, sur l'ensemble des données journalières :

Pour la mesure basse, pas de temps 24h :

$$T_v = 0.95 T_{nv} - 0.00105 SW\uparrow + 0.0439 u - 1.01 \quad r^2 = 0.879, n = 267$$

Pour les mesures hautes, pas de temps 24h :

$$T_v = 0.88 T_{nv} - 0.0046 SW\uparrow + 0.25 u - 1.19 \quad r^2 = 0.893, n = 267$$

avec : T_v Température ventilée T_{nv} Température non-ventilée
 $SW\uparrow$ rayonnement solaire réfléchi u vitesse du vent

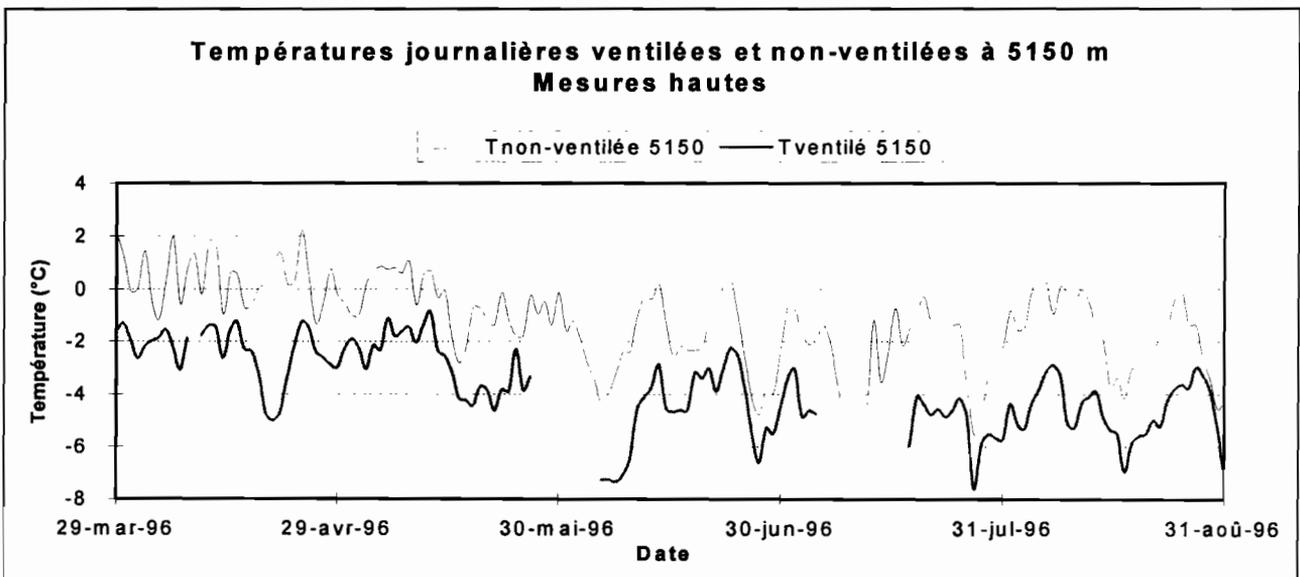


Figure C.26

C. 3. Températures minimales et maximales journalières

C. 3.1. Minima et maxima à 4750 mètres d'alt.

Concernant les mesures du thermographe papier, aucune saisonnalité ne se dégage du maxima journalier (figure C.27). En moyenne sur l'année le maximum journalier est de + 8,3 °C. En revanche, il apparaît nettement une saisonnalité pour le minimum, il est plus faible en saison sèche qu'en saison des pluies. La courbe de tendance confirme l'impression visuelle. En moyenne sur l'année, le minimum journalier est de - 0.1 °C.

A propos de l'amplitude thermique journalière, une saisonnalité apparaît là aussi nettement. Elle est plus importante en saison sèche (figure C.28). La moyenne sur l'année est de + 8,4 °C.

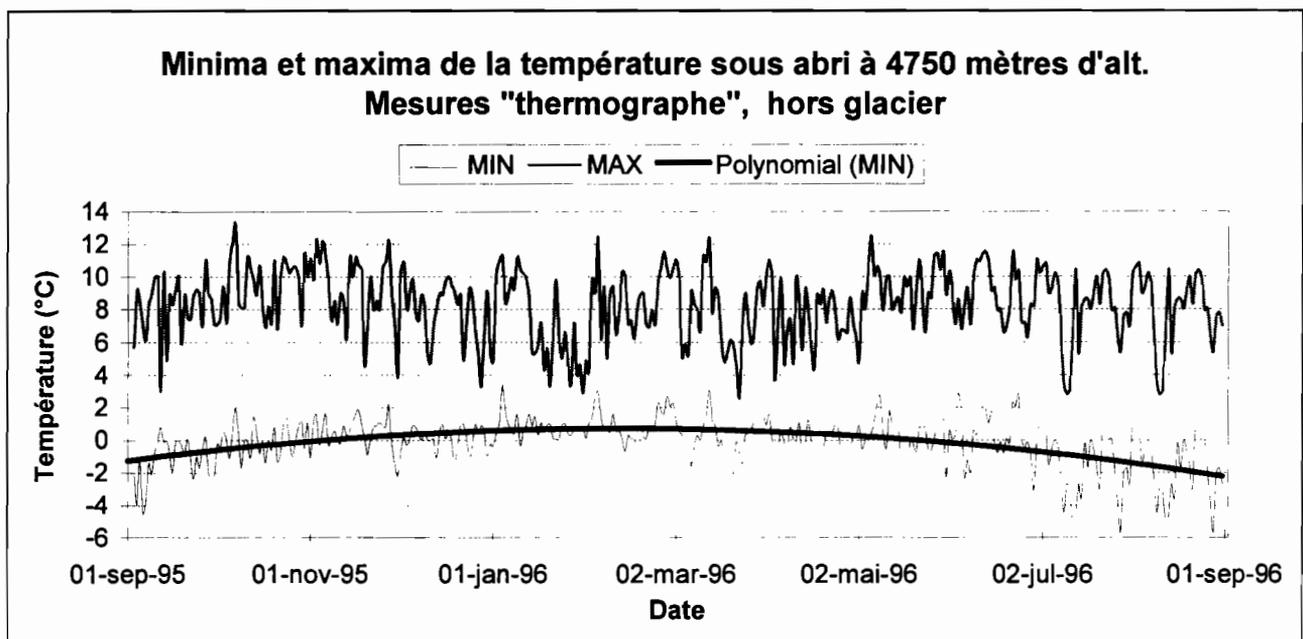


Figure C.27

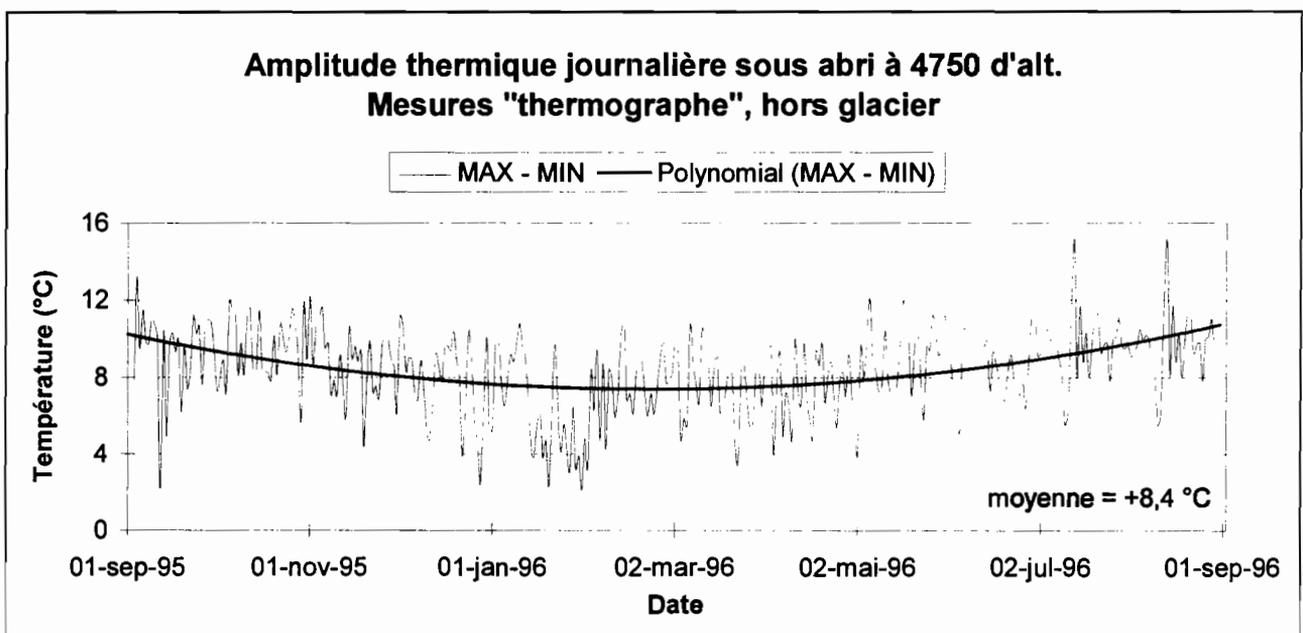


Figure C.28

Les mesures issues de la station Mevis présentent des tendances semblables mais avec des valeurs assez différentes. Ainsi, une saisonnalité apparaît pour les minima, ils sont plus faibles en saison sèche qu'en saison humide (fig. C.29). La lecture des maxima journaliers, elle, ne révèle pas de saisonnalité. En moyenne annuelle, le minimum journalier est de $-1,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, et le maximum journalier de $+13,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ces valeurs sont donc plus fortes (en valeurs absolues) que les précédentes. L'amplitude thermique est en accord avec les mesures « thermographe » (fig. C.30). Elle atteint son minimum en saison humide, et sa moyenne annuelle est égale à $8,2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

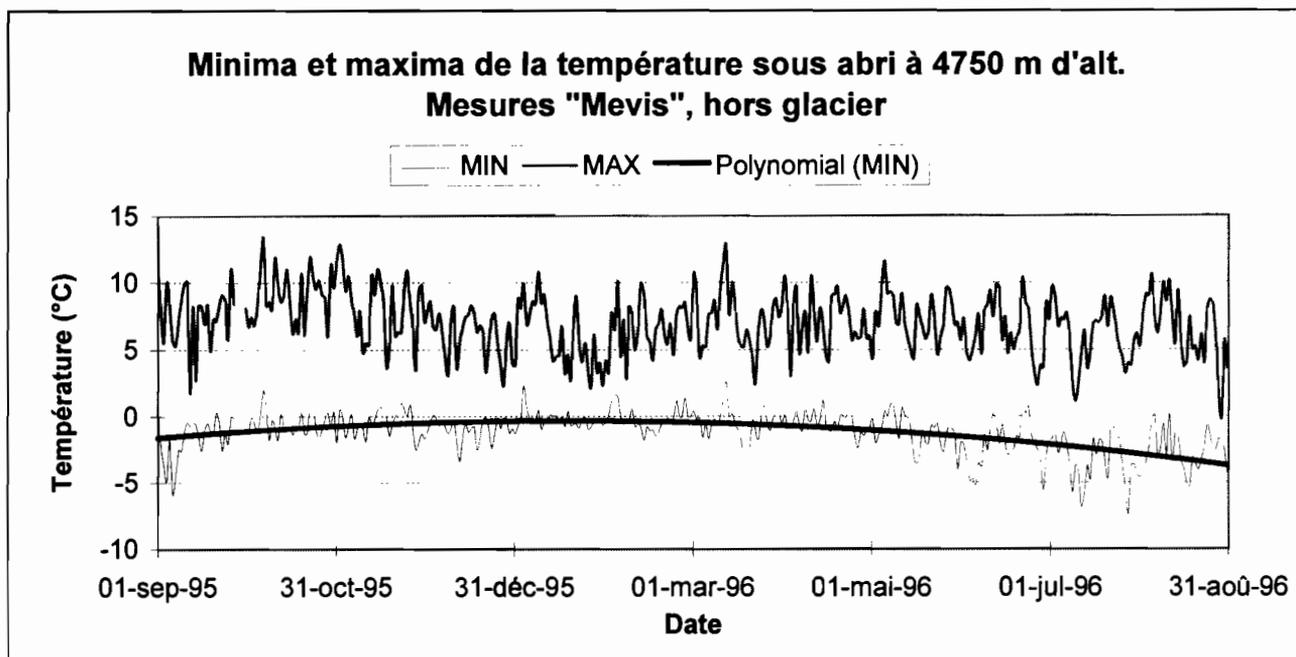


Figure C.29

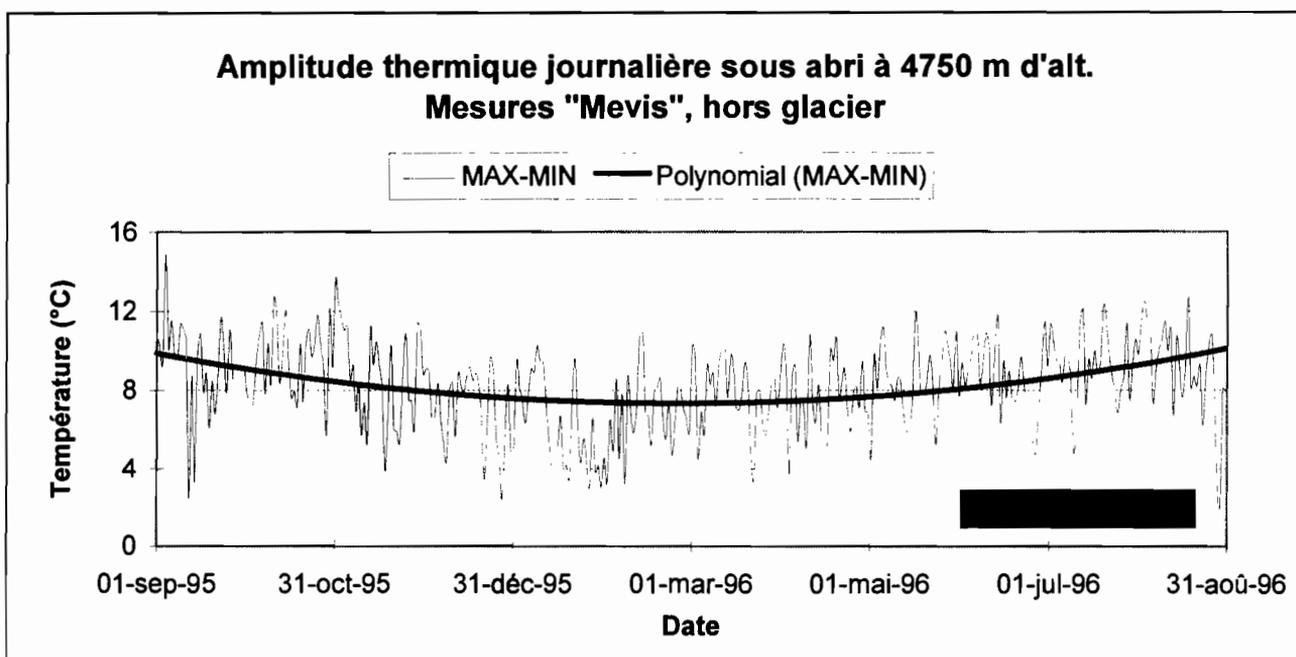


Figure C.30

C. 3.2. Minima et maxima à 5150 mètres d'alt., sur le glacier

- Température non ventilée, sous abri, mesure « haute »

Nous possédons les minima de la température mesurée sous abri par la sonde platine de la station 21X. Nous avons négligé les maxima car ils sont trop fortement perturbés par la radiation solaire. Une certaine saisonnalité se dégage de la courbe, elle est confirmée par la courbe de tendance (fig. C.31). On a là aussi des minima plus faibles en saison sèche. La moyenne sur l'année du minimum journalier est égale à $-3,7\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Remarque : si l'on évalue le gradient de température entre 4750 (mesure « thermographe ») et 5150 m à partir de la moyenne des minima à ces deux altitudes, on trouve une valeur proche des précédentes, à savoir environ $-0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ par 100 m.

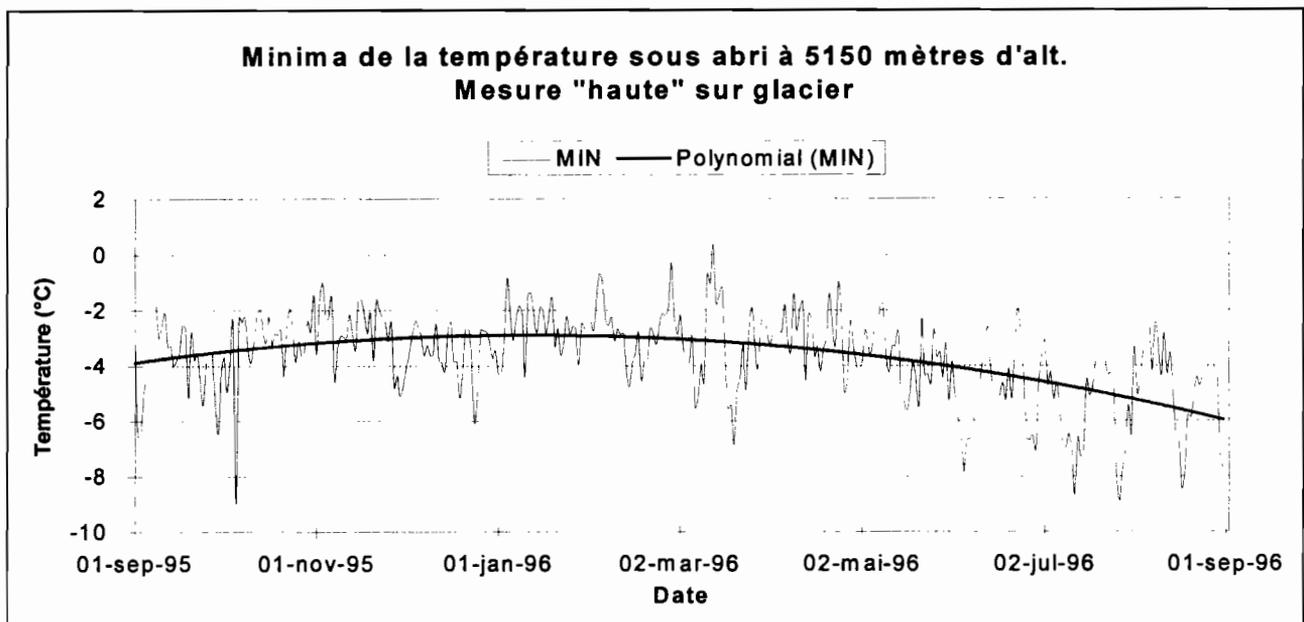


Figure C.31

- Température ventilée

Nous disposons, pour les cinq derniers mois de l'année, des minima et maxima des mesures de la température ventilée à 5150 m sur le glacier. Malgré de grandes périodes de lacunes, nous pouvons distinguer une certaine saisonnalité : les minima et maxima ont tendance à diminuer plus on s'avance dans la saison sèche (figure C.32). Les minima et maxima ne sont pas bien corrélés ($r^2 = 0,43$; $n = 132$) et leurs moyennes respectives, sur les périodes où il reste quelques données, sont égales à $-5,35\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $+3,1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Concernant l'amplitude thermique journalière (figure C.33), il semble qu'elle soit plus faible en saison sèche qu'en saison humide contrairement à ce que l'on observe à 4750 m (§ C.3.1). Mais l'échantillon reste trop faible pour se prononcer de manière définitive. La moyenne de l'amplitude thermique sur la période disponible est égale à $+8,45\text{ }^{\circ}\text{C}$. Cette valeur est très proche de celle trouvée à 4750 m.

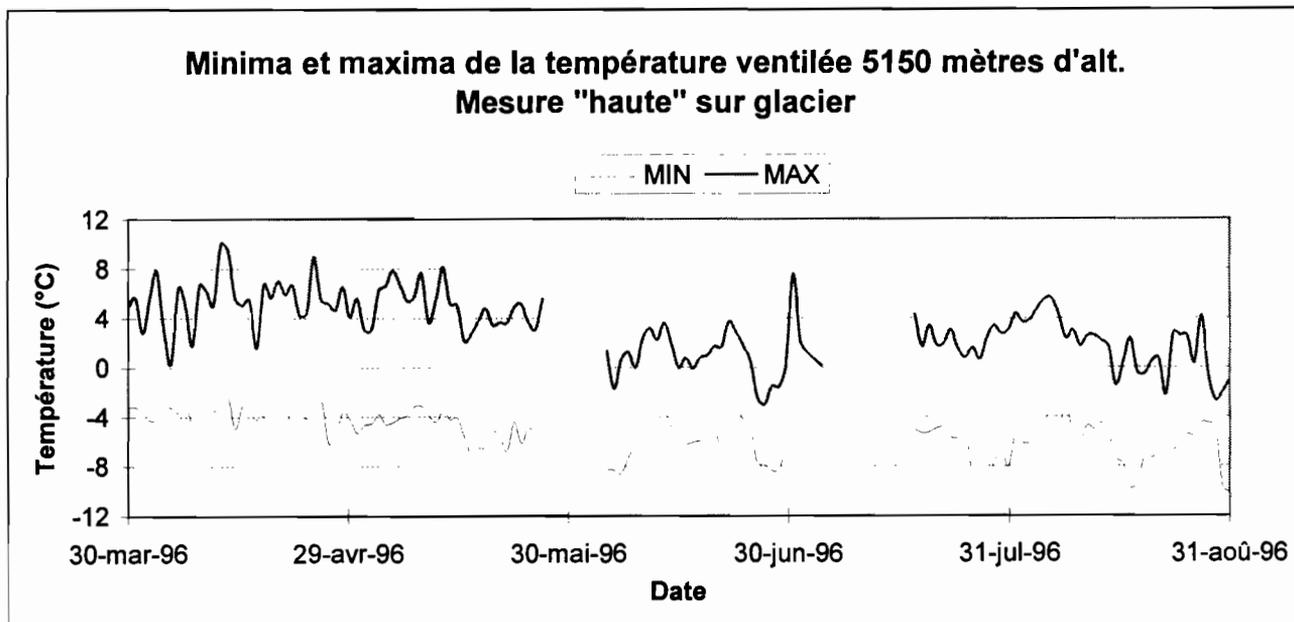


Figure C.32

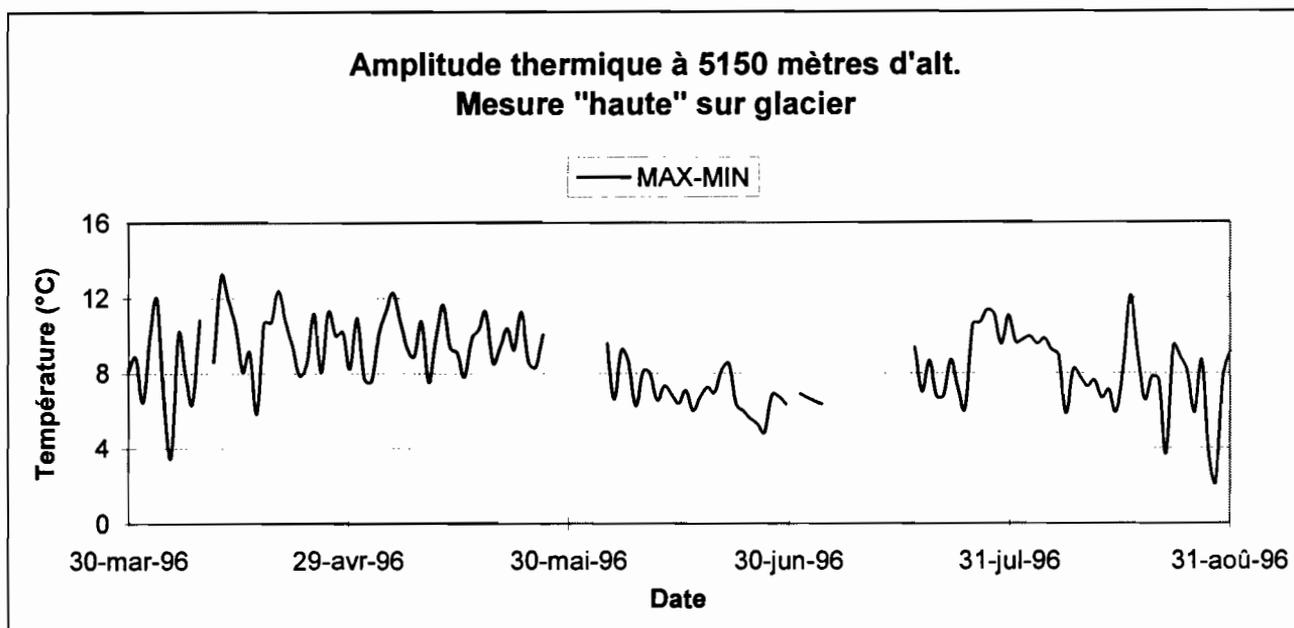


Figure C.33

C. 3.3. Minima et maxima à 5550 m, sur le glacier

Nous disposons, pour les quatre derniers mois de l'année hydrologique, des minima et maxima de la mesure de la température non-ventilée sous abri à 5550 m, sur le glacier. Les minima et maxima décroissent au fur et à mesure que l'on s'avance dans la saison sèche (figure C.34), ce qui paraît logique. Nous pouvons noter que la corrélation entre les minima et maxima est égale à : $r^2 = 0,51$ ($n = 130$), que la moyenne des minima est $-7,4$ °C et des maxima est $+0,4$ °C.

Concernant l'amplitude thermique (figure C.35) la période est trop courte pour se prononcer sur la saisonnalité de cette variable. Sa moyenne sur la période disponible est égale à $+7,9$ °C. On remarque qu'il s'agit d'une valeur très proche de celle trouvée à 4750 et 5150 m. L'amplitude thermique journalière semble être invariante en fonction de l'altitude.

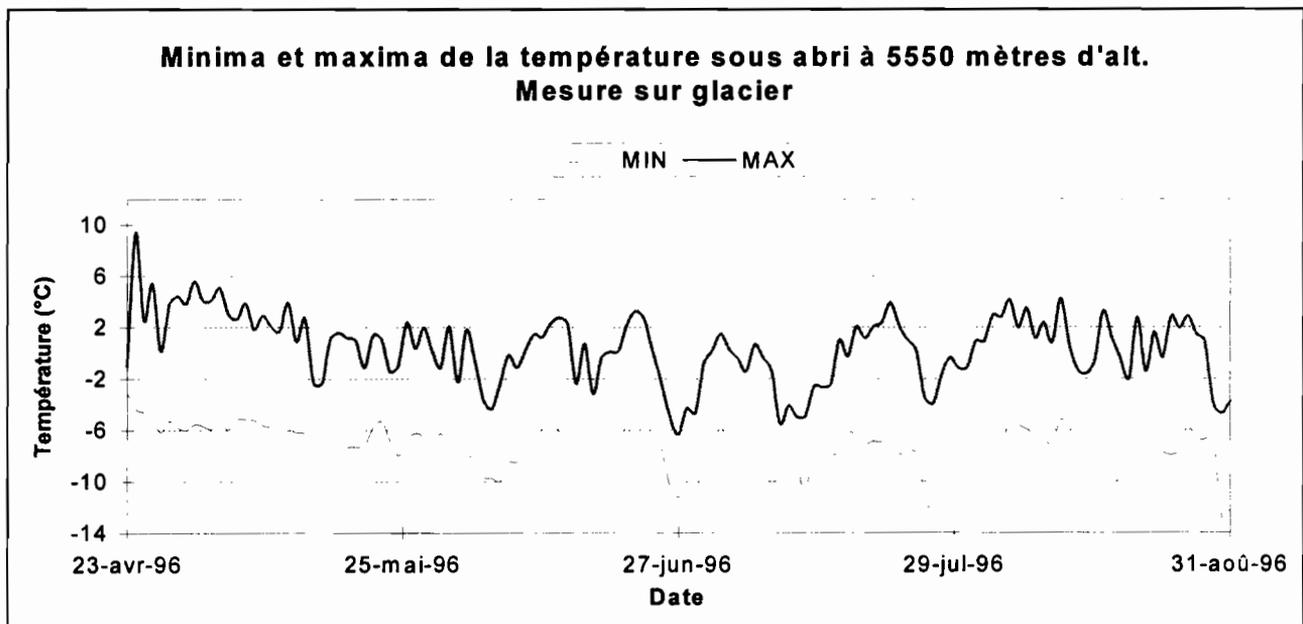


Figure C.34

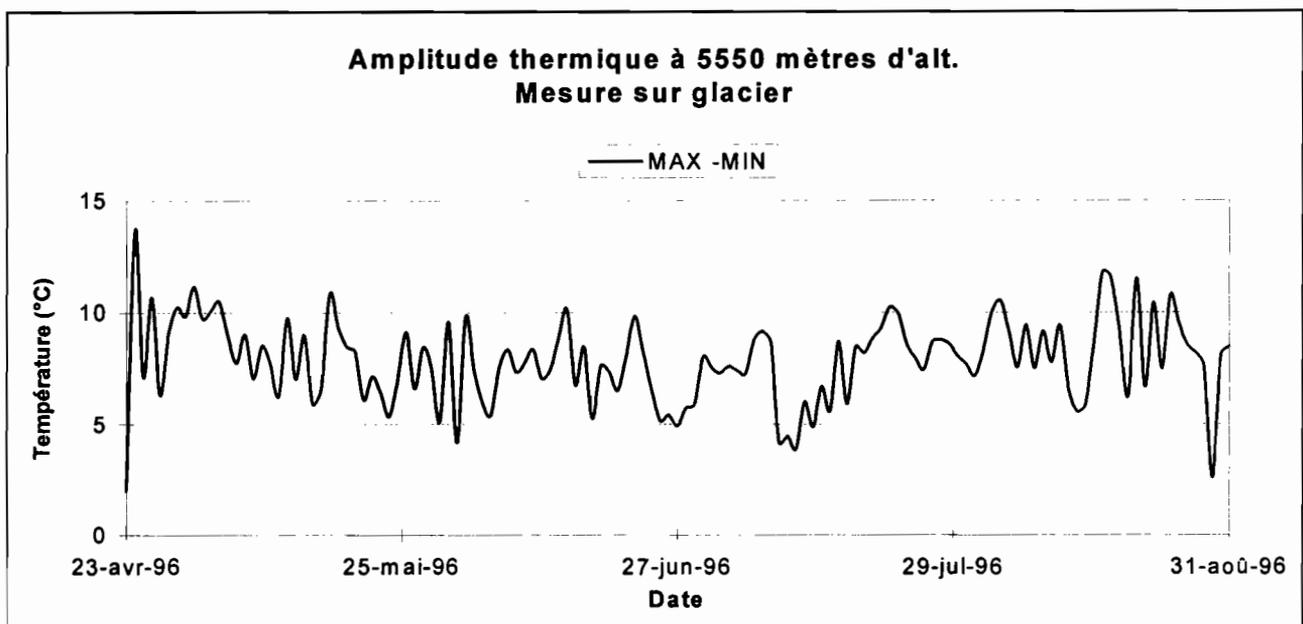


Figure C.35

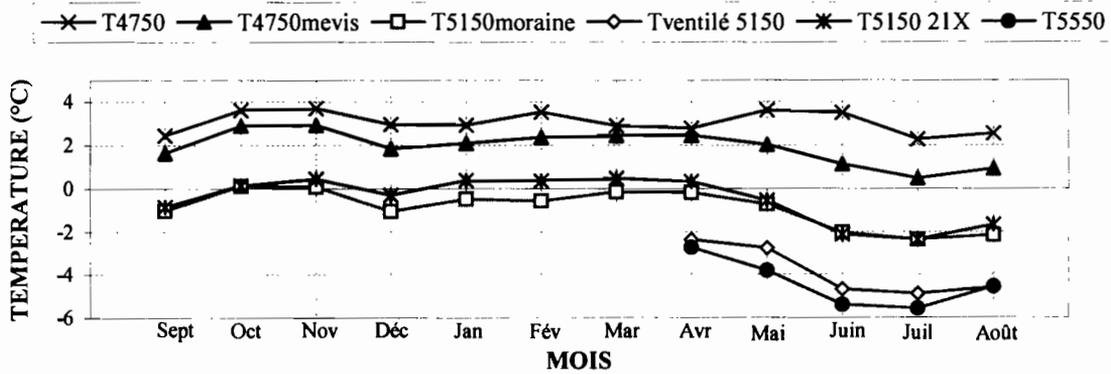
C. 4. Températures mensuelles et annuelles

C. 4.1. Valeurs mensuelles

Nous avons tracé sur la figure C.36 toutes les moyennes mensuelles dont nous disposons. Toutes ne sont pas directement comparables, en effet on trouve des températures mesurées sous abri, sans ventilation (T_{4750} , $T_{4750\text{mévis}}$, $T_{5150\text{moraine}}$, $T_{5150-21X}$ et T_{5550}) et avec ventilation ($T_{\text{ventilé } 5150}$), des températures mesurées sur le glacier ($T_{5150-21X}$, $T_{\text{ventilé } 5150}$ et T_{5550}) et hors du glacier (T_{4750} , $T_{4750\text{mévis}}$ et $T_{5150\text{moraine}}$). Il s'agit ici des mesures « hautes » pour $T_{5150-21X}$ et $T_{\text{ventilé } 5150}$. Cette année encore, on vérifie qu'aucune saisonnalité ne se dégage de la mesure du thermographe (T_{4750}) à la plateforma. Par contre, la nouvelle station Mevis semble, elle, en détecter une. L'absence de saisonnalité à cette altitude notée depuis le début du programme NGT ne serait donc

peut-être pas due à des conditions d'expositions particulières (col, orienté Est, particulièrement sensible aux remontées d'air chaud et humide de l'Amazonie), mais plus simplement à l'appareil de mesure... Aux plus hautes altitudes, la saisonnalité apparaît nettement, conformément aux observations des années précédentes. Cette année, seul le mois de décembre est un peu singulier, toutes les stations le désignent comme « anormalement » froid.

TEMPERATURES MENSUELLES



Remarque : la moyenne d'avril de T5550 porte sur les sept derniers jours de ce mois

Figure C.36

On note une importante différence entre les températures ventilées et non-ventilées à 5150 m sur le glacier, en moyenne sur les cinq derniers mois, il y a un écart de +2,6 °C. Les mesures réalisées à 5150 m sur et hors du glacier sont très proches l'une de l'autre et bien en phase.

Tableau C.3
Températures mensuelles aux différentes altitudes

	T4750 mesure thermographe	T4750 mesure mevis	T5150moraine mesure Ominidata	T5150 ventilée mesure « haute »	T5150 non- ventilée mesure « haute »	T5550 mesure « haute »
sep-95	2,46	1,66	-1,02		-0,85	
oct-95	3,62	2,91	0,12		0,15	
nov-95	3,71	2,93	0,08		0,43	
déc-95	2,96	1,86	-1,06		-0,32	
jan-96	2,94	2,10	-0,48		0,38	
fév-96	3,52	2,37	-0,56		0,34	
mar-96	2,90	2,45	-0,16		0,48	
avr-96	2,79	2,44	-0,20	-2,36	0,32	-2,73
mai-96	3,61	2,03	-0,73	-2,77	-0,55	-3,81
jun-96	3,51	1,14	-2,05	-4,67	-2,13	-5,41
jul-96	2,27	0,48	-2,37	-4,91	-2,37	-5,58
aoû-96	2,53	0,91	-2,15	-4,60	-1,70	-4,56
moyenne	3,07	1,94	-0,88	-3,86	-0,49	-4,42

Toutes les valeurs sont exprimées en °C

Tableau C.4
Extrema mensuels aux différentes altitudes

	Min 4750 mesures thermographe	Max 4750 mesures thermographe	Min 4750 mesures Mevis	Max 4750 mesures Mevis	Min 5150 mesures hautes ventilées	Max 5150 mesures hautes ventilées	Min 5150 mesures hautes non-ventilées	Min 5550 mesures hautes	Max 5550 mesures hautes
sep-95	-1,28	8,13	-1,67	7,59			-3,96		
oct-95	0,02	9,46	-0,51	8,97			-3,15		
nov-95	0,47	9,23	-0,50	8,21			-2,82		
déc-95	0,11	7,88	-0,99	6,18			-3,49		
jan-96	0,80	7,16	-0,29	6,01			-2,63		
fév-96	0,94	8,32	-0,19	6,61			-2,70		
mar-96	0,16	7,69	-0,52	7,20			-3,30		
avr-96	0,03	7,59	-0,49	7,25	-3,87	5,46	-2,88	-5,07	3,56
mai-96	0,28	9,20	-1,18	7,36	-4,81	4,89	-3,77	-6,49	1,59
jun-96	0,32	8,92	-2,24	6,41	-6,19	0,82	-5,02	-7,93	-0,74
juil-96	-1,63	8,05	-3,26	5,99	-6,38	2,32	-5,60	-8,36	-0,78
août-96	-1,63	8,05	-2,59	6,48	-6,07	1,72	-4,72	-7,62	0,82
moyenne	-0,12	8,31	-1,20	7,02	-5,46	3,04	-3,67	-7,09	0,89

Toutes les valeurs sont exprimées en °C

- Comparaison avec les années précédentes

Nous avons représenté les températures non ventilées mensuelles à 5150 m sur glacier pour les trois derniers cycles hydrologiques (figure C.37). Mis à part la valeur du mois de décembre, l'allure de la courbe de cette année est comparable aux autres.

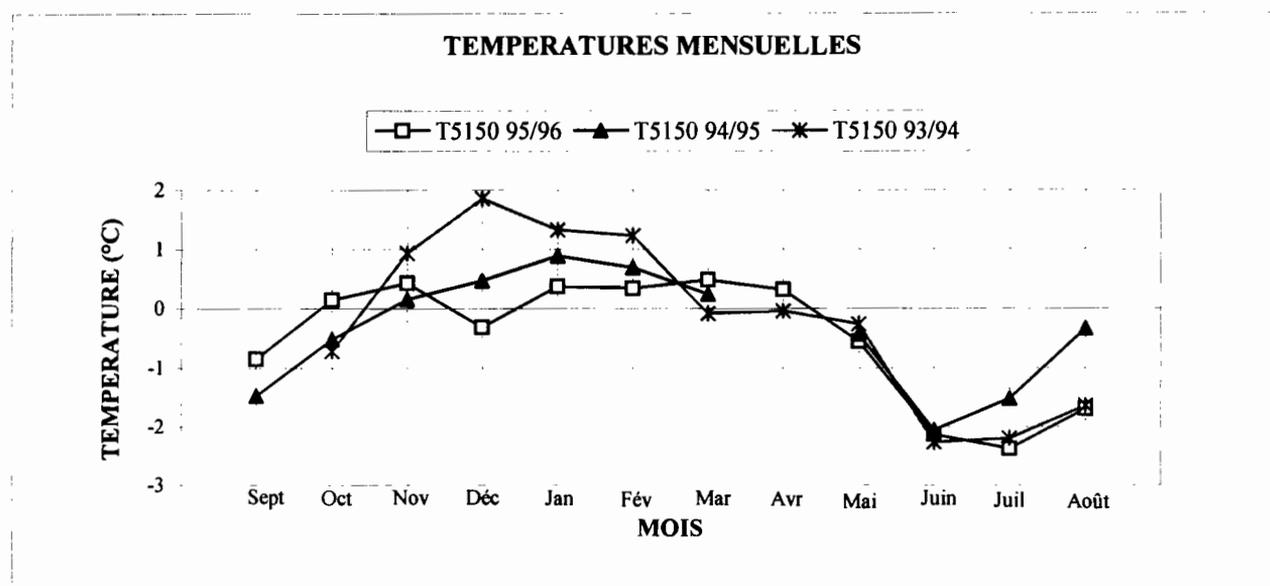


Figure C.37

C. 4.2. Valeurs annuelles

Une comparaison avec les années précédentes de la température moyenne annuelle est présentée dans le tableau C.5. La température à 4750 m est la plus élevée jamais enregistrée, depuis le début du programme. Paradoxalement, plus en altitude, les valeurs à 5150 m sur et hors glacier indiquent que l'année 95/96 a été une des plus froides.

Tableau C.5
Température annuelle aux différentes altitudes

	T ₄₇₅₀ thermogr. (°C)	T ₄₇₅₀ mevis (°C)	T ₄₈₃₀ (°C)	T ₅₁₅₀ moraine (°C)	T ₅₁₅₀ non-ventilée (°C)	T ₅₁₅₀ ventilée (°C)	T ₅₅₅₀ non-ventilée (°C)
95-96	+ 3,1	+1.9		- 0,9	- 0,5	- 3,9(*)	- 4,4(*)
94-95	+ 1,6		+ 1,13	- 0,25	- 0,35		
93-94	+ 1,0		+ 1,14	- 1,0	- 0,2		
92-93	+ 2,2		+ 0,9				
91-92	+ 2,8						

(*) : moyenne sur les cinq derniers mois de l'année.

D. TEMPERATURES DANS LE MANTEAU NEIGEUX ET LA GLACE

La température à l'intérieur du manteau neigeux et dans la glace a été mesurée cette année de façon continue à 5150 m. Le 14/09/95, deux thermocouples, gérés par la station Campbell 21X, ont été placés respectivement à 50 et 100 cm en dessous de la surface. Vers le 10/10/95 le premier « émergeait » du fait de l'ablation, le second, initialement à 100 cm sous la surface, est apparu à la surface du glacier vers le 25/10/95 (le mois d'octobre 95 a été le mois de l'année qui a connu la plus grande ablation : elle a atteint 1 m d'eau à 5150 m). Ces deux thermocouples sont restés à la surface jusqu'au début de la saison des pluies (début décembre 95). A cette période, ils ont été placés à l'interface glace/neige, leur profondeur a donc augmenté tout au long de la saison des pluies. Mi-avril 96, ils étaient sous 110 cm de neige environ, la saison sèche a ensuite fait disparaître progressivement cette couche de neige et ces derniers ont réapparu à la surface courant août 96. Le 28/03/96, sept autres thermocouples, gérés par la nouvelle station Campbell CR10, étaient installés respectivement dans la neige à 20, 30, 50, 70 et dans la glace à 100, 150 et 270 cm de profondeur. Les plus proches de la surface ont été découverts progressivement au cours de l'année.

D. 1. Valeurs instantanées

Nous présentons sur les figures suivantes les températures dans la neige/glace, la température de l'air divisée par 10 (mesure basse de la température de l'air non-ventilée -la mesure basse de la 21X-) et une représentation simplifiée (mais juste) de l'ablation / accumulation (mesure de la sonde à ultra son de la 21X).

D. 1.1. Thermocouples 21X

Nous présentons des périodes réparties tout au long de l'année : octobre (1^{ère} semaine), janvier (dernière semaine), avril (2^{ème} semaine), mai (dernière semaine), juin (dernière semaine), juillet (1^{ère} semaine) et août (1^{ère} semaine). T-x représente la température mesurée à x cm de profondeur au début de la période représentée. T-x (1) et T-x (2) sont les températures mesurées par les deux thermocouples « 21X » lorsqu'ils ont été placés à l'interface glace/neige.

Octobre 95 (fig. D.1)

La température est très stable et quasiment identique aux deux profondeurs. Néanmoins des pics négatifs surviennent aux heures les plus chaudes de la journée. On peut expliquer ces pics par une variation trop grande et trop rapide de la température de référence. Cette dernière est située dans le boîtier renfermant la centrale, celui-ci connaît les mêmes pics de températures que les thermomètres sous abri (on note parfois une augmentation de la température de 10°C en une heure). Cette situation est la conséquence d'un rayonnement intense qui fait élever la température des objets (même blancs) très rapidement. Lorsque la température de l'air varie progressivement, les températures à -30 et -80 cm indiquent toutes les deux une valeur d'environ -0.25°C.

Néanmoins quelques points restent singuliers : pourquoi n'y a-t-il pas de pics les 03 et 04-oct-95 et qu'il y en a les 01 et 07-oct-95, les conditions thermiques de l'air semblant être très proches? Et pourquoi le thermocouple « T-30cm » est-il beaucoup plus perturbé que le second.

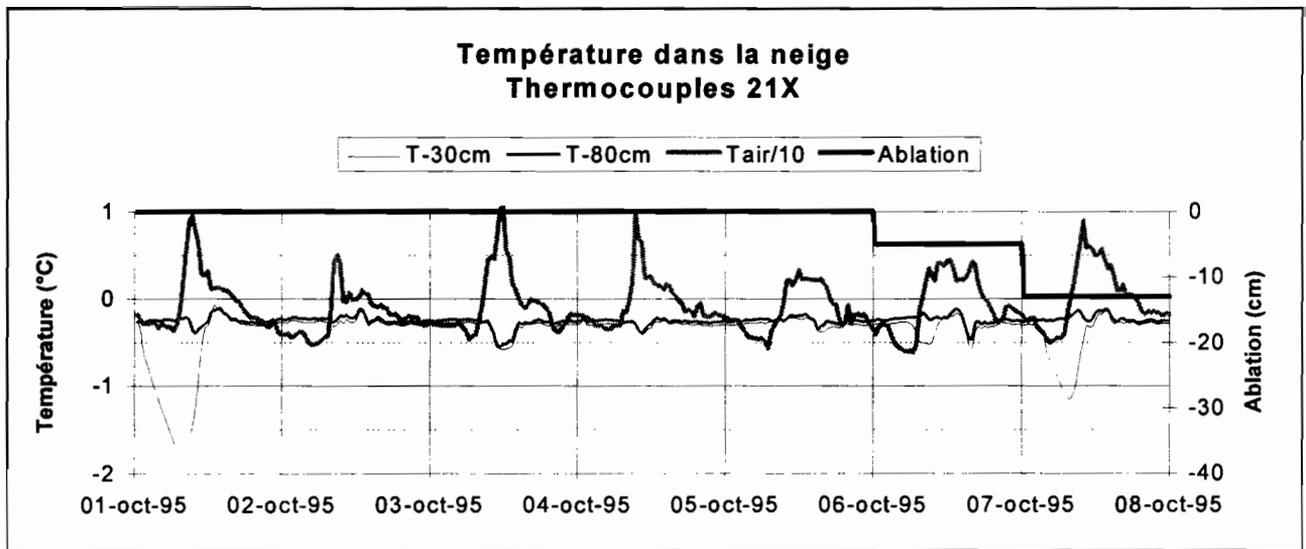


Figure D.1

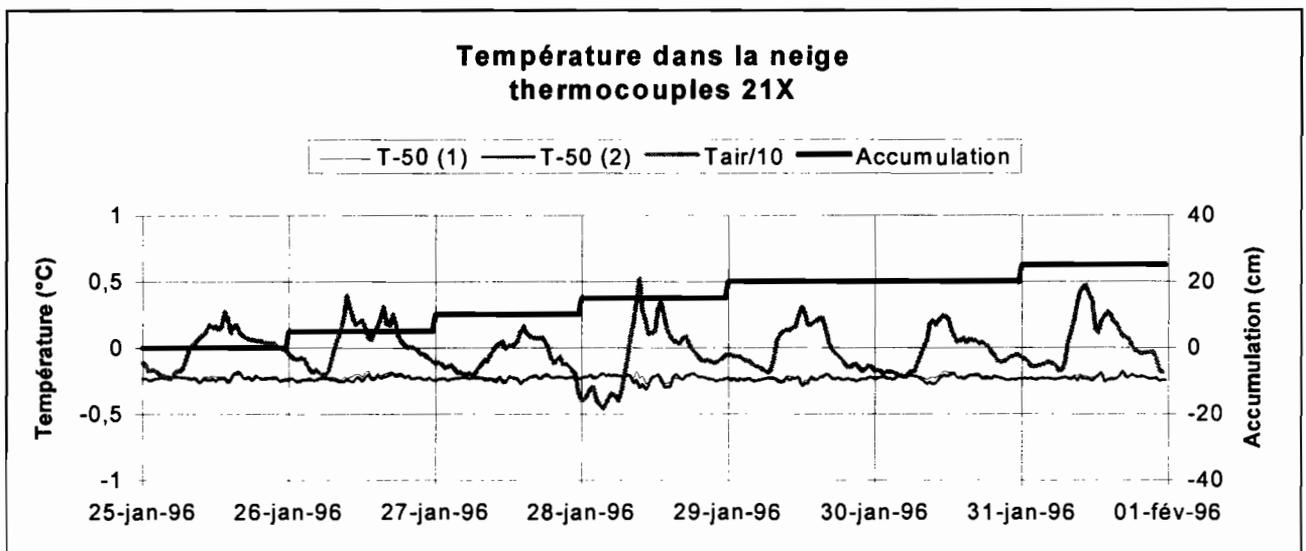


Figure D.2

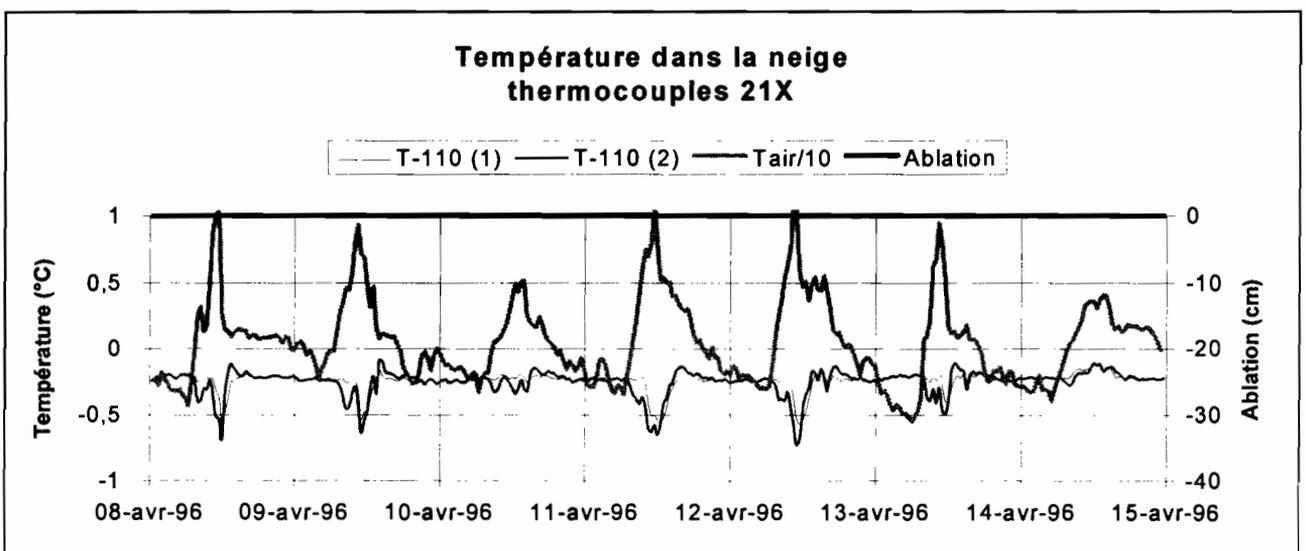


Figure D.3

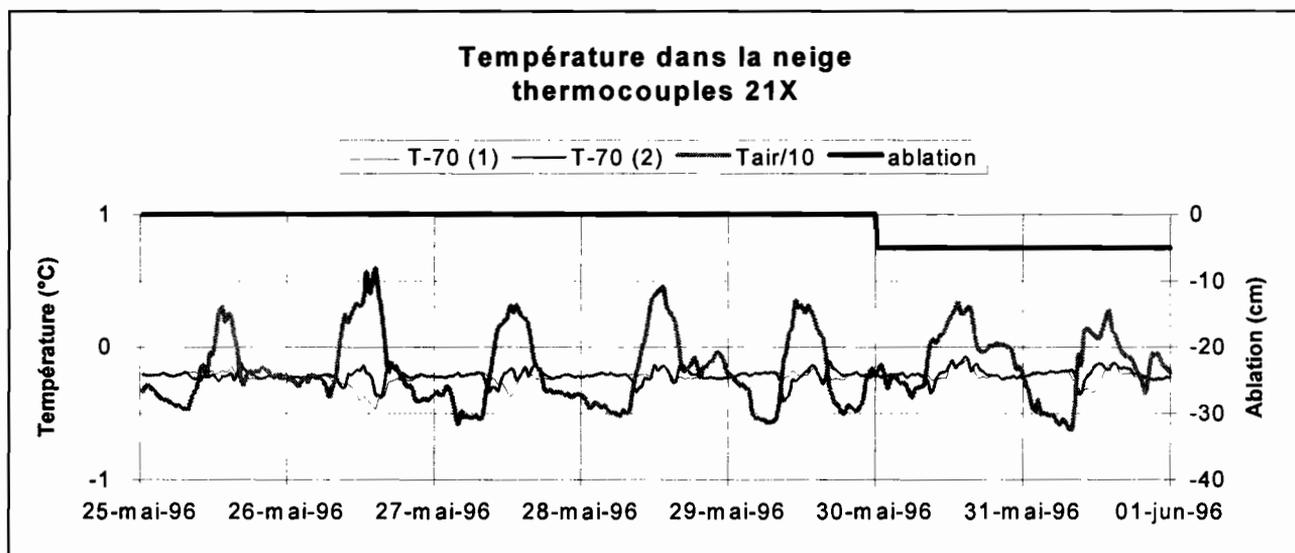


Figure D.4

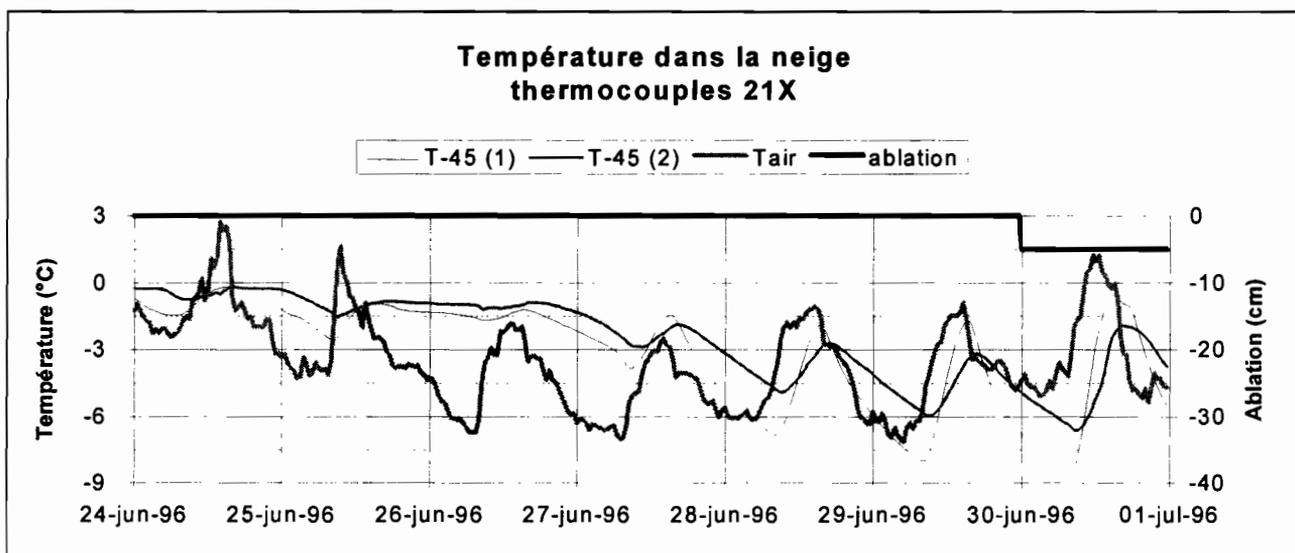


Figure D.5

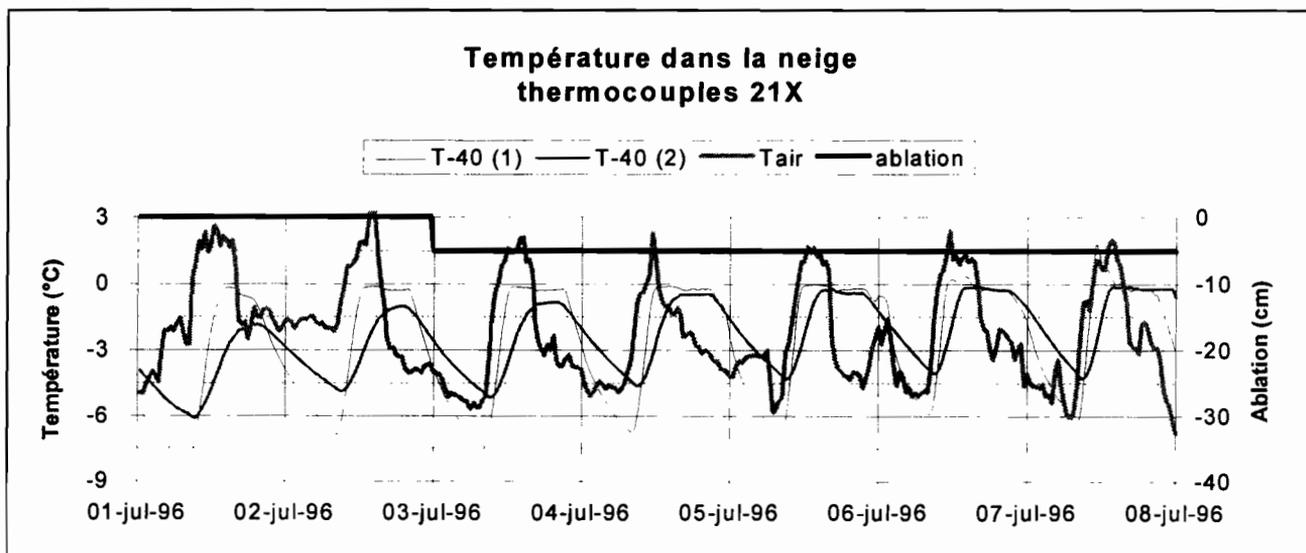


Figure D.6

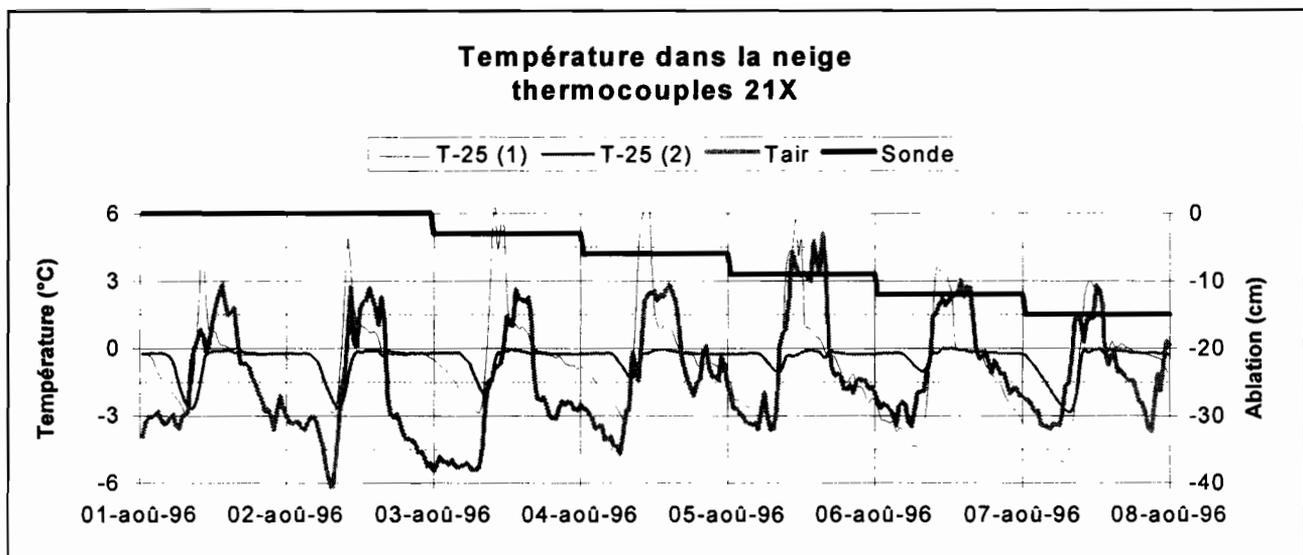


Figure D.7

Janvier 96 (fig. D.2)

Les variations de la température de l'air sont moins grandes, en conséquence la température dans la neige est très stable (seulement perturbée par les plus fortes variations de T_{ref}) et est égale à environ -0.2°C .

Avril 96 (fig. D.3)

On retrouve les mêmes problèmes dus à la trop brutale variation de la température de référence. Lorsque celle-ci connaît des variations plus graduelles, on retrouve une température de -0.2°C à 110 cm de profondeur.

Mai 96 (fig. D.4)

Le phénomène précédent est moins présent la température de l'air oscillant seulement entre -5 et $+5^{\circ}\text{C}$. On mesure toujours environ -0.2°C à 70 cm sous la neige.

Juin 96 (fig. D.5)

On note là un comportement très différent. La température à 45 cm sous la neige connaît de grandes variations. La réponse des deux thermocouples est sensiblement différentes bien qu'ils révèlent les mêmes tendances.

La température dans la neige est, au 24 juin, aux environs des mesures précédentes (-0.25°C), puis elle diminue progressivement pendant les deux jours suivants et elle commence à osciller. Cette oscillation s'amplifie jusqu'à suivre de très près la température de l'air (en amplitude et en phase).

Comment expliquer ce soudain et brutal changement de comportement?

Pour la première fois la température de l'air connaît des variations journalières qui restent négatives (sauf les deux premiers jours). Le troisième jour la température de l'air reste constamment négative : la couche de neige refroidit progressivement. Le quatrième jour la température à 40 cm sous la surface entame ses oscillations. Le cinquième jour, elle semble avoir atteint une sorte de régime permanent qui se poursuit jusqu'au septième jour.

Il faut remarquer que les minima et maxima (tous les deux négatifs) de la température de la neige présentent un léger décalage de phase avec T_{air} : il est d'environ une heure pour les maxima et semble plus important pour les minima. Pour reprendre l'hypothèse de Wagnon (rapport n°49), tout se passe comme si un front chaud (ou respectivement froid) pénétrait en profondeur du manteau neigeux. Mais attention, ceci est (ou semble) vrai à la condition (au moins celle-là, peut-être il y en a-t-il d'autres...) que ces fronts « chaud » et « froid » restent négatifs!

Comment expliquer cette « mise en oscillation »?

Et comment expliquer que les oscillations ne commencent pas dès le troisième jour, là où les températures sont déjà négatives? Seule la présence d'eau (fusion, percolation des jours précédents) à l'intérieur de la « matrice » neigeuse peut expliquer ce « retard à l'allumage ». Le troisième jour (et aussi certainement en grande partie le deuxième) a « servi » à transformer l'eau en glace et ce dans, au moins, les quarantes premiers centimètres. Et c'est seulement le changement d'état survenu que la couche de neige et glace (en tous cas matériau **solide**) a pu répondre aux sollicitations thermiques que lui imposait l'air à sa frontière supérieure.

On peut donc en déduire que toute l'année, sauf aux mois les plus froids (juin-juillet), la couche de neige est gorgée d'eau, qu'il y a continuellement percolation, puisque le manteau neigeux ne répond pas aux sollicitations thermiques de l'atmosphère.

Juillet 96 (fig. D.6)

Cette période suit exactement la précédente. Les oscillations se poursuivent, elles sont néanmoins bornées par 0. En effet, la température de l'air est positive une ou deux heures par jour (vers midi) et cela est suffisant pour faire fondre un peu de neige (d'où le « plateau » à environ 0°C de la température de la neige). La température de la neige ne recommence à diminuer uniquement une fois que l'eau de fusion s'est transformée en glace. Il s'écoule environ 3-4 heures entre le moment où T_{air} redevient négative et le moment où T_{neige} quitte la valeur 0°C pour aller vers des valeurs plus négatives, ce qui correspond donc au temps qu'il faut à l'eau pour changer d'état dans les 40 premiers centimètres du manteau.

Août 96 (fig. D.7)

Cette figure montre que le thermocouple n°1 est à la surface puisqu'il enregistre des valeurs positives la journée (est-il remonté au cours de l'année, sa position initiale a-t-elle été mal mesurée ?). Pour le second thermocouple, on observe de nouveau le palier de changement d'état à $T=0^{\circ}\text{C}$ puis la baisse de la température jusqu'au lever du jour où tout dégèle rapidement, presque sans retard par rapport à l'air : indice que lui aussi n'est plus très loin de la surface. Le 07/8 il est « théoriquement » à 10cm de profondeur, ce qui à la lumière des observations précédentes, semble probable. On pouvait deviner cette différence de quelques centimètres d'après l'allure des courbes sur les figures D.5 et D.6, car le thermocouple n°2 était plus « amorti », donc plus en profondeur par rapport au n°1.

D. 1.2. Thermocouples CR10

Les conventions, en ce qui concerne les profondeurs des thermocouples dans la neige/glace sont les mêmes que précédemment. Nous présentons ici la 2^{ème} semaine d'avril, la 1^{ère} de mai, la dernière de juin et la première d'août. L'ablation n'est pas représentée, cette information se trouvant déjà dans les figures précédentes.

Avril 96 (fig. D.8)

On retrouve le problème dû à l'instabilité de la température de référence. Ses trop grandes variations impliquent des pics de la température dans la neige (quelle que soit la profondeur du capteur) purement artificiels et sans aucune significations physiques (exemple : le 11, 12, 13/04 vers midi). Le 08 et le 14/04, les températures dans la neige connaissent des valeurs plus basses ($T_{.30}$ et $T_{.40}$ sont autour de -1°C et les autres de -0.5°C), ceci alors qu'aucun « forçage thermique » particulier n'apparaît clairement. Le reste du temps toutes les températures dans la neige se situent vers -0.25°C , ce qui correspond à la valeur mesurée par les thermocouples « 21X » (voir fig. D.1).

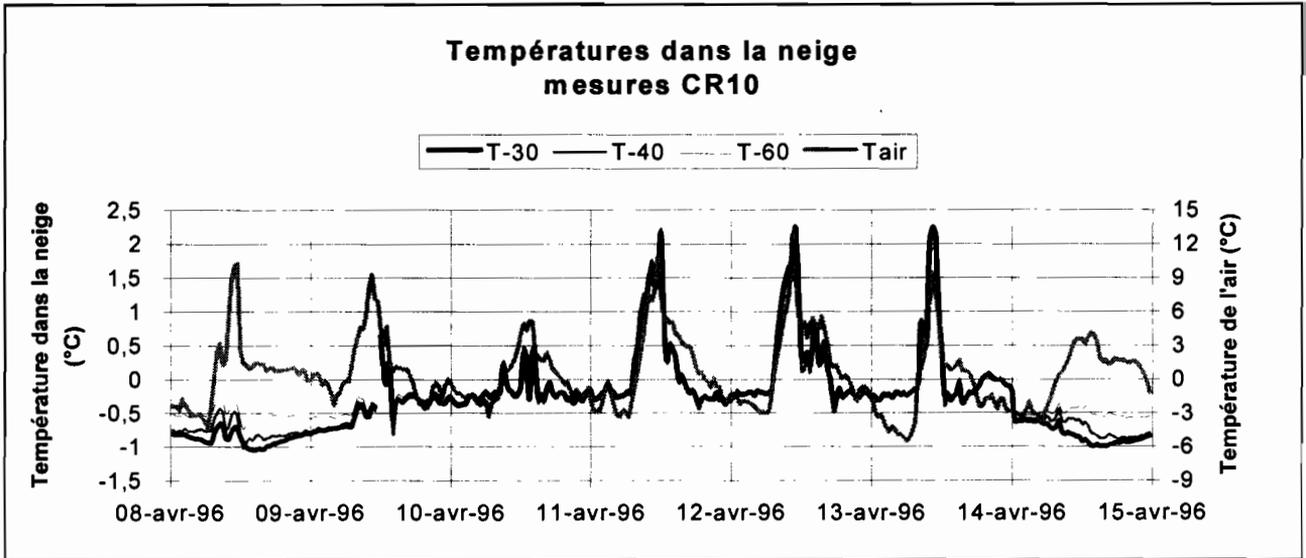


Figure D.8

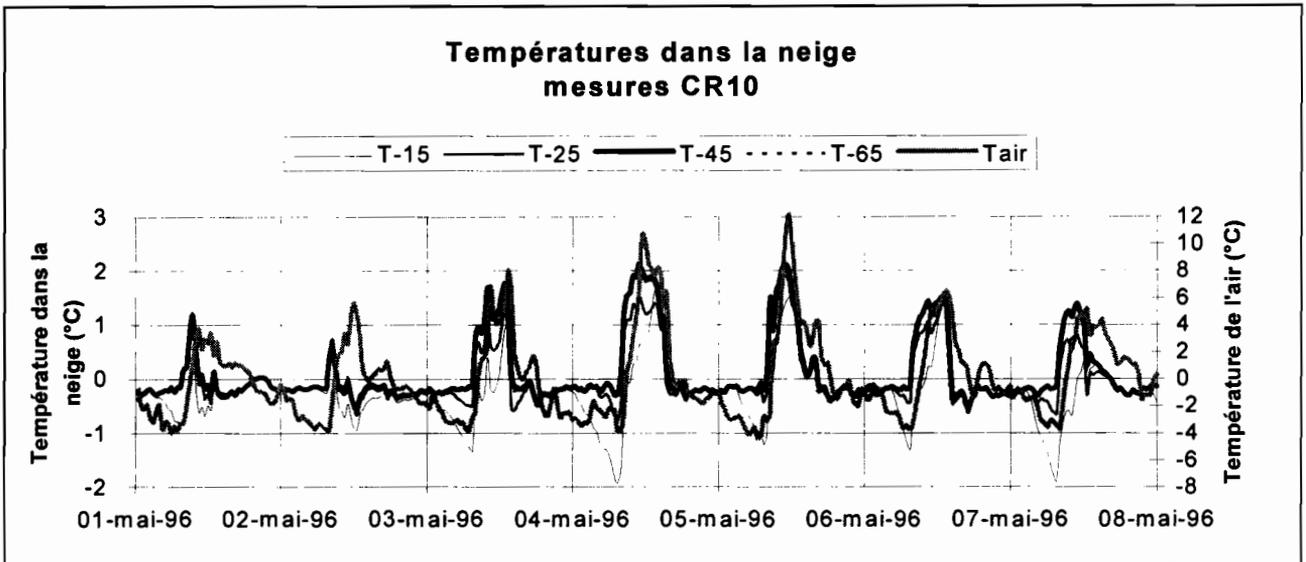


Figure D.9

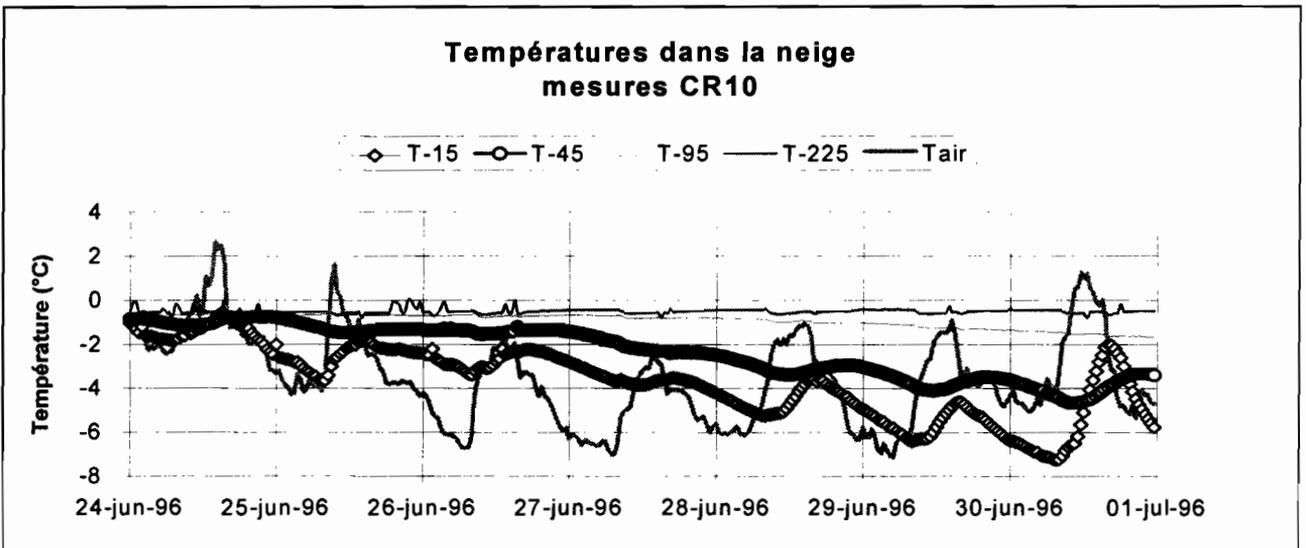


Figure D.10

Mai 96 (fig. D.9)

Le problème lié à la température de référence est toujours présent.

Les températures dans la neige sont stables et environ égales à -0.2°C (sauf pics aberrants) à partir de 45 cm de profondeur. Seuls T_{-15} et T_{-25} (dans une moindre mesure) connaissent des températures plus basses en fin de nuit (le 3, 4, 5, 6 et 7 au matin). T_{-15} est alors quasiment en phase avec T_{air} tandis que T_{-25} est légèrement en retard. On peut en conclure que, la nuit, T_{air} refroidit la neige suffisamment pour opérer le changement d'état : eau \rightarrow glace jusqu'à, au moins, 25 cm de profondeur. Ce changement d'état survenant plus tôt à -15 cm qu'à -25 cm, T_{-15} peut alors atteindre des valeurs plus basses que T_{-25} . Par contre, le front froid n'est pas suffisant pour opérer ce même changement d'état à plus de 45 cm de profondeur. En résumé, la couche [0, -25 cm] connaît un cycle de gel/dégel journalier alors que plus en profondeur, à partir de -45 cm au moins, il y a toujours présence d'eau liquide.

Juin 96 (fig. D.10)

Cette figure est à comparer avec son homologue, issue des mesures « 21X », elle correspond parfaitement aux conclusions d'alors. Nous pouvons rajouter simplement que le « forçage thermique » imposé en surface par l'air a une conséquence jusqu'à -95 cm. En effet T_{-95} quitte très lentement (en quelques jours) son palier à -0.5°C environ pour atteindre -2°C . L'eau de percolation règle jusqu'à -95 cm sous l'action prolongée de $T_{\text{air}} < 0$. Par contre aucun effet ne se fait sentir dans la glace à -225 cm, à l'échelle de la semaine tout au moins.

Août 96 (fig. D.11)

Cette figure montre le cycle gel/dégel journalier dans les 25 premiers centimètres de neige. On peut établir le comportement thermique journalier type de la neige à 25 cm de profondeur :

- Dégel brutal vers 11h du matin, la neige fond tant que T_{air} reste positif (et même un peu plus tard du fait du déphasage en temps entre T_{air} et T_{-25}).
- Dès que T_{air} devient négatif (vers 16h00), le changement d'état s'opère d'abord en surface puis, progressivement jusqu'à -25 cm. Par exemple dans la nuit du 3 au 4/08, la neige à 25 cm de profondeur est gelée en totalité (absence d'eau liquide) à 4h30 du matin : heure à laquelle la température, à cette profondeur, commence à diminuer
- Une fois la couche entièrement **solide**, sa température descend pour atteindre son minimum à 8h30, soit 2h après le minimum de T_{air} (qui lui est à 6h30). Cette durée peut être considérée comme une estimation de la célérité d'un front froid dans la neige/glace, ici : 12.5 cm h^{-1} .

T_{-75} augmente légèrement (de -1.5 à -0.5°C) durant cette semaine en même temps qu'augmente la moyenne journalière de T_{air} .

T_{-195} connaît lui aussi une augmentation très légère (ce thermocouple est celui qui était à -225 cm fin juin) : elle passe de -1.2 à -1°C . Plus que cette infime variation qui pourrait être considérée comme erreur de mesure, on s'aperçoit que fin juin ce même thermocouple indiquait -0.5°C . En un peu plus d'un mois la température à 2 m de profondeur a donc diminué d'un demi-degré. On vérifie ceci sur la figure D.12. La moyenne journalière est faussée de fin mars à début juin à cause de pics dus au problème de la stabilité de la température de référence. Ensuite elle est plus proche de la réalité (le problème pré-cité n'ayant plus cours) et nous voyons qu'elle diminue globalement jusqu'à fin-juillet et qu'elle remonte ensuite. La baisse des températures (de l'air) se ressent donc jusqu'à plus de 2 m de profondeur. L'instabilité qui semble frapper T_{-100} à partir de mi-juillet signifie simplement qu'elle est « arrivée » très près de la surface, voire en surface.

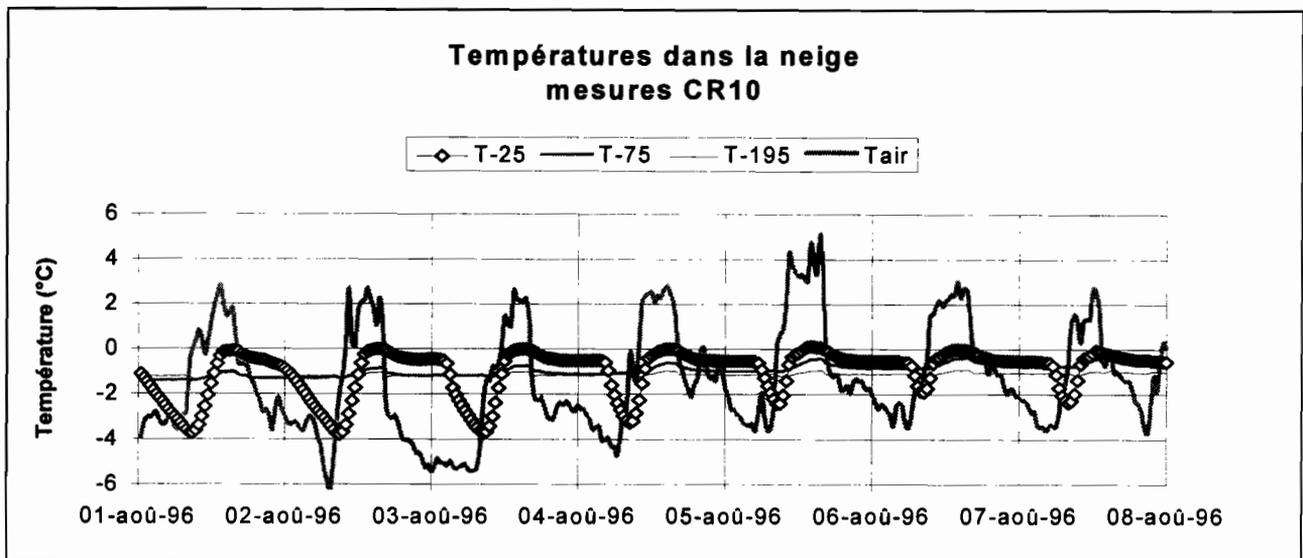


Figure D.11

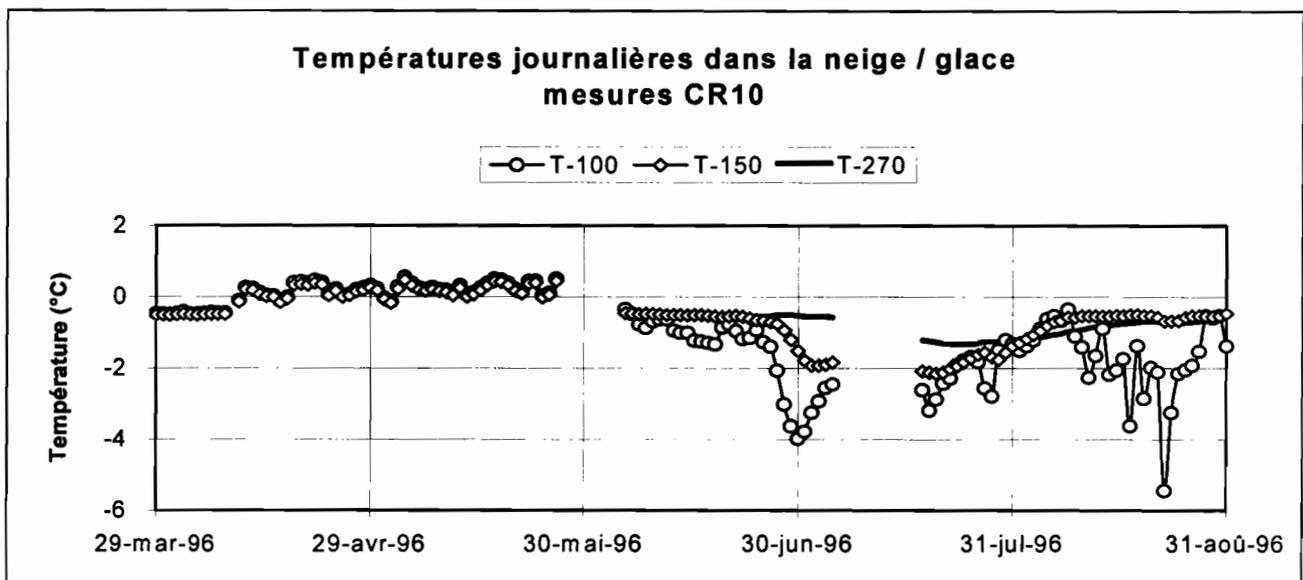


Figure D.12

(l'ablation est ignorée sur cette figure, les profondeurs sont justes au 29/03/96)

D. 2. Conclusion

L'eau liquide est présente de façon permanente dans le manteau neigeux tout au long de l'année, exceptée entre juin et août. Au plus fort de la saison sèche (et froide) une épaisseur plus ou moins importante (entre les 20 et 60 premiers centimètres) du manteau subit un cycle de gel/dégel journalier, voire un gel total (absence permanente d'eau liquide) durant plusieurs jours. Dans cette situation, la couche de neige suit parfaitement les variations de la température de l'air, ceci avec un déphasage en temps qui augmente avec la profondeur. En dehors de ces périodes suffisamment « froides », la température dans la neige reste plus ou moins constante, mesurée à environ -0.25°C , ceci à n'importe quelle profondeur. On peut interpréter cette valeur comme étant la température de changement d'état de la neige. Soit la température de changement d'état est légèrement négative en raison de la pression atmosphérique plus faible en altitude (à vérifier), soit nous avons une erreur systématique d'un quart de degré sur nos mesures.

E. PRECIPITATIONS

E. 1. Valeurs journalières

Le tableau E.1 présente les pluies journalières mesurées par le pluviomètre COBEE à la Plataforma (4750 m). Nous donnons ici les valeurs brutes lues par l'observateur, non corrigées du facteur 1.075 (voir rapport n°43). La lecture du pluviomètre est effectuée à 7h00 chaque matin par Franz Quispe, la valeur est attribuée au jour précédent. La figure E.1 illustre ce tableau.

Tableau E.1
Pluies journalières à la plataforma, 4750 m

	sept	oct	nov	déc	jan	fév	mar	avr	mai	jun	jul	aoû		
1	0	0	0	12,5	2	2	4,5	3	0	0	0	0	0	
2	0	3,8	0	5	0	5,5	0	13	0	0	0	0	0	
3	0	6	0	0	9,5	4	0	12,5	0	0	0	0	0	
4	0	1,2	0	1	1	3	4	3,4	0	0	0	0	0	
5	0	0	0	11,5	1	0,5	7,6	3,6	0	0	0	0	0	
6	0	0	3,5	0,5	1,5	6	2,5	0	1	0	0	0	0	
7	0	0	3,3	8	0	3	0	0,3	0	0	0	0	0	
8	0	0	4,7	8	0	11	0	8,7	0	0	0	0	0	
9	0	0	2,5	9,8	7	2	0	1	0	0	1,5	0	0	
10	0	0	17,5	0	0	6,5	0	0,5	5,5	0	12	0	0	
11	2	0	5,6	0	0,5	7	0	0	0	0	0	0	0	
12	1,2	0	5	0	4,5	7,4	0	0	0	0	0	0	0	
13	2,5	0	1,2	0	7,5	2	0	4	0,5	0	0	0	0	
14	6	0	0	0	18,5	1,6	0,5	0	0	0	0	0	1	
15	0	0	0	0	9,5	4	0	0	0	0	0	0	0,5	
16	0	8	0	0	9	15	0	5,5	0	0	0	0	0	
17	0,5	2	1,3	1,2	15	3	7,5	5,5	0	0	0	0	0	
18	0	1	7,5	7,5	11	12	0	0	0	4	0	0	0	
19	14,5	0	3,5	2	16	0	1,5	0	0	0	0	0	7	
20	0	0	3	4	6	0	1	0	0	0	0	0	3	
21	0	3	6,8	1	1	0	2,2	0	0	0	0	0	0	
22	0	0	6	0	1	0	14	0	0	0	0	0	0	
23	0	0	0	5	9,3	3	3,8	0	0	0	0	0	0	
24	0	0,5	0	1	3	3	5,5	1	1	0	0	0	0	
25	2	0	0	1	12	9	20	2	0	2	0	0	0	
26	0	4,5	0	10	6	8	1,5	10,5	0	0	0	0	0	
27	0	1,5	0	8	3,2	7,6	7,3	0	0	0	0	0	3	
28	0	1	0	3	10,5	0	4,2	0	0	0	0	0	5	
29	0,5	2,5	0	5	7	11	1,5	0	0	0	0	0	7	
30	0	0	0	0	5		3	1	0	0	0	0	0	
31		0		4	9,5		1		0		0		0	
total	29,2	35	71,4	109	187	137,1	93,1	75,5	8	6	13,5	26,5	791,3	Total annuel

Toutes les valeurs sont exprimées en mm

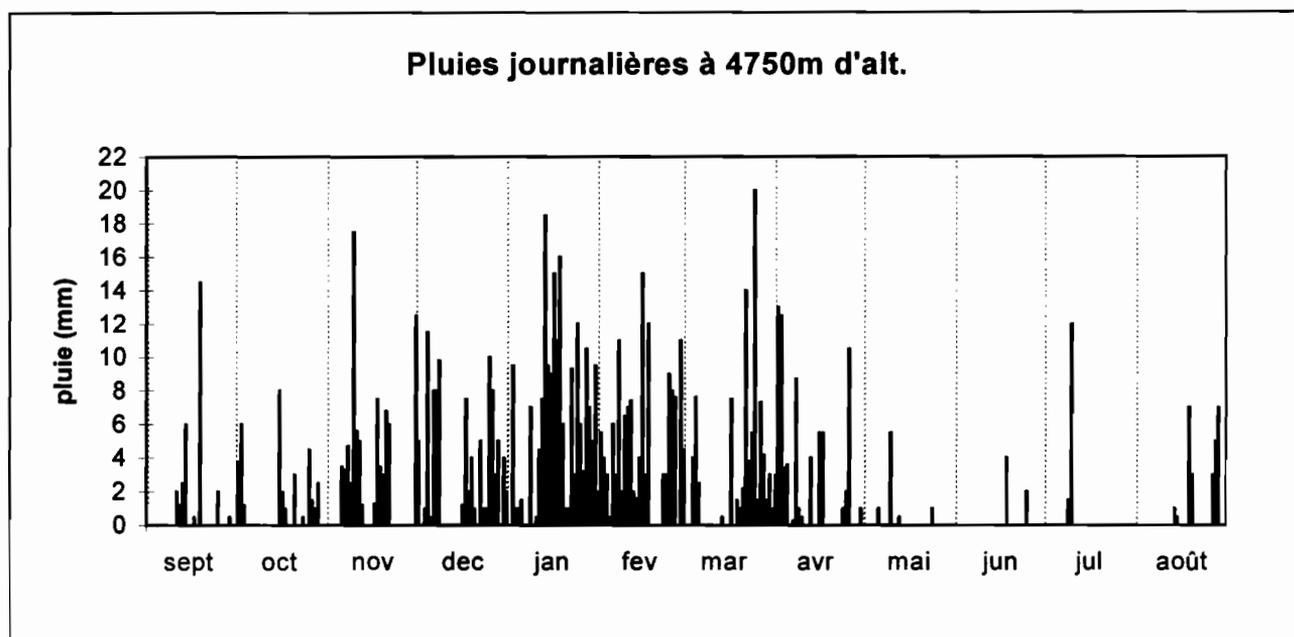


Figure E.1

La saisonnalité est moins marquée que les années précédentes (fig. E.1). De septembre à janvier, nous observons une suite de périodes de « mauvais » temps de quelques jours dont l'intensité s'accroît progressivement jusqu'en janvier (avec 27 jours de pluie). Les mois de février et mars ont aussi été très humides, mais entrecoupés de périodes plus ou moins importantes de beau temps. A partir de mi-avril, changement radical avec le début de la saison sèche (qui a donc été tardive cette année) avec néanmoins quelques épisodes perturbés qui ont été d'intensités et de durées décroissantes. La saisonnalité apparaît plus nettement avec les moyennes mensuelles (fig. E.2). Plus tard la saison sèche a connu quelques périodes de fortes précipitations, en particulier fin août où il y a eu 3 jours de tempête.

E. 2. Valeurs mensuelles et annuelles

E. 2.1. Pluviomètres totalisateurs

Le tableau E.2 regroupe les mesures mensuelles des cinq pluviomètres totalisateurs répartis sur le bassin versant du glacier du ZONGO. Les valeurs représentent le total cumulé en fin de mois. La figure E.2 illustre ce tableau.

Les moyennes mensuelles font bien ressortir la saisonnalité (le mois de janvier a été de loin le plus humide avec 27 jours de pluie sur 31) et les données sont cohérentes entre elles malgré les dispersions inhérentes aux situations propres de chaque pluviomètre. Néanmoins quelques réserves sont à faire quant aux mesures des pluviomètres P1 et P3, le premier a subi une évaporation très importante et le second semble avoir eu tendance à surestimer les précipitations au mois de janvier.

Les mesures des précipitations à 4830 m, (eau de pluie récupérée et mesurée lors des missions de routine) sont présentées dans le tableau E.3. Le total annuel est le plus élevé de tous avec 988 ml.

La détermination du total annuel des précipitations reçues par le bassin versant doit être basée sur les mesures issues des pluviomètres P2, P4, P5, P8 et Pst4830. On trouve alors un total annuel de **867 mm** d'eau.

Tableau E.2
Valeurs mensuelles des pluviomètres totalisateurs et la moyenne mensuelle de la pluie journalières à la plataforma (4750 m)

	P1 5165 m	P2 5080 m	P3 4860 m	P4 4860 m	P5 4855	P8 4750 m	Pluie 4750 plataforma	Pluie 4830 Station limnimétrique
sep	48	35	54	46	45	65	29,2	
oct	27	30	36	34	35	35	35	
nov	80	85	73	70	83	76	71,4	
déc	95	115	107	100	107	134	109	
jan	185	200	240	215	220	220	187	
fév	110	125	135	125	120	150	137,1	
mar	75	92	100	85	100	105	93,1	
avr	50	33	85	55	40	85	75,5	
mai	-10	75	30	10	50	10	8	
jun	-30	0	-10	-10	0	0	6	
jul	-30	20	0	0	10	20	13,5	
aoû	-10	5	20	20	40	25	26,5	
total(*)	670	815	880	760	850	925	791,3	988

total(*) : total en ignorant l'évaporation (les valeurs négatives fixées à 0). Toutes les valeurs sont exprimées en mm.

Tableau E.3
Valeurs du volume d'eau recueilli à 4830 m, lors des visites de routine

date	volume (ml)	en mm d'eau	Observations
14/09/1995	1350	18,48	
17/10/1995	3490	47,77	
27/10/1995	825	11,29	
13/12/1995	11405	156,10	
05/01/1996	6140	84,04	
12/01/1996	2050	28,06	
05/02/1996	15165	207,56	
08/03/1996	12150	166,30	
29/03/1996	5725	78,36	
09/04/1996	4445	60,84	
25/04/1996	1730	23,68	
15/05/1996	2155	29,50	
27/05/1996	225	3,08	
05/06/1996	0	0,00	
18/06/1996	0	0,00	
01/07/1996	650	8,90	plus de la glace
18/07/1996	1500	20,53	plus de la glace
25/07/1996	0	0,00	
08/08/1996	0	0,00	
14/08/1996	50	0,68	
25/08/1996	1165	15,95	
02/09/1996	1970	26,96	
total	72190	988,07	

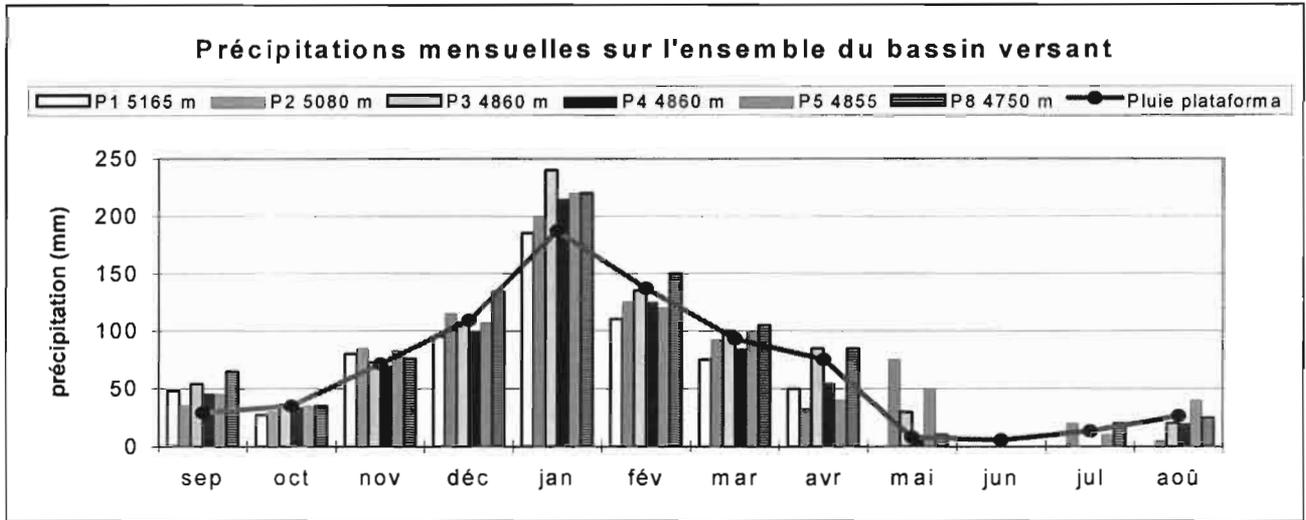


Figure E.2

E. 2.2. Gradients pluviométriques

• A l'échelle de la vallée du ZONGO

La figure E.3 représente les précipitations annuelles à différentes altitudes, de 1195 à 4750 m au-dessus du niveau de la mer. Ceci pour les années 71, 74, 80, 83, 86, 89, 91 et 96. Le gradient négatif des précipitations avec l'élévation apparaît nettement. Nous pouvons même distinguer deux paliers, le premier entre 1200 et 1500 m, et le second entre 2700 et 3500 m. De part et d'autre de ces seuils, le régime des précipitations est très différent. Toutefois la fiabilité des mesures n'est pas acquise, en particulier les problèmes d'exposition et de masque doivent perturber fortement ces dernières.

• A l'échelle du bassin versant du glacier du ZONGO

L'examen du tableau E.2 montre que les précipitations ont tendance à être moins fortes plus l'altitude est importante. Mais les situations propres de chaque pluviomètre et le fait que certains reçoivent prioritairement de la neige et les autres de la pluie perturbent trop un phénomène qui, à l'échelle de 100 m (en altitude), est difficilement décelable. Les mesures à l'échelle de la vallée tout entière suggèrent, par continuité, que les précipitations doivent diminuer avec l'altitude même à l'échelle du glacier. Mais, les mesures d'accumulation réalisées entre 5550 et 5700 m révèlent des précipitations plus importantes à ces altitudes que plus « bas » au niveau des pluviomètres totalisateurs, du moins cette année (chap. K, § K.3).

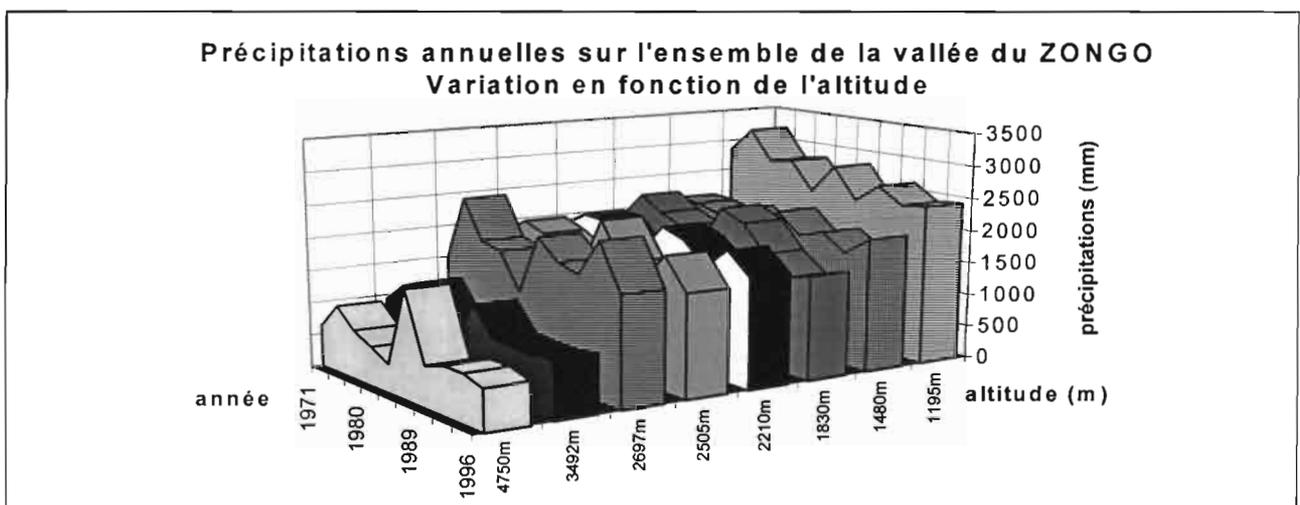


Figure E.3

(d'après Erout, 1996)

F. BILAN RADIATIF

F. 1. Rappels

Le bilan radiatif à la surface du glacier s'écrit de la façon suivante (Lliboutry, 1964) :

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

avec : R_n , radiation nette.

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

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

$LW\downarrow$, radiation de grandes longueurs d'ondes du ciel (ou radiation thermique incidente)

$LW\uparrow$, radiation de 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 la radiation solaire réfléchie et incidente.

- ***Ce qui est mesuré et ce qui ne l'est pas.***

$SW\downarrow$ et $SW\uparrow$ sont mesurés à 5025 m (du 25/07 au 31/08/96), à 5150 m (toute l'année hydrologique) et à 5550 m (du 24/04/ au 31/08/96).

R_n est mesuré à 5150 m (deux mesures : une couvrant toute l'année et l'autre du 28/03 au 31/08/96) et à 5550 m (du 24/04 au 31/08/96).

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

F. 2. Valeurs maximales enregistrées

Les valeurs maximales enregistrées sont regroupées dans le tableau F.1. Les maxima de la radiation solaire sont très élevés (supérieurs à la radiation solaire extraterrestre, voir § suivant) du fait de l'effet miroir des pentes alentour et, surtout, de l'effet « loupe » de certains nuages (Hastenrath, 1978).

Le maximum de R_n à 5150 m, mesuré par la centrale CR10, est de 1203 W m^{-2} le 26-août-96. A la même date, le bilanmètre de la centrale 21X mesure une radiation nette maximale de 1142 W m^{-2} à la même heure (12h30). L'erreur relative est de 5%, ce qui reste dans l'intervalle annoncé par le constructeur.

Tableau F.1
Radiation nette, radiation solaire directe et réfléchie
maxima instantanés de l'année 95/96

	4750 m	date	5025 m	date	5150 m	date	5550 m	date
Rn (W m ⁻²)					1365 (mesure 21X)	13-oct-95 (21X)	637,3(*)	12-août-96
					1203(*) (mesure CR10)	26-août-96 (CR10)		
SW↓ (W m ⁻²)	1390	22-oct-95 et 20-nov-95	1512(*)	16-août -96	1784 (mesure 21X)	02-oct-95	1706(*)	26-août-96
SW↑ (W m ⁻²)			1040(*)	21-août-96	1654 (mesure 21X)	22-jan-96	1361(*)	23-août-96

(*) : valeurs concernant seulement une partie de l'année hydrologique

F. 2.1. Etude de la radiation solaire incidente maximale journalière

Nous présentons ici la radiation solaire incidente maximale journalière à 5150 m et à 5550 m (mesurée seulement à partir de fin avril). Nous la comparons à la radiation solaire extraterrestre maximale théorique : SW_{extraMAX} (Paltridge et Platt, 1976) qui représente la radiation courtes longueurs d'ondes, lorsque le soleil est au zénith, que reçoit la terre (avant de pénétrer dans l'atmosphère). SW_{extraMAX} - 200 est cette même valeur retranchée de 200 W m⁻².

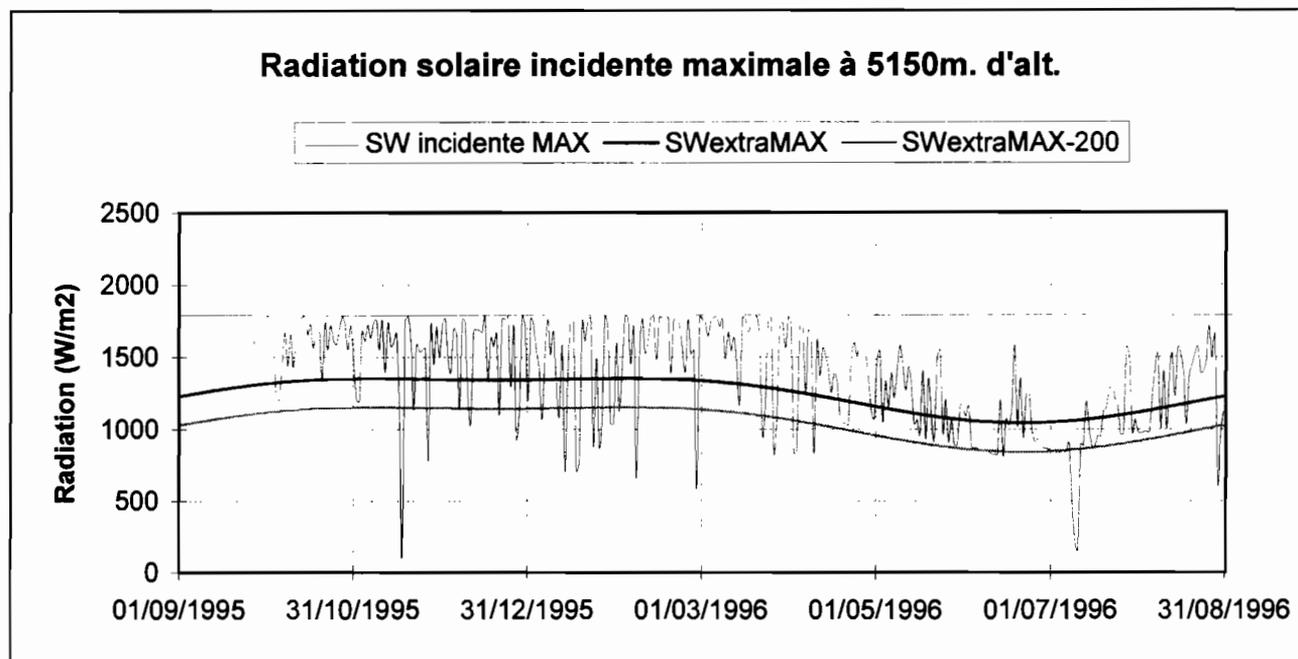


Figure F.1

On retrouve le même comportement de la radiation solaire incidente à 5150 m (fig. F.1) que les années précédentes, avec des maxima plus hauts en saison des pluies et plus faibles en saison sèche. Les maxima de la saison sèche sont organisés autour de SW_{extraMAX} - 200, comme l'année dernière. Par contre, et c'est nouveau, ceux de la saison des pluies sont bien moins dispersés que les années

précédentes : ils semblent s'organiser autour d'une valeur maximale de 1780 W m^{-2} . Il est peu probable que ce nombre ait une réelle signification physique. Une défaillance du capteur, celui-ci ne pouvant plus mesurer une radiation supérieure à un certain seuil (ici 1784 W m^{-2}), est plus plausible.

Les nouvelles données viennent donc confirmer toutes les conclusions de l'année dernière (rapport n°49), et en particulier que la radiation solaire incidente est atténuée d'environ 200 W m^{-2} , en atmosphère sèche, lors de son trajet dans l'atmosphère jusqu'à 5150 m d'altitude.

La radiation solaire incidente à 5550 m est présentée (fig. F.2) seulement pendant la période de la saison sèche. On peut voir qu'elle aussi s'organise autour de $\text{SW}_{\text{extraMAX}} - 200$ et donc aucune différence notable n'existe entre la radiation solaire incidente maximale journalière à 5150 et à 5550 m . $\text{SW}\downarrow_{\text{max}5150}$ et $\text{SW}\downarrow_{\text{max}5550}$ sont bien corrélés, $r^2 = 0,796$ ($n = 130$). Les valeurs très faibles mesurées vers le 10/07 et fin août correspondent à des périodes de mauvais temps où la nébulosité était maximale toute la journée, où l'insolation « avant » nuages n'a jamais été atteinte.

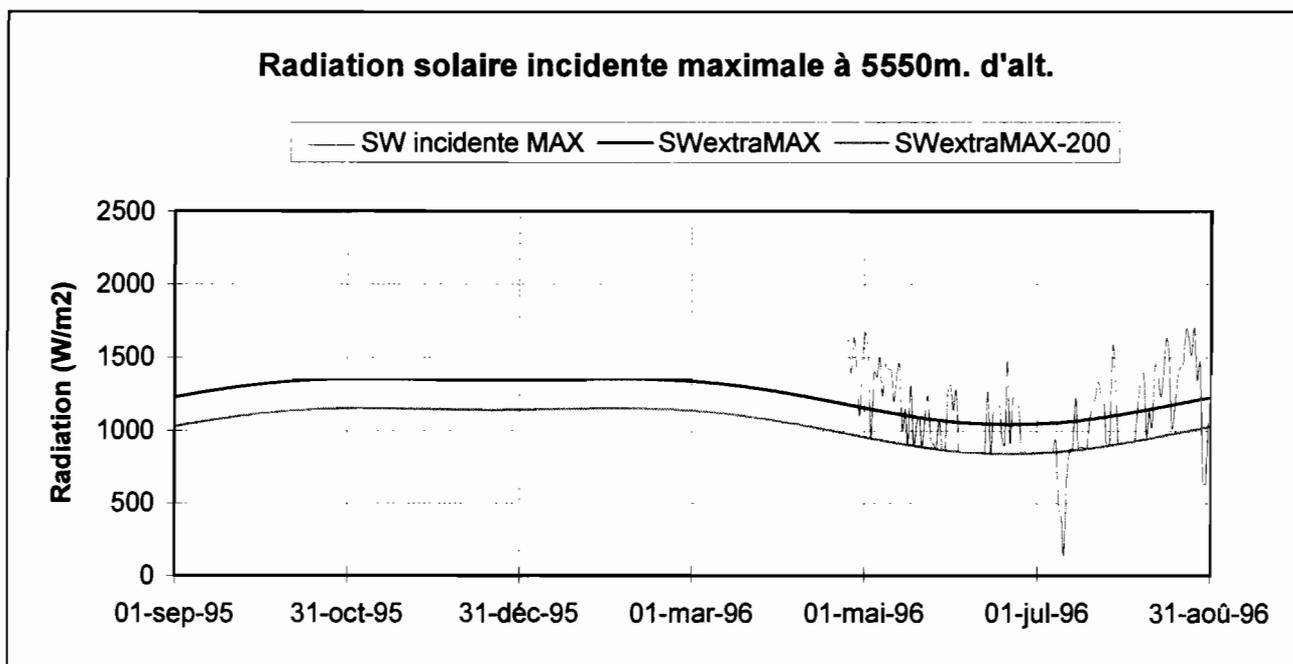


Figure F.2

F. 3. Valeurs journalières

F. 3.1. Albédo

Nous retenons ici le minimum journalier comme valeur représentative de l'albédo sur une journée. Il arrive, certains jours où les précipitations neigeuses sont importantes, que le pyranomètre mesurant $\text{SW}\downarrow$, soit totalement recouvert de neige, l'albédo mesuré est alors supérieur à 1. Dans ces types de situations nous le fixons à 0,9.

La figure F.3 représente ses variations à 5150 m , elle met en évidence la saisonnalité bien marquée, cette année, de ce paramètre. On constate que c'est au mois d'octobre 95 que la surface du glacier a été la plus « sale » avec un albédo autour de 0.2. Ceci explique, en partie, que ce soit précisément ce mois d'octobre qui ait connu la plus grosse ablation de l'année (1 m d'eau à 5150 m). Jusqu'à la fin décembre l'alternance de périodes de beau temps et de précipitations explique les variations de 0.9 (pyranomètre supérieur entièrement recouvert de neige toute la journée) à 0.2 en l'espace de quelques jours.

Début janvier, la saison des pluies débute vraiment et de la neige fraîche s'accumule chaque jour sur le glacier, ceci jusqu'à environ mi-avril (fig. E.1).

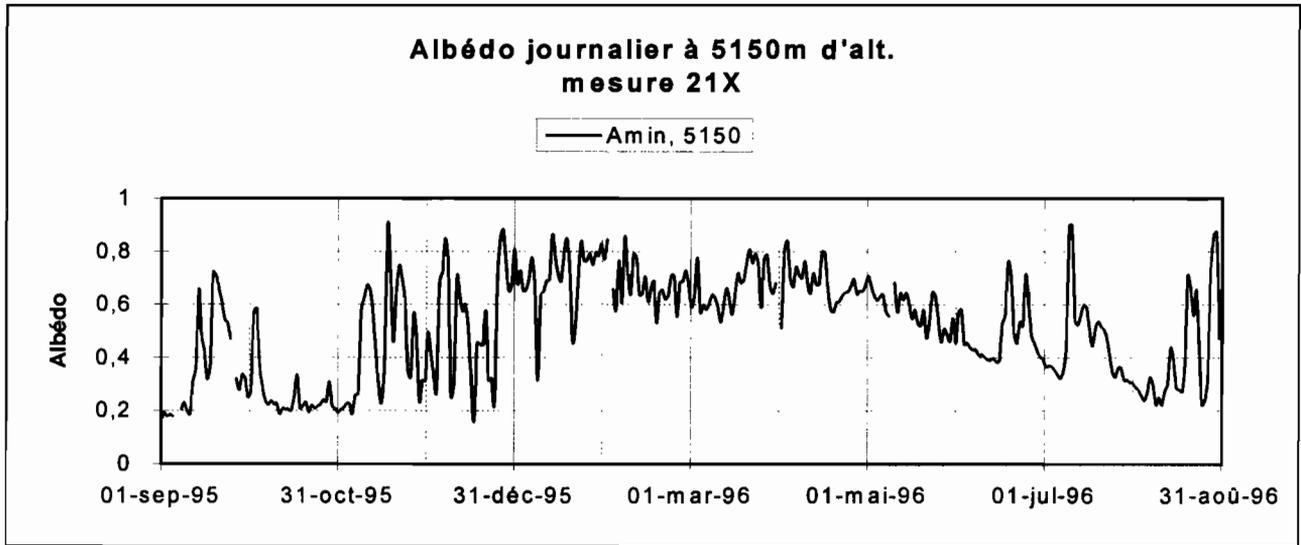


Figure F.3

Les périodes de beau temps n'altèrent que modérément l'albédo (il « descend » à 0.6 environ) car l'ablation alors occasionnée ne fait que découvrir d'autres couches de neige plus « anciennes » et non la surface d'ablation (« glace sale ») comme en novembre/décembre. A partir de mai 96, l'albédo décroît lentement, juste augmenté temporairement par les chutes de neige de fin-juin et début juillet, jusqu'à atteindre, début août, une valeur minimale légèrement supérieure à 0,2. A cette époque, la surface d'alors était une couche de neige/glace de 5 cm d'épaisseur surmontant la glace vive. La couche de neige/glace en question avait subi l'action prolongée de la percolation de l'eau de fonte : elle était percée de toutes parts tel un réseau karstique en miniature, on voyait l'eau ruisseler sur la glace vive à travers. Cette année 96 (de janvier à décembre) n'aura pas vu la glace entièrement à nue à 5150 m. Les bédrières et les moulins ne se sont pas formés non plus entre septembre et novembre 96, contrairement à ce qui s'était passé aux mêmes dates en 95. De même, les pénitents ne se sont pas formés en 96 à 5150 m.

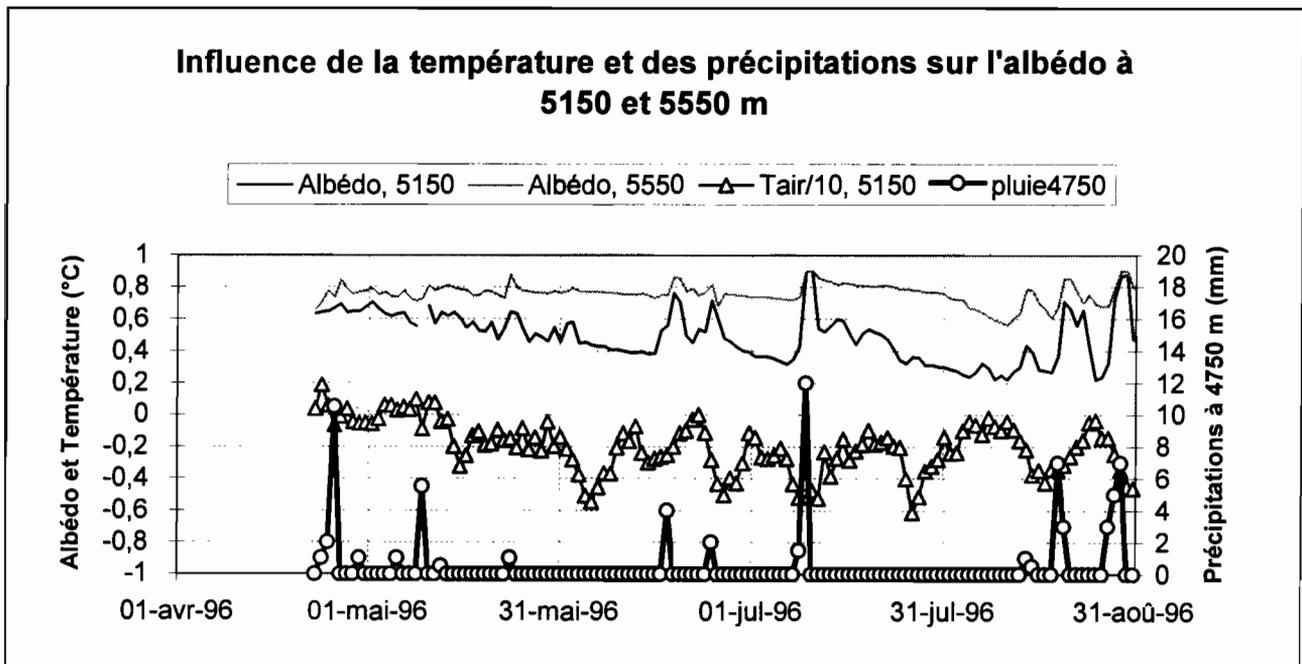


Figure F.4

Note : $T_{air}/10$, 5150 est le dixième de la température journalière non-ventilée de l'air (mesure basse) à 5150 m

Nous avons représenté sur la figure F.4 l'albédo à 5150 et 5550 m depuis la date de la mise en service de la station 5550. Les mesures montrent bien la décroissance progressive de l'albédo à 5150 m : de 0,7 à la fin de la saison des pluies à 0,2 au mois d'août lorsque le manteau neigeux a quasiment disparu. La valeur de l'albédo est seulement « relevée » au gré des précipitations.

A 5550 m, l'albédo est plus ou moins constant de la fin de la saison des pluies à la fin du mois de juillet (entre 0,7 et 0,8). Seul le mois d'août voit la surface se salir légèrement, avec un albédo qui « descend » à 0,6. L'évolution de l'état de surface du glacier est bien distincte de part et d'autre de l'ELA.

La température, même négative (en moyenne journalière), n'empêche pas l'albédo de décroître à 5150 m, et les précipitations n'influencent la valeur de l'albédo qu'en dessous de l'ELA.

F. 3.2. Radiation solaire incidente journalière

Nous avons représenté la radiation solaire incidente à 4750, 5150 et 5550 m, ainsi que la radiation extraterrestre journalière (Paltridge et Platt, 1976). On retrouve le même comportement que les années précédentes. Néanmoins on constate que la radiation, en saison sèche, diminue avec l'altitude (fig. F.5, F.6 et F.7), ce qui est pour le moins étrange. Ceci pourrait être dû simplement à des durées d'ensoleillement différentes : on verrait le soleil plus longtemps à 4750 qu'à 5150 m, et plus à 5150 qu'à 5550 m. Ceci reste à vérifier. La radiation solaire incidente journalière mesurée à 5150 m a été corrigée des perturbations occasionnées par les chutes de neige. En effet, lors de précipitations neigeuses le pyranomètre supérieur est recouvert et la mesure évidemment faussée. Nous la corrigeons de la façon suivante, nous attribuons à l'albédo sa valeur maximale (0,9) et la mesure du pyranomètre inférieur, elle, étant valable, nous écrivons :

$$SW\downarrow_{\text{corrigé}} = SW\uparrow_{\text{mesuré}} / 0,9$$

Le terme $SW\downarrow$ qui apparaît dans la figure F.6 est corrigé de la sorte. Celui de la figure F.7 est la donnée brute, la correction est quasiment inutile en période sèche. $SW\downarrow_{4750}$ n'est pas corrigé non plus car nous ne mesurons pas la radiation réfléchie et de toute façon, il ne neige que très peu à cette altitude.

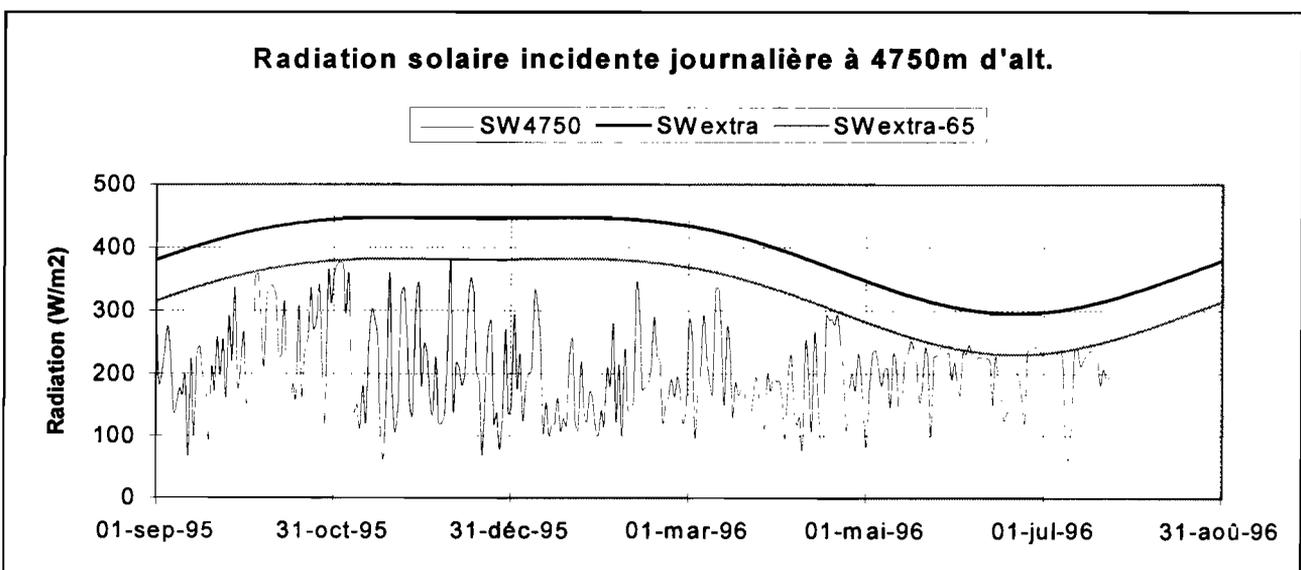


Figure F.5

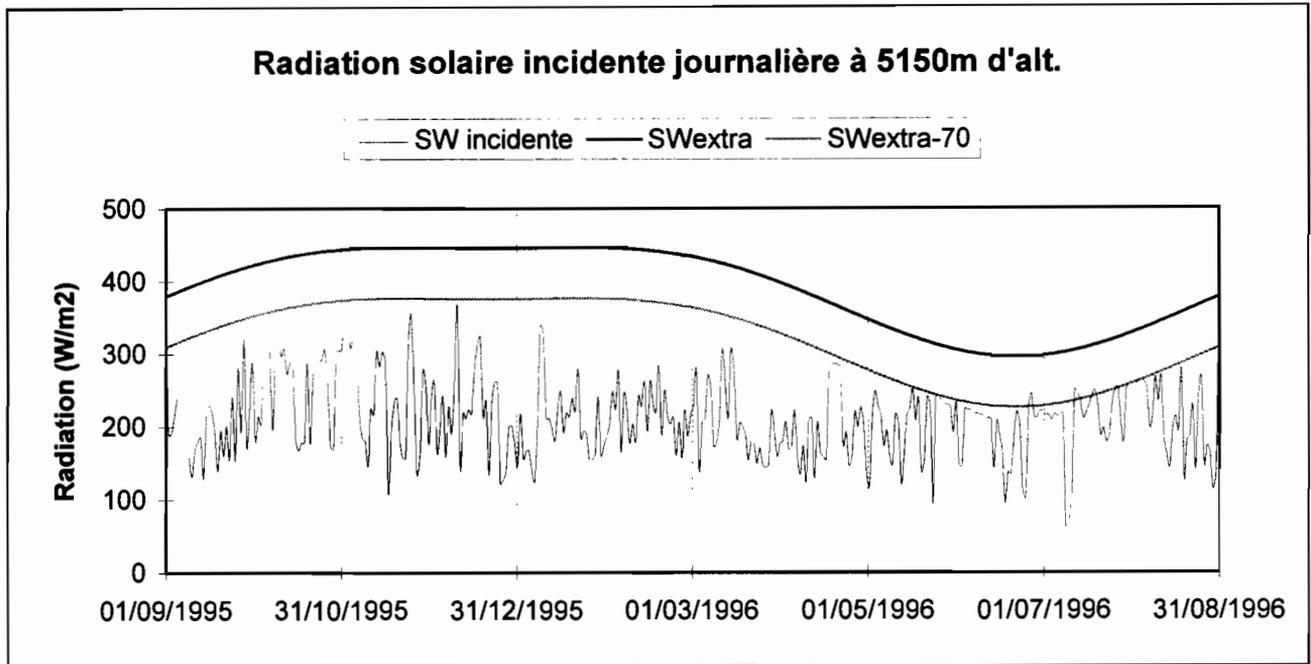


Figure F.6

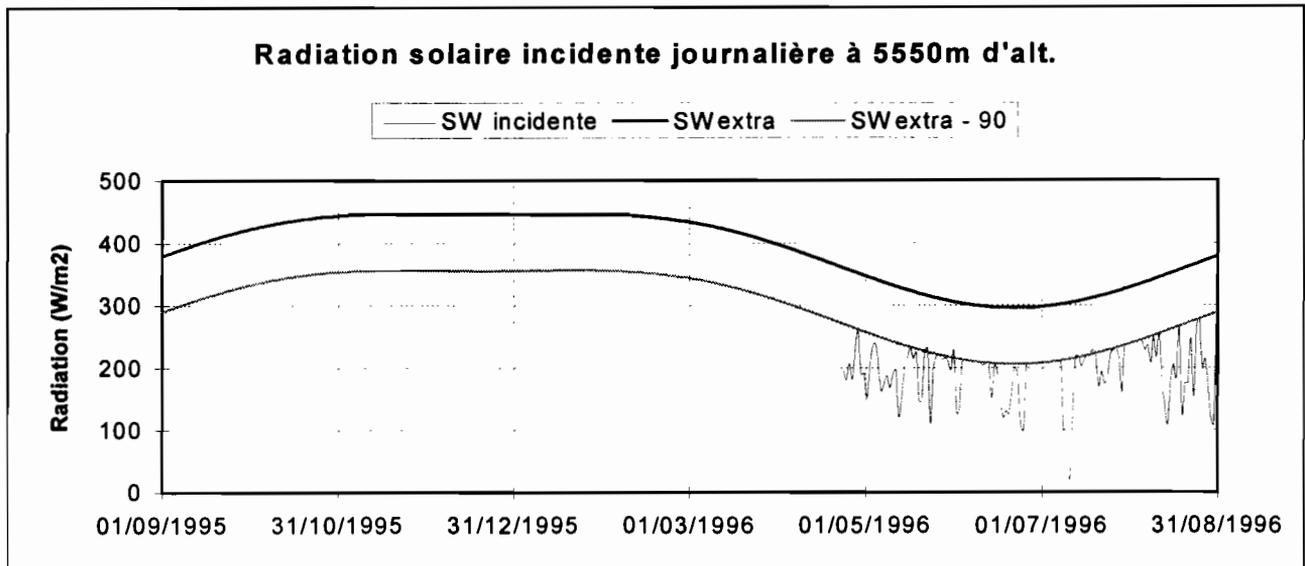


Figure F.7

F. 3.3. Radiation nette journalière

A 5150 m, la radiation nette est le plus souvent positive (fig. F.8). Elle dépend fortement de l'albédo (voir aussi § F.4.1.), ainsi elle atteint des valeurs supérieures à $+50 \text{ W m}^{-2}$ entre septembre et décembre 95 et en août 95 lorsque le manteau neigeux avait disparu ou était « sale », et oscille autour de 0 W m^{-2} de janvier à juin lorsque le manteau neigeux était le plus réfléchissant. A la fin du mois de mars 96, un second bilanmètre a été installé à cette altitude. La corrélation entre les deux enregistrements est bonne, $r^2 = 0,9$ ($n = 135$ pts).

Le 24-avril-96, un bilanmètre a été installé à 5550 m (fig. F.9). Nous pouvons noter que le bilan radiatif mesuré à 5550 m est globalement négatif alors que celui mesuré à 5150 m est globalement positif. Cela est parfaitement logique, ces deux altitudes étant situées de part et d'autre de l'ELA. La différence entre la radiation nette mesurée à ces deux altitudes est présentée sur la figure F.10. De mai à juin Rn_{5150} est supérieure d'environ 20 W m^{-2} à Rn_{5550} , ensuite la différence peut atteindre

plus de 50 W m⁻². Les fluctuations peuvent être fortes d'un jour à l'autre, au gré des précipitations neigeuses qui modifient la valeur de l'albédo.

Les corrélations entre les enregistrements aux différentes altitudes sont mauvaises :

$r^2 = 0,46$ (n = 108 pts) entre les mesures « CR10 » à 5150 et celles à 5550 m.

$r^2 = 0,50$ (n = 130 pts) entre les mesures « 21X » à 5150 et celles à 5550 m.

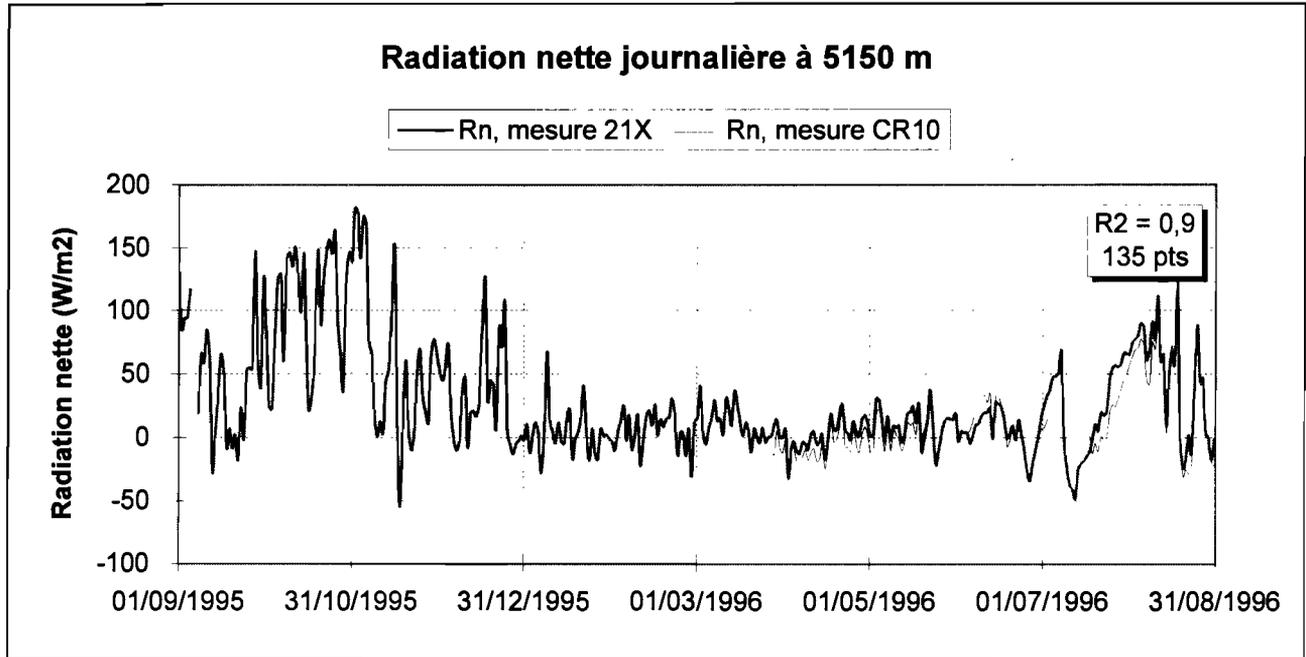


Figure F.8

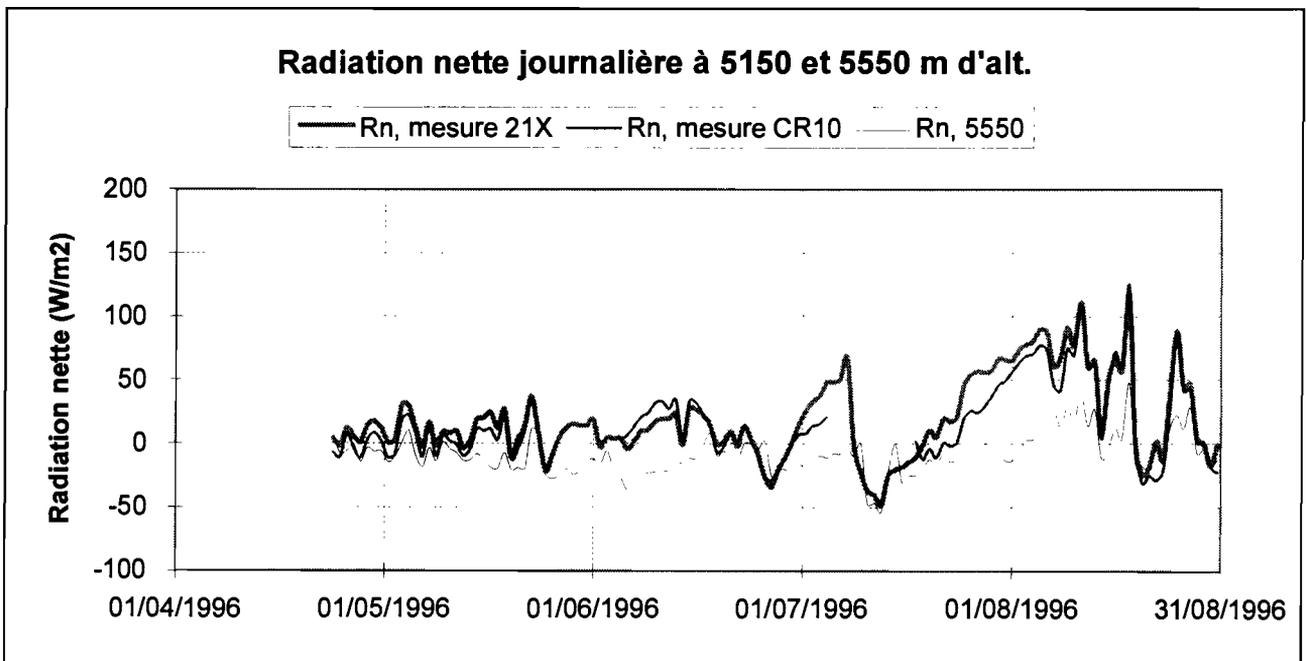


Figure F.9

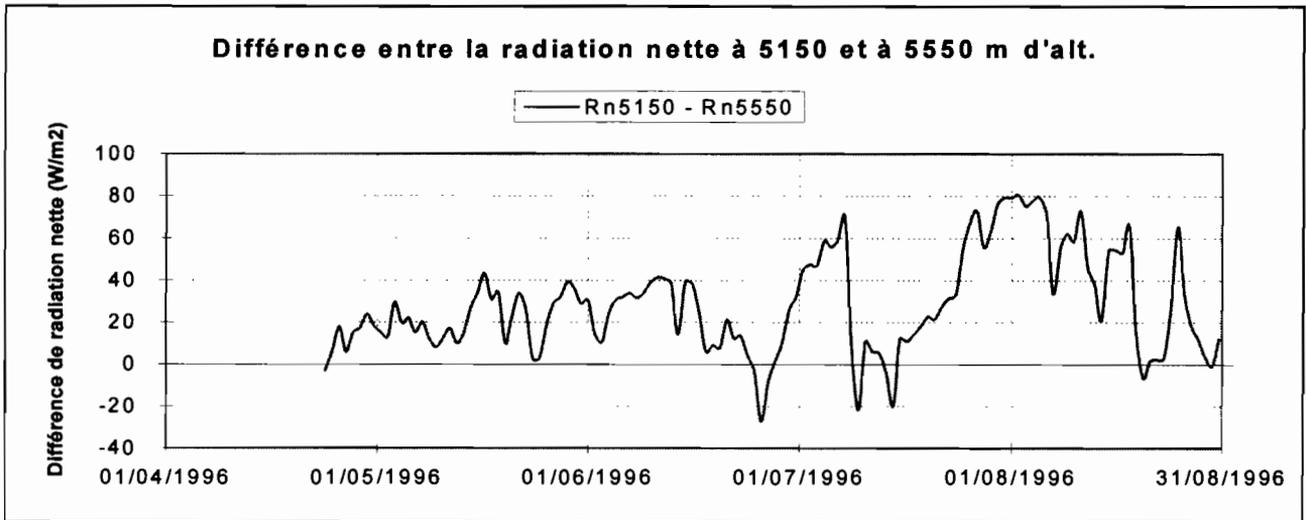


Figure F.10

F. 4. Valeurs mensuelles

F. 4.1. Radiation nette et albédo mensuels

Le tableau F.2 regroupe les moyennes mensuelles de Rn et de l'albédo aux différentes altitudes. On peut voir sur la figure F.11 que cette année, la saisonnalité de Rn est bien marquée. Rn est directement fonction de l'albédo, en particulier le maximum du mois d'octobre correspond au minimum annuel de l'albédo. L'apport d'énergie par radiation a été très important jusqu'en nov-95, ce qui coïncide avec les débits les plus forts (fig. F.13), cet apport a donc été « utilisé » en priorité pour la fonte. Ensuite il a été plus modeste, et donc plus proche des valeurs enregistrées les années précédentes.

Remarque : Les chutes de neige faussent aussi les mesures de Rn en recouvrant la coupole supérieure de celui-ci. Mais dans une moindre mesure que pour les pyranomètres, car la forme même du bilanmètre (petite coupole sphérique) fait que la neige « ne tient pas bien ». Ne disposant pas de capteurs spécifiques pour mesurer les radiations grandes longueurs d'ondes (pyrgeomètres), nous ne pouvons donc opérer aucune correction. Les valeurs en saison humide sont donc légèrement sous-estimées.

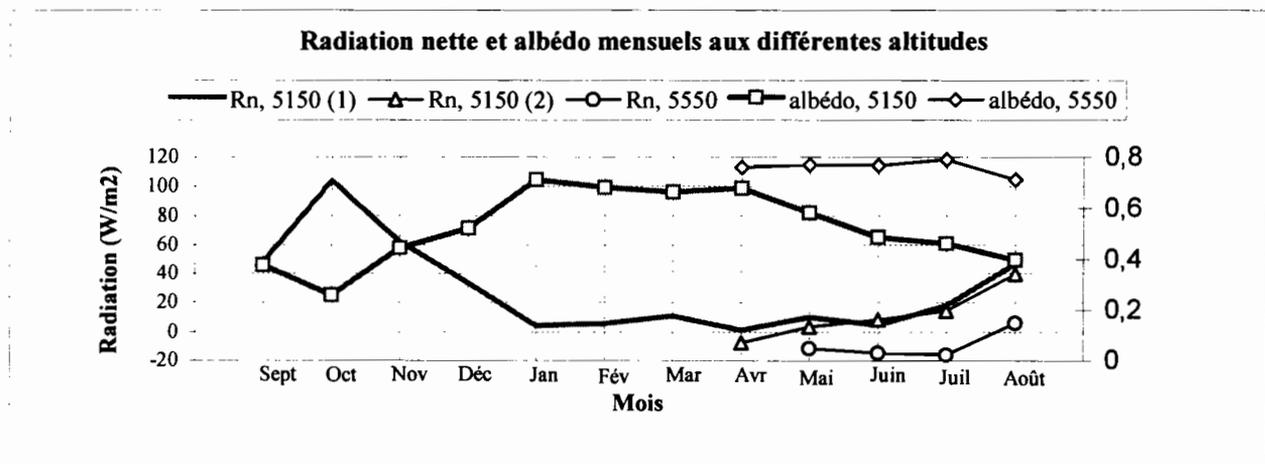


Figure F.11

Tableau F.2
Radiation nette et l'albédo
moyennes mensuelles aux différentes altitudes

	Rn, 5150 (mesure 21X)	Rn, 5150 (mesure CR10)	Rn, 5550	albédo 5025	albédo 5150	albédo 5550
sep-95	47,9				0,38	
oct-95	103,9				0,26	
nov-95	62,0				0,44	
déc-95	33,4				0,52	
jan-96	4,1				0,71	
fév-96	5,7				0,68	
mar-96	10,7				0,66	
avr-96	1,3	-7,5			0,68	0,76
mai-96	10,1	3,3	-11,8		0,58	0,77
jun-96	4,9	8,4	-14,7		0,49	0,77
juil-96	18,1	14,3	-16,1		0,46	0,79
aoû-96	46,9	39,8	6,2	0,42	0,40	0,71
Moyenne	29,1	11,6	-9,1	0,42	0,52	0,76
Ecart-type	31,2	17,6	10,4		0,14	0,03

Toutes les valeurs sont exprimées en $W m^{-2}$

La figure F.12 présente la radiation nette mensuelle à 5150 m pour les trois dernières années hydrologiques. Les valeurs obtenues cette année sont dans la norme de celles observées les deux années précédentes, et même très comparables à l'année 93/94, sauf pour les mois de septembre à décembre. On enregistre en octobre et novembre 95 des valeurs très fortes. L'ablation « record » du mois d'octobre 95 (qui a atteint le mètre d'eau) peut largement être expliquée par ce surplus d'énergie radiative reçu par le glacier à cette époque.

La radiation nette annuelle à 5150 m étant égale à $29.1 W m^{-2}$, on peut dire que chaque mètre carré a reçu une énergie totale de $920.2 \cdot 10^6$ de Joules pendant cette année (sous la forme de radiation). En supposant que cet apport net d'énergie a été « utilisé » uniquement pour la fonte, l'ablation aurait dû être de 2.76 m d'eau. Elle n'a été environ que de 2.2 m d'eau. Cet apport d'énergie a donc servi à autres choses qu'à la fusion, et en particulier à la sublimation.

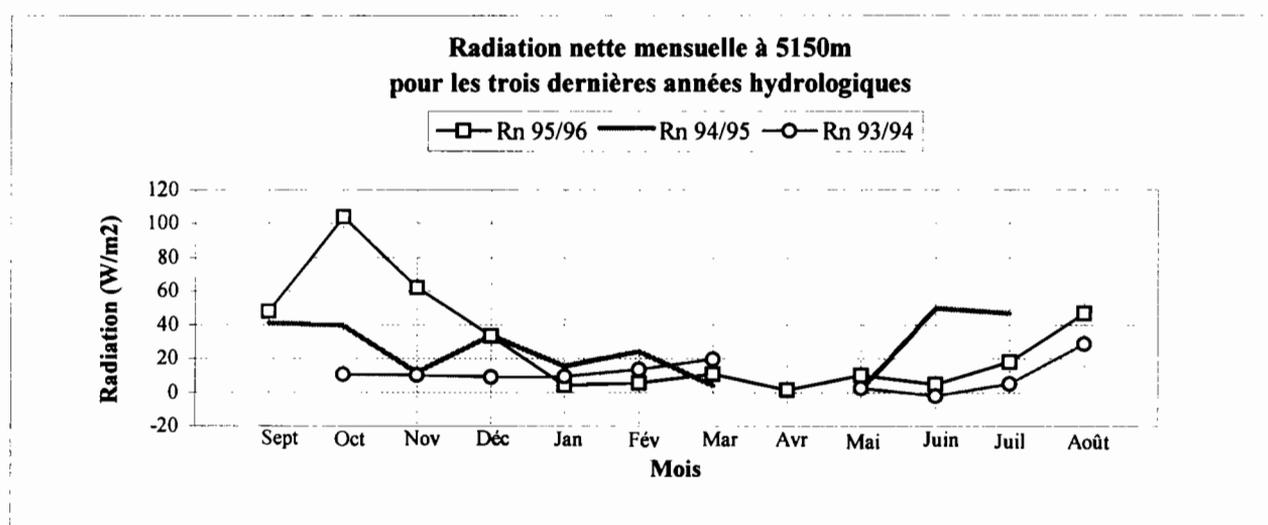


Figure F.12

F. 4.2. Radiations solaires incidente et réfléchie mensuelles

Les moyennes mensuelles des radiations solaires incidentes et réfléchies, et de leurs différences à 4750, 5025, 5150 et 5550 m sont présentées (parfois partiellement) dans les tableaux F.3 et F.4. On constate que la radiation solaire directe mesurée à 4750 m par la station Mevis, est très proche de la mesure réalisée à 5150 m sauf pendant la saison des pluies (décembre, janvier, février, mars) où la moyenne est jusqu'à 150 W m^{-2} plus faible (couvert nuageux plus dense et effet miroir inexistant). Sur les quatre derniers mois de l'année, la mesure de $\text{SW}\downarrow_{5550}$ fournit des valeurs proches de celles observées à 5150 m, quoiqu'en léger retrait, surtout en juin-juillet. Pour expliquer cet écart, on peut évoquer une durée d'ensoleillement plus faible, ainsi qu'un effet miroir moindre à 5550 qu'à 5150 m. Mais cela reste à prouver.

Concernant la radiation réfléchie, sur les quatre derniers mois de l'année, elle est plus importante à 5550 qu'à 5150 m du fait d'un albédo supérieur. En conséquence l'apport net de radiation solaire est plus important à 5150 qu'à 5550 m (tableau F.4).

Nous avons tracé sur la figure F.13 l'évolution mensuelle du débit, de l'apport net de la radiation solaire ($\text{SW}\downarrow - \text{SW}\uparrow$)₅₁₅₀ et de la radiation nette Rn_{5150} . Les trois paramètres sont bien en phase, cette année la radiation a été le facteur majeur commandant le débit, avant la température et les précipitations (néanmoins la corrélation simple entre le débit journalier et la radiation nette journalière reste médiocre : $r^2 = 0,44$; $n = 340$ pts). L'année dernière ce n'était pas du tout le cas, les tendances Rn (mensuel) étaient très éloignées de celles du débit. Ces dernières étaient plus en correspondances avec les variations de la température et de la précipitation mensuelle (rapport n°49), exactement l'inverse donc.

Tableau F.3
Radiation solaire (courtes longueurs d'ondes) incidente et réfléchie
moyennes mensuelles aux différentes altitudes

	SW↓ 4750	SW↓ 5025	SW↓ corrigé 5150	SW↓ corrigé 5550	SW↑ 5025	SW↑ corrigé 5150	SW↑ corrigé 5550
sep-95	203,1		206,1			111,3	
oct-95	256,3		254,2			101,3	
nov-95	237,8		249,7			146,1	
déc-95	198,5		227,8			163,9	
jan-96	171,3		324,3			267,8	
fév-96	188,0		344,5			278,9	
mar-96	195,6		350,8			275,1	
avr-96	189,4		192,5			151,0	
mai-96	200,1		196,1	194,4		141,8	156,2
jun-96	202,5		191,5	183,1		139,8	144,8
jul-96	212,4		207,7	199,1		135,9	160,1
aoû-96	199,6	186,9	210,8	209,5	92,5	110,9	156,2
Moyenne	204,5	186,9	246,3 201,5(*)	196,5	92,5	168,7 132,1(*)	154,3
Ecart-type	22,6		60,2	11,0		66,0	6,6

Toutes les valeurs sont exprimées en Wm^{-2}

(*) : moyenne sur les 4 derniers mois.

Tableau F.4
Apport net d'énergie solaire (radiation courtes longueurs d'ondes)
moyennes mensuelles aux différentes altitudes

	SW↓ - SW↑ 5025	SW↓ - SW↑ corrigé 5150	SW↓ - SW↑ corrigé 5550
sep-95		94,8	
oct-95		152,9	
nov-95		103,5	
déc-95		63,9	
jan-96		56,5	
fév-96		65,6	
mar-96		75,7	
avr-96		41,6	
mai-96		54,3	38,1
jun-96		51,6	38,1
jul-96		71,9	39,1
aoû-96	94,5	99,9	53,1
Moyenne	94,5	77,7 \ 69,4(*)	42,1
Ecart-type		30,8	7,3

Toutes les valeurs sont exprimées en Wm^{-2}
 (*) : moyenne sur les 4 derniers mois

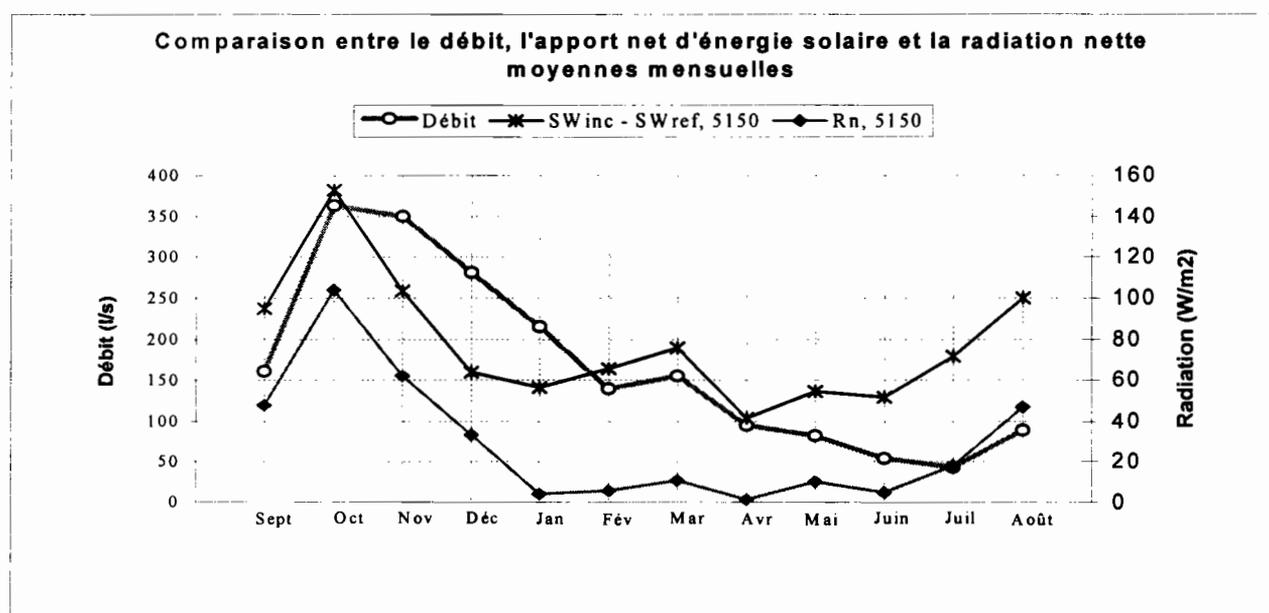


Figure F.13

F. 5. Durées avec la radiation solaire incidente supérieure à un seuil

Nous présentons ici les moyennes mensuelles des durées journalières pendant lesquelles la radiation courtes longueurs d'ondes est supérieure aux seuils 300, 500 et 700 $W m^{-2}$, ceci à 5150 et 5550 m d'altitude. Ces données ne sont pas corrigées de l'effet des précipitations des chutes de neige. Ceci a peu d'importance car en cas de chutes de neige, la nébulosité étant importante, la radiation est le plus souvent inférieure à 300 $W m^{-2}$.

Tableau F.5
Durées journalières avec SW↓ > Seuil
Moyennes mensuelles à 5150 et 5550 m d'altitude

	SW↓ ₅₁₅₀ >300	SW↓ ₅₅₅₀ >300	SW↓ ₅₁₅₀ >500	SW↓ ₅₅₅₀ >500	SW↓ ₅₁₅₀ >700	SW↓ ₅₅₅₀ >700
sep-95	351		241		162	
oct-95	438		315		235	
nov-95	413		304		198	
déc-95	373		252		161	
jan-96	360		196		87	
fév-96	384		234		108	
mar-96	363		217		121	
avr-96	362		230		134	
mai-96	382	378	285	284	172	172
jun-96	379	381	302	254	177	162
jul-96	394	368	322	291	206	192
août-96	386	404	280	283	197	183
Moyenne	382 \ 385(*)	383	265 \ 297(*)	278	163 \ 188(*)	177
Ecart type	24,46	15,05	41,77	16,37	43,88	12,85

Toutes les valeurs sont exprimées en minutes par jour
 (*) : moyenne sur les 4 derniers mois

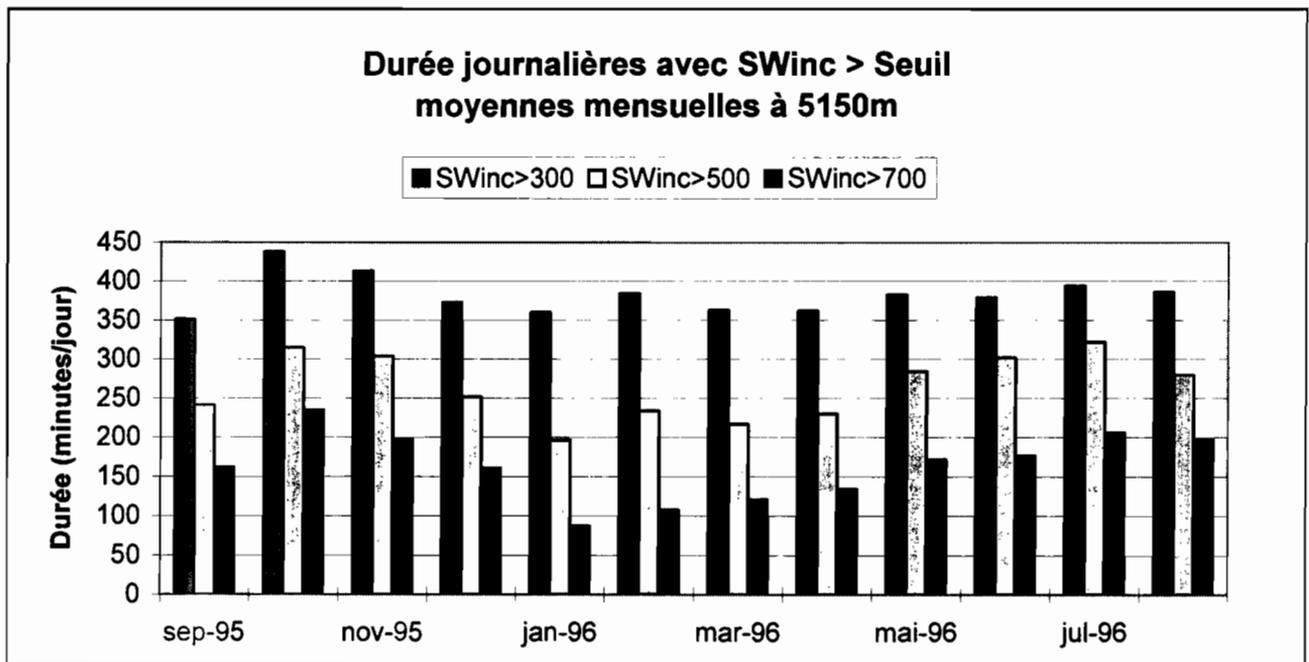


Figure F.14

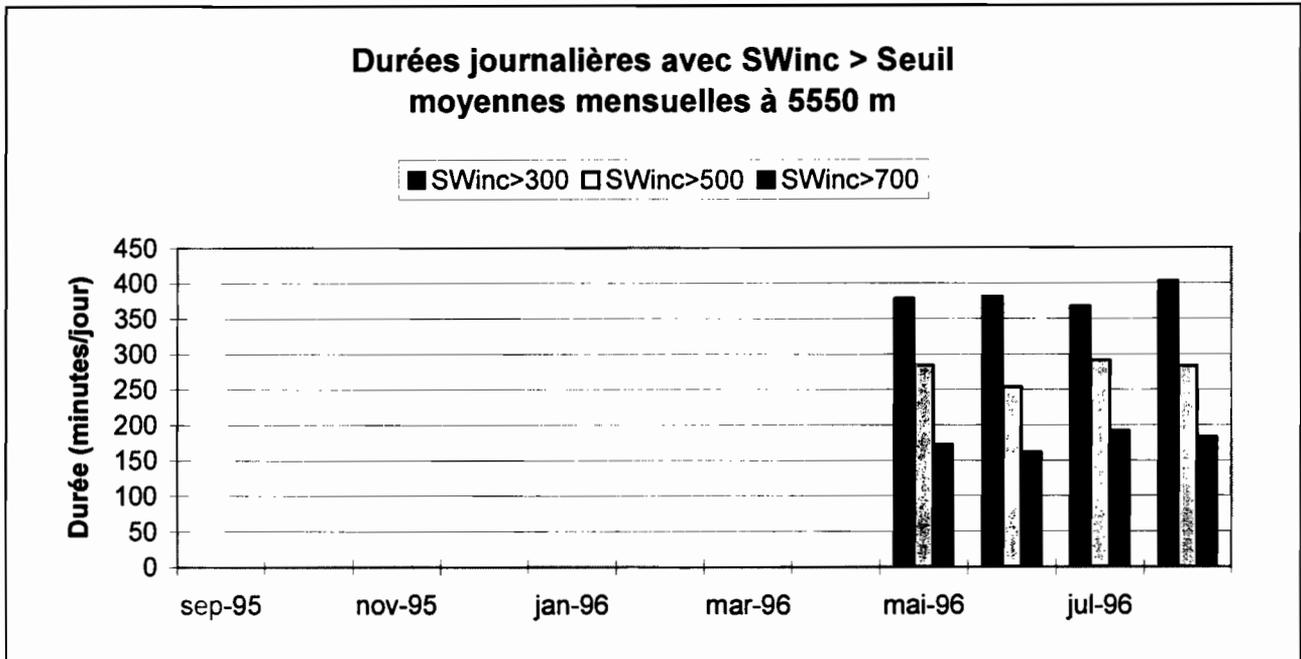


Figure F.15

Concernant les durées de radiation à 5150 m (fig. F.14), on peut voir que plus le seuil est élevé plus la saisonnalité apparaît nettement. Et cette dernière est en opposition de phase avec les précipitations (fig. E.1), ce qui est logique : une nébulosité importante est incompatible avec une radiation supérieure à 700 W m^{-2} . En moyenne sur l'année, la durée journalière pendant laquelle la radiation du ciel est supérieure à 300 W m^{-2} est de 6 h 22 min, celle correspondant à 700 W m^{-2} est égale à 2h43min. Ces valeurs sont sensiblement supérieures à celles observées il y a 2 ans, voir rapport n°43.

Quant aux durées de radiation à 5550 m (fig. F.15), l'échantillon est trop faible pour tirer quelques conclusions propres à cette altitude. Néanmoins, plus le seuil est élevé, plus elles sont en retrait par rapport aux durées observées à 5150 m.

G. DEBITS

Le débit du torrent émissaire du bassin versant est mesuré par un limnigraphe à bande situé à 4830 m, à environ 50 m (en dénivelée) du front du glacier. Nous avons donc une mesure en continu du débit.

G.1. Valeurs instantanées

Les figures G.1 et G.2 représentent le débit instantané enregistré à la station limnigraphique à 4830 m, au cours de deux périodes représentatives de l'année. La première période (fig. G.1) en saison des pluies, la seconde (fig. G.2) en saison sèche.

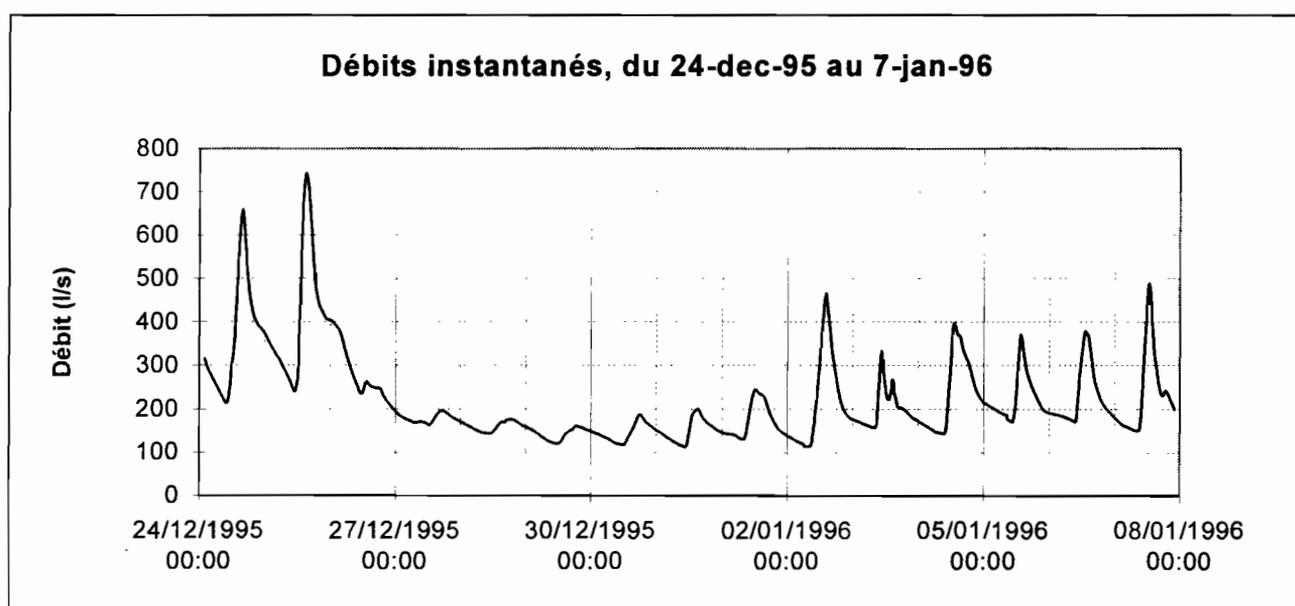


Figure G.1

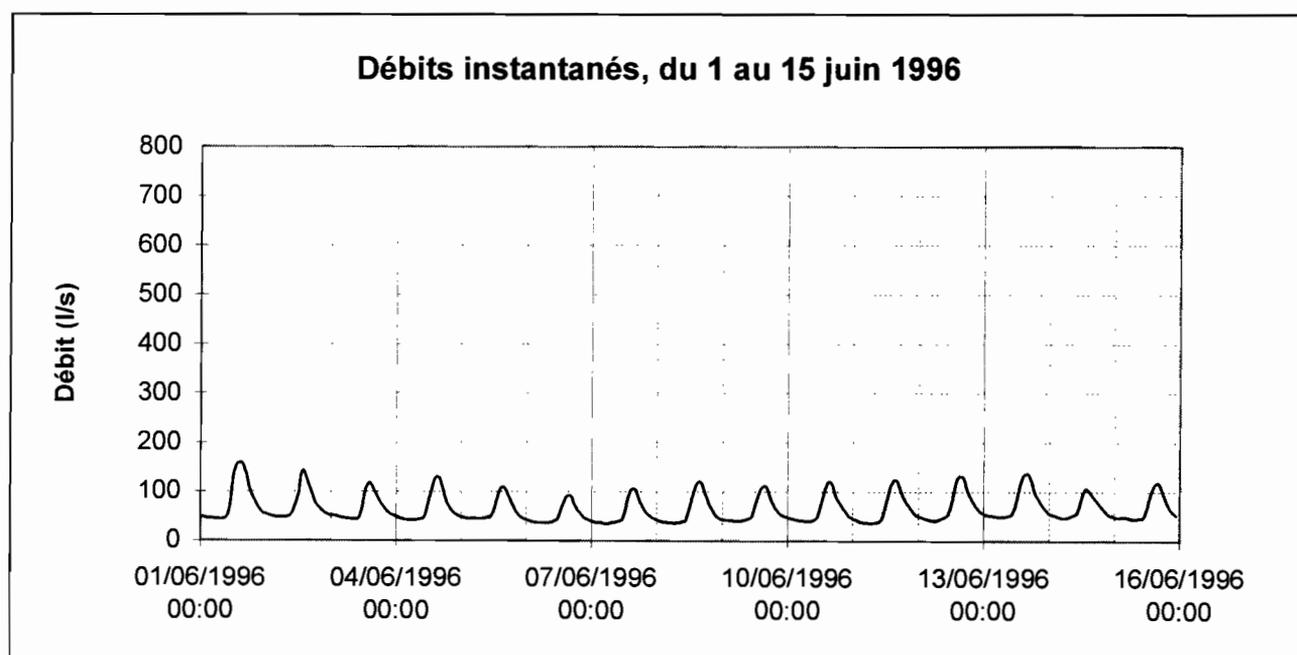


Figure G.2

Ces deux figures montrent les deux caractères principaux du débit. Premièrement, tout au long de l'année (sans exception) le débit connaît des oscillations journalières, et deuxièmement il s'agit d'une variable à très forte saisonnalité. L'oscillation journalière du débit est caractéristique d'un bassin versant fortement englacé du type de celui du ZONGO, quelle que soit la saison le débit est maximum entre 13h et 16h et minimum en fin de nuit. Outre cette variabilité journalière, il existe aussi une variabilité à l'échelle de l'année à propos de laquelle nous pouvons faire les remarques suivantes :

- En saison des pluies, qui est aussi la saison chaude, les débits de base sont de l'ordre de 200 l s^{-1} et l'on observe des pics dépassant les 700 l s^{-1} ainsi que des périodes « d'étiages » où le débit peut descendre jusqu'à 100 l s^{-1} . Cette grande variabilité est caractéristique de la saison des pluies où les conditions météorologiques (température, humidité, radiation) ainsi que les conditions de la surface (albédo) sont très changeantes à l'échelle de quelques jours. De plus, il existe plusieurs scénarios (ou conditions) météo-glaciologiques pouvant conduire à un même régime du torrent émissaire. C'est aussi en cette saison que l'amplitude journalière est la plus grande, elle peut atteindre des valeurs proches de 500 l s^{-1} .

- En saison sèche, qui est aussi la saison froide, Les débits observés sont donc les plus faibles de l'année. Les débits de base sont de l'ordre de 50 l s^{-1} et les débits de pointes atteignent 150 l s^{-1} . Le caractère régulier du débit, à l'échelle de quelques jours, reflète bien la stabilité des conditions météorologiques typiques de cette saison. L'amplitude journalière est aussi réduite avec une moyenne autour de 50 l s^{-1} .

- Débits extrêmes instantanés

Le tableau G.1 présente les maxima et les minima instantanés de l'année, ainsi qu'une comparaison des maxima instantanés annuels depuis 5 ans. On remarque que le débit de pointe maximum de cette année fait partie des plus forts enregistrés, il est aussi le plus précoce.

Tableau G.1
Maxima et minima annuels du débit instantané pour les cinq dernières années

	Débit maximum (l s^{-1})	Débit spécifique maximum ($\text{l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$)	Date	Débit minimum (l s^{-1})	Débit spécifique minimum ($\text{l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$)	Date
91/92	929	312	le 22/12/91	9.7	3.3	le 22/08/92
92/93	1070	360	le 20/12/92	7.7	2.6	le 17/07/93
93/94	793	267	le 07/12/93	8.8	3.0	le 09/09/94
94/95	1050	354	le 6/12/94	23.9	8.0	le 19/07/95
95/96	1020	343	le 15/11/96	13.3	4.5	le 30/08/96

Note : le débit spécifique est le débit rapporté à la surface du bassin versant, ici $2,97 \text{ km}^2$.

G. 2. Valeurs journalières

La figure G.3 présente le débit journalier et la pluie journalière reçue à 4750 m. Cette année, le débit a connu une saisonnalité très marquée, il a atteint son maximum fin octobre - début novembre, ensuite il a progressivement diminué tout en connaissant des périodes de crues de plusieurs jours, d'intensités décroissantes elles aussi. Il atteint ainsi son minimum fin juillet - début août, puis a recommencé à croître. Cette saisonnalité est assez différente de celle observée antérieurement. En particulier, les forts débits ont été atteints très tôt par rapport aux années

précédentes (tableau G.4). Cette figure montre le rôle « ambigu » des précipitations dans la valeur du débit. En effet, jusqu'en novembre débit et précipitations connaissent des variations inverses, car alors le moteur de cet apport d'eau est *la fonte* causée par une radiation nette très forte, elle-même conséquence d'un albédo très faible (fig. F.11 et F.13). Les chutes de neiges donnent provisoirement un albédo plus élevé et la nébulosité, qui va de pair, bloque la radiation solaire incidente, importante source d'énergie, utilisée à cette époque pour la fusion. A partir du mois de décembre, par contre, les précipitations deviennent un facteur prépondérant pour les crues. Sur l'ensemble de l'année, la pluie et le débit journalier sont parfaitement décorrélés : $r^2 = 0,018$ ($n = 330$ pts). En régime essentiellement nivale, les précipitations ne peuvent évidemment pas expliquer à elles seules le débit, il faut l'associer à d'autres paramètres climatiques.

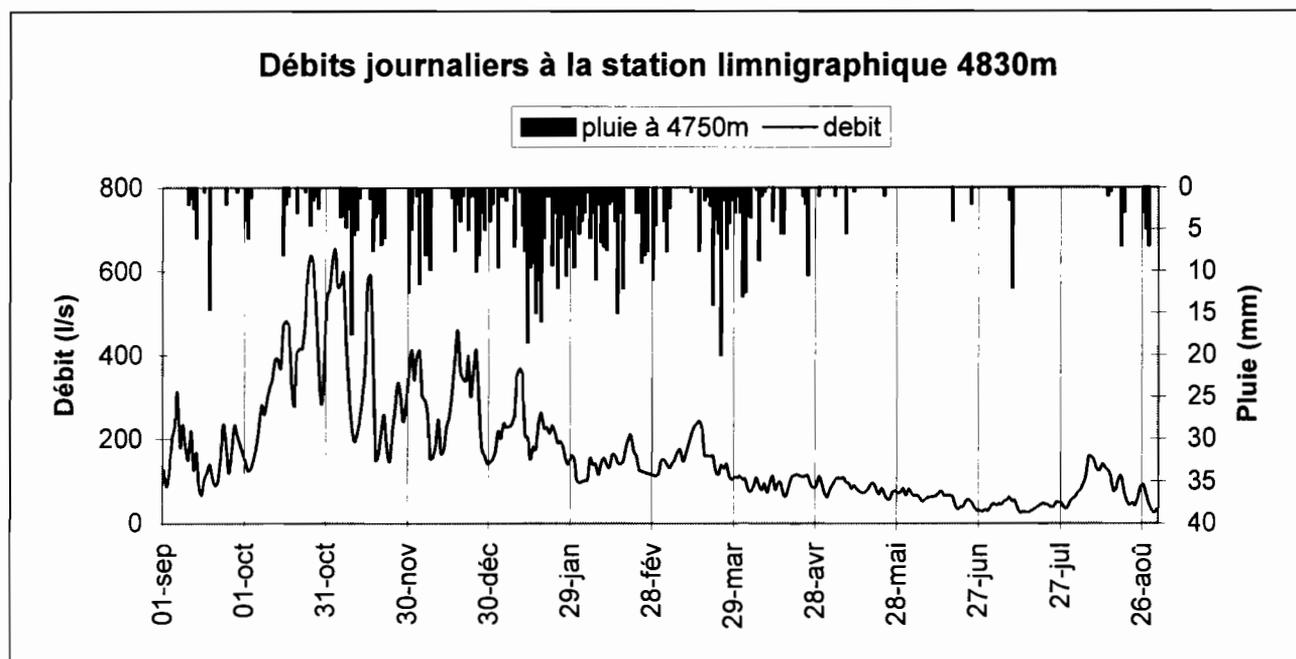


Figure G.3
(les valeurs manquantes du débit sont interpolées)

Le tableau G.3 récapitule les valeurs journalières du débit pour cette année. On peut y voir que le débit journalier maximal a été enregistré le 03-nov-95 avec 652 l s^{-1} soit en débit spécifique $219.5 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$. Ce débit est proche de celui enregistré l'an passé (tableau G.2), la singularité de cette année est que de telles valeurs (autour des 600 l s^{-1}) ont été enregistrées à de nombreuses reprises en octobre-novembre. Le débit journalier minimal a été enregistré le 12-juil-96 avec 25 l s^{-1} (soit $8.4 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$). Cette valeur est comparable à celle de l'année dernière et fait donc partie des plus grandes (tableau G.2).

Tableau G.2
Maxima et minima annuels du débit journalier pour les cinq dernières années

	Maximum annuel du débit journalier (l s^{-1})	Date	Minimum annuel du débit journalier (l s^{-1})	Date
91/92	645	26-mar-92	14	22-juin-92
92/93	703	21-déc-92	17	24-août-93
93/94	529	07-déc-93	10	07-juil-94
94/95	636	05-déc-94	26.6	19-juil-95
95/96	652	03-nov-95	25	12-juil-96

Tableau G.3
Débits journaliers à la station limnigraphique, année 95/96
 Toutes les valeurs sont exprimées en $l\ s^{-1}$, sauf, SPE : débit spécifique en $l\ s^{-1}\ km^{-2}$

	sep-95	oct-95	nov-95	déc-95	jan-96	fév-96	mar-96	avr-96	mai-96	jun-96	juil-96	aoû-96
1	128		556	411	173			104	74	81	40	63
2	87		619	340	218		148	105	62	72	47	74
3	120		652	394	201		151	80	79	66	43	80
4	200	148	562	409	236		142	76	91	67	47	94
5	232	178	568	304	227		132	89	103	62	45	114
6	312	222	595	292	229	139	143	108	107	52	52	159
7	181	281	417	261	234	142	151	90	105	56	56	158
8	234	258	318	154	259	116	170	79	108	61	62	149
9	176	289	231	156	352	142	175	94	97	62	52	128
10	151	323	194	189	367	155	147	73	95	64	55	126
11	219	342	208	246	352	141	160	95	82	65	35	141
12	127	391	245	166	208	133	185	112	89	71	25	133
13	167	391	291	176	204	162	206	80	81	77	28	126
14	90	369	376	227	152	162	227	97	76	66	26	112
15	67	470	577	255	182	146	235	96	72	66	26	77
16	104	481	590	308	175	141	242	66	73	66	30	82
17	119	466	375	392	239	147	225	66	80	64	34	104
18	140	325	150	458	262	176	161	92	91	46	38	111
19	110	279	166	360	225	202	161	110	95	34	43	78
20	90	405	221	343	228	209	159	113	83	38	47	54
21	97	415	257	338	213	170	160	115	69	41	46	44
22	159	416	180	397	232	160	126	113	83	53	44	49
23	235	486	147	300	214		116	110	72	57	39	42
24	183	588	213	365	191		138	112	58	51	40	61
25	120	638	272	410	195		131	112	57	39	50	86
26		615	333	280	180		140	92	74	31	49	91
27		504	299	179	151		110	84	77	31	48	71
28		371	241	161	140		104	87	73	28	38	49
29		282	285	143	161		109	111	73	33	36	34
30		377	356	146	154		108	96	82	30	49	25
31	x	534 _x		152		x	112		67		59	34
Moyenne <i>(l s⁻¹)</i>	154 160	387 362	350 350	281 291	218 214	155 140	156 155	95 94	82 82	54 55	43 43	89 89
Ecart type <i>(l s⁻¹)</i>	59,7	125,2	162,0	99,0	57,0	23,8	38,7	14,9	13,8	15,5	9,8	38,8
SPE <i>(l s⁻¹ km⁻²)</i>	51,8	130,4	117,8	94,6	73,6	52,3	52,5	32,1	27,5	18,3	14,4	29,9

G. 3. Valeurs mensuelles et annuelles

G. 3.1. Débits mensuels

Le tableau G.4 résume les valeurs mensuelles du débit pour l'année 95/96, et les compare avec celles des années précédentes. La figure G.4 illustre ce tableau. Cette année se démarque des autres sur deux points : la précocité des forts débits d'une part, et leur intensité d'autre part. Octobre et novembre 95 sont les mois qui ont connu les débits les plus grands depuis 5 ans. Ils sont même plus forts que ceux enregistrés en 91/92, qui fut une année associée à un événement ENSO d'amplitude moyenne. Décembre et janvier ont été des mois à débits relativement soutenus, ensuite les débits observés ont été parfaitement conformes à ceux mesurés les années précédentes (année « ENSO » mise à part).

Tableau G.4
Débits mensuels pour les cinq dernières années

	91/92	92/93	93/94	94/95	95/96
Sept	88,1	67,8	52,2	147	154
Oct	230	152	84,9	179	387
Nov	274	234	187	168	350
Déc	342	201	295	285	281
Jan	192	114	207	242	218
Fév	185	114	176	289	155
Mars	243	116	126	137	156
Avril	194	66,8	81,9	134	95
Mai	179	65,1	62,7	84	82
Juin	52,7	42,2	61,7	68	54
Juil	28,2	29,2	47,2	71	43
Août	32,8	31,3	132,3	130	89
Moyenne (l s⁻¹)	170,1	102,8	126,2	161,2	172,0
SPE (l s⁻¹ km⁻²)	57,3	34,6	42,5	54,3	57,9

Valeurs exprimées en l s⁻¹, SPE : débit spécifique en l s⁻¹ km⁻²

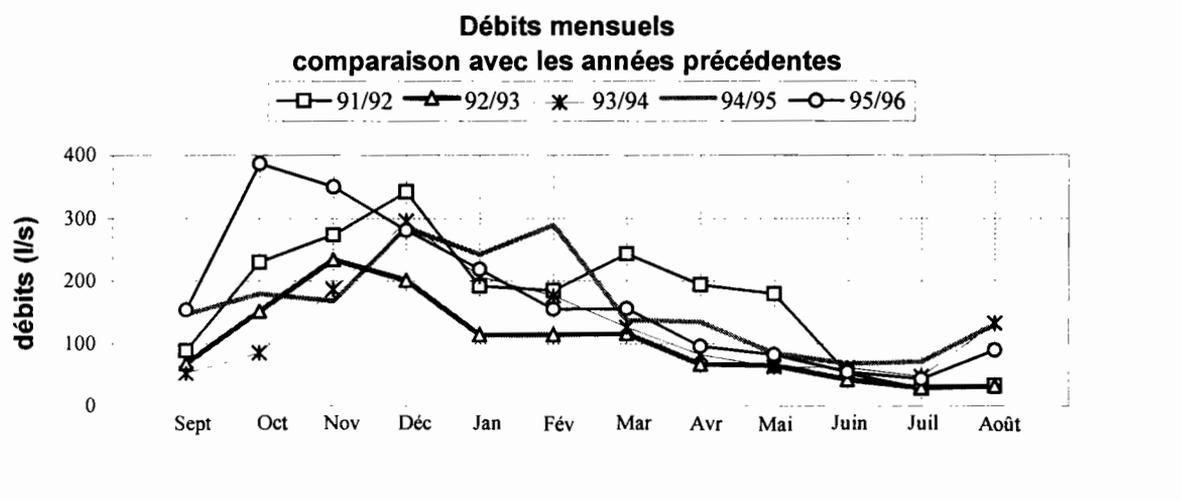


Figure G.4

G. 3.2. Débits annuels

Le débit annuel pour cette année apparaît dans le tableau G.4. 95/96 est l'année qui a connu l'écoulement le plus fort depuis le début du programme NGT. Cette valeur est plus forte que celle de l'année « ENSO » 91/92.

• Bilan hydrologique sur les cinq années

Le bassin versant du torrent mesuré est composé de 2.1 km² de glacier et de 0.9 km² de moraine. Nous faisons l'hypothèse que la contribution de la moraine est égale à 0.8 fois la quantité d'eau qu'elle reçoit (coefficient de ruissellement). Nous mesurons le débit et la pluie sur l'ensemble du bassin versant. Nous pouvons donc établir l'apport de la moraine et du glacier à l'écoulement, et en déduire le bilan de masse du glacier. Les résultats sont explicités dans le tableau G.5. Le bilan masse est la masse (en mm d'eau) perdue (si >0) ou gagnée (si <0) par le glacier au terme de l'année hydrologique.

Tableau G.5
Bilan hydrologique sur les cinq dernières années

	Débit annuel (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	920	21	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	867	19.7	152.3	2293	1426

Note : Précipitations : moyenne annuelle des précipitations sur le bassin versant
 Apport moraine = $(0.8 * \text{Précipitation} * \text{surface moraine}) / 1 \text{ an} = (0.8 * \text{Précipitation} * 0.9 * 10^6) / (366 * 24 * 60 * 60)$
 Apport glacier (l s⁻¹) = Débit annuel - Apport moraine
 Apport glacier (mm) = Apport glacier (l s⁻¹) * 1 an / surface glacier = $10^3 * ((\text{Apport glacier (l s}^{-1}) * 10^{-3} * 366 * 24 * 60 * 60) / 2,1 * 10^6)$
 Bilan masse (mm) = Apport glacier (mm) - Précipitation (mm)

Le bilan masse obtenu par cette méthode est particulièrement fort. Il est assez éloigné de celui obtenu par les mesures glaciologiques « classiques » : - 1094 mm d'eau (chap. K). Pour « retrouver » cette valeur, en conservant la valeur du débit annuel, il aurait fallu une précipitation annuelle de 1115 mm, ce qui n'a jamais été mesurée.

G. 4. Etude statistique

G. 4.1. Corrélations multiples

Nous présentons ici la corrélation multiple du débit avec les paramètres Précipitations, Température de l'air à 5150 m (mesure haute), Radiation nette et la Différence de la radiation solaire incidente et réfléchie (SW↓ - SW↑). Cette corrélation existe pour les années 93/94 et 94/95 (rapport 43 et 49). La reconstitution du débit par cette corrélation est présentée sur la figure G.5. Cette reconstitution est meilleure d'année en année : en 93/94, r² = 0.40, en 94/95, r² = 0.56 (310 pts) et en 95/96, r² = 0.57 (361pts).

Le fait de rajouter la radiation solaire extraterrestre apporte un gain substantiel à la corrélation, puisque le coefficient atteint 0.72. L'action de ce terme, à la saisonnalité évidemment très marquée, sur la valeur du débit est donc flagrante (fig. G.6)

Ces deux reconstitutions restent grossières en particulier sur les deux points suivants.

Premièrement, aucune ne peut restituer les fortes valeurs : les pics d'octobre / novembre sont sous estimés d'environ 200 l s^{-1} .

Deuxièmement, des pics négatifs surviennent en juin - juillet, comme dans la reconstitution de 93/94. Cette année ils sont dus à des conditions climatiques particulières, que manifestement un tel modèle est incapable de rendre. Dans les deux cas, il s'agit d'une période 2-3 jours qui :

- 1) suit une précipitation neigeuse (albédo élevé)
- 2) voit la température journalière atteindre -4.5°C .
- 3) connaît une nébulosité nulle

Dans une telle situation, l'albédo élevé reste élevé, donc $(\text{SW}\downarrow - \text{SW}\uparrow)_{\text{jour}}$ est un terme faible (de l'ordre de 20 W m^{-2}), Rn_{jour} est négatif (environ -40 W m^{-2}) et T_{jour} atteint environ -5°C , les précipitations étant nulles, cela suffit à fournir un débit négatif.

Seul un modèle physique peut espérer prédire avec une meilleure précision le débit issu d'un bassin versant englacé à l'échelle de quelques jours.

Néanmoins, à l'échelle de l'année, le débit reconstitué est très bon. En effet, La moyenne annuelle du débit reconstitué est de $171,6 \text{ l s}^{-1}$ d'après la corrélation sans R_{extra} , et de 173 l s^{-1} dans l'autre cas.

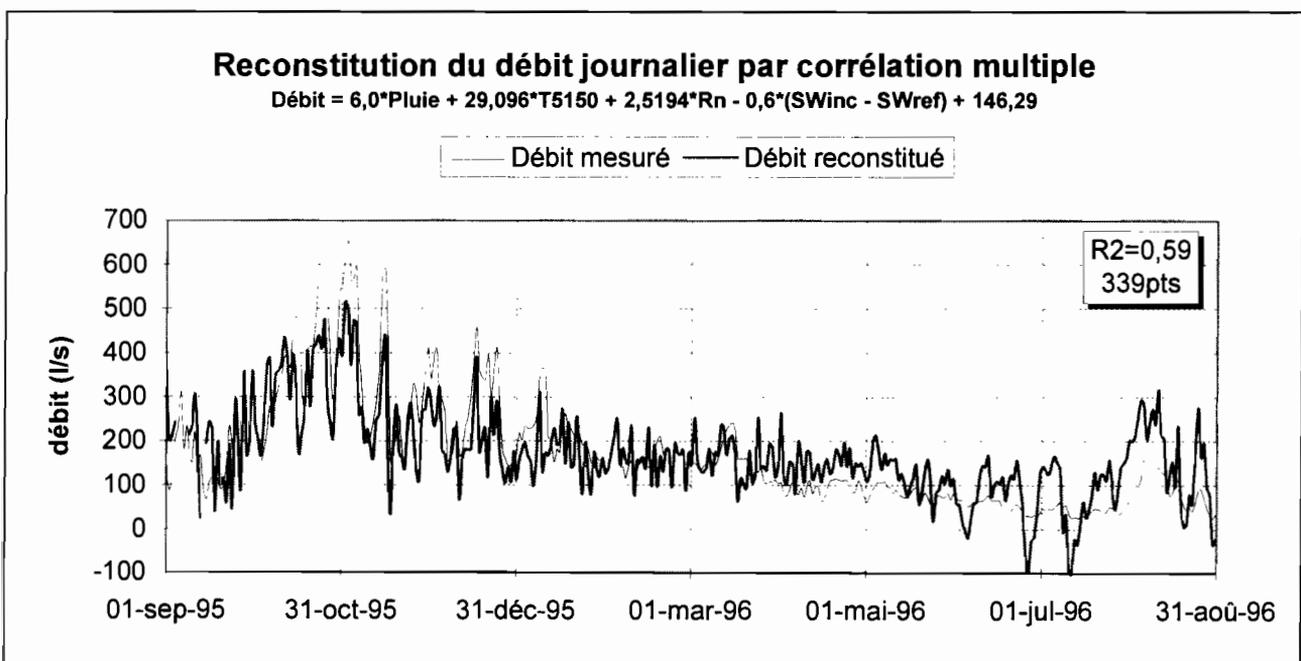


Figure G.5

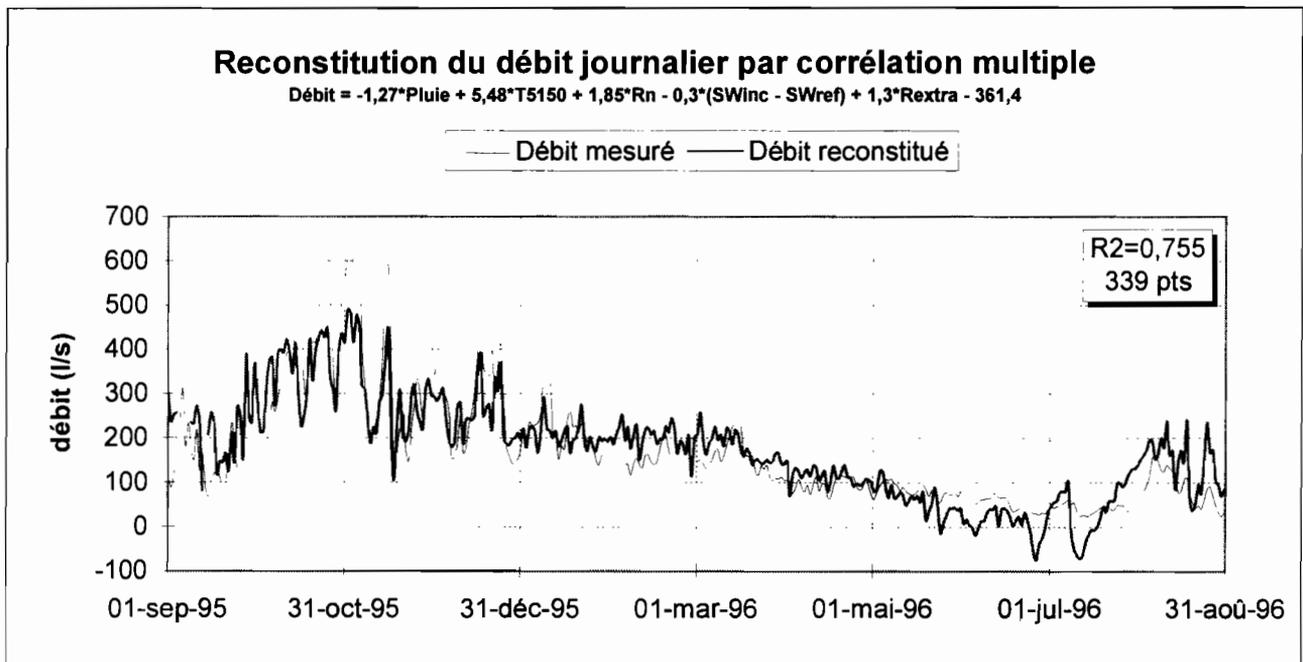


Figure G.6

G. 4.2. Autocorrélation

Le tableau G.6 présente diverses corrélations simples entre le débit journalier du jour j , et ceux respectivement des jours $j-1$, $j-2$, $j-3$, $j-5$ et $j-10$. Ce simple calcul permet de mettre en évidence l'inertie des débits par rapport à ceux des jours précédents. La signification des coefficients a et b est la suivante : $Q(j) = a Q(j-n) + b$, $Q(j-n)$ étant le débit au jour $j-n$.

Tableau G.6
Autocorrélations des débits

	a	b	r²
Q(j-1)	0,944	9,2	0,888
Q(j-2)	0,861	22,8	0,737
Q(j-3)	0,797	33,514	0,629
Q(j-5)	0,726	45,066	0,521
Q(j-10)	0,726	44,346	0,516

Le débit du jour j est fortement corrélé avec celui de la veille, et significativement lié à celui des jours $j-2$ et $j-3$. Ce phénomène est typique d'un bassin versant englacé, le glacier a un effet tampon sur la variabilité aléatoire des paramètres météorologiques. La figure G.7 représente la reconstitution du débit du jour j par corrélation simple avec celui du jour $j-1$, ainsi qu'avec celui du jour $j-10$. La dépendance avec le débit de la veille est très bonne, mais celle par rapport au jour $j-10$ est franchement mauvaise, en particulier les pics apparaissent 10 jours plus tard.

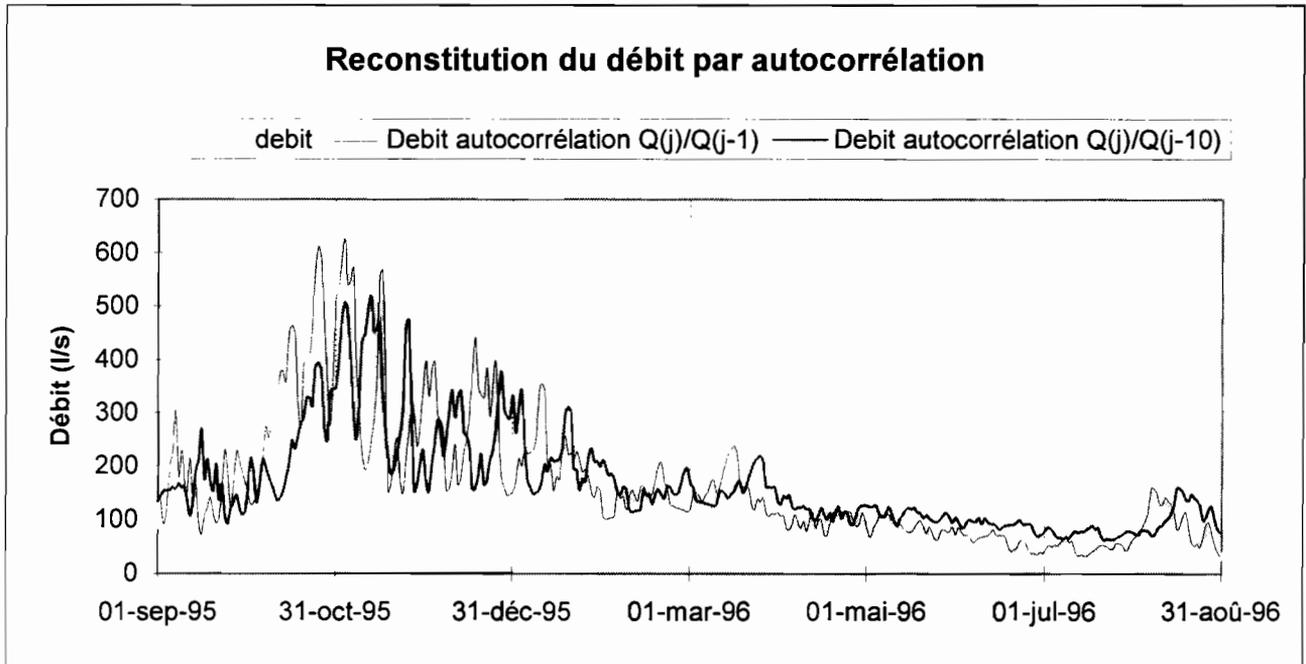


Figure G.7

H. PRESSION DE VAPEUR D'EAU

Nous mesurons la pression de vapeur à 4750, 5150 et 5550 mètres d'altitude, ceci avec deux types de capteurs. Les stations Mevis (hors glacier, 4750 m) et Campbell 21X (sur glacier, 5150 m) sont équipées d'hygro-thermomètres classiques qui fournissent une valeur de l'humidité relative. Les stations Campbell CR10 fixe (sur glacier, 5150 m) et portable (sur glacier, 5025 m) sont, elles, équipées de psychromètres qui mesurent les températures sèche et humide de l'air. Les expressions thermodynamiques utiles pour en déduire la pression de vapeur, notée e , sont les suivantes :

$$\text{pression de vapeur saturante : } e_{\text{sat}} = 6.1078 \text{ EXP} \left(\frac{17.08085 T_{\text{sec}}}{234.175 + T_{\text{sec}}} \right) \quad (\text{mb})$$
$$\text{pression de vapeur : } e = e_{\text{sat}}(T_{\text{hum}}) - 0.00066 p (T_{\text{sec}} - T_{\text{hum}}) \quad (\text{mb})$$
$$\text{humidité relative : } H = e/e_{\text{sat}} \quad (\%)$$

Dans toutes ces expressions T_{sec} et T_{hum} sont les températures sèche et humide exprimées en °C, et p la pression atmosphérique (540 mb à 5200 m).

H. 1. Valeurs instantanées

Nous allons présenter ici les résultats des mesures pour deux périodes de sept jours : la première semaine d'avril, en saison humide et la première semaine d'août, en saison sèche. Mais avant, nous présentons quelques résultats pour évaluer l'influence de la ventilation sur les mesures de la pression de vapeur.

- *Influence de la ventilation*

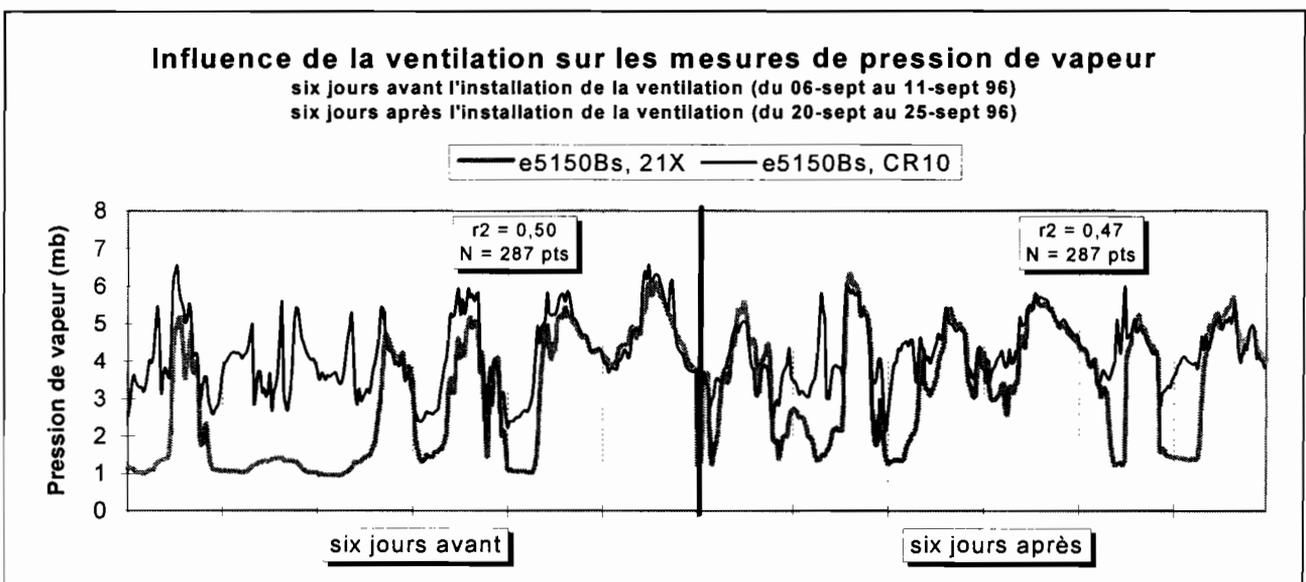


Figure H.1

Entre le 12 et 19-sept-96, un système d'alimentation électrique (panneau solaire 43 W + batterie 12V/100Ah) a été installé pour assurer la ventilation en continu des psychromètres de la station CR10 à 5150 m. Nous présentons six jours de mesures de ces derniers avant et après cette installation. Nous les comparons avec les mesures de la station 21X (hygro-thermomètres). D'après les figures H.1 et H.2, les mesures ne semblent pas bouleversées par ce changement. Les mesures basses des psychromètres sont moins bien corrélées avec celles des hygro-thermomètres après l'installation de la ventilation continue, et les mesures hautes mieux ... Les mesures réalisées depuis la mise en service des psychromètres semblent être crédibles, car premièrement elles ont été faites en priorité en saison sèche, donc ventilées efficacement la journée, et deuxièmement la ventilation ne semble pas modifier grandement les mesures.

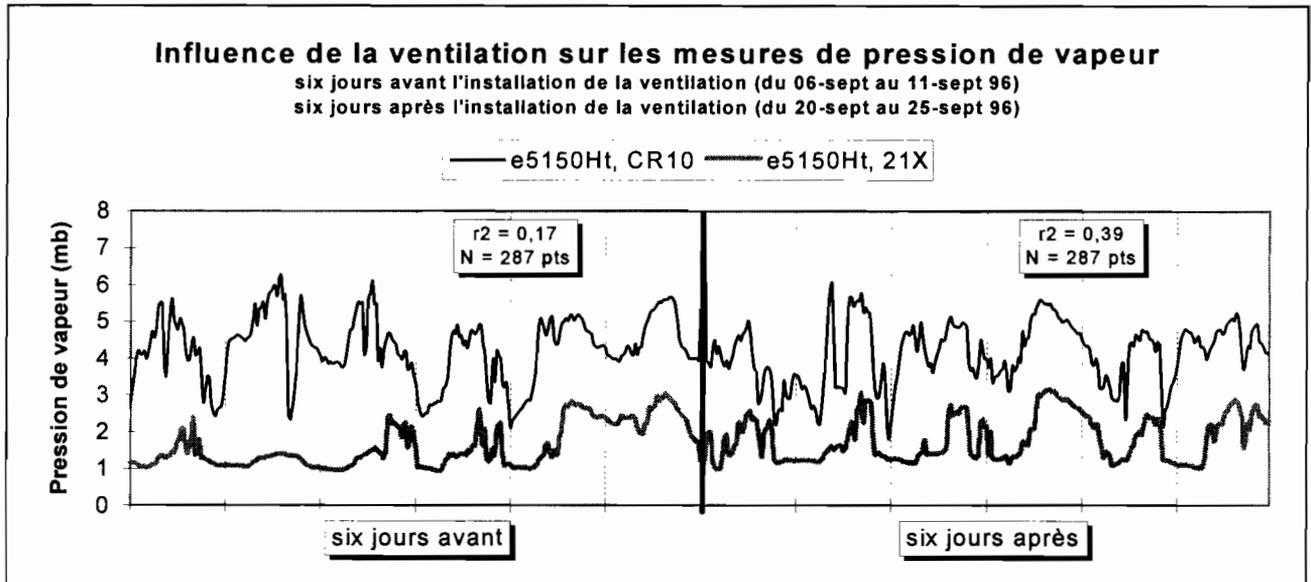


Figure H.2

• *Avril 96*

Nous présentons les mesures réalisées à 5150 m par les deux types de capteurs.

Les mesures réalisées à partir des hygro-thermomètres (fig. H.3) montrent de façon continue un gradient négatif assez élevé (-3 mb pour 1,5 m d'élévation). Rappelons qu'un gradient négatif correspond à une situation d'évaporation et (ou) de sublimation, et qu'un gradient positif à une situation de condensation, mais attention, le taux d'évaporation ou de condensation n'est pas directement proportionnel à la valeur du gradient (la turbulence joue un rôle important). D'après ces mesures, il y aurait donc évaporation/sublimation de façon permanente à la surface du glacier. En valeur absolue, les mesures basses varient quotidiennement entre 3 et 7 mb, et les mesures hautes entre 1 et 4 mb. Le maximum quotidien se situe vers 12h00.

Les mesures issues des psychromètres (fig. H.4) ne montrent pas, elles, de si grandes différences. On note la tendance suivante pour le gradient : il passe légèrement négatif en milieu de matinée en augmentant plus ou moins (en valeurs absolues) jusqu'en milieu d'après-midi. Vers 20h00, il repasse positif, en augmentant jusqu'au matin. Ces résultats semblent plus logiques, avec cette alternance de périodes de condensation (plutôt la nuit) et d'évaporation/sublimation (plutôt le jour). En valeur absolue, les mesures de pression de vapeur varient journalièrement entre 4 et 6 mb. Le maximum est lui aussi atteint en début d'après-midi.

La comparaison entre les deux types de mesures, à niveau constant, montre que les basses concordent relativement bien entre elles : elles sont bien en phase, seule l'amplitude de l'hygro-thermomètre est légèrement plus grande (fig. H.5). Mais la mesure haute de la 21X, si elle est à peu près en phase avec celle de CR10, montre aussi un décalage d'environ 3 mb par rapport à son

analogue (fig. H.6). Ce décalage persistant, tant par rapport à l'hygro-thermomètre bas que par rapport aux psychromètres, invite à penser que l'hygro-thermomètre haut est mal calibré (voir aussi § H.2.1). Ses mesures sont donc à considérer avec précaution.

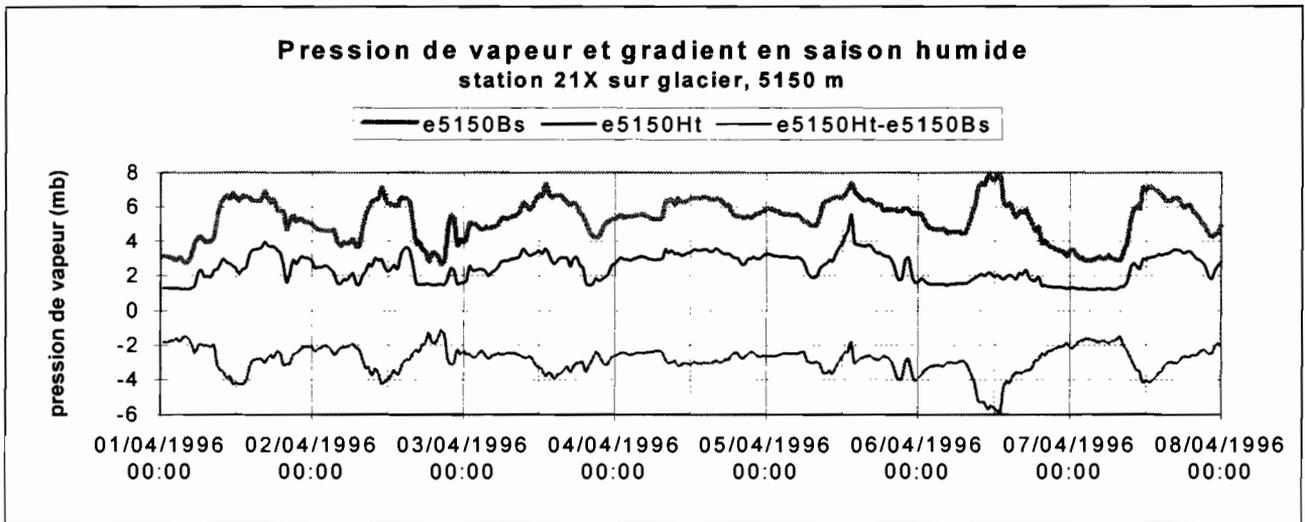


Figure H.3

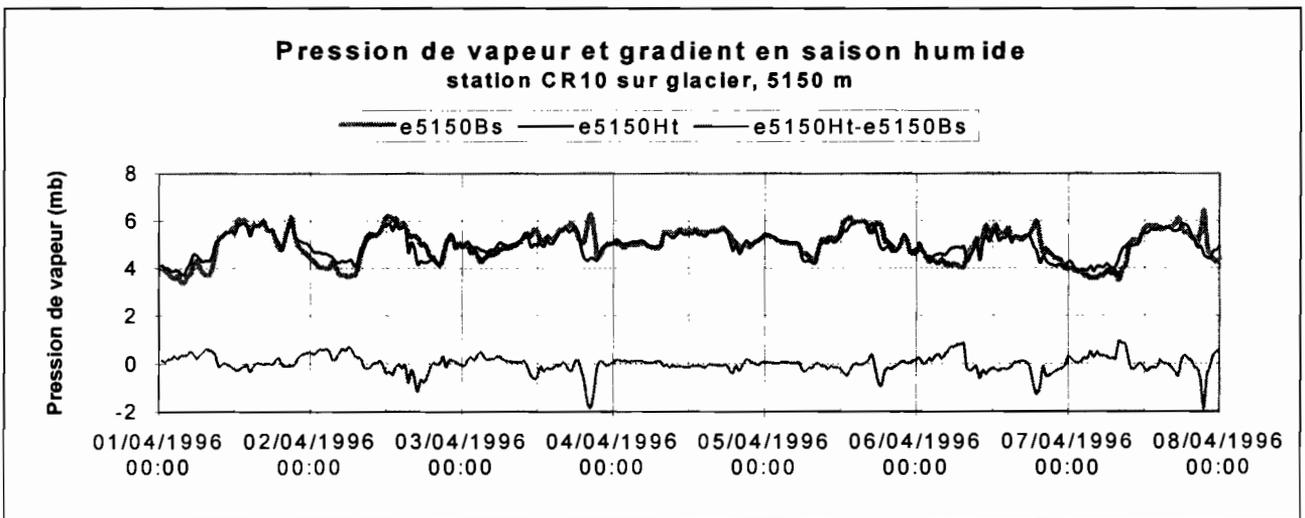


Figure H.4

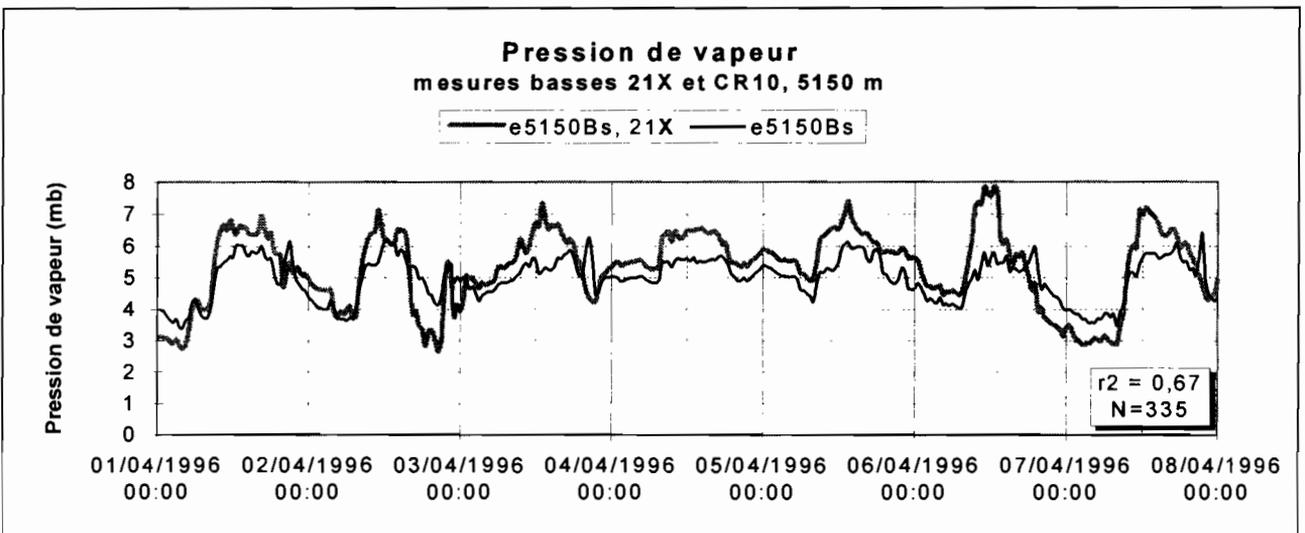


Figure H.5

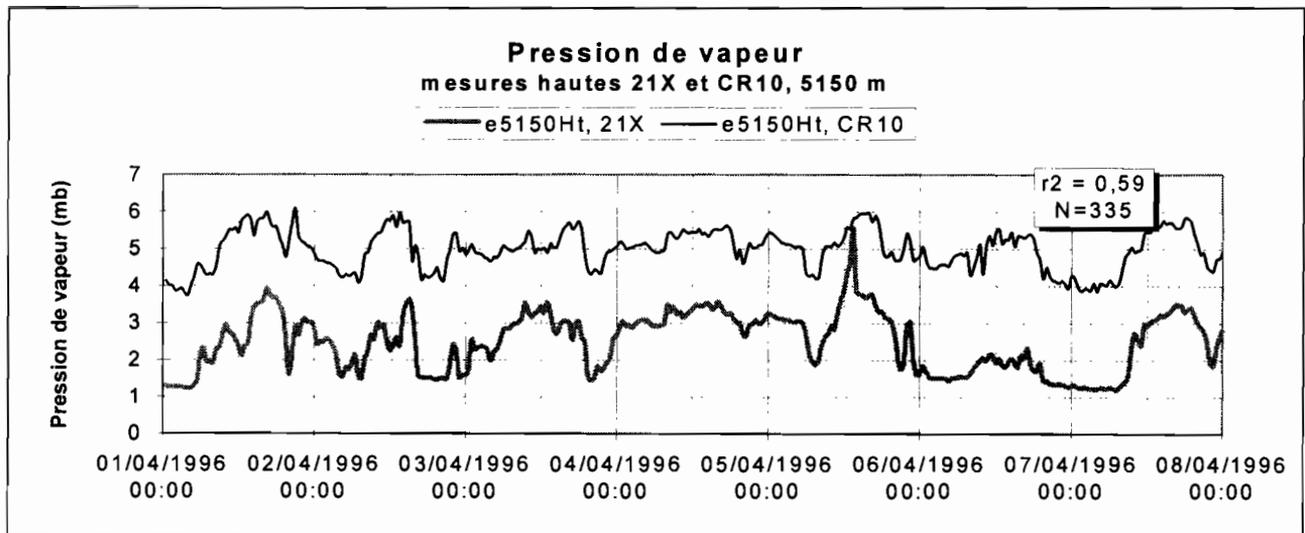


Figure H.6

• *Août 96*

A cette période nous disposons, en plus des mesures précédentes, de celles de la station portable installée au front du glacier à 5025 m.

A 5025 m, les psychromètres détectent un gradient de pression de vapeur qui varie quotidiennement entre -1 et +1 mb (plus exceptionnellement entre -2 et +2) pour 1,5 m d'élévation (fig. H.7). Positif la nuit jusqu'en milieu de matinée où il passe négatif (avec une variation assez brutale). Cette période de gradient négatif atteint son maximum vers 12h00 et repasse positif soit en milieu, soit en fin d'après-midi. A part quelques pics fortement positifs, l'évaporation semble être plus présente que la condensation. Les valeurs absolues des pressions de vapeur varient entre 2 et 6 mb, le minimum est donc plus faible que celui enregistré à 5150 en avril par les psychromètres.

A 5150 m, les mesures issues des psychromètres sont assez proches de celles réalisées à 5025 m en valeurs absolues (fig. H.7). On note cependant des instabilités importantes du gradient en milieu de matinée. Par rapport aux mêmes mesures en avril, les périodes où le gradient est négatif sont plus ou moins équivalentes, l'évaporation et la sublimation ne seraient donc pas plus importantes en saison sèche qu'en saison humide. A priori, ceci semble singulier. Néanmoins, les mesures révèlent que l'air est globalement plus sec en août qu'en avril. En effet, la moyenne sur la semaine étudiée est d'environ 4 mb, elle était de 5 mb en avril.

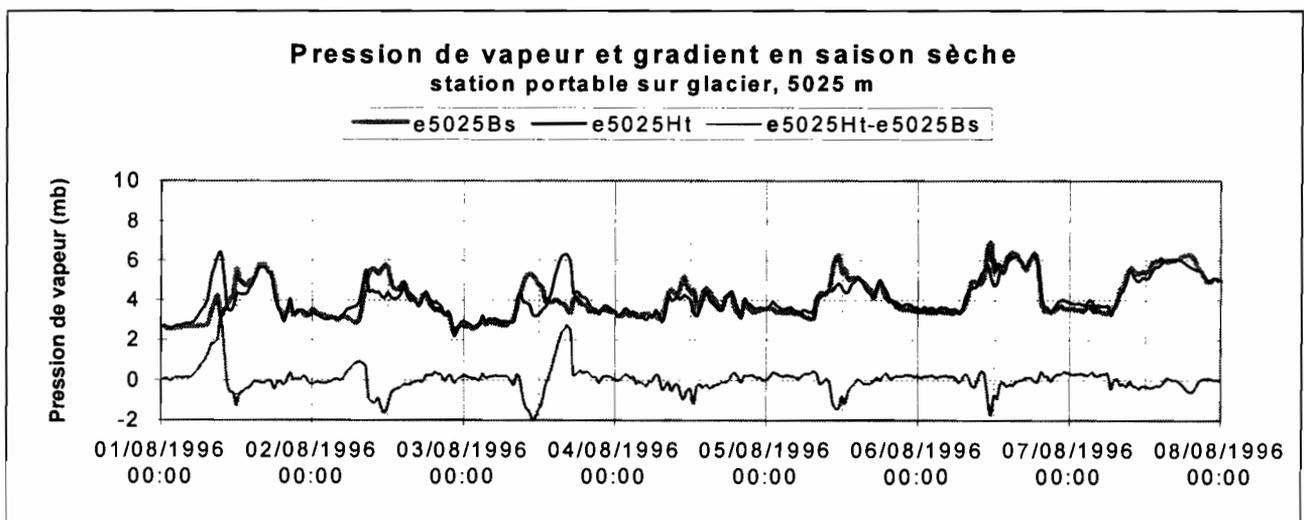


Figure H.7

Les mesures réalisées par les hygro-thermomètres montrent des différences appréciables avec celles de la saison humide (fig. H.8). La pression de vapeur est minimale la nuit (1mb) et se développe plus ou moins, selon les jours, dans le milieu de l'après-midi. Le point positif est que les valeurs absolues de ces mesures sont plus faibles en août qu'en avril : l'atmosphère serait donc plus sèche en saison sèche qu'en saison humide, ce qui semble pour le moins probable. Le point négatif de ces mesures est le gradient continuellement négatif. La nuit, il se rapproche systématiquement de la valeur nulle. Ce dernier point étant peut-être dû au capteur lui-même : il atteint sa limite inférieure de son échelle de mesures, il ne peut lire plus bas qu'une humidité relative d'environ 20%. Les deux appareils étant en « buté », le gradient serait alors proche de zéro. Ce problème de capteur fait que les deux types de mesures réalisées à 5150 m sont alors très mal corrélés (fig. H.9 et H.10).

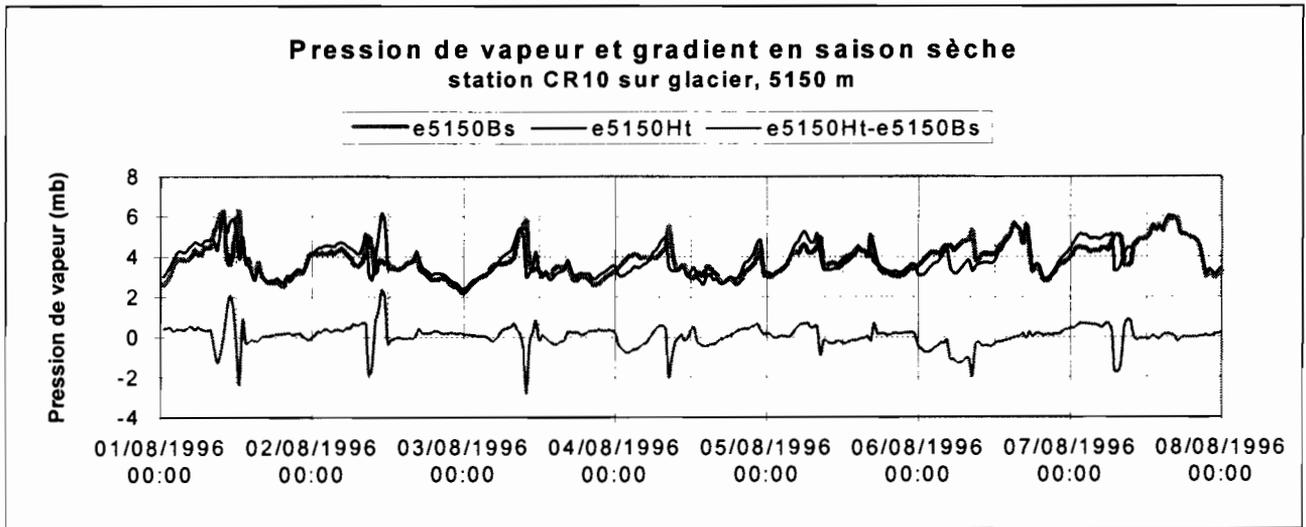


Figure H.7

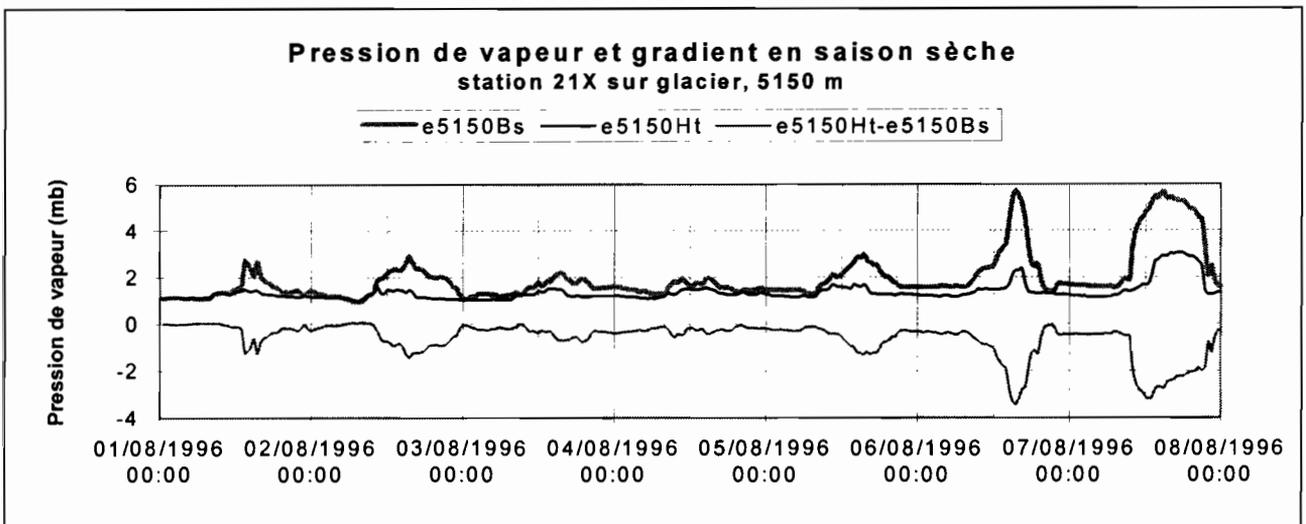


Figure H.8

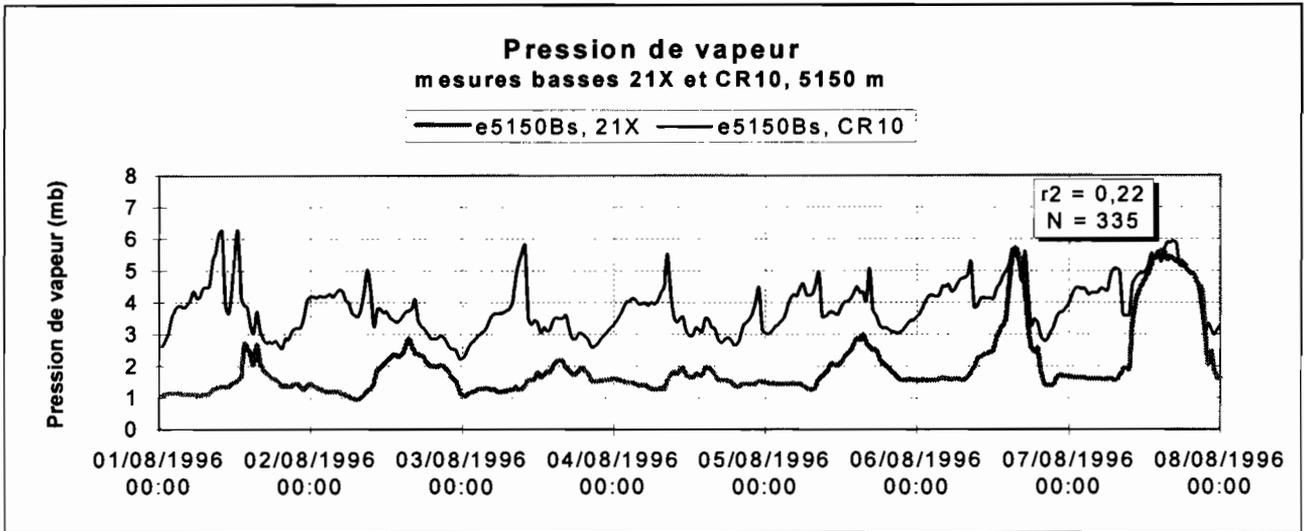


Figure H.9

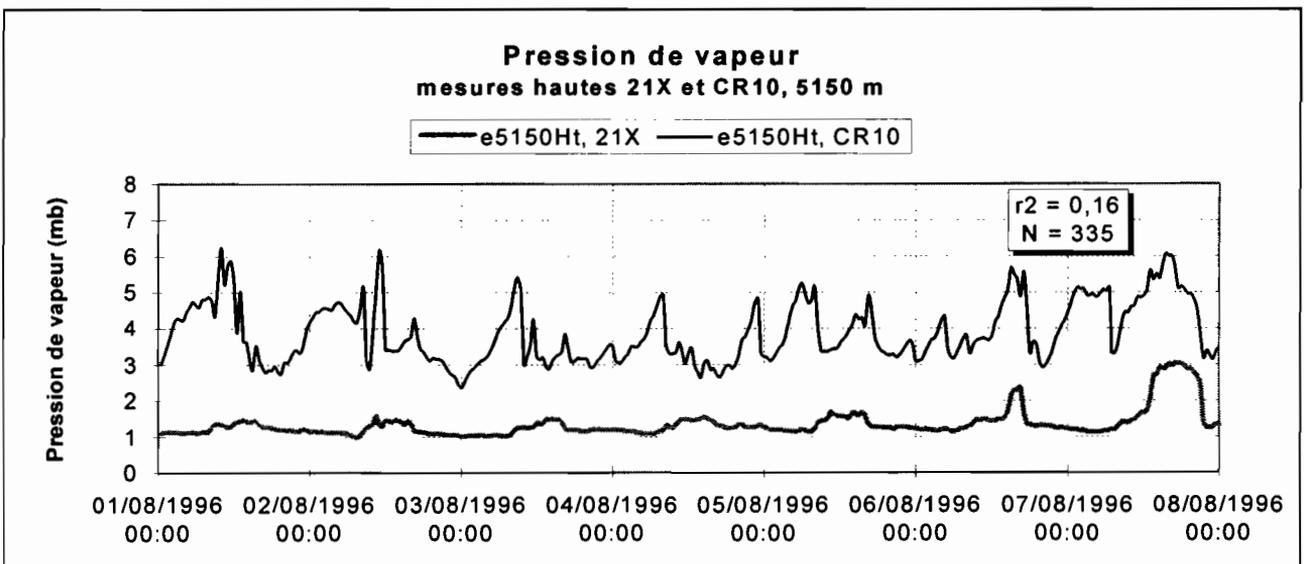


Figure H.10

H. 2. Valeurs journalières

H. 2.1. Comparaison entre 4750 et 5150 m

Nous avons tracé sur la figure H.11, les moyennes journalières des mesures (issues d'hygrothermomètres) de la pression de vapeur à 4750 et 5150 m. Les mesures (hautes) à 4750 et basses à 5150 m sont très proches l'une de l'autre et bien corrélées ($r^2 = 0,88$ pour 318 points). Ceci bien que les sites de mesures soient très différents (sol et glacier). La figure H.12 montre la différence entre ces deux mesures, globalement la pression de vapeur à 4750 m est supérieure d'un millibar à celles de 5150 m quand le temps est plutôt dégagé. Les pressions partielles, comme la pression totale (atmosphérique) décroissent avec l'altitude. A la saison des pluies ou lors de périodes de mauvais temps, la pression est sensiblement la même en « haut » et en « bas », la masse d'air est homogène (en terme de teneur en vapeur d'eau) à l'échelle de la montagne.

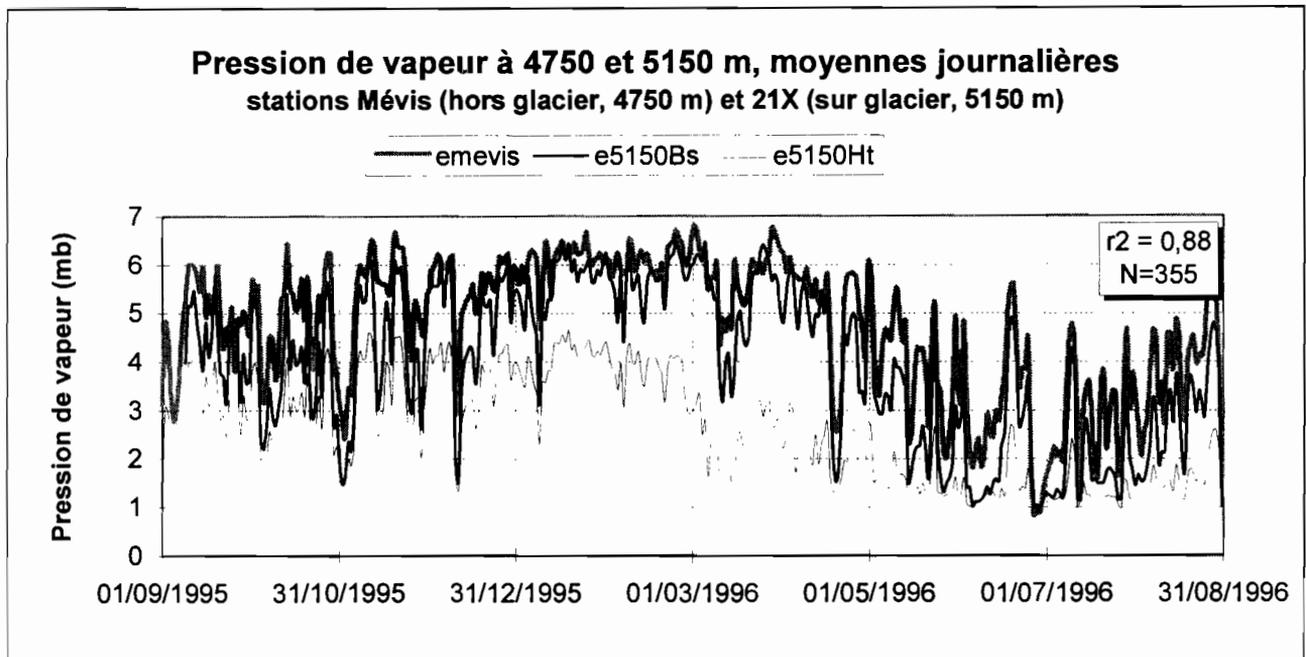


Figure H.11

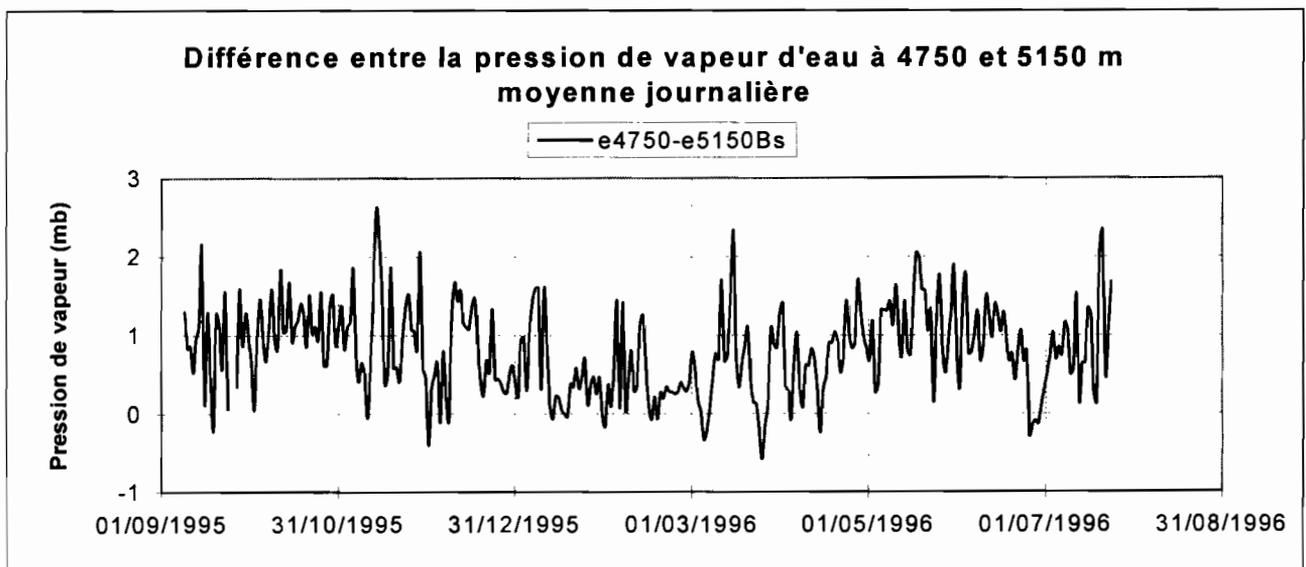


Figure H.12

La mesure haute à 5150 m est en retrait par rapport aux deux autres d'environ 2 mb (en dehors de la saison sèche, fig. H.11). Cette différence est d'autant plus forte pour les valeurs fortes. On peut donc émettre quelques réserves sur la calibration de l'hygro-thermomètre « haut » de la station 21X. La saisonnalité apparaît nettement : valeurs très fluctuantes de septembre à décembre, au gré des précipitations passagères, maximales de janvier à début avril, puis décroissantes jusqu'à atteindre ses valeurs minimales en juin et juillet.

H. 2.2. Comparaison entre 5025 et 5150 m

Nous avons tracé sur la figure H.13 les moyennes journalières des pressions de vapeur mesurées par les psychromètres à 5025 et 5150 m. Bien que l'échantillon des données à 5150 m ne couvre que les 5 derniers mois de l'année, on distingue la saisonnalité du paramètre. Les valeurs diminuent au fur et à mesure que l'on avance dans la saison sèche, ce qui ne se voit pas bien sur les valeurs instantanées présentées précédemment. Néanmoins, par rapport à la figure H.11, la pression

de vapeur ne « descend » pas aussi bas. Ces capteurs ne mesurent pas une très grande différence dans la pression de vapeur entre les deux saisons, à l'opposé des hygro-thermomètres.

Le gradient de vapeur semble connaître lui aussi une variation annuelle (fig. H.14). A 5150 m, son module diminue plus on avance dans la saison sèche. Il est aussi de signe positif quasiment continuellement, de façon assez nette jusqu'au mois de juin (qui connaît quelques jours avec la moyenne journalière négative), ensuite il est plus proche de 0 et parfois très légèrement négatif. A 5025 m, le gradient est plutôt négatif pour le mois de données que nous possédons. D'après ces mesures, les situations d'évaporation/sublimation sont donc plus présentes à cette altitude qu'à 5150 m.

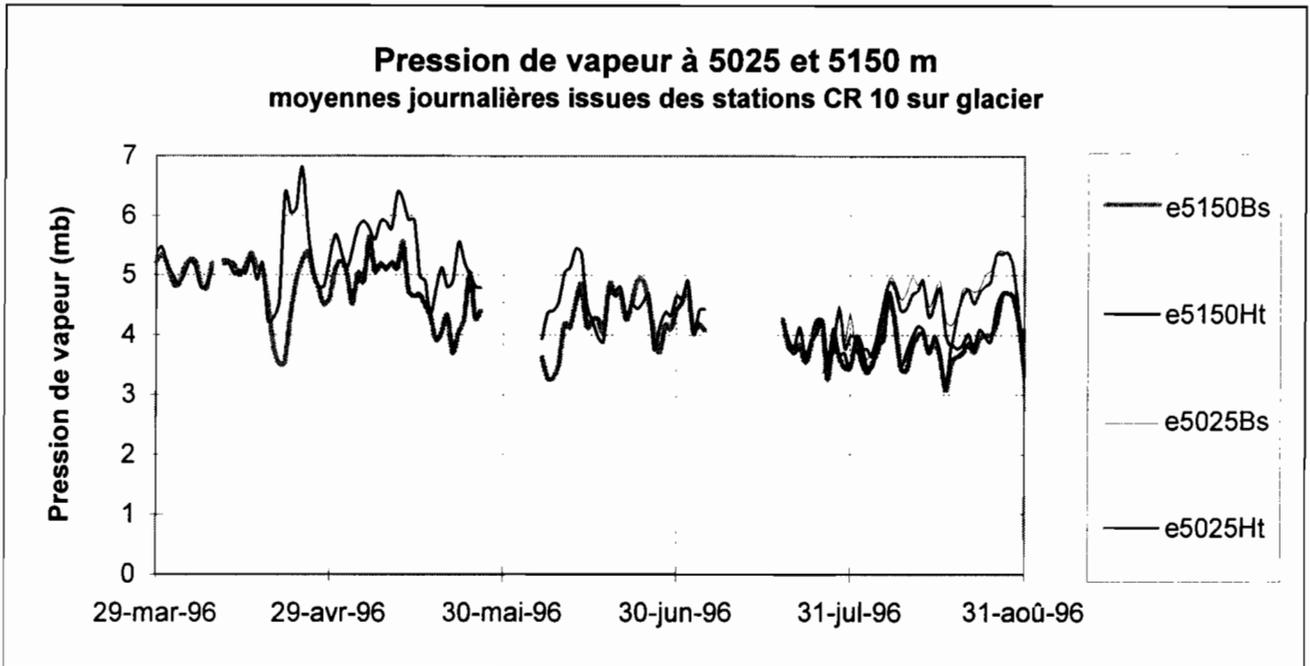


Figure H.13

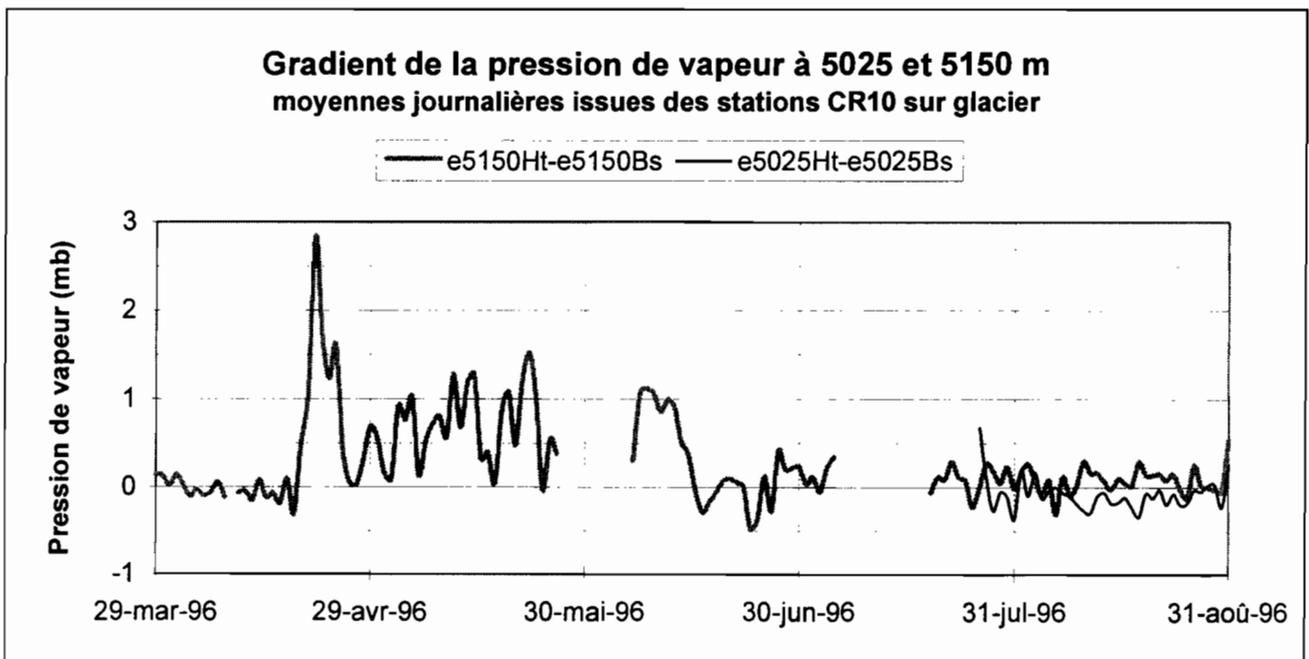


Figure H.14

H. 3. Valeurs mensuelles

Les moyennes mensuelles des mesures de la pression de vapeur enregistrées aux différentes altitudes sont présentées dans le tableau H.1. La figure H.15 illustre ce tableau. La saisonnalité est bien marquée pour les mesures issues des hygro-thermomètres, à la différence des enregistrements provenant des psychromètres.

Tableau H.1
Moyennes mensuelles des pressions de vapeur d'eau à 4750, 5025 et 5150 m d'altitude

	e4750Ht, Mevis	e5025Bs	e5025Ht	e5025Ht- e5025Bs	e5150Bs, CR10	e5150Ht, CR10	e5150Ht- e5150Bs, CR10	e5150Bs, 21X	e5150Ht, 21X
sep-95	4,81							4,34	3,13
oct-95	4,92							3,83	2,95
nov-95	5,19							4,12	3,19
déc-95	5,55							4,85	3,59
jan-96	6,08							5,56	4,02
fév-96	6,10							5,69	3,87
mar-96	5,82							5,28	2,53
avr-96	5,20				4,85	5,20	0,35	4,46	2,14
mai-96	4,04				4,71	5,40	0,69	2,88	1,57
jun-96	3,00				4,24	4,52	0,28	2,20	1,38
juil-96	2,86				3,94	4,04	0,10	1,88	1,31
août-96	3,90	4,59	4,49	-0,09	3,88	3,96	0,09	2,84	1,60
moyenne	4,79	4,59	4,49	-0,09	4,32	4,62	0,30	3,99	2,61

Toutes les valeurs sont exprimées en mb.

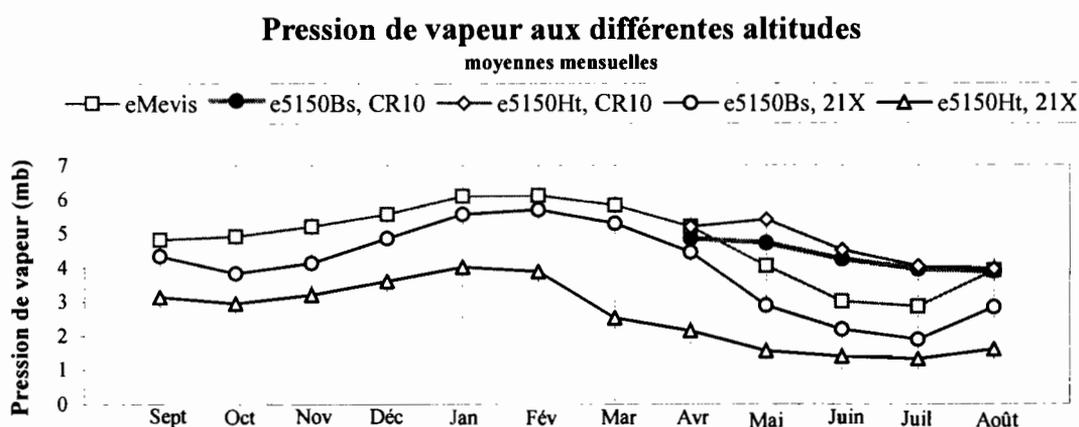


Figure H.15

H. 4. Conclusion

On soupçonnait les hygro-thermomètres classiques d'être peu précis. En effet, ces derniers fournissent une valeur d'humidité relative calculée à partir de leur mesure de la température. Or nous avons vu (chap. C) que les températures mesurées sous abri et sans ventilation étaient parfois fortement surévaluées (du fait en particulier de la radiation solaire). Les températures mesurées avec une ventilation sont jugées plus fiables, d'où l'installation de psychromètres. Si leurs mesures ventilées de températures sèches semblent être globalement meilleures (chap. C), celles de la pression de vapeur d'eau, issues de la combinaison de la mesure des températures sèche et humide, sont plus difficiles à valider. En effet, le fait qu'elles montrent si peu de périodes d'évaporation / sublimation en saison sèche à 5150 m est très surprenant. Le phénomène de condensation diminue plus la saison sèche s'installe, mais le phénomène inverse (évaporation) ne s'installe pas vraiment. Or à l'occasion des missions ponctuelles, les mesures d'évaporation et de condensation effectuées avec des lysimètres montrent que des états d'évaporation / sublimation existe bel et bien à la surface du glacier. En revanche, le fait qu'aucun pénitent ne se soit développé à cette altitude, est le signe d'une moindre action de la sublimation à la surface du glacier cette année. A 5025 m, par contre les mesures semblent indiquer un régime globalement « évaporant » au mois d'août. En plus de ces interrogations quant au gradient, les valeurs brutes de la pression de vapeur sont peu différentes d'une saison à l'autre, ce qui paraît là aussi surprenant. Et nous l'avons vu en débutant ce chapitre, le fait que la ventilation n'ait été assurée seulement la journée n'a perturbé les mesures que faiblement.

A propos des mesures issues des hygro-thermomètres, paradoxalement, le bilan apparaît satisfaisant. Au rang des points positifs, il y a la très bonne concordance entre les mesures réalisées à 4750 et 5150 m (fig. H.11) et la saisonnalité bien marquée. Les points négatifs sont premièrement l'ensemble des mesures réalisées par l'hygro-thermomètre haut de la station Campbell 21X. Ce capteur semble être mal calibré, en conséquence de quoi nous ne pouvons rien déduire de fiable sur le gradient, et donc sur l'occurrence des états d'évaporation / sublimation et de condensation à la surface du glacier. Ce qui est bien regrettable. Deuxièmement, en saison sèche, ces capteurs mesurent des valeurs si faibles qu'elles sortent de leurs gammes de mesure.

En définitive, il est assez difficile de dire lequel des deux types d'appareils donne les « meilleures » mesures. En saison humide, les deux fournissent des résultats parfois quasiment identiques (fig. H.5). Par contre en saison sèche, les valeurs issues des deux types de mesures varient dans des proportions trop grandes (de 1 à 5) pour être prises au sérieux.

I. VITESSE ET DIRECTION DU VENT

Nous enregistrons la vitesse du vent à 4750, 5025, 5150 et 5550 m et sa direction à 5550 m uniquement (les girouettes à 5025 et 5150 étant défectueuses).

I. 1. Vitesse du vent

I. 1.1. Valeurs instantanées

Nous présentons ici une comparaison des mesures effectuées aux différentes altitudes pendant une période de 5 jours en saison sèche. Ceci dans le but d'apprécier les changements dans le régime des vents d'un site à l'autre.

Entre 4750 et 5150 m (fig. I.1), l'intensité des vents (à l'échelle de l'heure) est différente, comme en témoigne le coefficient de corrélation ($r^2 = 0,12$). Parfois les tendances sont les mêmes (le 02/07/1996), et parfois totalement opposées (le 05/07/1996). Rappelons que les enregistrements sont effectués sur des sites de natures différentes : hors glacier (4750 m) et sur glacier (5150 m).

Entre 5025 et 5150 m (fig. I.2), bien que les sites soient de même nature (glacier), les vitesses enregistrées fluctuent de manière indépendante l'une par rapport à l'autre. Leurs amplitudes journalières respectives sont néanmoins comparables. Le vent à 5025 m semble connaître des variations plus importantes et plus brutales qu'à 5150 m.

Entre 5150 et 5550 m (fig. I.3), le régime des vents est en définitive peu différent. Bien que le coefficient de corrélation n'atteigne que 0.26, les amplitudes et les tendances sont globalement concordantes. Seul le 01/08/1996 montrent des valeurs très différentes.

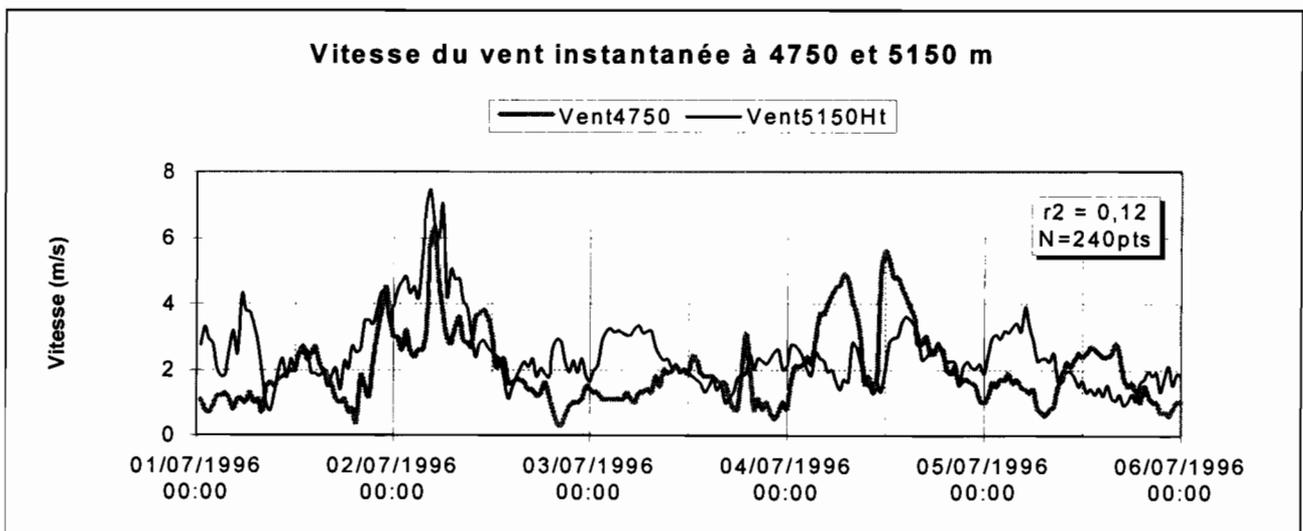


Figure I.1

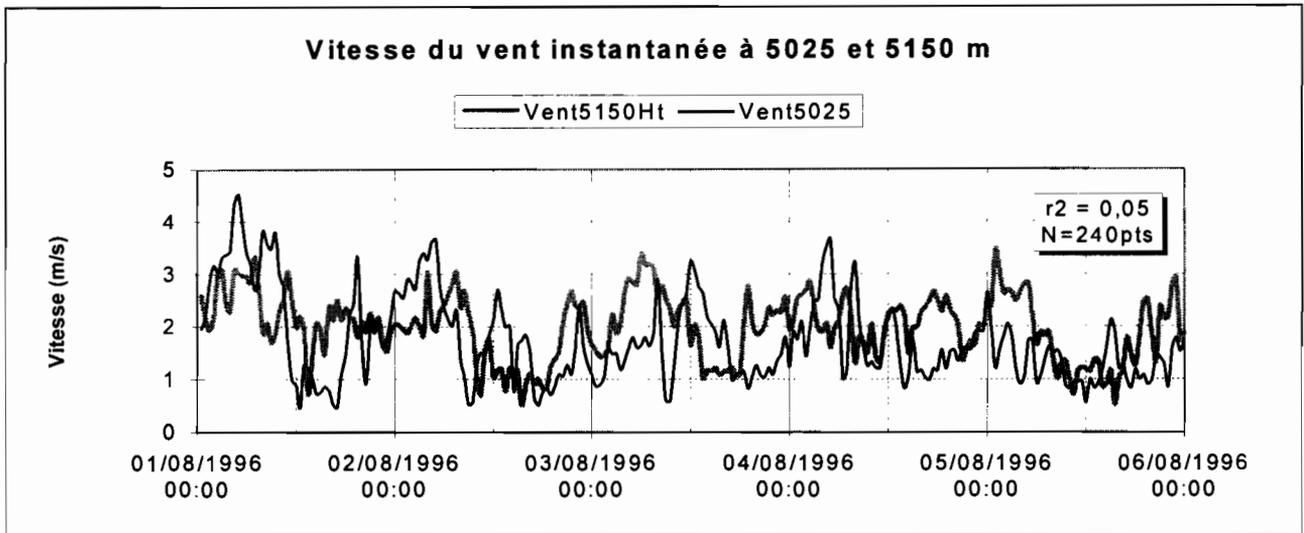


Figure I.2

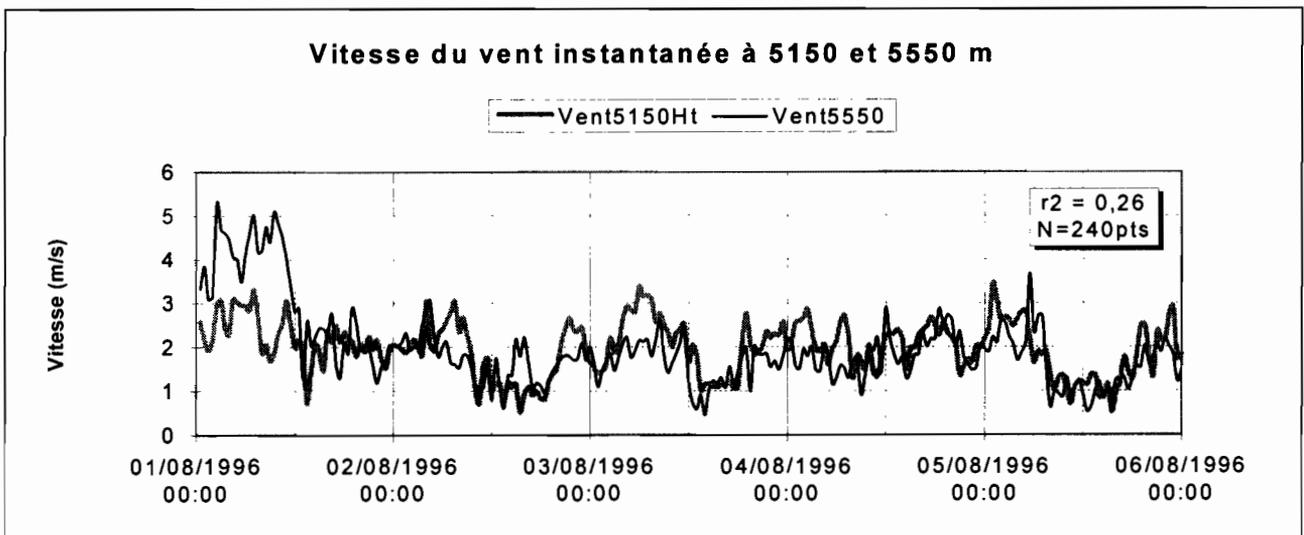


Figure I.3

I. 1.2. Valeurs journalières

La figure I.4 représente la moyenne journalière de la vitesse du vent enregistrée sur les différents sites. Cette figure permet de voir, malgré la mauvaise lisibilité du détail, que la vitesse du vent est sensiblement la même quelle que soit l'altitude : il n'y a pas un site qui se démarque des autres par des vents plus faibles ou plus forts. On peut aussi voir que la saisonnalité de ce paramètre existe et qu'elle est conforme aux observations des années précédentes, à savoir que les vitesses sont plus faibles lors des mois les plus humides (janvier et février) et plus fortes en saison sèche. Globalement, le vent est plus soutenu lors des périodes de beau temps que lors de passages pluvieux. Ainsi on distingue nettement l'arrêt (temporaire) de la saison des pluies la deuxième semaine de mars. Il y a néanmoins des exceptions, les précipitations qui surviennent en saison sèche sont souvent accompagnées de vents plus forts (exemple : la perturbation du 25 juin et la tempête de neige du 27 au 29 août). Les vitesses nulles enregistrées par l'anémomètre bas à 5150 m (Vent5150Bs) sont la conséquence de l'enfouissement (momentané) sous la neige du capteur. Concernant le gradient de la vitesse du vent à 5150 m, nous observons sur la figure que la mesure basse enregistre systématiquement des valeurs plus fortes que la mesure haute. Ceci se vérifie aussi sur les valeurs instantanées. Il y a donc un problème de calibration pour l'un des deux anémomètres,

car il est impossible physiquement que le gradient de vent soit négatif en permanence. Une recalibration est en cours, une fois achevée, elle nous permettra de corriger ces valeurs.

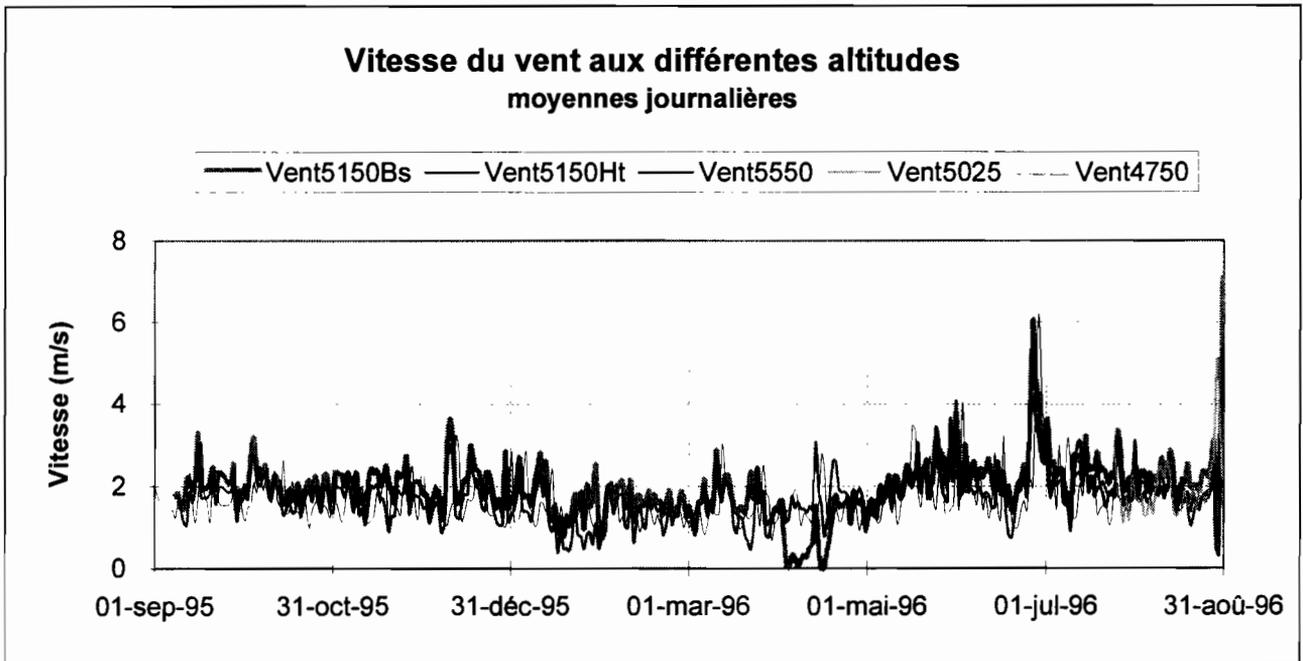


Figure I.4

Les corrélations entre les mesures, tracées ci-dessus, sont présentées dans le tableau I.1. Elle confirme les résultats issus des valeurs instantanées.

La corrélation entre les deux mesures réalisées à 5150 est médiocre, car les deux mesures sont effectuées par des capteurs de même type et installées l'un au-dessus de l'autre (au même endroit donc).

Les corrélations entre les enregistrements à 5150 et 5550 m (0,53 et 0,56) montrent que le régime des vents est sensiblement le même pour les deux sites.

Par contre les mesures effectuées à 5025 m sont absolument décorréliées avec ces analogues de 5150 et 5550 m. Le front du glacier ne serait donc pas soumis au même régime de vent que le reste du glacier. Ceci est logique car l'orientation du glacier qui est différente, et l'action de la moraine gauche sur le régime de vent au front du glacier est certain.

Tableau I.1

Corrélations entre les moyennes journalières de la vitesse du vent aux différentes altitudes

Corrélation entre les vents :	r^2	N nombre de points
5150Bs et Ht	0,67	357
5150Bs et 4750	0,11	320
5150Ht et 4750	0,13	320
5150Bs et 5550	0,56	130
5150Ht et 5550	0,53	130
5150Bs et 5025	0,03	38
5150Ht et 5025	0,05	38
5025 et 5550	0,07	38

I. 1.3. Valeurs mensuelles

Nous présentons dans le tableau I.2 les moyennes mensuelles de la vitesse du vent enregistrées sur les différents sites de mesures. Ce tableau est illustré par la figure I.5. Cette dernière permet de visualiser très nettement la saisonnalité de ce paramètre. De septembre à décembre (succession de précipitations et de périodes de beau temps), nous observons des moyennes mensuelles constantes (1,7 à 1,8 m s⁻¹). La période de janvier à avril (précipitations très majoritaires) correspond aux moyennes les plus basses de l'année (avec le minimum des minima en janvier à 5150 m) avec des valeurs inférieures à 1,5 m s⁻¹. Et enfin la saison sèche (mai à août) qui connaît les moyennes mensuelles les plus fortes (supérieures à 2 m s⁻¹). On atteint même plus de 3 m s⁻¹ en août.

Tableau I.2
Moyennes mensuelles de la vitesse du vent aux différentes altitudes

	Vent4750	Vent 5150Bs	Vent 5150Ht	Vent5550	Vent5025
sep	1,69	2,05(*)	1,76(*)		
oct	1,73	2,06	1,78		
nov	1,70	2,08	1,66		
déc	1,68	2,04	1,64		
jan	1,38	1,65	1,14		
fév	1,34	1,68	1,39		
mar	1,43	1,68	1,41		
avr	1,43	0,91	1,65	1,71(**)	
mai	1,86	2,21	2,08	2,15	
jun	2,18	2,56	2,31	2,20	
jul	1,89(***)	2,43	2,08	2,10	1,80(**)
aoû		3,78	3,29	3,40	3,46
moyenne	1,66	2,09	1,85	2,31	2,63

(*) moyenne réalisée avec la première semaine manquante, (**) moyenne réalisée à partir de la dernière semaine seulement, (***) moyenne réalisée avec la dernière semaine manquante

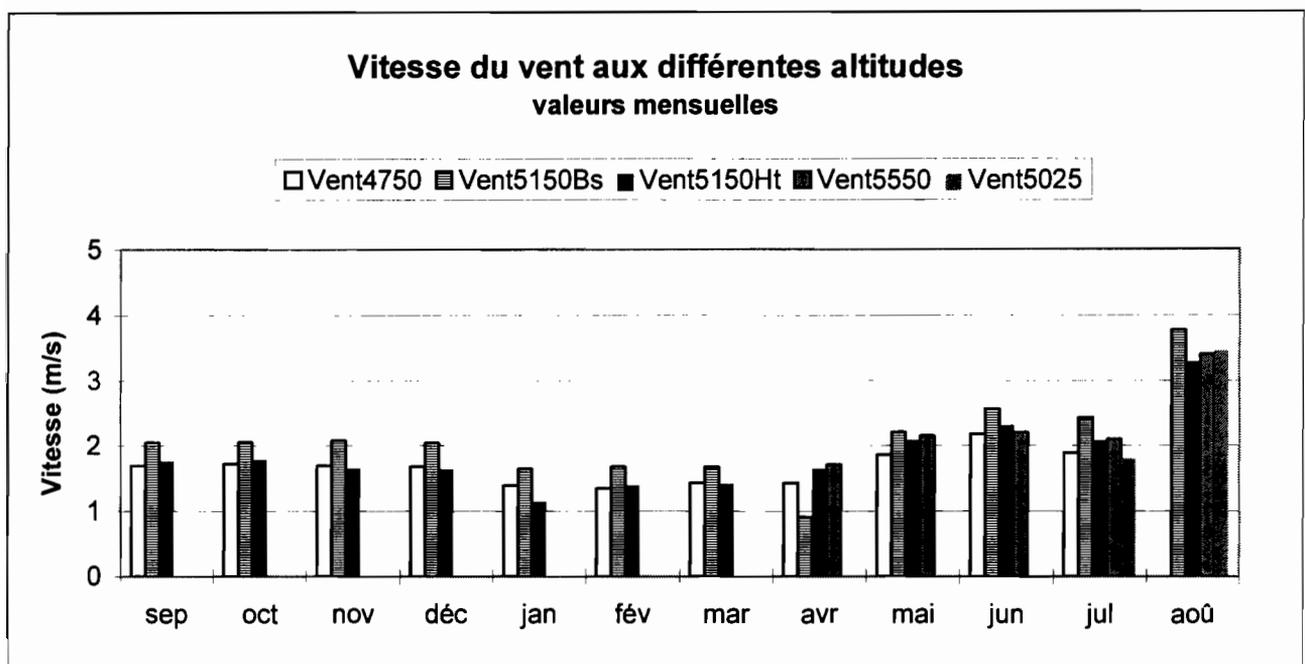


Figure I.5

Les moyennes mensuelles de la mesure basse à 5150 m se détachent nettement par rapport aux autres (cf. le problème de calibration évoqué au paragraphe précédents). Les autres sont très voisines les unes des autres : l'intensité des vents semble homogène sur l'ensemble du bassin versant à l'échelle du mois.

Concernant les moyennes annuelles, la seule comparaison possible est celle entre les valeurs à 4750 et 5150 m, qui sont les seules à couvrir toute l'année. Si nous retirons le mois d'août aux moyennes de 5150 m, les trois valeurs annuelles sont très proches (1.89 m s^{-1} à 4750, 1.94 m s^{-1} à 5150, mesure basse et 1.72 m s^{-1} à 5150, mesure haute).

I. 2. Direction du vent

Nous avons représenté sur la figure I.6 la moyenne journalière de la direction du vent à 5550 m et les précipitations à 4750 m. On peut voir de façon très nette que lorsque les vents s'orientent à l'Est (ou du moins au Sud-Est), le site connaît des précipitations le (ou les) jours suivants. Ceci est évidemment très logique, mais il est intéressant que l'on puisse le « voir » à partir des mesures. La période représentée couvre en fait la seule saison sèche, on voit qu'en moyenne sur cette période les vents sont orientés presque Sud/Sud-Ouest. Il sera intéressant de voir si en saison humide les vents sont plutôt orientés Sud-Est, comme la logique nous le suggère.

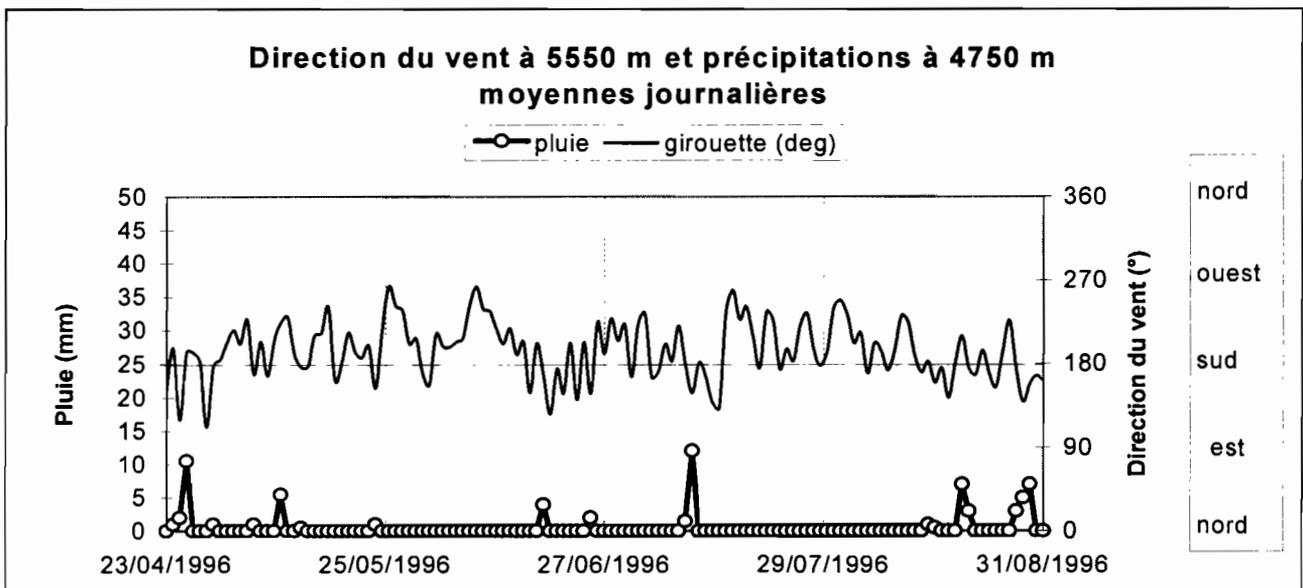


Figure I.6

I. 3. Conclusion

Nous pouvons retenir des mesures effectuées cette année, les points suivants :

- 1- La saisonnalité bien marquée de la vitesse du vent
- 2- Son homogénéité sur l'ensemble du bassin versant.
- 3- La difficulté de mesurer un gradient vertical de la vitesse du vent (calibrations « parfaites » des capteurs, maintenir ces derniers à des hauteurs constantes par rapport à une surface qui varie continuellement (ablation/accumulation)).
- 3- L'étude de l'orientation des vents reste encore embryonnaire, elle ne doit pourtant pas être considérée, a priori, comme quantité négligeable. De nouveaux capteurs seront mis en service pour la prochaine année hydrologique pour palier à cette situation.

J. MESURES DE LA SONDE A ULTRASON

L'objet de ce court chapitre est de présenter les résultats des mesures d'ablation et d'accumulation réalisées à 5150 m avec la sonde à ultrason Campbell. Cette sonde mesure toutes les 30 minutes la distance entre elle, perchée en haut d'un mât, et la surface de neige ou de glace. Le fonctionnement de cette sonde est pour le moins capricieux, en effet elle fournit une valeur correcte une fois sur vingt environ. De ce fait, nous avons seulement une ou deux mesures instantanées chaque jour. Bien que ce ne soit pas complètement satisfaisant, l'information est somme toute suffisante.

J. 1. Ablation / accumulation à 5150 m

La figure J.1 présente la variation de la distance (sonde, surface) tout au long de l'année hydrologique 95/96 (Il s'agit de l'ensemble des mesures instantanées). L'interprétation de cette figure est simple : lorsque la distance augmente, il s'agit d'une période d'ablation et inversement sa diminution correspond à une période d'accumulation.

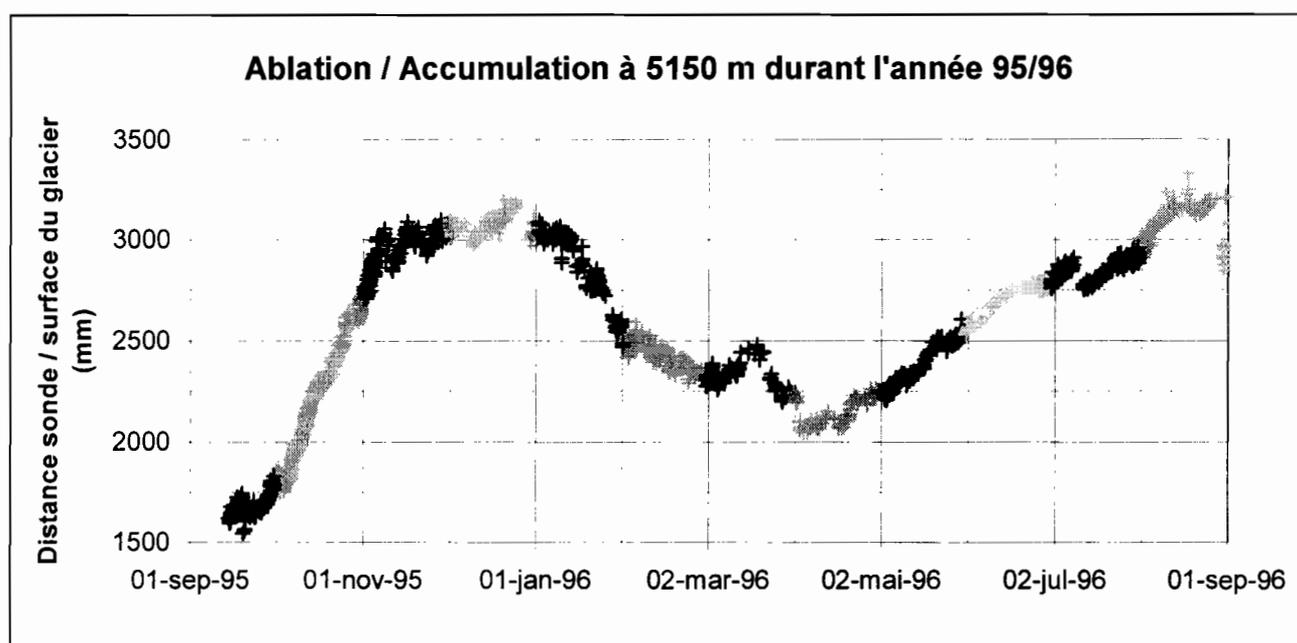


Figure J.1

Cette figure est à comparer avec la figure E.1 représentant la pluie journalière à 4750 m. Nous pouvons faire les remarques suivantes :

- 1- Le mois d'octobre a effectivement été le mois qui a connu la plus forte ablation, la surface s'est « éloignée » d'environ un mètre de la sonde. La surface d'alors était constituée de glace, l'ablation du mois d'octobre, à 5150 m, est 1 m de glace, soit environ 80 cm d'eau (en considérant une densité de 0,8). Cette valeur est inférieure, mais néanmoins du même ordre de grandeur que celle déduite des mesures glaciologiques « classiques » (chap. K).
- 2- Les mois de novembre et décembre ont été eux très légèrement déficitaires : les précipitations neigeuses et la fusion se sont plus ou moins équilibrées.
- 3- A partir de fin décembre jusqu'à début mars, les précipitations ont constitué un manteau neigeux d'environ 80 cm. Les 15 premiers jours de mars ont été particulièrement cléments, nous pouvons en voir clairement l'effet sur la figure : le glacier a connu une ablation d'environ 15-20 cm (à 5150 m).

Ensuite la saison des pluies a repris son cours « normal » jusqu'au début du mois d'avril, où le manteau neigeux a atteint son épaisseur maximale. On peut estimer cette épaisseur en faisant la différence entre la distance (sonde, surface) vers le 23 décembre (distance maximale) et vers le 5 avril (distance minimale), on trouve alors une épaisseur d'environ 1,15 m.

4- L'épaisseur du manteau diminue alors à partir du début de la saison sèche et a quasiment disparu vers le 10 août. Ceci correspond avec les observations directes effectuées lors des visites de routine. Fin août, une période de mauvais temps a apporté de grosses précipitations neigeuses, environ 40 cm à 5150 m. Ce qui là encore est cohérent avec les observations directes.

5- Vu la valeur de la distance (sonde, surface) mi-septembre, environ 160 cm, et cette même valeur au 31 août, environ 280 cm, nous pouvons dire que pour l'année 95/96 l'ELA s'est située plus haut que 5150 m et que l'ablation à 5150 m a été d'environ 120 m de glace.

J. 2. Conclusion

Les mesures issues de ce capteur rendent compte parfaitement de l'évolution de la surface du glacier au fil des différentes périodes de l'année. En particulier les périodes d'ablation rapide, de statu quo, d'ablation au milieu d'une période d'accumulation, etc... peuvent être suivies de manière fidèle (on peut estimer l'intervalle d'erreur des mesures à environ 5 cm, d'après les observations directes) et surtout avec un pas de temps de l'ordre de la journée. Avec un meilleur fonctionnement, nous pourrions même estimer une « vitesse » d'ablation sur quelques jours, ce qui pourrait être intéressant en termes d'apport d'énergie.

K. GLACIOLOGIE

K.1. L'ACCUMULATION

Il s'agit du bilan d'accumulation mesuré directement par forage et mesures densimétriques, particulièrement dans la zone haute du glacier.

- **L'accumulation mesurée en fin de saison des précipitations :**

Une mission réalisée du 23 au 25 avril a permis de mesurer l'accumulation à partir de 6 puits à neige. Les sites choisis sont ceux déjà sélectionnés les autres années : 4 sites à 5500-5550 m, un à 5620 m, et le plus haut à 5700 m sous la pente sud du sommet sud. La méthode est classique et a déjà fait l'objet d'une description à plusieurs reprises. Les sites sont reportés sur la carte de la figure K.14 et les résultats sur les tableaux et figures ci-dessous.

Tableau K.1. Sondage 1 : Altitude : 5520 m. ; site : station Campbell ; total d'accumulation : 908 mm d'eau

Alt. cum.	Alt.	P. brut	P.net	Volum.	Densité	wat.equ.	observations
(cm)	(cm)	(g)	(g)	(cm ³)	(g/cm ³)	(mm)	
-16	16	690	200	437,2	0,46	73,19	glace a 8cm
-36	20	750	260	546,5	0,48	95,15	névé
-56	20	710	220	546,5	0,40	80,51	névé
-76	20	780	290	546,5	0,53	106,13	névé
-96	20	780	290	546,5	0,53	106,13	névé
-116	20	760	270	546,5	0,49	98,81	névé
-136	20	790	300	546,5	0,55	109,79	glace
-156	20	830	340	546,5	0,62	124,42	neige lourde
-176	20	800	310	546,5	0,57	113,45	neige lourde
					0,51	907,57	

Tableau K.2. Sondage 2 : Altitude : 5520 m ; site : rive droite ; total d'accumulation : 609 mm d'eau

Alt. cum.	Alt.	P. brut	P.net	Volum.	Densité	wat.equ.	observations
(cm)	(cm)	(g)	(g)	(cm ³)	(g/cm ³)	(mm)	
-20	20	760	270	546,5	0,49	98,81	
-36	16	735	245	437,2	0,56	89,66	neige molle
-56	20	860	370	546,5	0,68	135,40	glace
-74	18	745	255	491,9	0,52	93,32	
-94	20	755	265	546,5	0,48	96,98	
-109	15	750	260	409,9	0,63	95,15	neige lourde
					0,56	609,31	

Ce site, à moins de 300 m à l'ouest du précédent, montre un déficit de 300 mm d'eau (- 33 %), qui peut être attribué à un déficit d'accumulation, mais aussi sans doute à de la fusion par les effets de rayonnement conjugués de la paroi rocheuse proche (100 m) et une exposition davantage tournée vers l'est. Ce qui explique une densité du manteau neigeux un peu plus élevée.

Figure K.1.

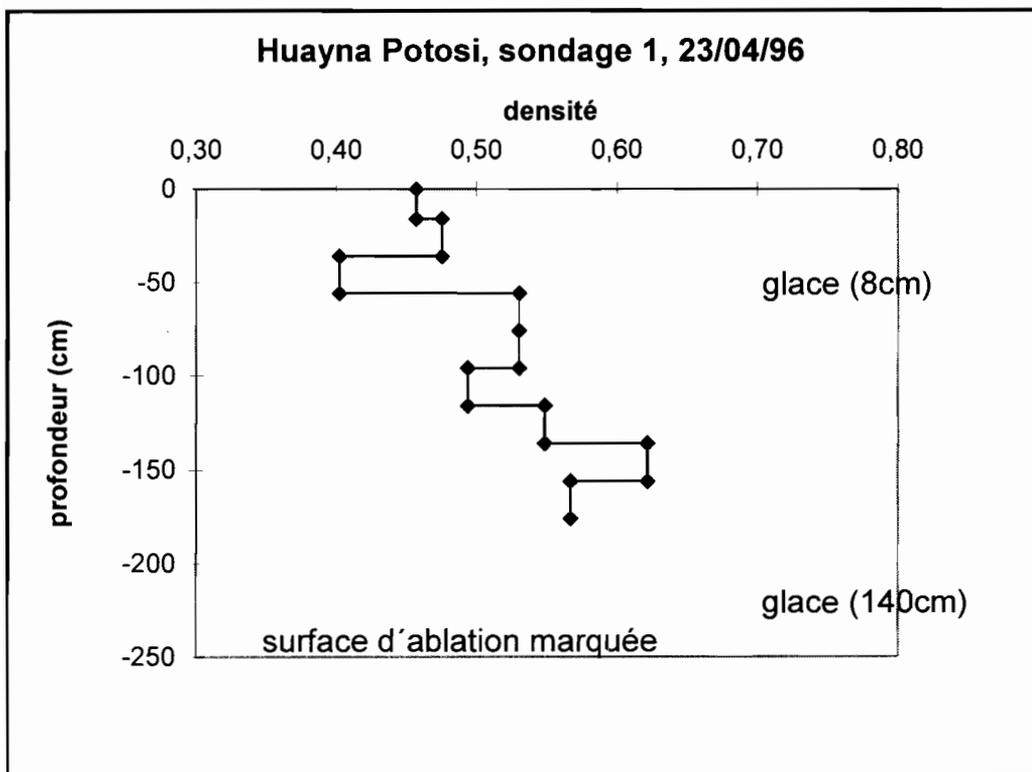


Figure K.2.

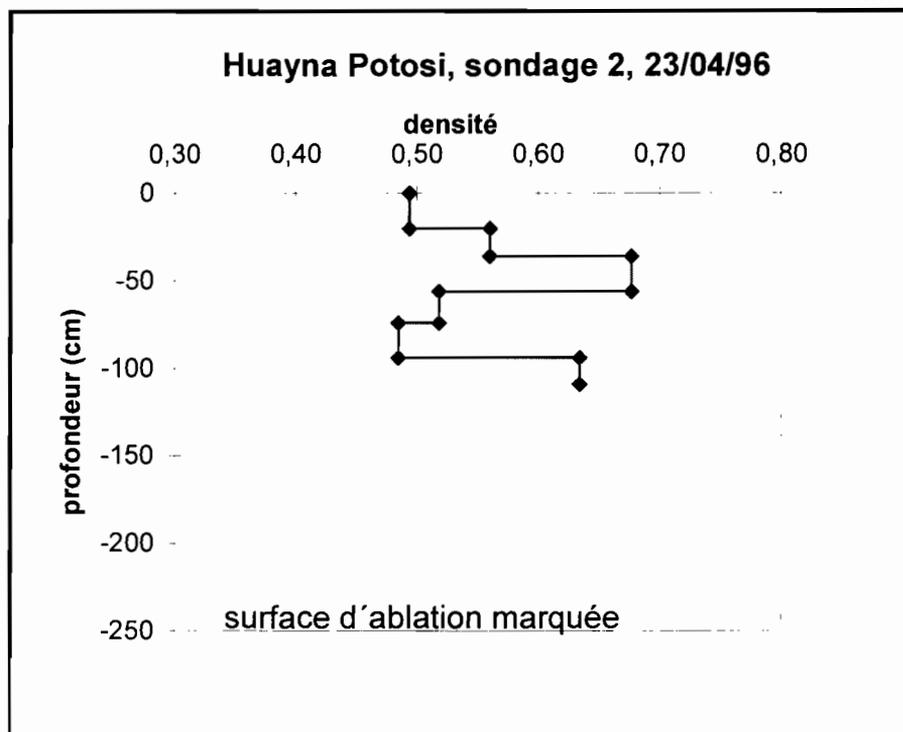
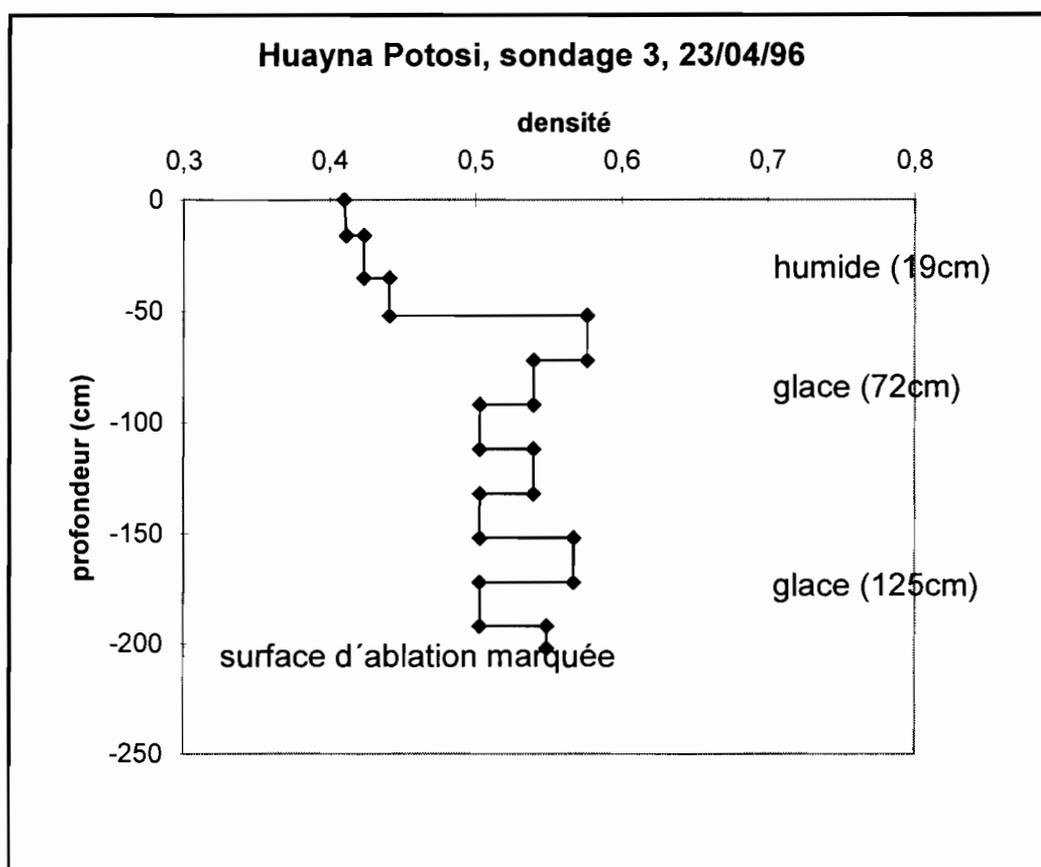


Tableau K.3. Sondage 3 : Altitude : 5550 m ; site : arête SSE ; total d'accumulation : 1023 mm d'eau.

Alt. cum. (cm)	Alt. (cm)	P. brut (g)	P.net (g)	Volum. (cm ³)	Densité (g/cm ³)	wat.equ. (mm)	observations
-16	16	670	180	437,2	0,41	65,87	
-35	19	710	220	519,2	0,42	80,51	neige humide
-52	17	695	205	464,5	0,44	75,02	
-72	20	805	315	546,5	0,58	115,28	glace
-92	20	785	295	546,5	0,54	107,96	
-112	20	765	275	546,5	0,50	100,64	
-132	20	785	295	546,5	0,54	107,96	
-152	20	765	275	546,5	0,50	100,64	glace
-172	20	800	310	546,5	0,57	113,45	
-192	20	765	275	546,5	0,50	100,64	
-202	10	640	150	273,3	0,55	54,89	
					0,51	1022,84	

Figure K.3.



**Tableau K.4. Sondage 4 : Altitude : 5520 m ; site : Combe Est ;
total d'accumulation : 845 mm d'eau**

Alt. cum. (cm)	Alt. (cm)	P. brut (g)	P.net (g)	Volum. (cm ³)	Densité (g/cm ³)	wat.equ. (mm)	observations
-13	13	660	170	355,2	0,48	62,21	neige humide
-28	15	680	190	409,9	0,46	69,53	névé
-48	20	790	300	546,5	0,55	109,79	névé
-68	20	780	290	546,5	0,53	106,13	gros grains
-88	20	760	270	546,5	0,49	98,81	névé
-107	19	760	270	519,2	0,52	98,81	névé
-127	20	790	300	546,5	0,55	109,79	névé
-147	20	780	290	546,5	0,53	106,13	névé
-165	18	720	230	491,9	0,47	84,17	névé
					0,51	845,35	

Ce site nouveau, dans la combe est, placé à l'aval et à l'amont de crevasses, permet une évaluation de l'accumulation sans l'effet de chasse-neige qui pourrait entraîner une suraccumulation. Il est compris dans un secteur dont l'importance relative en surface par rapport à l'ensemble de la zone d'accumulation est notable.

Figure K.4.

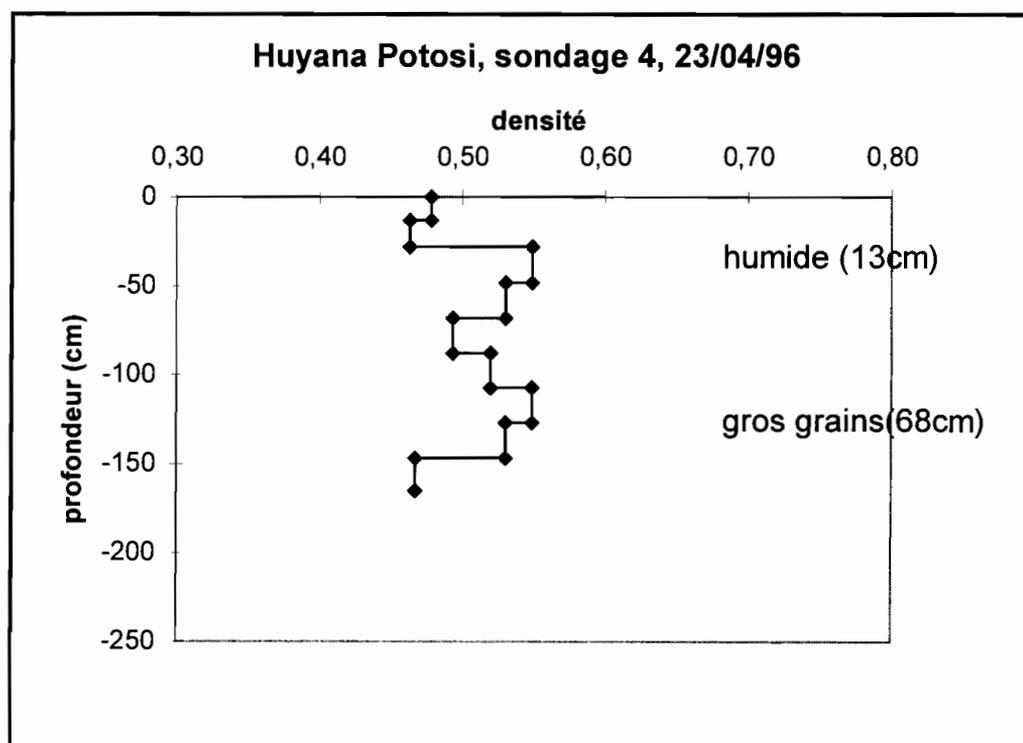


Tableau K.5. Sondage 5 : Altitude : 5700 m ; site : pied de la pente sud du Sommet sud ; total d'accumulation : 986 mm d'eau

Alt. cum. (cm)	Alt. (cm)	P. brut (g)	P.net (g)	Volum. (cm ³)	Densité (g/cm ³)	wat.equ. (mm)	observations
-17,5	17,5	690	200	478,2	0,42	73,19	glace
-37,5	20	690	200	546,5	0,37	73,19	glace
-55,5	18	705	215	491,9	0,44	78,68	glace
-72,5	17	690	200	464,5	0,43	73,19	glace
-90,5	18	730	240	491,9	0,49	87,83	
-110,5	20	760	270	546,5	0,49	98,81	
-130,5	20	750	260	546,5	0,48	95,15	
-150,5	20	755	265	546,5	0,48	96,98	
-170,5	20	770	280	546,5	0,51	102,47	glace
-190,5	20	755	265	546,5	0,48	96,98	gros grains
-210,5	20	790	300	546,5	0,55	109,79	gros grains
					0,43	986,00	

Figure K.5.

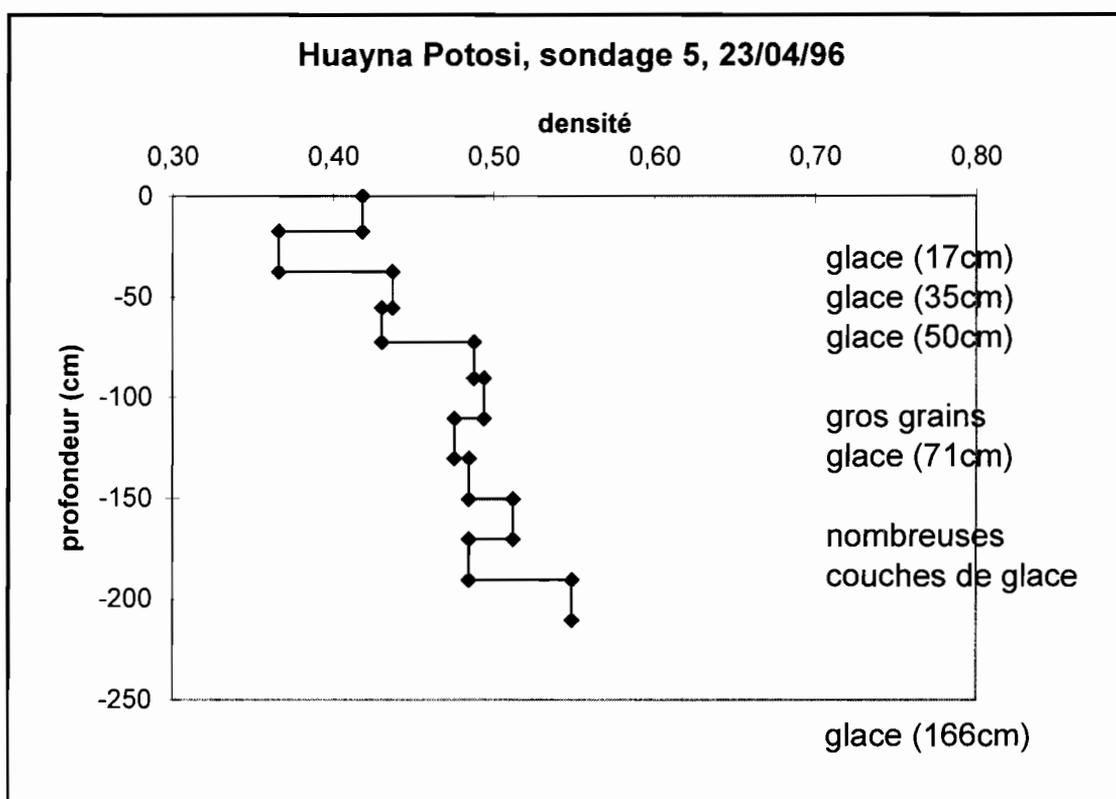
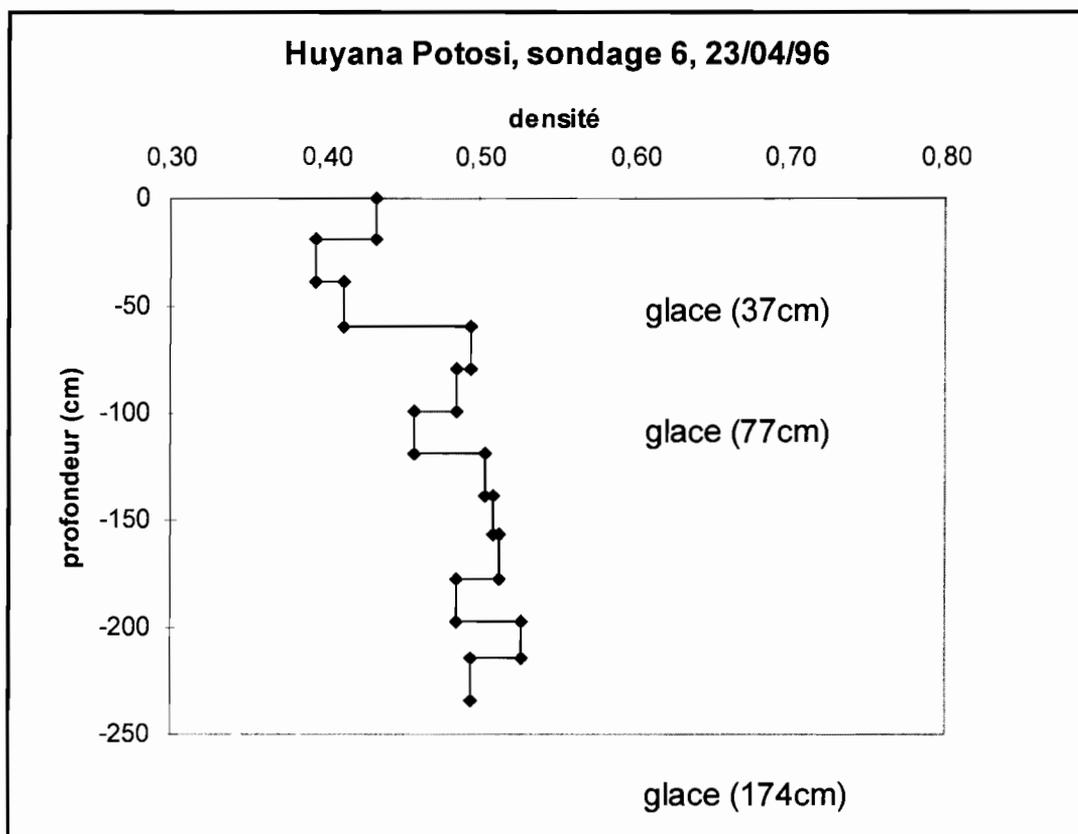


Tableau K.6. Sondage 6 : Altitude : 5620 m : site : amont de la « grande crevasse » ; total d'accumulation : 1111 mm d'eau.

Alt. cum. (cm)	Alt. (cm)	P. brut (g)	P.net (g)	Volum. (cm ³)	Densité (g/cm ³)	wat.equ. (mm)	observations
-19	19	715	225	519,2	0,43	82,34	
-39	20	705	215	546,5	0,39	78,68	glace
-59	20	715	225	546,5	0,41	82,34	
-79	20	760	270	546,5	0,49	98,81	glace
-99	20	755	265	546,5	0,48	96,98	
-119	20	740	250	546,5	0,46	91,49	
-139	20	765	275	546,5	0,50	100,64	
-157	18	740	250	491,9	0,51	91,49	
-177	20	770	280	546,5	0,51	102,47	glace
-197	20	755	265	546,5	0,48	96,98	gros grains
-214	17	735	245	464,5	0,53	89,66	gros grains
-234	20	760	270	546,5	0,49	98,81	gros grains
					0,48	1110,67	

Figure K.6.



Comme les années précédentes, ce site comporte plus de neige en raison de phénomènes de suraccumulation.

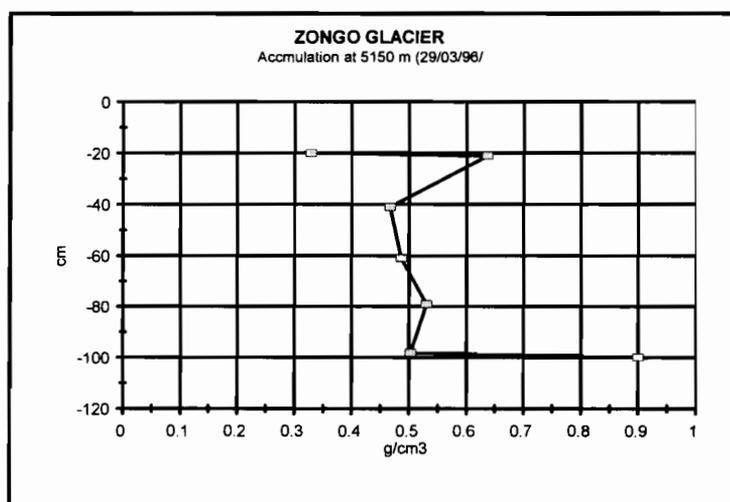
Concernant l'accumulation de fin de saison des précipitations, on peut observer que les valeurs du bilan au-dessus de 5500 m sont assez homogènes, dans les limites de 10%, à l'exception du site « rive droite » et du site 5620 m, l'un déficitaire, l'autre excédentaire. Il n'y a pas l'évidence d'un gradient d'accumulation avec l'altitude, par contre la densité baisse sensiblement entre 5500 et 5700 m (de 0.8 environ).

Des puits ont été aussi creusés près de la station CAMPBELL de 5150 m. On observe, comme les autres années, que dès la fin mars, alors que les précipitations sont encore fréquentes, la densité du manteau à 5150 m est déjà élevée (tableau K.7 et figure K.7.)

Tableau K.7. Profil dans le manteau neigeux à 5150 m (station Campbell le 29/03/1996) ; total de l'accumulation : 454 mm d'eau.

long.	long.cum.	p.brut	p. net	volum.	dens.	wat/eq/.
cm	cm	g.	g.	cm ³	g/cm ³	mm
20	-20	686	186	565.48	0.33	65.7
1	-21	518	18	28.27	0.64	6.4
20	-41	764	264	565.48	0.47	93.4
20	-61	775	275	565.48	0.49	97.3
18	-79	770	270	508.93	0.53	95.5
19	-98	770	270	537.21	0.50	95.5
	-100				0.90	
superficie de ablación de diciembre						
total	975mm				0.49	453.8

Figure K.7.



- **L'accumulation de fin d'année hydrologique**

La mission de septembre 1996 a permis de mesurer le bilan d'accumulation sur les sites classiques exploités en avril, soit : 5520C (station Campbell), 5520D, 5520G, 5620 et 5700. Finalement, la mesure de fin de saison sèche fait ressortir une forte analogie avec ce qui a été mesuré en avril. Seul le site 5620 a subi une ablation,

qui peut être liée ici à l'effet du vent. Dans l'ensemble, les chutes de neige ont compensé les pertes par sublimation. Il est à noter qu'à 5150 m., en zone d'ablation du glacier, le bilan net sur les deux balises de ce site accuse une perte nette cumulée de 500 mm d'eau de mai à août inclus. En plus de l'effet de la différence d'altitude, il faut y voir celui de l'exposition : sur les balises de 5100 m à Chacaltaya (versant sud, comme la zone d'ablation du glacier de Zongo) , on a eu un bilan stationnaire de mai à août.

Tableau K.8. Sondage à 5700 m (pied de la pente sud du Sommet Sud) : densité moyenne = 0.39, total d'accumulation = 965 mm we

Alt. cum. (cm)	P. brut (g)	P.net (g)	Volum. (cm3)	Densité (g/cm3)	Wat.equ. (mm)	Observations
-14	712	180	545,7	0,33	53,41	névé
-29	746	214	556,0	0,38	63,50	très
-47	724	192	556,0	0,35	56,97	gros
-62	720	188	545,7	0,34	55,79	grains (5-10mm)
-78	700	168	525,0	0,32	49,85	glace à 60
-96	748	216	556,0	0,39	64,09	glace à 85
-114	722	190	535,4	0,35	56,38	
-132	746	214	545,7	0,39	63,50	glace à 130
-146	764	232	556,0	0,42	68,84	glace à 156
-162	744	212	535,4	0,40	62,91	glace à 165
-178	748	216	545,7	0,40	64,09	glace à 172
-182	790	258	556	0,46	76,56	
-210	762	230	556	0,41	68,25	
-218	720	188	556	0,34	55,79	glace à 225
-234	712	180	514,8	0,35	53,41	
-250	704,5	172,5	539,1	0,32	51,19	
				0,39	964,54	

Tableau K.9. : Sondage « Grande Crevasse » à 5620 m : densité moyenne = 0.39, total d'accumulation = 848 mm we

Alt. cum. (cm)	P. brut (g)	P.net (g)	Volum. (cm3)	Densité (g/cm3)	Wat.equ. (mm)	Observations
-15	766	234	556,0	0,42	69,44	
-32	736	204	545,7	0,37	60,53	
-47	736	204	556,0	0,37	60,53	
-66	770	238	556,0	0,43	70,62	neige
-81	756	224	556,0	0,40	66,47	compacte gros
-97	760	228	556,0	0,41	67,66	grains
-115	762	230	545,7	0,42	68,25	profond < 50cm
-130	768	236	556,0	0,42	70,03	
-146	766	234	556	0,42	69,44	
-161	774	242	545,7	0,44	71,81	
-180	766	234	556	0,42	69,44	
-196	722	190	556	0,34	56,38	
-210	692,4	160,4	472	0,34	47,60	
				0,39	848,19	

Tableau K.10. Sondage de la Station Campbell » à 5520 m :
densité moyenne = 0.41, total d'accumulation = 907 mm we

Alt. cum. (cm)	P. brut (g)	P.net (g)	Volum. (cm3)	Densité (g/cm3)	Wat.equ. (mm)	Observations
-16	696	164	535,4	0,31	48,66	
-30	736	204	514,8	0,40	60,53	
-47	804	272	556,0	0,49	80,71	4cm glace vive
-62	804	272	556,0	0,49	80,71	10cm gros névé
-77	774	242	556,0	0,44	71,81	
-92	742	210	525,0	0,40	62,31	
-110	818	286	556,0	0,51	84,87	
-126	782	250	556,0	0,45	74,18	
-142	794	262	556,0	0,47	77,74	
-157	794	262	556,0	0,47	77,74	
-173	768	236	556,0	0,42	70,03	
-189	800	268	556	0,48	79,53	
-197	661,4	129,4	269,6	0,48	38,40	
				0,41	907,24	

Tableau K.11. Sondage « rive droite » à 5520 m :
densité moyenne = 0.49, total d'accumulation = 572 mm we

Alt. cum. (cm)	P. brut (g)	P.net (g)	Volum. (cm3)	Densité (g/cm3)	Wat.equ. (mm)	Observations
-17	742	210	545,7	0,38	62,31	
-33	864	332	556,0	0,60	98,52	glace
-49	806	274	545,7	0,50	81,31	
-64	788	256	556,0	0,46	75,96	
-78	814	282	556,0	0,51	83,68	
-95	794	262	556,0	0,47	77,74	
-111	796	264	545,7	0,48	78,34	
-114	580,5	48,5	101,1	0,48	14,39	
				0,49	572,26	

Tableau K.12. Sondage de la « Combe Est » à 5520 m :
densité moyenne = 0.40, total d'accumulation = 886 mm we

Alt.cum. (cm)	P.brut (g)	P.net (g)	Volum. (cm3)	Densité (g/cm3)	Wat.equ. (mm)	Observations
-17	706,00	174	545,7	0,32	51,63	
-35	752,00	220	535,4	0,41	65,28	
-51	774,00	242	556	0,44	71,81	
-67	764,00	232	556	0,42	68,84	
-82	760,00	228	556	0,41	67,66	
-96	782,00	250	556	0,45	74,18	
-114	770,00	238	545,7	0,44	70,62	
-130	792,00	260	556	0,47	77,15	
-145	764,00	232	545,7	0,43	68,84	
-163	748,00	216	545,7	0,40	64,09	
-177	796,00	264	556	0,47	78,34	
-193	772,00	240	556	0,43	71,22	
-206	720,40	188,4	438	0,43	55,91	
				0,395	885,58	

Figure K.8. Sondage 5700 m

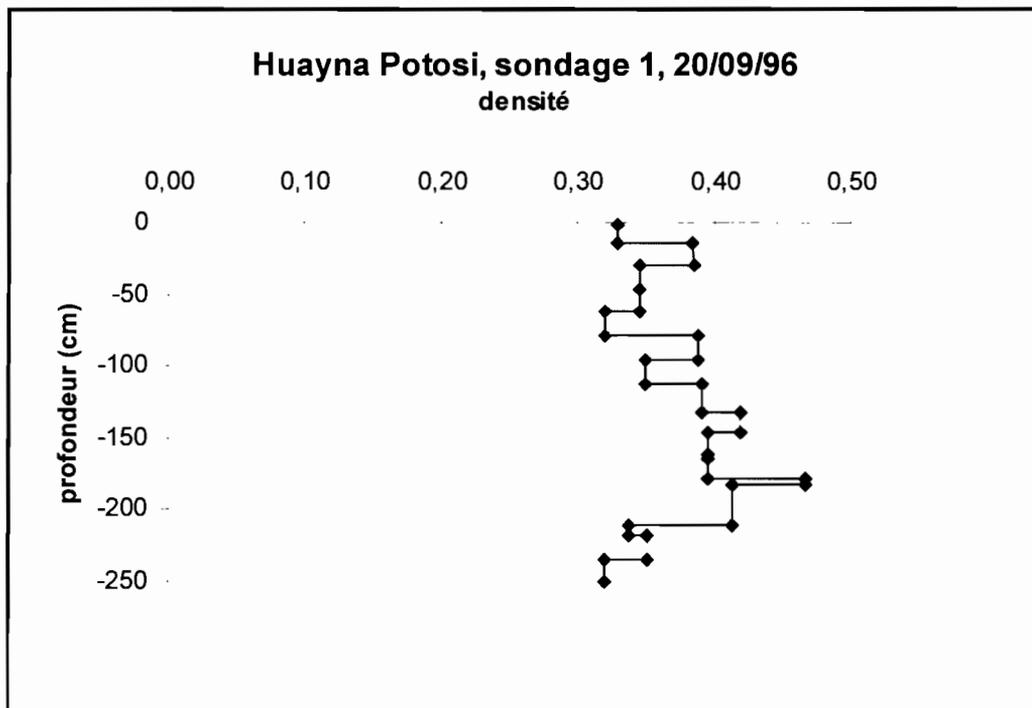


Figure K.9. Sondage 5620

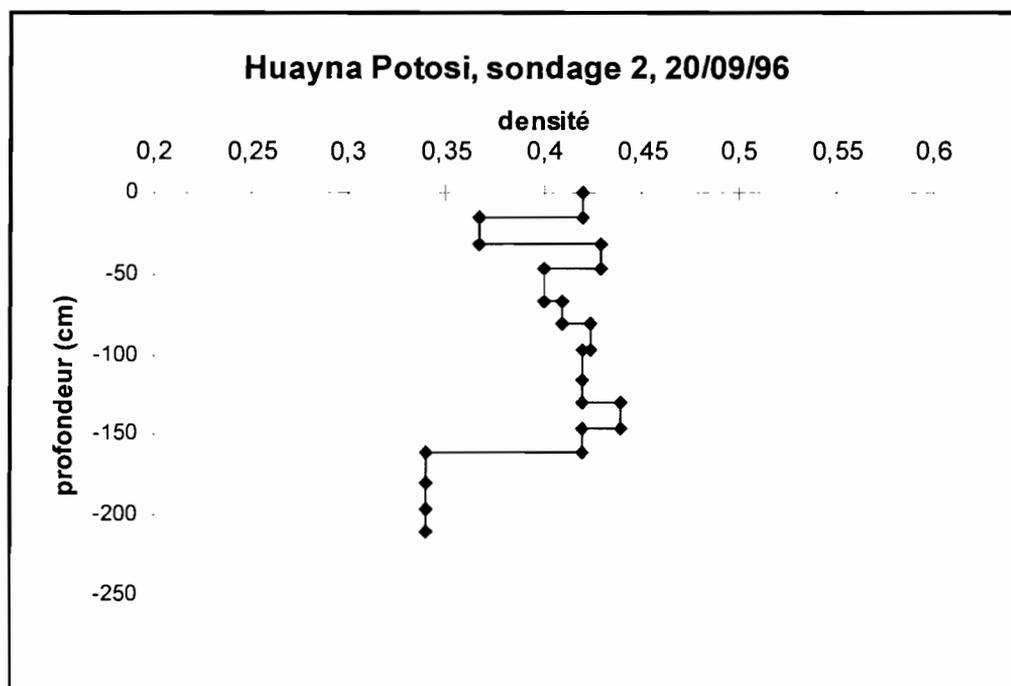


Figure K.10. Sondage 5520 (Station Campbell)

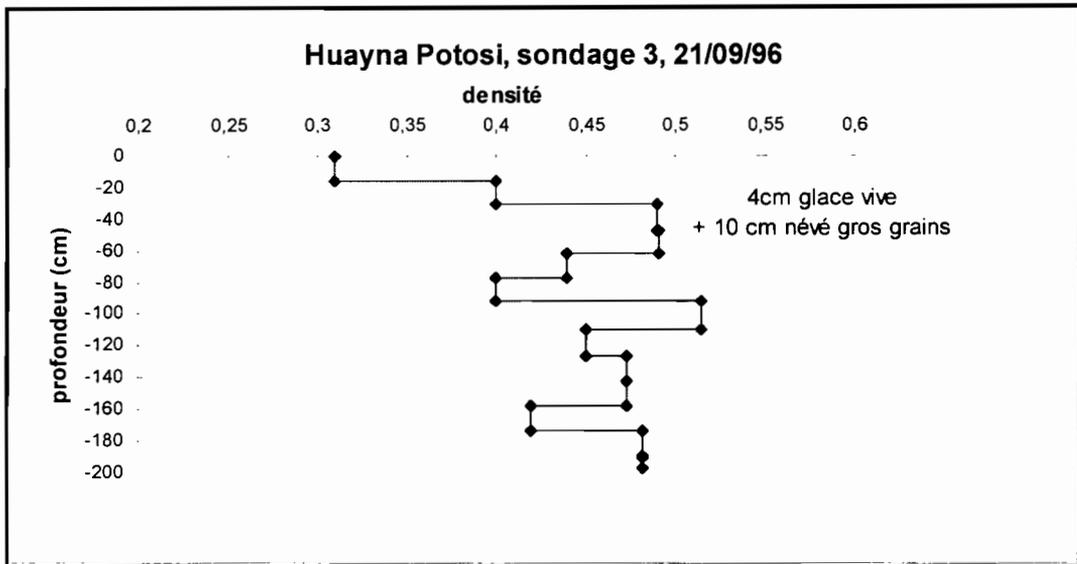


Figure K.11. Sondage 5520 « rive droite »

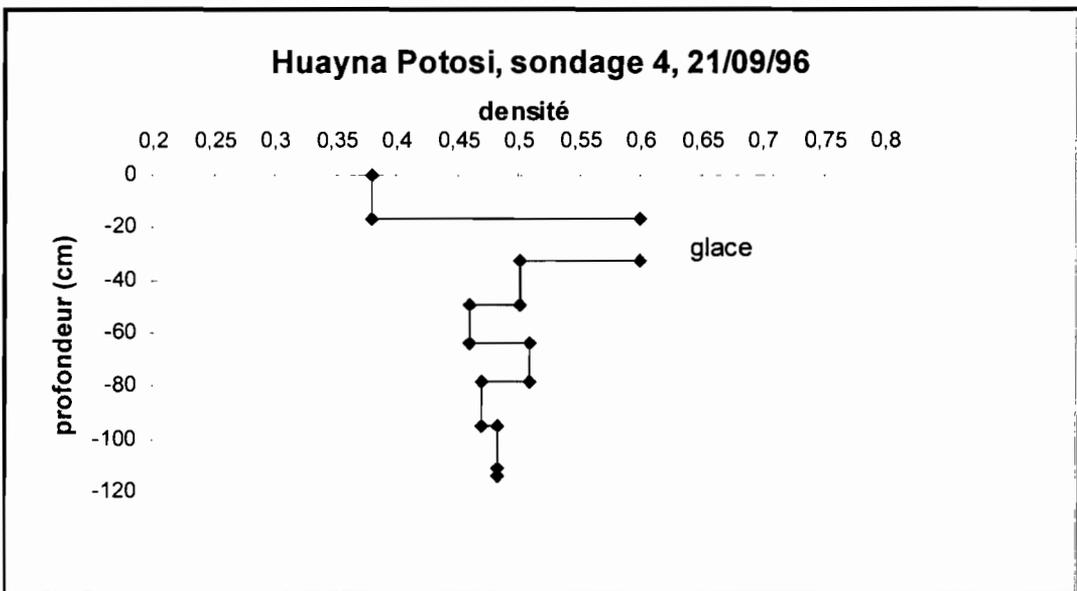


Figure K.12. Sondage 5520 m « Combe Est »

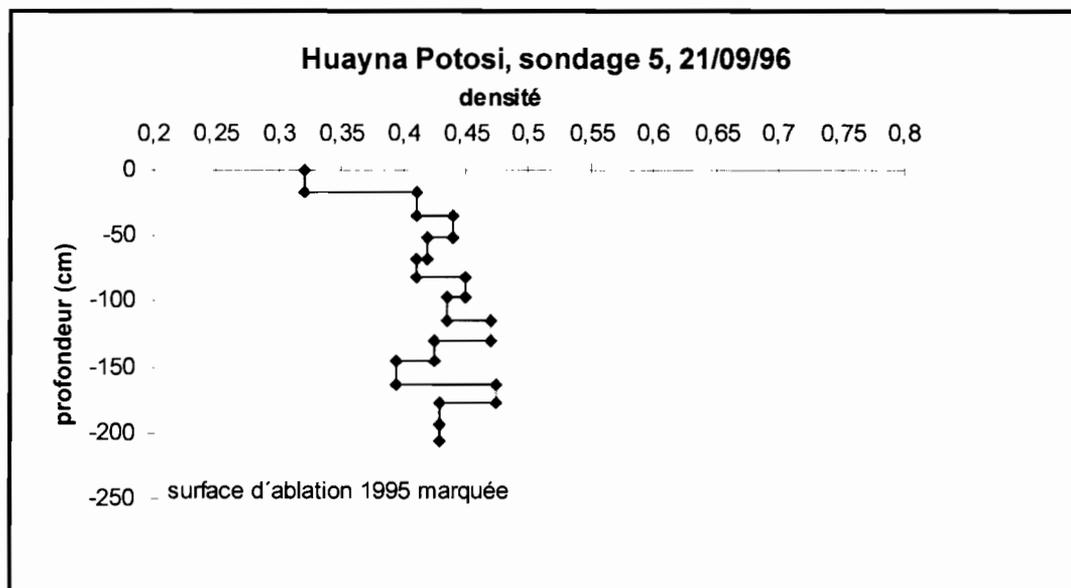


Tableau K.13. Synthèse des densités moyennes et des bilans d'accumulation mesurés sur les 5 sites de la zone supérieure du Glacier de Zongo

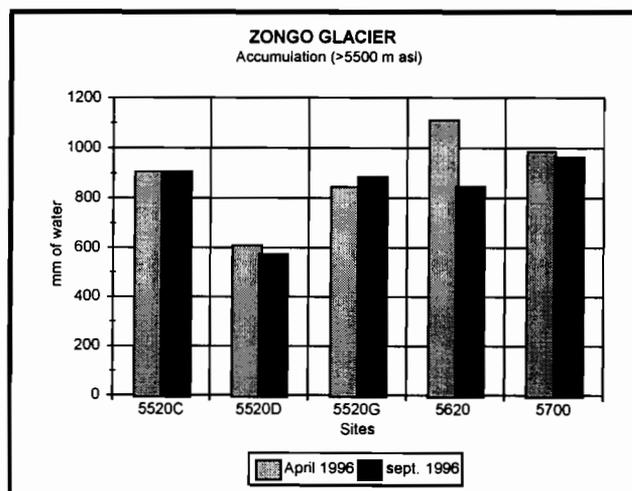
Sites	5700		5620		5520C		5520D		5520 G	
périodes	04	09	04	09	04	09	04	09	04	09
densité	0.43	0.39	0.48	0.39	0.51	0.41	0.56	0.49	0.51	0.40
mm d'eau	986	965	1111	848	908	907	609	572	845	886

5520 C : Campbell

5520 D : Rive droite

5520 G : Combe Est

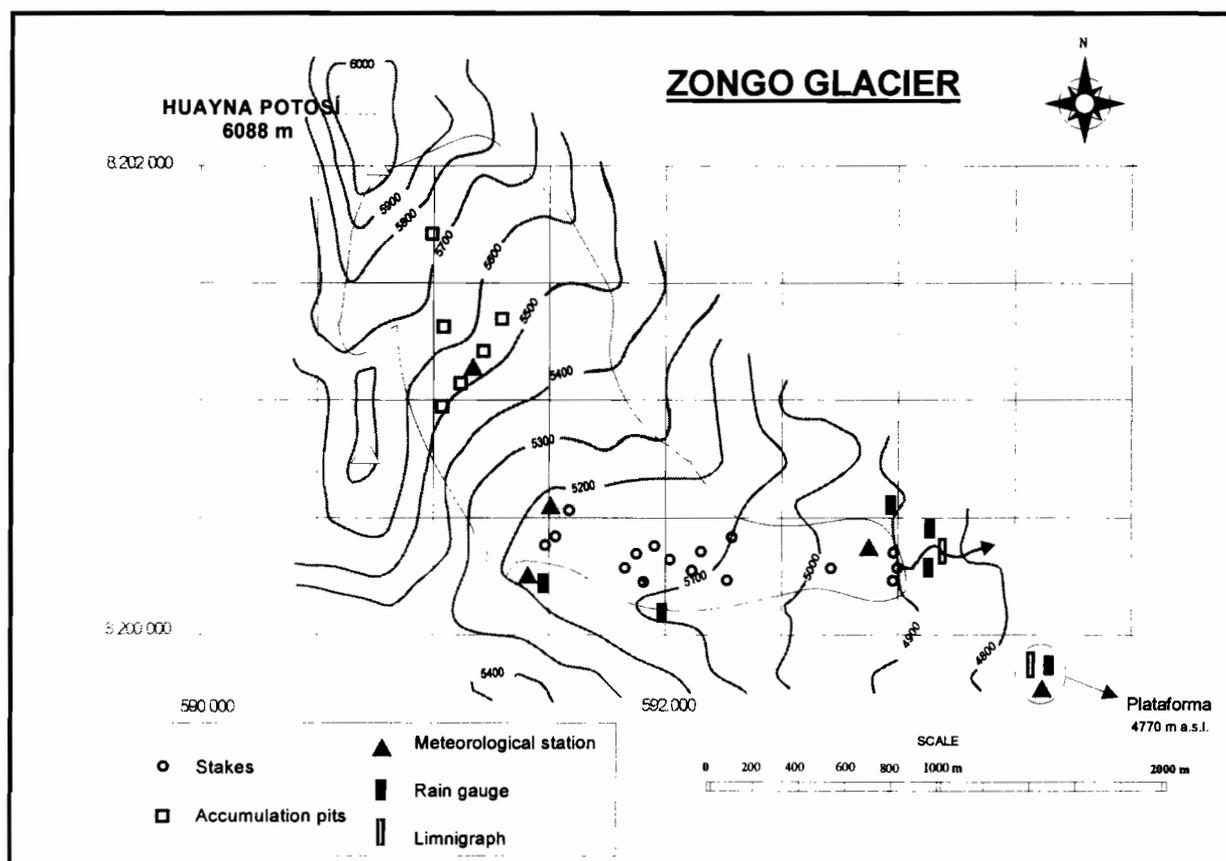
Figure K.13. Synthèse du bilan d'accumulation en avril (en clair) et en septembre (en foncé) sur les sites principaux de la zone d'accumulation du Glacier de Zongo (équivalent-eau en mm).



K.2. LE BILAN DE MASSE DU GLACIER

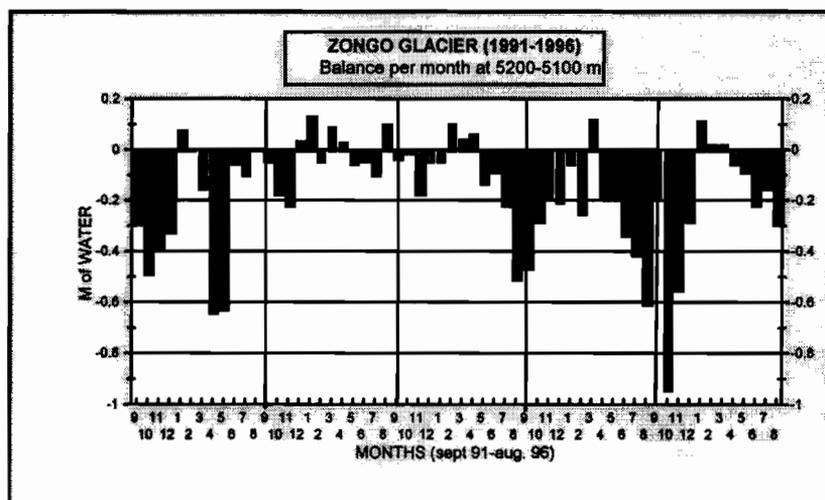
Le bilan de masse pour ce cycle 1995-96 a été déterminé à partir du réseau de balises figuré sur la carte du glacier (figure K13). Le réseau de balises utilisé lors de ce cycle est le plus complet depuis le début des mesures en 1991. Cinq puits à neige ont été creusés dans la zone d'accumulation aux emplacements classiques entre 5550 m et 5700 m à la mi-septembre 1996 (voir chapitre K1). On a démarré le cycle en 1995 avec 32 balises dans la zone d'ablation. Elles se sont réparties selon les tranches d'altitude de la manière suivante (entre parenthèses, les balises utilisées pour estimer le bilan début septembre 1996) : 6 (5) sur le plateau de la station à 5150 m., 18 (10) sur la langue entre 5150 et 5050 m, et 7 (2) vers 4900 m.

Figure K.14. Glacier en 1996 et emplacement du réseau de balises, des puits à neige et des stations (d'après Sicart, 1996, modifié).



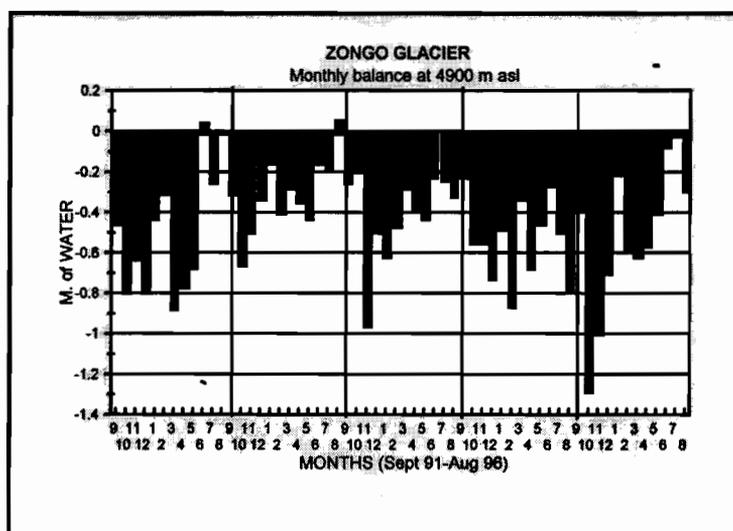
On a placé une balise (la 35) dans la chute de sérac vers 5000 m pour vérifier l'hypothèse utilisée jusqu'à présent selon laquelle les valeurs des balises situées à 4900 m sont représentatives de toute la langue du glacier entre 4900 et 5000 m. Cette hypothèse a été validée grâce aux dernières lectures effectuées avant août, date de la sortie totale de la balise. En ce qui concerne la périodicité de la surveillance des balises de la zone d'ablation, on a poursuivi la lecture mensuelle comme les années précédentes.

Figure K.15. Bilan mensuel sur la zone d'ablation, partie haute (5200-5100 m)



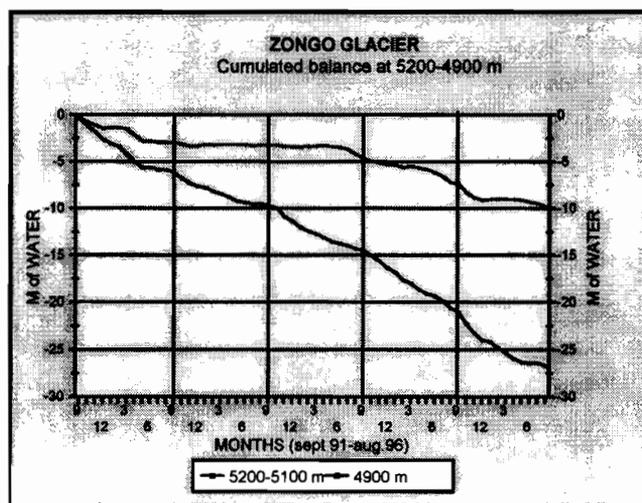
Le bilan d'ablation mensuel sur la tranche d'altitude 5200/5100 m montre des valeurs très négatives. Le record (absolu, toutes années confondues) est obtenu en **octobre** avec près d'un mètre d'ablation. L'ablation également accentuée de novembre et décembre a permis d'arriver au début de la saison d'accumulation en janvier avec déjà une perte nette de près de 1900 mm sur cette partie du glacier. Dans la région frontale, cette perte atteint 3400 mm (fig.K.16).

Figure K.16. Bilan mensuel dans la zone d'ablation, partie basse (4900 m).



Le bilan cumulé (fig. K.17) montre l'importance de la perte en eau du glacier dans la zone d'ablation, perte qui a commencé en fait durant les mois secs de juillet et août 1995.

K.17 : Bilan mensuel cumulé sur le Glacier de Zongo entre 5200 et 5100 m et à 4900 m.



Les données générales pour ce cycle 1995-96 sont résumées dans le tableau K.14. Elles sont comparées avec celles recueillies sur le Glacier de Chacaltaya (tableau K15).

Tableau K.14. : Sommaire des données du Glacier de Zongo (1991-1996)

YEAR (1)	βn (2)	$\Sigma\beta$ (3)	P (4)	A (5)	Q (6)	ELA (7)	AAR (8)	Term.(9)
	mm	mm	mm	mm	mm	m.a.s.l.	%	m
1991-92	-1498	-1498	920	2418	2240	5460	41	-12
1992-93	163	-1335	1060	897	1180	5100	86	+1
1993-94	-736	-2071	850	1586	1590	5300	58	-10
1994-95	-1276	-3347	850	2126	2130	5420	45	-6
1995-96	-1094	-4441	867	1961	2293	5400	50	-12

(1) Hydrological year (sep-aug.)

(2) Specific net balance

(3) Cumulated specific net balance

(4) Precipitation near the glacier

(5) Specific ablation ($A = P - \beta n$)

(6) Specific water discharge (2.1 km² surface area)

(7) Equilibrium Line Altitude

(8) Accumulation Area Ratio

(9) Advance or retreat of glacier terminus

Tableau K.15 : Sommaire des données du Glacier de Chacaltaya (1991-1996)

YEAR (1)	βn (2)	$\Sigma\beta$ (3)	P (4)	A (5)	ELA (6)	AAR (7)	Term (8)
	mm	mm	mm	mm	m	%	m
1991-92	-1166	-1194			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

(1) Hydrological year (sep-aug.)

(2) Specific net balance

(3) Cumulated specific net balance

(4) Precipitation near the glacier

(5) Specific ablation ($A = P - \beta n$)

(6) Equilibrium Line Altitude

(7) Accumulation Area Ratio

(8) Advance or retreat of glacier terminus

Sur le Glacier de Zongo, le bilan net de l'année est **nettement négatif** : le glacier a perdu plus d'un mètre d'eau. C'est une valeur toutefois un peu inférieure à celle de l'année précédente, et surtout à celle du cycle 1991-92. Redisons le fait saillant de ce cycle : la très forte ablation de d'octobre-novembre 1995, épisode de fonte exceptionnelle qui a commencé dès juillet 1995. A partir de décembre, le cycle apparaît plus normal dans son déroulement. *C'est l'occasion de souligner combien cette période septembre-décembre est cruciale dans la valeur du bilan de masse de l'année.*

Au contraire, sur Chacaltaya, cette année a été la plus négative, avec un bilan deux fois plus déficitaire (fig. K.18). Il faudra analyser les raisons pour laquelle, avec un réseau de balise inchangé, les bilans de ces deux glaciers s'écartent l'un de l'autre pour ce cycle. Sur la période de 5 ans écoulée, l'évolution du bilan de ces deux glaciers reste néanmoins assez concordante (fig. K.19).

Figure K.18. Evolution des bilans nets spécifiques du Glacier de Zongo et du Glacier de Chacaltaya depuis 1991-92.

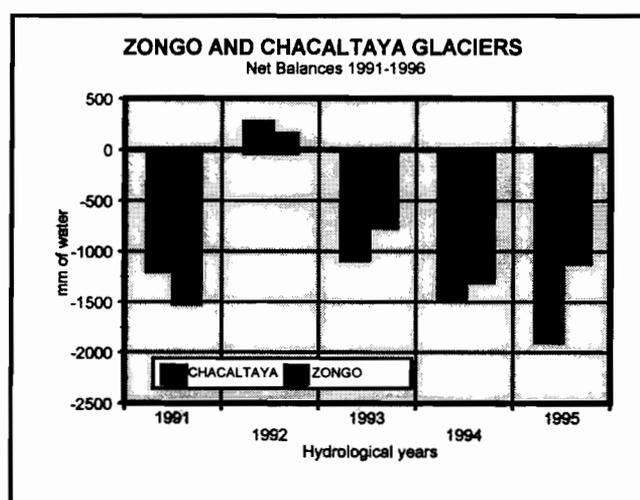
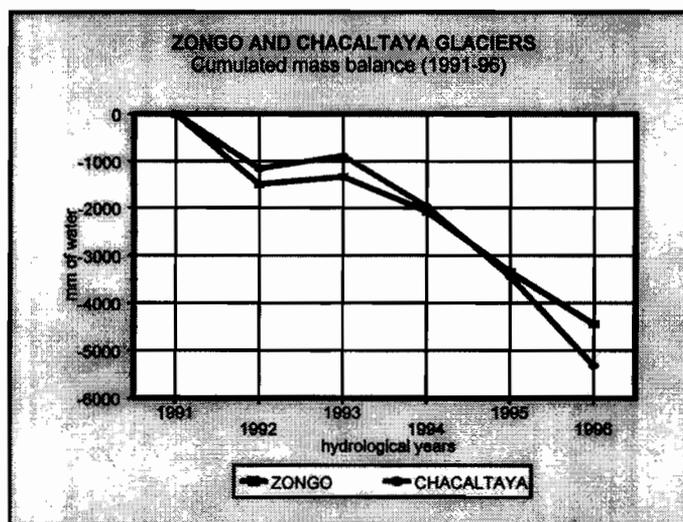


Figure K.18. Evolution des bilans nets spécifiques des glaciers de Zongo et de Chacaltaya de 1991 à 1996 en valeurs cumulées.



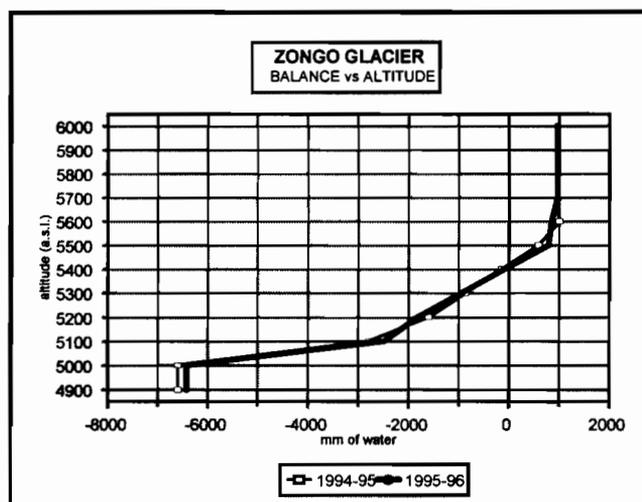
Dans le tableau suivant, on présente le bilan en fonction de l'altitude. On observera que la ELA (*Equilibrium Line Altitude*) 4 années sur 5 est calculée par interpolation linéaire. L'incertitude vient du fait que le glacier entre 5150 et 5500 m n'a pas de balises en raison de la topographie heurtée et du cheminement incertain (chute de séracs). Toutefois, en septembre 1996, on a pu mettre en place deux balises vers 5250 m pour tenter de vérifier, comme on l'a fait dans la chute de séracs inférieure, le bien fondé de cette interpolation.

Tableau K.16 Bilan en fonction de l'altitude

alt. (m)	1991-92	1992-93	1993-94	1994-95	1995-96
4900	-6000	-3300	-5400	-6600	-6420
5000	-6000	-3300	-5400	-6600	-6420
5100	-2900	0	-1300	-2800	-2496
5200	-2800	250	-250	-1600	-1830
5300	-1730	470	-13	-870	-957
5400	-650	690	224	-150	-84
5500	420	910	460	580	788
5600	570	1060	660	1000	848
5700	570	1240	830	970	965
5800	570	1240	830	970	965
5900	570	1240	830	970	965
6000	570	1240	830	970	965
ELA	5460	5100	5300	5420	5400

□ Les données notées en italique sont obtenues par interpolation linéaire

Figure K.19. Evolution du bilan avec l'altitude pour les deux derniers cycles.



La figure K.19. montre une assez nette similitude dans la distribution du bilan en fonction de l'altitude entre les deux derniers cycles.

La figure K.20 présente le tracé des isolignes de bilan pour les deux derniers cycles.

Les figures K.21 et K.22 permet de vérifier que l'évolution de la ELA et de l'AAR (*Accumulation Area Ratio*) en fonction du bilan net donne une relation linéaire, même s'il manque encore des points pour l'établir correctement (il faut au moins 6 points, norme du *World Glacier Monitoring Service* [WGMS]).

Ceci est en conformité avec les résultats obtenus sur la plupart des glaciers surveillés dans le monde (voir les données publiées par le bulletin du WGMS). On voit que pour un bilan net équilibré ($\beta_n = 0$), 80 % de la surface du glacier est en accumulation et la ligne d'équilibre (ELA₀) se place à 5150 m (5200 m à Chacaltaya).

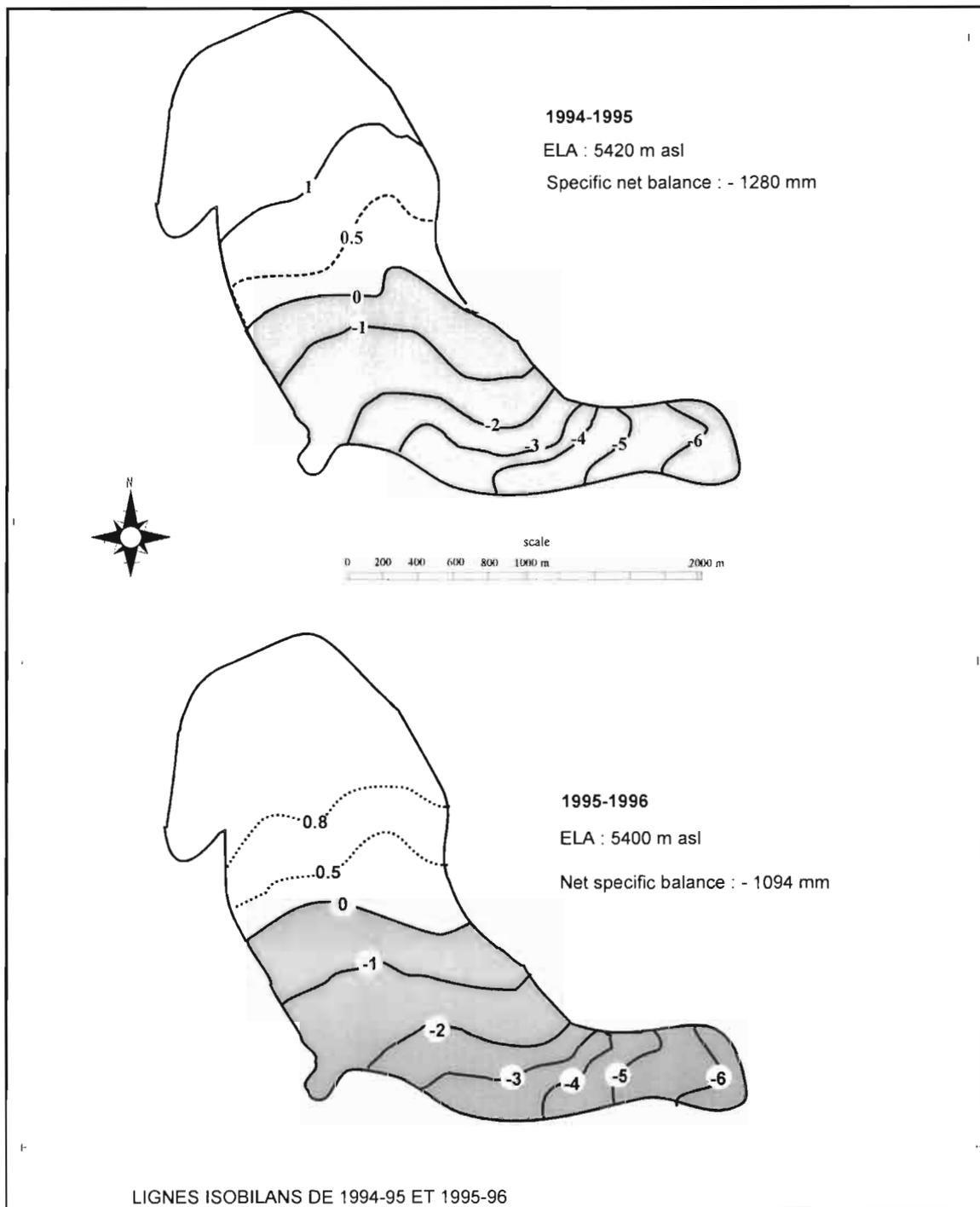


Figure K.20. Isolignes de bilan du Glacier de Zongo pour les cycles 1994-95 et 1995-96.

K.21. Relation bilan net/altitude de la ELA pour les 5 cycles

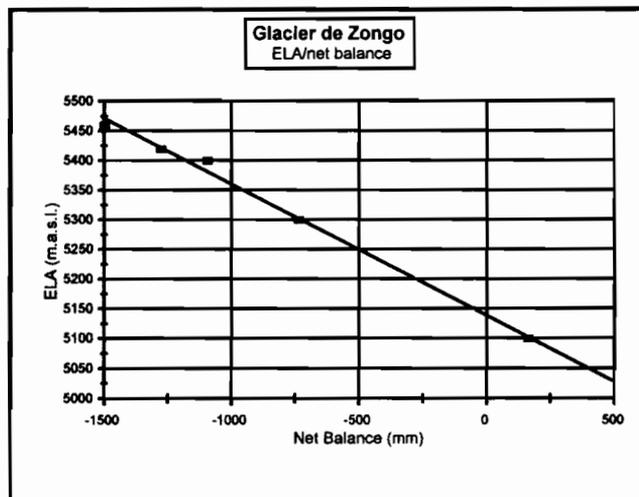
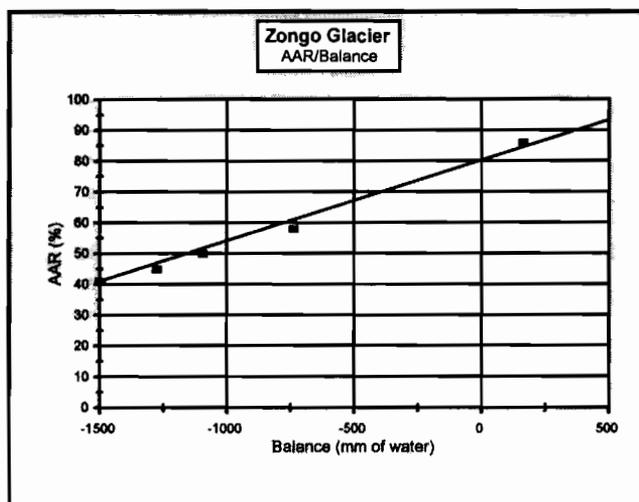


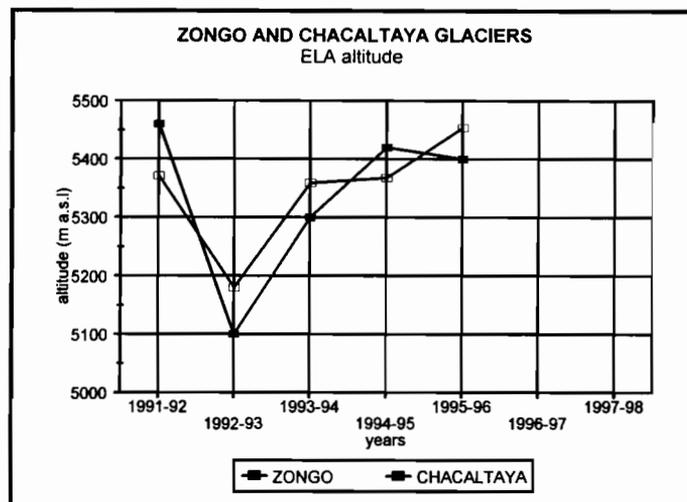
Figure K.22. Relation entre bilan net et AAR (Accumulation Area Ratio) pour les 5 cycles



Finalement, on a représenté à la figure K.23 l'évolution de la ELA durant ces 5 cycles de mesure. Les ELAs sont obtenues au Zongo par interpolation linéaire lorsqu'elles sont placées dans la zone de séracs supérieure non contrôlée par des balises. A Chacaltaya, elles sont calculées par régression et se situent parfois au-dessus de la limite supérieure du glacier.

On constate que les lignes d'équilibre évoluent dans des limites proches - une centaine de mètres - sur le Glacier de Zongo et le Glacier de Chacaltaya. La variabilité du climat et son effet sur le bilan impose une oscillation de la ELA sur plus de 300 m. *Une ligne d'équilibre placée vers 5400 m et des bilans nets spécifiques compris entre -1000 mm et -1500 mm paraissent être assez représentatifs des années de mesure écoulées sur ces glaciers de la Cordillère Royale de Bolivie. On est loin de l'équilibre, qui se situerait avec une ELA_0 vers 5150 m et un AAR_0 proche de 80%.*

Figure K.23. Evolution de la ELA sur les glaciers de Zongo et de Chacaltaya depuis 5 ans.



K.3. COMPARAISON ENTRE BILAN NET SPECIFIQUE ET DEBIT SPECIFIQUE

Comme indiqué sur le tableau K.14, l'ablation spécifique (A) - calculée à partir des précipitations et du bilan spécifique - et le débit spécifique de l'émissaire à 4830 m (Q) montrent une différence de plus de 300 mm. Si l'on admet une sublimation non négligeable sur le glacier, on devrait avoir $A > Q$. Si l'on estime que la valeur de Q est à peu près juste (l'incertitude majeure étant le coefficient d'écoulement fixé à 80%), on peut penser que la valeur de A est sous-estimée par les mesures pour au moins deux raisons :

- les précipitations recueillies aux pluviomètres - très majoritairement solides - sous-estiment sans doute - dans une proportion impossible à déterminer - les quantités reçues dans la zone d'alimentation du glacier : pour ce cycle, il y a déjà une différence de plus de 100 mm entre le **bilan d'accumulation** au-dessus de 5500 m et le **total des précipitations** vers 5100 m, comme pour les années antérieures ; il faut donc admettre un léger gradient positif des précipitations le long du glacier à partir des pluviomètres ;
- le mode de calcul du bilan net entre le 1^{er} septembre d'une année a et le 1^{er} septembre de l'année $a + 1$, pratique la plus courante sur tous les glaciers étudiés au niveau mondial, minimise fortement l'ablation ; grâce à la périodicité mensuelle de lecture de l'émergence des balises sur ce glacier, on corrige en partie cette sous-estimation : en effet, en cumulant sur l'année les valeurs du bilan mensuel obtenu en utilisant des densités variables (0.4 en période d'accumulation, 0.9 lorsque la surface est en glace), on obtient une valeur d'ablation plus élevée (ces valeurs ne sont pas représentées ici).

K.4. TOPOGRAPHIE

- **les mesures topographiques depuis 1991.**

Chaque année depuis 1991, on a réalisé une mesure topographique de la limite inférieure du glacier. Sur la rive droite, cette limite mesurée remonte depuis le front jusqu'à l'altitude 5150 m, sur la rive gauche, elle est tracée jusqu'à 5000 m puis s'arrête en raison des séracs. Le polygone d'appui mis en place passe par 3 points situés sur la moraine de rive droite (Z-1, Z-2, BM-3A), 1 point sur une moraine frontale (BM-3) et un point (BM-4) placé sur une moraine de rive gauche, non loin du pluviomètre P3. Les coordonnées de ces points figurent dans le tableau suivant :

Tableau K.17. Coordonnées des points de la polygonale du Glacier du Zongo (valeurs de 1995).

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

La COBEE, qui a financé ces campagnes de mesure chaque année, a engagé les équipes spécialisées. Malheureusement, chaque année de 1991 à 1994, ce sont des équipes différentes qui ont travaillé sur le glacier. Aussi, des doutes étant apparus en vérifiant la qualité du polygone, on a souhaité porter une attention toute particulière à sa mesure en 1995. Une erreur de plusieurs mètres a été constatée. En même temps, on a demandé que le polygone du glacier soit rattaché à des points situés au fond de la vallée, qui sont eux-mêmes reliés au système de l'Instituto Geográfico Militar (IGM). C'est le cabinet *Jaime Cari Silva (Servicios de Consultorias)* de La Paz qui a réalisé ce travail en 1995. En 1996, c'est ce même cabinet qui a été engagé pour ce travail. On a corrigé les topographies des années antérieures à partir du polygone de 1995 et l'on peut donc présenter cette année pour la première fois une carte des fluctuations de la langue terminale du glacier.

- **le recul du glacier (1991-96).**

Pour estimer les fluctuations du glacier, on a considéré sa partie frontale stricte ou limite inférieure - avant que sa direction soit parallèle à l'axe d'écoulement du glacier. Le polygone considéré est celui compris entre un point de rive droite coté $x = 820150$, $y = 592900$ et un point de rive gauche coté $x = 8200450$ et $y = 592900$ (UTN). Directement sur la carte au 1/2500, on a mesuré onze segments reliant le plus perpendiculairement possible la limite du front actuelle et les limites respectives des années précédentes. Chaque segment est séparé du voisin d'une vingtaine de mètres, ce qui fait que les onze segments sont répartis également le long du front. La fluctuation de l'année est obtenue de leur moyenne (tableau K.18 et figures K.24 et K.25)

Tableau K.18. Valeurs en mètres des oscillations du front du Glacier de Zongo entre août 1991 et août 1996 : moyennes de 11 points répartis sur le front.

years	per year	cumulated
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

Figure K.24. Mouvement du front du Glacier de Zongo de 1991 à 1996.

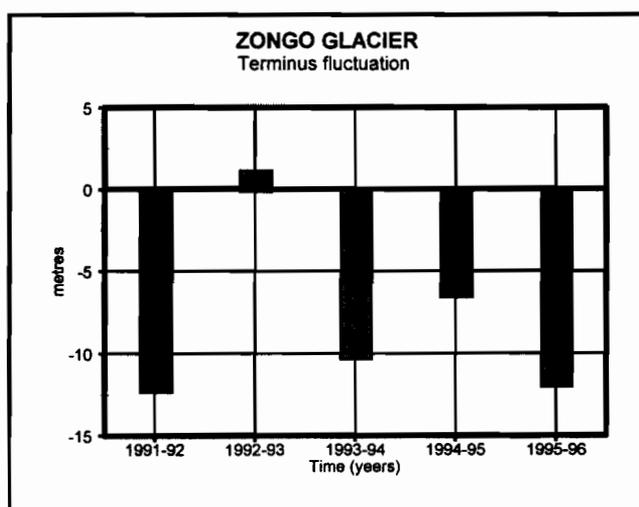
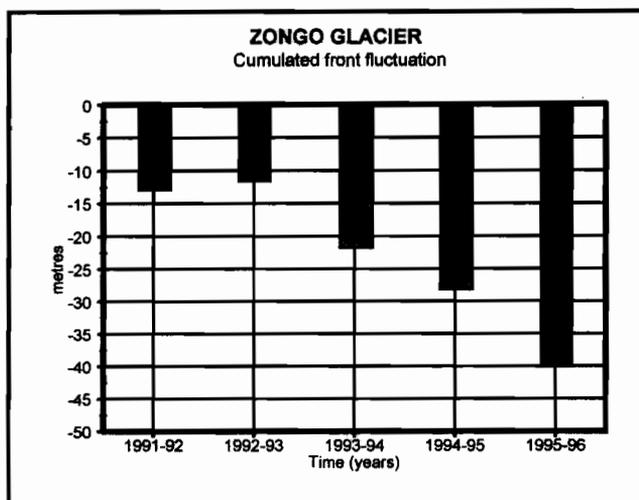


Figure K.25. Mouvement cumulé du front du Glacier de Zongo de 1991 à 1996.



Ce glacier a reculé de 40 m durant ces 5 dernières années, soit de 8 mètres par an en moyenne. Comme il fallait s'y attendre pour un glacier de cette taille, il n'y a pas de relation entre le

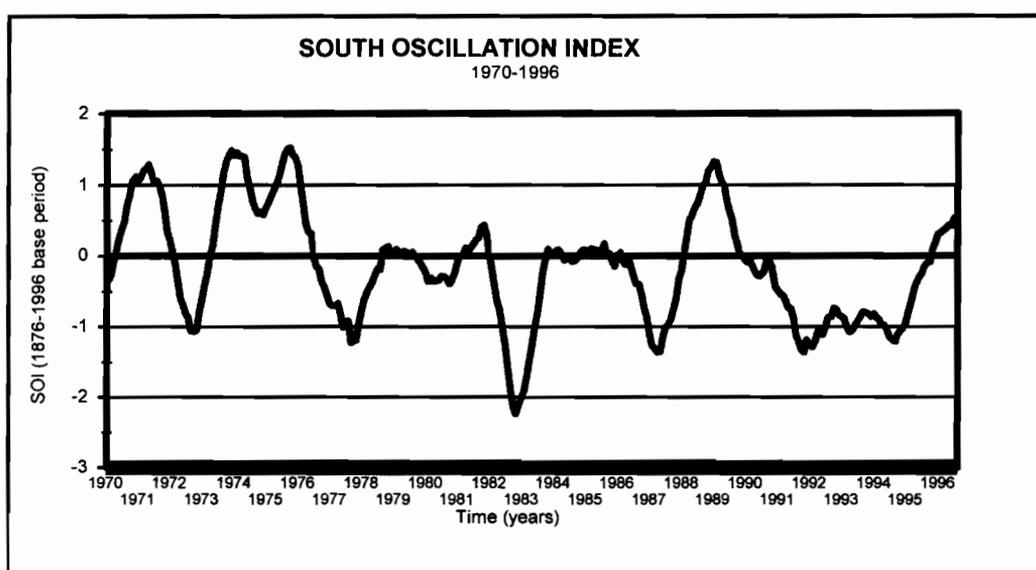
Ce glacier a reculé de 40 m durant ces 5 dernières années, soit de 8 mètres par an en moyenne. Comme il fallait s'y attendre pour un glacier de cette taille, il n'y a pas de relation entre le bilan net de l'année et le mouvement du front. Tout au plus observe-t-on que durant le cycle 1992-93 au bilan positif le front n'a pas reculé. Si l'on admet que le BM3 est proche (à 10 m près) de la position du front sur la photographie aérienne de 1956, on calcule un recul de 125 m en 40 ans, soit un peu plus de 3 m an^{-1} . Le front du glacier semble donc reculer en moyenne depuis 5 ans à un rythme nettement plus élevé.

La figure hors-texte présente les positions du front au mois d'août des années indiquées.

K.5. CONCLUSION

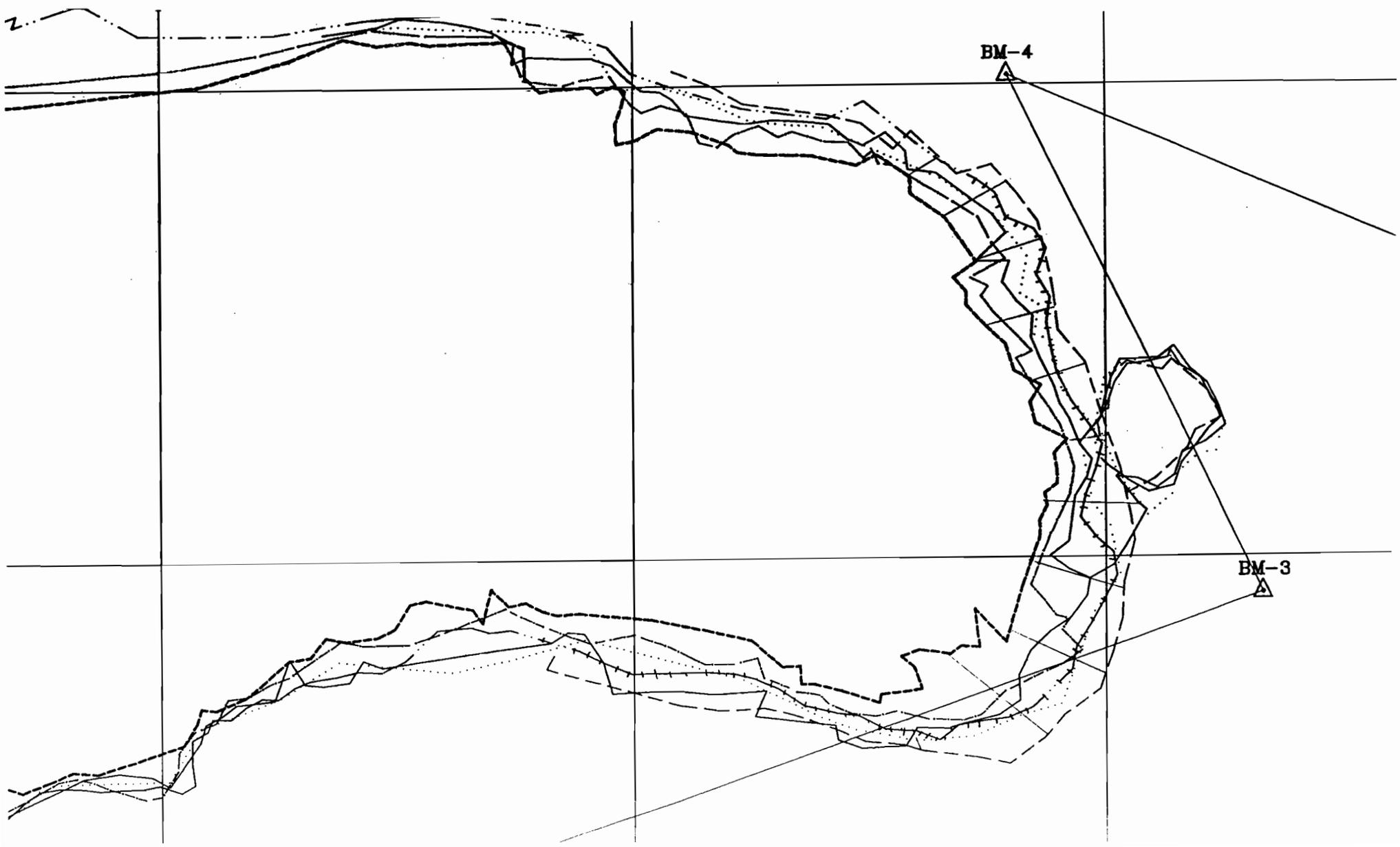
Le cycle 1995-96 a donné des bilans de masse nettement déficitaires, tendance qui prolonge un mouvement de recul accéléré des surfaces englacées de ce secteur des Andes Centrales entamé au début des années 1980. La période 1991-96 s'est caractérisée sur les glaciers étudiés par une ablation particulièrement intense (à l'exception du cycle 1992-93 à bilan à peu près équilibré) et cette tendance persistante est à relier au forçage climatique observé pendant la même période dans le secteur tropical du Pacifique. La figure K.26 montre la permanence, exceptionnelle à l'échelle du siècle pour sa durée, d'un Indice d'Oscillation Sud négatif, avec deux minima, l'un en 1991-92, événement ENSO de forte intensité, et un autre, non reconnu comme étant un ENSO, en 1995. On remarque aussi sur la figure que cette situation prend fin en 1996, avec le renversement du champ de pression qui survient en milieu d'année. Cet événement nouveau pourrait annoncer le retour à une situation moins déficitaire voire excédentaire pour nos glaciers. Réponse en 1998, dans le prochain rapport !

Figure K.26. Indice d'Oscillation Sud (Tahiti-Darwin) de 1970 à 1996. Moyenne mobile sur 12 mois



ZONGO GLACIER : fluctuations of terminus (1991-1996)

- - - - - GLACIAL HUAYNA POTOSI - 1991
- GLACIAL HUAYNA POTOSI - 1992
- + + + + + GLACIAL HUAYNA POTOSI - 1993
- ==== GLACIAL HUAYNA POTOSI - 1994
- ==== GLACIAL HUAYNA POTOSI - 1995
- ==== GLACIAL HUAYNA POTOSI - 1996



L. CONCLUSION

L'évolution du glacier a été plus ou moins comparable à celle observée depuis 1991. Le fait saillant de cette année est l'ablation record subie par le glacier en octobre et novembre, ainsi que les débits du torrent glaciaire qui s'en sont suivis (les plus forts jamais enregistrés). D'après les cycles déjà étudiés, nous savons que le bilan se « joue » en grande partie entre septembre et décembre, mais cette année constitue un cas d'école ! La cause en est sans doute l'ablation anormalement élevée des mois de juillet et août 1995. Ces mois connaissent traditionnellement une ablation très faible, mais cette année elle a entamé fortement les « réserves » en neige du glacier, laissant la glace à nue en surface jusqu'à 5400 mètres d'altitude. L'albédo très faible de la glace sale (0,2) et le rayonnement encore important à cette époque ont alors été des éléments déterminants pour ce scénario « catastrophe » du glacier. En comparaison, les mois d'hiver 1996 ont mieux « su » préserver le manteau neigeux accumulé pendant la saison des pluies.

Un effort important a été entrepris pour équiper, de façon homogène, le glacier. Ainsi, pas moins de trois stations météorologiques automatiques ont été installées cette année. Nous mesurons maintenant les différents paramètres climatiques dans toutes les zones caractéristiques du glacier : à proximité du front à 4750 m, dans sa zone d'ablation à 5025 et 5150 m et dans sa zone d'accumulation à 5550 m. Outre cet aspect quantitatif, la qualité des capteurs de mesure a elle aussi été améliorée. En particulier, avec l'installation de thermomètres ventilés à la station « 5150 m », la mesure de la température de l'air (variable climatique au rôle évidemment primordial dans l'évolution du glacier) peut désormais être considérée comme juste. L'élaboration d'un modèle physique décrivant le fonctionnement du glacier Zongo est un objectif majeur, c'est dans cette logique que notre réseau de mesures a été agrandi et amélioré. Les données recueillies constitueront la base fiable nécessaire à l'élaboration d'un tel modèle. C'est enfin et toujours dans cette optique que plusieurs campagnes de mesures sur le terrain ont été et seront encore entreprises dans l'avenir.

BIBLIOGRAPHIE

Brutsaert W., 1982 - Evaporation into the atmosphere. *Kluwer Academic Publishers*. 293 p.

Hastenrath S., 1978 - Heat-budget measurements on the Quelccaya ice cap, Peruvian Andes. *Journal of glaciology*, 20, 82, 85-97.

Paltridge G.W. and Platt C.M.R., 1976 -Radiative Processes in Meteorology and Climatology. *Elsevier Scientific Publishing Company*. 315 p.

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 ORSTOM n°43*. 68 p.

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'école nationale supérieure des mines de Saint-Etienne*. 60 p.

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 ORSTOM n°49*. 82 p.