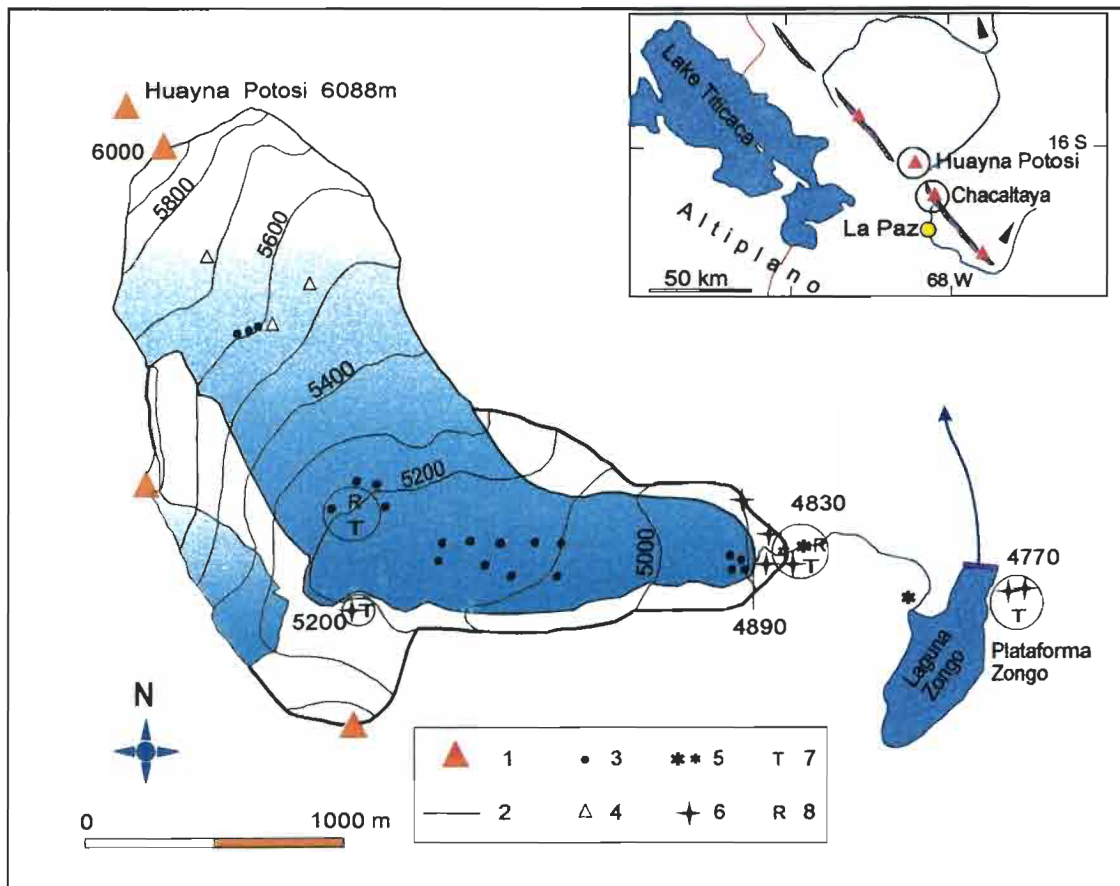


INFORME N°43
ORSTOM - BOLIVIE



MESURES METEOROLOGIQUES,
HYDROLOGIQUES ET GLACIOLOGIQUES
SUR LE GLACIER ZONGO

ANNEE HYDROLOGIQUE 1993-94

P. RIGAUDIERE (ORSTOM)
P. RIBSTEIN (ORSTOM)
B. FRANCOU (ORSTOM)
B. POUYAUD (ORSTOM)
R. SARAVIA (COBEE)

JANVIER 1995

INFORME N°43
ORSTOM - BOLIVIE

**MESURES METEOROLOGIQUES,
HYDROLOGIQUES ET GLACIOLOGIQUES
SUR LE GLACIER ZONGO
ANNEE HYDROLOGIQUE
1993-94**

**P. RIGAUDIERE (ORSTOM)
P. RIBSTEIN (ORSTOM)
B. FRANCOU (ORSTOM)
B. POUYAUD (ORSTOM)
R. SARAVIA (COBEE)**

JANVIER 1995

AVANT - PROPOS

L'étude hydrologique et glaciologique du glacier Zongo, Huayna Potosi, est menée depuis 1991 dans le cadre d'une coopération entre l'ORSTOM (l'institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération) et la COBEE (Compagnie Bolivienne d'Energie Electrique).

Cette étude est un élément important du programme PECA (Précipitations et Ecoulements de Bassins Versants Andins), qui se déroule dans le cadre des conventions liant l'hydrologie ORSTOM - DEC UR 21 à ses principaux partenaires en Bolivie, le SENAHMI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología) et l'IHH-UMSA (Instituto de Hidraulica e Hidrología - Universidad Mayor de San Andres) d'autre part.

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION	1
	3
2. HISTORIQUE ET INVENTAIRE DE L'EQUIPEMENT DU GLACIER	3
2.1. Station de mesures a 4830 mètres	3
2.1.1. Station limnimétrique	3
2.1.2. Station Campbell	5
2.2. Mesures sur le glacier a 5200 mètres	6
2.2.1. Configuration originale	6
2.2.2. Appareillages remplacés	6
2.2.3. Appareillages ajoutés	7
2.2.4. Elévations et abaissements de la station	7
2.3. Mesures a la plataforma zongo	7
2.4. Mesures sur la moraine	8
2.4.1. Mesures de températures	8
2.4.2. Mesures de précipitations	8
2.5. Relevés limnimétriques	8
2.6. Mesures glaciologiques sur le glacier	9
	11
3. TEMPERATURES DE L'AIR	11
3.1. Valeurs journalières	11
3.1.1. Températures moyennes	11
3.1.2. Minima et maxima	13
3.1.3. Gradients journaliers	14
3.2. Valeurs mensuelles et annuelles	16
3.2.1. Températures moyennes	16
3.2.2. Minima et maxima	18
3.2.3. Durées avec la température supérieure à un seuil	19
3.2.4. Gradients	21
3.3. Etude statistique	21
	25
4. PRECIPITATIONS	25
4.1. Valeurs journalières	25
4.2. Valeurs mensuelles et annuelles	26
4.2.1. Pluviomètres totalisateurs	26
4.2.2. Comparaison avec d'autres sites de mesure	28
4.2.3. Comparaison avec d'autres années	29
4.2.4. Gradients	30
	31

5. BILAN RADIATIF	31
5.1. Introduction	31
5.2. Valeurs " instantanées "	32
5.2.1. Bilan radiatif	32
5.2.2. Problèmes de mesures	33
5.2.3. Valeurs maximales	34
5.3. Valeurs journalières	35
5.4. Valeurs mensuelles	37
5.4.1. Valeurs moyennes	37
5.4.2. Durées avec la radiation supérieure à un seuil	39
5.4.3. Maxima	40
	41
6. DEBITS	41
6.1. Valeurs instantanées	41
6.2. Valeurs journalières	42
6.3. Valeurs mensuelles et annuelles	45
6.3.1. Valeurs mensuelles	45
6.3.2. Valeurs annuelles	46
6.4. Etude statistique	47
6.4.1. Corrélations multiples	47
6.4.2. Autocorrélation	48
6.5. Reconstitutions	50
6.5.1. Approche statistique	50
6.5.2. Approche "déterministe"	52
	55
7. AUTRES MESURES METEOROLOGIQUES	55
7.1. Introduction	55
7.1. Humidité	55
7.2. Vitesse du vent	57
7.3. Sonde à neige	57
7.4. Pluviographe à augets basculeurs	58
7.5. Température de la glace	59
	61
8. MESURES GLACIOLOGIQUES ET BILAN DE MASSE	61
8.1. Valeurs mensuelles	61
8.2. Valeurs annuelles	65
	67
9. CONCLUSION	67

BIBLIOGRAPHIE

1. INTRODUCTION :

Ce rapport rend compte des diverses mesures effectuées pendant l'année hydrologique 1993-1994 sur le bassin versant du glacier Zongo. Le glacier du Zongo fait partie du massif du Huayna Potosi, dans la Cordillère Royale, située en Bolivie. Il occupe la majeure partie du bassin versant étudié, dont la surface totale est de 3 km², et la surface englacée de 2,1 km². La surface du bassin versant non occupée par le glacier principal se compose de deux moraines latérales, et de petites aires englacées connectées hydrologiquement au glacier, mais pas glaciologiquement. Le bassin versant est compris entre 4830 mètres et 6000 mètres d'altitude. Il est exposé à l'est dans sa partie basse, et au sud dans sa partie supérieure [Francou et al., in press; Ribstein et al., in press].

Le programme d'étude de ce bassin versant, tant hydrologique que glaciologique, a été entrepris au cours de l'année 1991, année de mise en place des pièces maîtresses du dispositif de mesure : la station hydrométrique à 4830 mètres, destinée à enregistrer en continu le débit du torrent émissaire du glacier, le réseau de balises sur le glacier, destiné à une étude de bilan-vitesse, et les pluviomètres totalisateurs.

Depuis cette date, d'autres dispositifs de mesures ont été installés, permettant une diversification tant des sites de mesures que des variables mesurées. Ainsi, après l'installation de deux stations CAMPBELL, d'abord sur la moraine au niveau de la station hydrométrique en 1992, puis sur le glacier à 5200 mètres, on peut considérer que l'année hydrologique 1993-1994 est la première durant laquelle a fonctionné un dispositif de mesures de cette ampleur. Ce dispositif permet en effet, outre les mesures déjà citées, d'évaluer des gradients pluviométriques et de températures sur tout le bassin versant, et de mesurer un bilan radiatif et diverses variables météorologiques.

Le rapport commence par un inventaire de tous les équipements du glacier (chapitre 2), avec pour chacun d'eux un petit historique rendant compte d'éventuels changements ou problèmes d'appareillage, et des périodes de lacune le cas échéant.

Chacun des paramètres mesurés fait ensuite l'objet d'un chapitre. Ce rapport traite ainsi successivement des températures (chapitre 3), des précipitations (chapitre 4), des radiations et bilans radiatifs (chapitre 5), des débits (chapitre 6), de diverses mesures complémentaires (chapitre 7), et des mesures glaciologiques et de bilan de masse (chapitre 8). De façon générale, on s'attache à fournir les éléments suivants :

- Chaque fois que cela est possible, et que cela présente un intérêt, on donne quelques valeurs instantanées, ainsi que des valeurs journalières, mensuelles et annuelles, sous forme de graphiques et tableaux. Ces valeurs sont souvent assorties de quelques éléments statistiques de base : moyennes, écarts types, cumulés.... Si cela est nécessaire, elles sont également critiquées, et quelques explications sont fournies sur d'éventuelles corrections qui ont pu être apportées, ponctuellement ou systématiquement.

- On effectue des comparaisons avec les années hydrologiques précédentes pour lesquelles on dispose de mesures, soit 91-92 et 92-93 . Ceci permet de bien mettre en valeur les similitudes et les contrastes entre ces trois années.

- On commente tout spécialement le caractère, saisonnier ou non, de la variable analysée. On s'efforce également d'expliquer l'allure générale des variations journalières ou saisonnières, et de mettre ainsi en évidence les interactions entre tous les paramètres mesurés, particulièrement avec le débit.

- Dans le but d'approfondir les relations entre paramètres, sont également présentées, pour peu qu'elles soient significatives, quelques études statistiques simples, généralement des corrélations, ou des approches modélisatrices un peu plus élaborées.

Ce rapport est donc une synthèse d'à peu près toutes les mesures effectuées sur le bassin versant du glacier Zongo pendant l'année hydrologique 93-94. On pourra le consulter pour trouver des valeurs à différents pas de temps, ainsi que quelques commentaires sur ces valeurs, d'ordre physique ou statistique. L'objet d'un tel rapport est aussi de garder une " mémoire " d'une année de mesures sur le glacier Zongo, considérée d'un point de vue plus pratique. Les problèmes rencontrés au fil d'une année, aussi bien pratiques (concernant la réalisation des mesures) que théoriques (concernant la validité et le sens physique de ces mesures) sont en effet nombreux et variés. Certains ont été résolus, d'autres non. C'est pourquoi certaines des difficultés rencontrées sont abordées et commentées ici.

2. HISTORIQUE ET INVENTAIRE DE L'EQUIPEMENT DU GLACIER :

Le bassin versant du glacier Zongo, et plus particulièrement le glacier lui-même, ont commencé à être équipés à partir de 1991, de façon à pouvoir mettre en oeuvre diverses mesures hydrologiques, glaciologiques et météorologiques.

La figure 1 donne un plan de situation du massif du Huayna Potosi, par rapport à la ville de La Paz, au massif de Chacaltaya et à la vallée du Zongo. La figure 2 représente le bassin versant lui-même, ainsi que les emplacements des différents équipements et stations qui seront décrits dans les paragraphes suivants.

2.1. STATION DE MESURES A 4830 METRES :

2.1.1. Station limnimétrique :

2.1.1.1. Limnigraphe à bande :

La station limnimétrique, équipée d'un déversoir triangulaire et d'un limnigraphe à flotteur fonctionne depuis septembre 1991 (voir figure 2). Pour l'année hydrologique 93-94, on dispose d'un enregistrement en continu des hauteurs, avec les périodes de lacune suivantes :

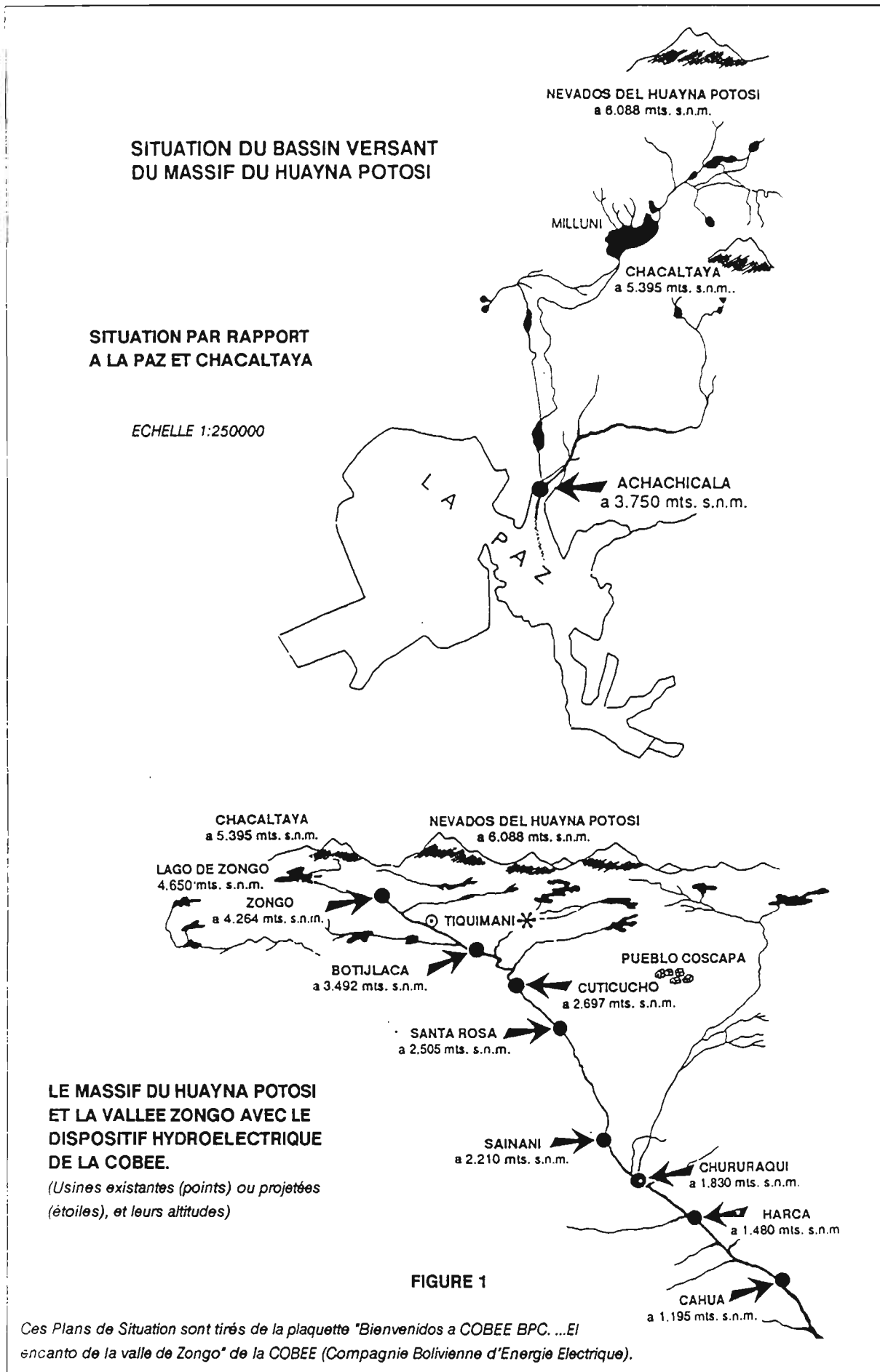
- du 27/10/93 à 14h20, au 17/11/93 à 12h30,
- du 19/01/94 à 09h00, au 20/01/94 à 10h50,
- du 22/01/94 à 00h45, au 24/01/94 à 14h45,
- du 15/03/94 à 04h30, au 16/03/94 à 15h00,
- du 09/06/94 à 15h00, au 17/06/94 à 09h20,
- du 22/06/94 à 06h00, au 28/06/94 à 09h30.

Ces lacunes, qui représentent presque 10% de l'année, sont dues essentiellement à des problèmes d'entraînement du papier ou à des dysfonctionnements du mécanisme d'horlogerie.

Les difficultés du dépouillement des bandes sont essentiellement de deux types :

- chaque fois qu'une vérification de l'appareil est effectuée, la date, l'heure et la cote à l'échelle sont inscrites sur le papier. Ceci permet, lors du dépouillement des bandes, d'une part de bien repositionner l'enregistrement dans le temps, d'autre part de replacer l'axe des hauteurs par rapport à l'enregistrement lui-même. Chaque segment d'enregistrement est donc encadré par deux jeux complets de ces indications. Cependant, il arrive fréquemment que certaines indications de dates, d'heures ou de hauteurs inscrites d'une fois sur l'autre ne soient pas compatibles entre elles. Ceci est le cas en particulier pour les lectures de l'échelle. Dans certains cas, on ne peut alors recalculer l'enregistrement en hauteur ou en temps qu'avec un seul jeu de ces indications, l'autre s'avérant inutilisable.

- le gel, qui se produit de façon quasi systématique la nuit en saison sèche, n'est généralement pas difficile à identifier sur les enregistrements. Il se caractérise par une "remontée" du niveau vers le milieu de la nuit, qui vient du fait que les bords du déversoir sont pris par la glace, puis par une baisse brutale du niveau entre 7H00 et 9H00 du matin, qui traduit un dégel brusque au déversoir. Les enregistrements sont interpolés facilement entre le moment où le niveau commence à monter, et celui où se produit le dégel brusque. On retient alors le niveau le plus bas atteint sur l'enregistrement. Cependant, il peut arriver que quelques journées successives de fort gel perturbent considérablement les enregistrements. Ceci est notamment le cas lorsqu'il ne se produit aucun dégel diurne dans la retenue ou dans le puits du flotteur. Il faut alors tâcher de reconstituer une hauteur "de base" (c'est à dire qui traduise un débit de base), mais l'interprétation des bandes n'est pas sans risque d'erreurs importantes. L'enregistrement de la première quinzaine d'août 1994 est à ce titre très significatif. Y apparaissent en effet plusieurs séquences de deux ou trois jours au cours desquelles l'enregistrement donne une hauteur à peu près constante et assez élevée (c'est à dire non compatible avec un débit de base), traduisant des périodes de fort gel continu.



LE GLACIER ZONGO ET SON SYSTEME DE MESURE EN 1993

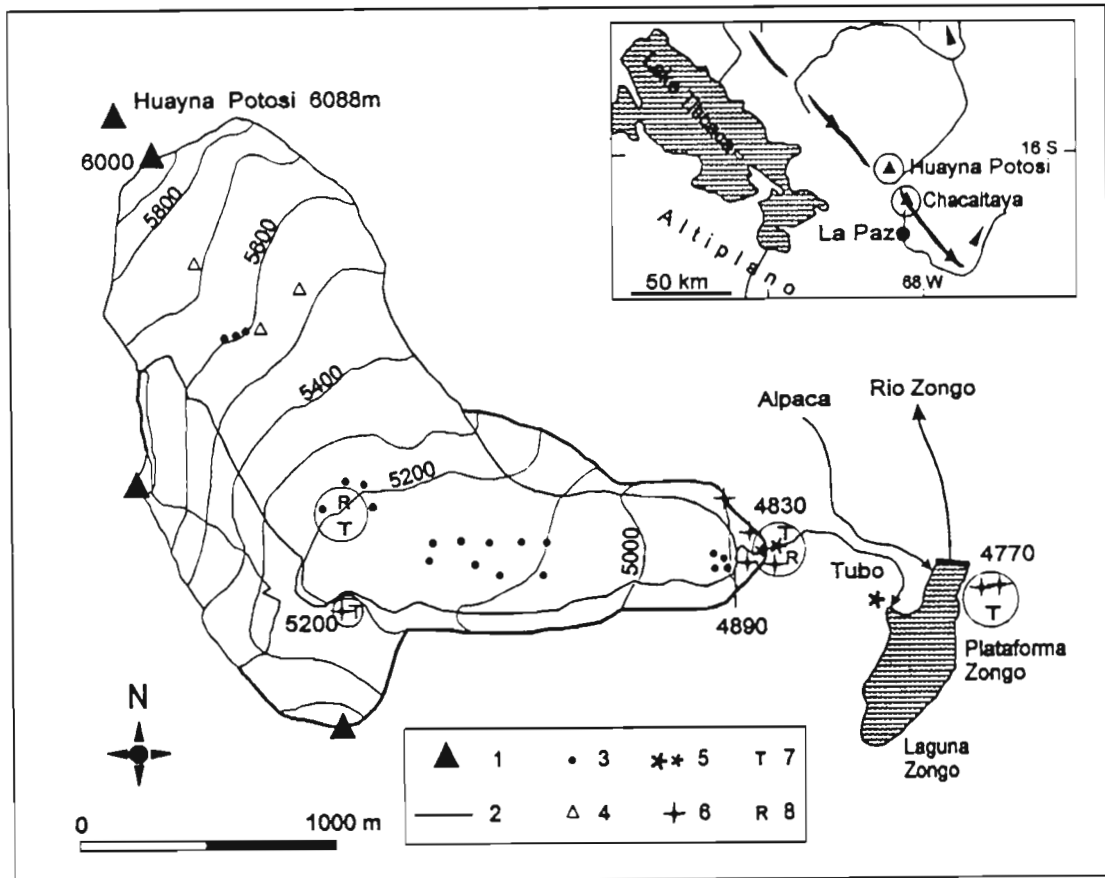


FIGURE 2

LEGENDE : 1. principaux sommets - 2. Limites de bassin versant - 3. Balises de bilan-vitesse - 4. Puits et crevasses pour les mesures du bilan d'accumulation - 5. stations hydrométriques - 6. Pluviomètres totalisateurs - 7. Thermographes sous abri - 8. Stations Campbell.

2.1.1.2. Enregistreur CHLOE :

Le 30/10/94 a été mis en place un enregistreur CHLOE, destiné à terme à remplacer l'enregistreur à flotteur. Une vérification préalable du CHLOE a montré que sa précision est bien de 1 centimètre à condition que la sonde soit immergée de plus de 40 centimètres. Dans le cas contraire, l'appareil semblait présenter une dérive (généralement une surestimation des cotes). Cette condition est de toute façon toujours réalisée dans le puits de la station limnigraphique.

Le CHLOE et le limnigraphe à bande vont fonctionner en parallèle pendant une durée d'au moins deux mois, de façon à pouvoir comparer les deux enregistrements. Une première confrontation sur le mois de septembre 94 s'est avérée satisfaisante, bien que de légères différences (de 1 centimètre ou 2) interviennent sur certaines pointes de crues. Ceci vient probablement du fait que le CHLOE est plus sensible aux variations de niveau que l'enregistreur à flotteur.

2.1.2. Station Campbell :

La station CAMPBELL est en place depuis février 93. Depuis cette date on dispose des enregistrements suivants, effectués avec un temps de scrutation de 15 secondes :

- un thermomètre fournit la température de l'air sous la forme d'une valeur moyenne sur

30 minutes. Au pas de temps journalier, le programme fournit également, les valeurs maximale et minimale, et les durées (en minutes) pendant lesquelles la température est supérieure à 0, 1, 2, 3 et 4°C.

- un pyranomètre LICOR donne une valeur demi horaire moyenne de la radiation du ciel (courtes longueurs d'onde), ainsi que les valeurs journalières suivantes : valeur maximale et durées (en minutes) pendant lesquelles la radiation est supérieure à 300, 500 et 700 W/m².

De plus le 20/05/94 a été installé un pluviomètre à augets basculeurs. Le principe de la calibration de l'appareil est le suivant : un auget bascule pour 7.3 cm³ d'eau. Sachant que la surface de captation est de 730 cm², on obtient un basculement (soit une impulsion transmise à la station CAMPBELL) pour 0.1 mm de pluie. L'appareil une fois mis en place a dû être recalibré pour correspondre réellement à ce fonctionnement. Cette recalibration a montré que ce pluviomètre est sujet au phénomène "d'emballlement des augets".

La station Campbell fournit une valeur de la pluie tombée demi-heure par demi-heure, ainsi qu'une valeur journalière totale. Le dispositif n'étant pas chauffant, il est clair qu'en cas de neige il se produit un décalage temporel entre l'épisode et son enregistrement. Cependant, du fait des fortes températures et radiations, on peut penser que la neige dans le pluviomètre fond en moins de 24 heures.

2.2. MESURES SUR LE GLACIER A 5200 METRES :

La station CAMPBELL sur le glacier à 5200 mètres a été installée au début du mois d'octobre 93 (voir figure 2). Sa configuration d'origine a beaucoup évolué depuis cette date, du fait de la mise en place de nouveaux appareillages, et de montées et descentes en bloc de tout le dispositif. Ces montées ou descentes sont destinées à compenser les variations du niveau de la surface pendant les périodes de forte accumulation ou de forte ablation. On fait alors coulisser vers le haut ou vers le bas tous les appareils, de façons à ce que ceux-ci gardent leur position relative les uns par rapport aux autres.

2.2.1. Configuration originale :

La station CAMPBELL telle qu'elle a été installée début octobre 93, a été programmée avec un temps de scrutation de 15 secondes. Elle fournit une valeur moyenne demi horaire de toutes les variables mesurées, ainsi qu'une valeur moyenne journalière, des valeurs maximales (pour les différentes radiations, le vent et l'humidité), et des valeurs minimales (pour l'albédo). Elle comprend les équipements suivants :

- 1 thermomètre " bas ", qui mesure la température de l'air à 30 centimètres du sol environ,
- 1 capteur de température et d'humidité (que nous appellerons thermomètre " haut "), qui donne la température de l'air et l'humidité relative à environ, 180 centimètres du sol,
- 1 anémomètre, qui mesure la vitesse du vent à environ 220 centimètres du sol (si celle-ci est supérieure à 0.40 m/s, l'anémomètre ne se mettant à tourner qu'à partir de ce seuil),
- 2 pyranomètres LICOR donnant, l'un la radiation du ciel de courtes longueurs d'onde, l'autre la radiation réfléchie du glacier de courtes longueurs d'onde. Le rapport de ces deux mesures fournit l'albédo. Les mesures sont effectuées à 80 centimètres du sol environ.
- 1 bilanmètre, qui fournit la radiation nette, c'est à dire le bilan de radiation sur toutes les longueurs d'onde. Cette mesure est effectuée à la même hauteur que les précédentes (80 centimètres du sol environ).

2.2.2. Appareillages remplacés :

Différents bilanmètres, possédant chacun des constantes de calibration propres, ont été utilisés pendant l'année hydrologique. L'historique des changements intervenus est le suivant :

- un premier bilanmètre du 20/10/93 au 07/12/93 (marque CAMPBELL, constante de calibration : 13.6 W/m²/10⁻³V, numéro de série 90172).
- un second bilanmètre du 07/12/93 au 02/02/94 (marque Middletown, constante de

calibration inconnue, numéro de série 1449, fonctionnant avec une chambre à air). Les mesures effectuées durant cette période ont été corrigées par comparaison avec le troisième bilanmètre installé par la suite.

- un troisième bilanmètre du 02/02/94 au 24/03/94 (marque CAMPBELL, constante de calibration : $12.3 \text{ W/m}^2/10^{-3}\text{V}$, numéro de série 89042).
- une interruption de mesure du 24/03/94 au 17/05/94, faute d'un appareil disponible.
- un quatrième bilanmètre depuis le 17/05/94 (marque CAMPBELL, constante de calibration : $13.3 \text{ W/m}^2/10^{-3}\text{V}$, numéro de série 93280).

2.2.3. Appareillages ajoutés :

Une "sonde à neige" a été installée le 17/05/94. Elle effectue toutes les demi-heures une mesure de la distance située entre sa partie basse et le sol. Quelques essais montrent que la précision de la mesure est de l'ordre de la rugosité de la surface de neige ou de glace. Après une chute de neige fraîche par exemple, on atteint une précision de 0.5 centimètre. Par contre, en cas de forte chute de neige, il arrive très fréquemment que la mesure soit perturbée. Un code d'erreur est alors stocké.

D'autre part, le 04/10/94 ont été mises en place 4 sondes destinées à mesurer la température de la neige/glace à différentes profondeurs. Elles ont été installées de la façon suivante :

- 3 sondes ont été placées sur une âme de bois cylindrique de 2,5 centimètres de diamètre, pouvant elle-même coulisser à l'intérieur d'un tube plastique de 3 mètres de long et 1,25 inch de diamètre intérieur (soit 2,8 cm), enfoncé de 2 mètres dans la glace. Le dispositif a été réglé de telle sorte que les sondes se trouvent à des profondeurs respectives de 30, 80 et 130 centimètres.
- la dernière, dite "sonde perdue", a été placée directement dans la glace à 80 centimètres de profondeur, de façon à pouvoir comparer les deux types de mesure.

2.2.4. Elévations et abaissements de la station :

Les périodes d'accumulation ou d'ablation obligent régulièrement à monter ou descendre l'ensemble de la station, de façon à retrouver à peu près la configuration initiale. Cette manipulation a été effectuée trois fois au cours de l'année :

- le 20/04/94, ajout de tubes de 2 mètres sur le mât central et les piquets périphériques, et élévation en bloc de 90 centimètres environ,
- le 08/09/94 descente en bloc de la station de 70 centimètres environ.
- le 25/10/94, descente en bloc de la station de 90 centimètres environ.

Durant les périodes de fortes chutes de neige, ou au contraire les périodes chaudes de grand beau temps, les phénomènes d'accumulation ou d'ablation s'accroissent considérablement, et peuvent se chiffrer en plusieurs dizaines de centimètres sur 2 ou 3 semaines. La configuration "originale" peut donc évoluer rapidement entre deux visites. Ainsi, se détachent au cours de l'année :

- deux périodes de fortes chutes de neige : première quinzaine de mars et première quinzaine d'avril, au cours desquelles le thermomètre bas s'est retrouvé pris dans la neige, et les pyranomètres à environ 30 centimètres de la surface,
- une période de forte ablation : de fin juillet à fin août, au cours de laquelle la station a atteint un niveau supérieur de 50 centimètres environ à son niveau "original".

2.3. MESURES A LA PLATAFORMA ZONGO :

La Plataforma Zongo, située à 4750 mètres d'altitude, à l'extérieur du bassin versant du glacier et à quelques centaines de mètres du front (voir figure 2), est équipée des matériels suivants :

- 1 thermographe à bandes papier, qui enregistre, depuis juillet 1991, la température de l'air en continu (Période de lacune : du 17/11/93 à 14h00, au 27/11/93 à 10h00),
- 1 pluviomètre à augets basculeurs, relié à un enregistreur à bande. Cet appareil a fonctionné sans période de lacune jusqu'au 20/12/93 (date à partir de laquelle il a été mis hors service, à la suite probablement d'une mauvaise manipulation).
- 1 pluviomètre de la COBEE, dont un relevé est effectué quotidiennement par l'observateur

de la Plataforma, à 7H00 du matin. La valeur lue, correspondant aux précipitations tombées entre 7H00 du matin la veille et 7h00 du jour courant, est affectée au jour de lecture. En saison des pluies, les précipitations se produisent généralement entre midi et la fin de l'après midi. Dans la majorité des cas, les données de pluies journalières correspondant à ce pluviomètre sont donc décalées d'une journée.

- En septembre 94 a été installé un pluviomètre totalisateur destiné essentiellement à contrôler les données du pluviomètre COBEE, et à fournir pour la Plataforma une mesure comparable avec celles des autres pluviomètres totalisateurs du bassin versant.

2.4. MESURES SUR LA MORAINÉ :

2.4.1. Mesures de températures :

La température de l'air sur la moraine à 5200 mètres est enregistrée depuis le 12/02/93 à l'aide d'un thermomètre OMNIDATA placé sous abri, qui fournit une température moyenne toutes les 2 heures avec une précision de 0.5°C. Pour l'année hydrologique 93-94, les périodes de lacune, nombreuses puisque les enregistrements ne peuvent être dépouillés sur place, sont les suivantes :

- du 07/09/93 à 13h00 au 23/09/93 à 13h00,
- du 07/12/93 à 11h00 au 02/02/94 à 13h00, les données ayant été perdues à cause des piles non changées (il est nécessaire de changer les piles chaque fois que l'appareil est descendu),
- du 24/03/94 à 11h00 au 30/03/94 à 09h00,
- du 17/05/94 à 11h00 au 20/05/94 à 09h00,
- du 19/07/94 à 09h00 au 21/07/94 à 09h00.

2.4.2. Mesures de précipitations :

Un réseau de pluviomètres totalisateurs permet d'étudier les précipitations (en particulier les gradients) en divers points du bassin versant (voir figure 2). Ces pluviomètres, répartis sur la moraine dans la zone d'ablation, ont une surface de captation de 2000 cm². Ils sont relevés régulièrement au début de chaque mois. Ils sont implantés dans les conditions suivantes :

- P1 : 5200 mètres, moraine droite,
- P2 : 4885 mètres, en amont du déversoir haut, démonté en septembre 94 et remis en place à 5100 mètres, moraine droite,
- P3 : 4945 mètres, moraine gauche,
- P4 : 4860 mètres, à gauche de la station limnimétrique,
- P5 : 4855 mètres, à droite station limnimétrique.

Notons qu'entre avril et août 94, certains de ces pluviomètres (P1 et P3) ont connu une dérive, se traduisant par une perte. Il s'agit probablement soit d'un problème de fuite, soit d'un problème d'évaporation, pouvant peut être survenir au moment du dégel.

2.5. RELEVÉS LIMNIMÉTRIQUES :

Des relevés de hauteur sont effectués chaque jour sur deux ouvrages alimentant la retenue de tête de la vallée du Zongo, qui drainent les eaux de certains glaciers environnants (chacun de ces ouvrages apparaissent sur la figure 2) :

- le TUBO, conduite qui récupère la majeure partie des eaux du glacier Zongo,
- le canal ALPACA, dans lequel coulent les eaux en provenance de la face Est du Huayna Potosi,

Les relevés limnimétriques sont effectués trois fois par jour à 7h00, 11h00 et 15h00 par l'observateur de la COBEE, sur une échelle pour le canal ALPACA, et au niveau d'un déversoir pour le TUBO.

Notons que l'observateur de la Plataforma Zongo, qui prend en charge ces mesures ainsi que celles du pluviomètre COBEE, a changé au cours du mois de novembre 1993. Si le précédent donnait satisfaction, des réserves importantes sont à émettre quant au nouveau. Même si cela est assez délicat à repérer dans les séries, des comparaisons de mesures faites lors de nombreuses visites ont montré que beaucoup de lectures n'ont pas été effectuées, ou ont été mal effectuées. La période de novembre 93 à janvier 94 est à ce titre à considérer avec beaucoup de précautions. Les lectures semblent meilleures par la suite, jusqu'en juin 94, mais sont de nouveau d'une qualité douteuse pour août 94.

2.6. MESURES GLACIOLOGIQUES SUR LE GLACIER :

Pour les mesures glaciologiques le glacier est équipé de la façon suivante [Francou et al., 1992] :

- 15 balises de bilan-vitesse dans la zone d'ablation entre 5200 et 4900 mètres,
- quelques balises destinées à mesurer l'accumulation en partie haute,
- 2 lignes de blocs peints perpendiculaires au glacier entre 5200 et 5100 m.

Les mesures effectuées sont les suivantes :

- un relevé mensuel des balises (mesure de bilan),
- une mesure annuelle de l'accumulation en partie haute, au niveau des balises, et dans des crevasses,
- une mesure topographique annuelle de chaque balise et de chaque bloc peint (angles horizontaux et verticaux), à partir de quatre bases situées sur la moraine droite,
- un positionnement topographique annuel du front.

3. TEMPERATURES DE L'AIR :

3.1. VALEURS JOURNALIERES :

3.1.1. Températures moyennes :

Le tableau 1 donne les températures moyennes journalières à la station hydrométrique (4830 mètres), mesurées par la station CAMPBELL, ainsi que les moyennes mensuelles. Les figures 3 et 4 représentent les températures moyennes journalières respectivement à la Plataforma (4750 mètres) et à la station hydrométrique (4830 mètres), et à 5200 mètres sur le glacier (température "haute") et la moraine.

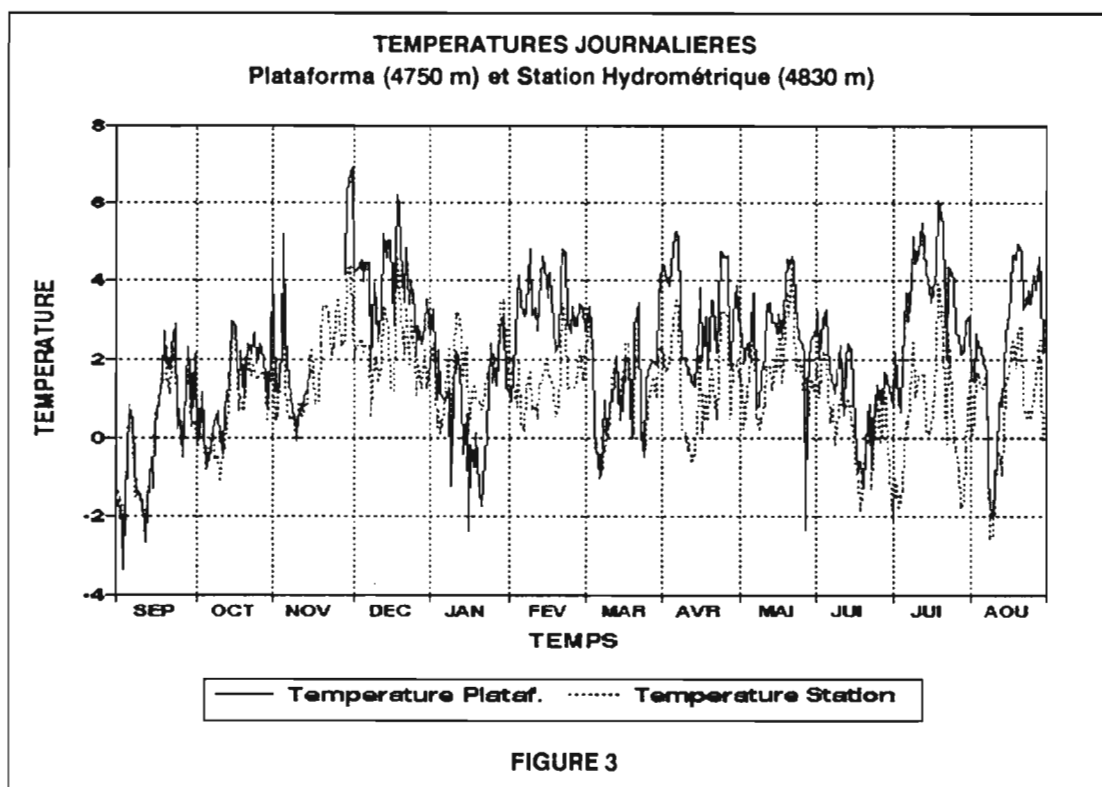


FIGURE 3

Les températures enregistrées par les appareils électroniques (températures à 4830 mètres et à 5200 mètres sur le glacier (stations CAMPBELL), et à 5200 mètres sur la moraine (OMNIDATA)) ne semblent pas présenter d'anomalies particulières. Les températures données par le thermographe de la Plataforma ne semblent pas non plus a priori poser de problème particulier.

L'étude des figures 3 et 4 permet de faire les observations suivantes :

- dans les quatre cas présentés, les températures moyennes journalières évoluent au cours de l'année dans un intervalle d'un peu moins d'une dizaine de degrés, cet intervalle étant décalé d'environ 3 degrés entre 4750 mètres (de -3 à +7°C) et 5200 mètres (de -6 à +3°C)

- la saisonnalité des températures moyennes journalières est peu marquée à 4750 et

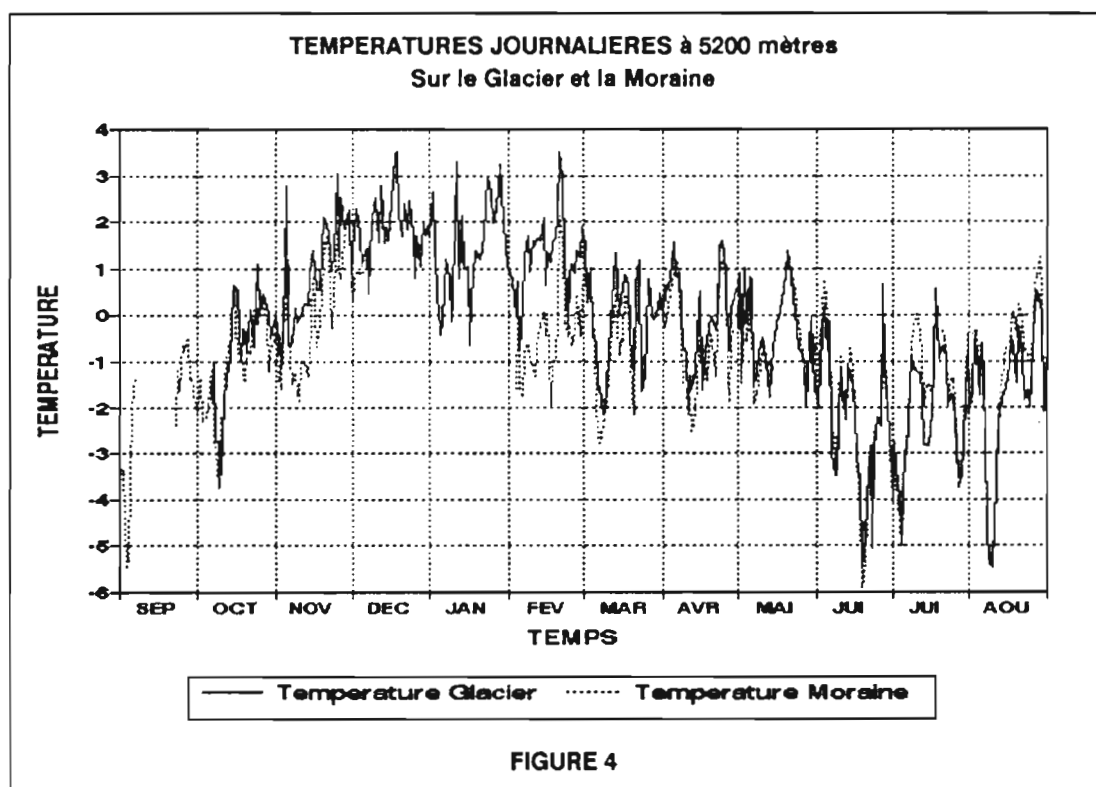
4830 mètres. Par exemple, la gamme de valeur de 0 à 2°C se rencontre indifféremment plusieurs jours par mois toute l'année. Ou encore, les valeurs journalières les plus fortes obtenues en juillet, théoriquement un mois froid, sont comparables à celles de décembre, mois théoriquement chaud.

TABLEAU 1
TEMPERATURES MOYENNES JOURNALIERES A LA STATION
HYDROMETRIQUE (4830 mètres)

	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUI	JUI	AOU
1	-1,32	0,43	1,80	2,85	1,89	1,74	1,45	2,16	1,92	1,16	-0,91	1,52
2	-1,51	-0,31	0,44	2,11	2,49	1,38	1,97	2,33	1,43	1,55	-2,14	-0,04
3	-1,93	0,16	0,63	2,33	0,27	0,76	2,58	1,93	1,43	1,90	-1,00	0,43
4	-2,48	0,81	2,34	2,56	0,75	1,96	3,07	1,67	0,22	1,05	-1,81	1,70
5	-1,45	-0,79	4,43	2,11	0,10	0,33	1,92	1,86	1,14	2,23	-1,69	1,63
6	0,89	-0,56	1,16	2,40	0,25	0,18	-0,19	2,94	1,52	1,86	-1,26	1,29
7	0,38	-0,21	0,45	2,33	1,22	1,22	-0,52	3,26	2,70	1,28	0,46	1,23
8	-1,50	0,32	0,57	0,52	2,32	1,74	-0,80	3,58	2,79	0,37	0,28	1,72
9	-1,51	-0,57	0,27	2,10	-0,09	0,74	-0,99	3,09	0,57	0,93	1,76	-0,59
10	-1,39	-0,42	-0,09	2,13	1,06	0,83	-0,26	0,11	0,17	-0,22	2,51	-2,53
11	-1,88	-1,14	0,94	1,38	3,12	0,51	-0,19	0,12	0,47	0,62	1,02	-2,52
12	-2,21	-0,42	0,57	1,81	3,23	1,35	0,46	-0,32	0,87	1,21	1,57	-0,45
13	-1,48	-0,19	0,89	3,38	2,66	1,46	1,32	-0,07	1,79	0,64	1,60	-0,33
14	-0,60	0,87	0,88	3,03	1,56	2,07	1,72	-0,66	1,87	0,73	1,67	-0,55
15	-0,57	1,42	2,05	2,61	2,35	1,60	1,96	-0,36	1,17	1,04	0,15	-0,97
16	0,68	2,50	2,31	1,18	0,09	1,64	0,91	1,06	2,03	0,54	0,10	1,30
17	0,85	2,58	0,85	1,19	0,72	1,17	1,57	2,16	1,70	-0,42	0,23	1,75
18	1,83	0,69	0,95	4,63	1,39	0,56	1,12	0,12	2,87	-1,01	1,18	2,06
19	2,42	1,12	2,42	3,89	0,97	0,75	2,45	1,14	1,36	-1,02	2,11	2,54
20	1,52	0,69	3,33	3,16	0,95	1,86	2,41	0,45	1,94	-1,89	4,01	1,77
21	1,10	0,65	3,40	2,13	0,71	3,50	0,38	1,85	3,71	-0,77	3,21	2,65
22	1,87	2,08	3,15	3,36	0,78	2,85	0,07	1,27	3,08	-0,02	2,43	2,88
23	2,44	1,56	2,11	1,82	1,59	1,26	2,85	0,50	4,40	0,85	-0,16	0,76
24	0,17	1,93	2,37	3,06	1,96	1,33	3,20	1,50	2,92	-1,31	2,70	0,52
25	0,46	1,58	3,58	2,16	2,18	1,36	0,29	3,26	1,71	-0,44	1,93	0,77
26	0,04	1,47	2,98	1,07	2,12	1,29	-0,52	3,22	2,06	1,08	-0,02	0,45
27	0,49	1,60	2,33	1,90	1,33	1,63	-0,06	3,05	1,46	-0,11	-0,24	1,04
28	1,76	1,70	2,49	1,25	3,51	2,29	0,85	0,46	0,86	-0,01	-0,77	1,45
29	0,88	1,24	4,09	2,28	3,53		1,30	0,67	-0,63	1,53	-1,80	2,57
30	0,29	0,38	4,42	1,25	1,97		1,57	1,95	0,18	-0,18	-1,66	1,46
31		1,67		1,52	1,65		1,02		1,54		-0,27	-0,13
Mo	-0,06	0,71	1,84	2,34	1,57	1,38	1,10	1,45	1,67	0,50	0,49	0,81

TABLEAU 1 : températures moyennes journalières en °C; MO = moyennes mensuelles en °C.

Cette saisonnalité est plus évidente à 5200 mètres, avec des maxima en décembre et des minima en juin nettement marqués. Les valeurs obtenues à cette altitude semblent moins irrégulières, et mettent bien en évidence deux tendances saisonnières, une augmentation de juillet à décembre et une diminution de janvier à juin, qui ne sont pas aussi nettes à 4750 et 4830 mètres.



3.1.2. Minima et maxima :

La figure 5 montre les températures minimales et maximales journalières mesurées à 5200 mètres sur le glacier (température haute) :

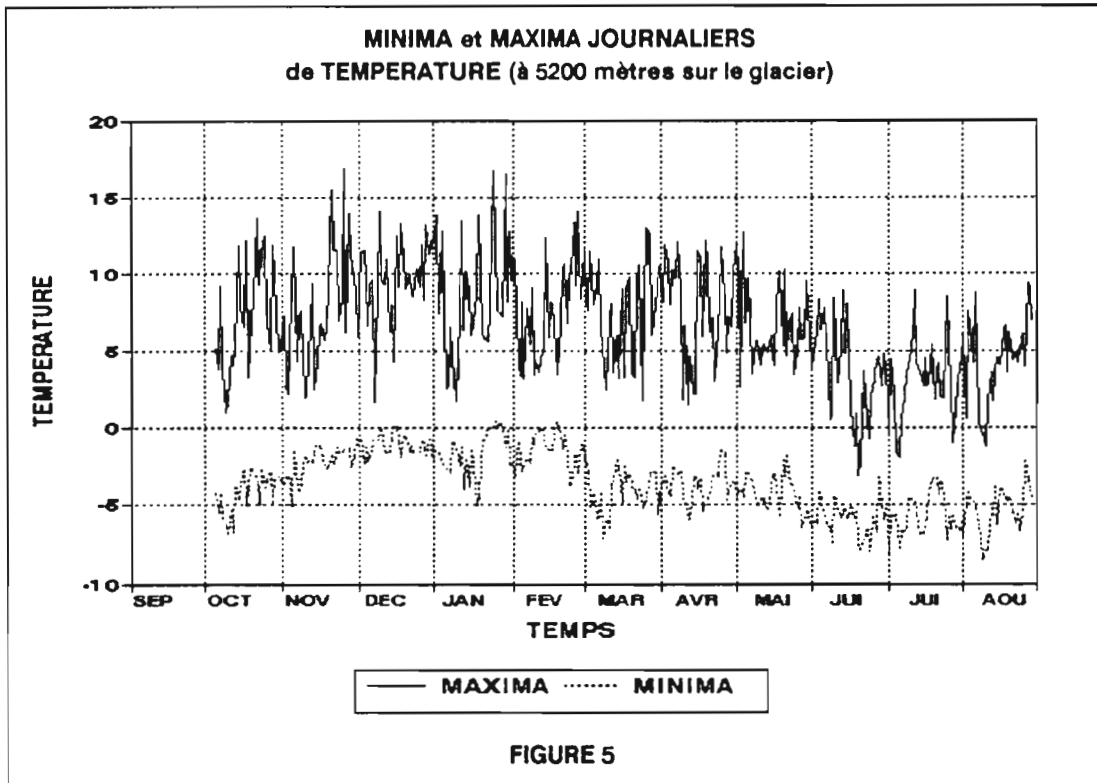
- Les minima sont compris entre **-8** et **0.5°C** et les maxima entre **-3** et **+17°C**,
- Une légère saisonnalité est visible pour les deux types de valeurs, peut-être plus évidente pour les minima, et permet de bien distinguer les quatre mois les plus chauds (de novembre à février) des trois mois les plus froids (de juin à août).
- L'amplitude thermique journalière varie entre 2.3 et 18.3°C, et a une moyenne annuelle de **10.3°C**. Elle est de l'ordre de cette moyenne à peu près tout le temps, sauf pendant les périodes vraiment froides (deuxième quinzaine de juin) au cours desquelles elle est un peu atténuée.

Pour les autres lieux de mesures, les minima et maxima obtenus dans l'année sont les suivants :

- à 4830 mètres (station CAMPBELL) : valeur minimale **-6.2°C**, valeur maximale **10.7°C**. L'amplitude thermique journalière moyenne sur l'année est **6.5°C**, et varie entre **2.4** et **12.3°C**.
- à 5200 mètres sur la moraine (OMNIDATA) : valeur minimale **-9°C**, valeur maximale **7°C** (valeurs moyennes sur 2 heures),
- à la Plataforma (thermographe) : valeur minimale **-6.8°C**, valeur maximale **13.2°C**.

On remarque une différence sensible entre les résultats des deux stations CAMPBELL. A 5200 mètres (sur le glacier), l'amplitude thermique est plus marquée, et la valeur maximale absolue sur

l'année (17°C) est plus importante que celle obtenue à 4830 mètres (10.7°C). Ceci s'explique par le fait que la station à 5200 mètres est située sur le glacier, contrairement à l'autre, qui est en place sur la moraine. Sur le glacier les contrastes thermiques sont plus forts, à cause de refroidissements nocturnes plus importants (nous y reviendrons dans la suite), et des "effets de four" pendant les pointes de radiation durant la journée.



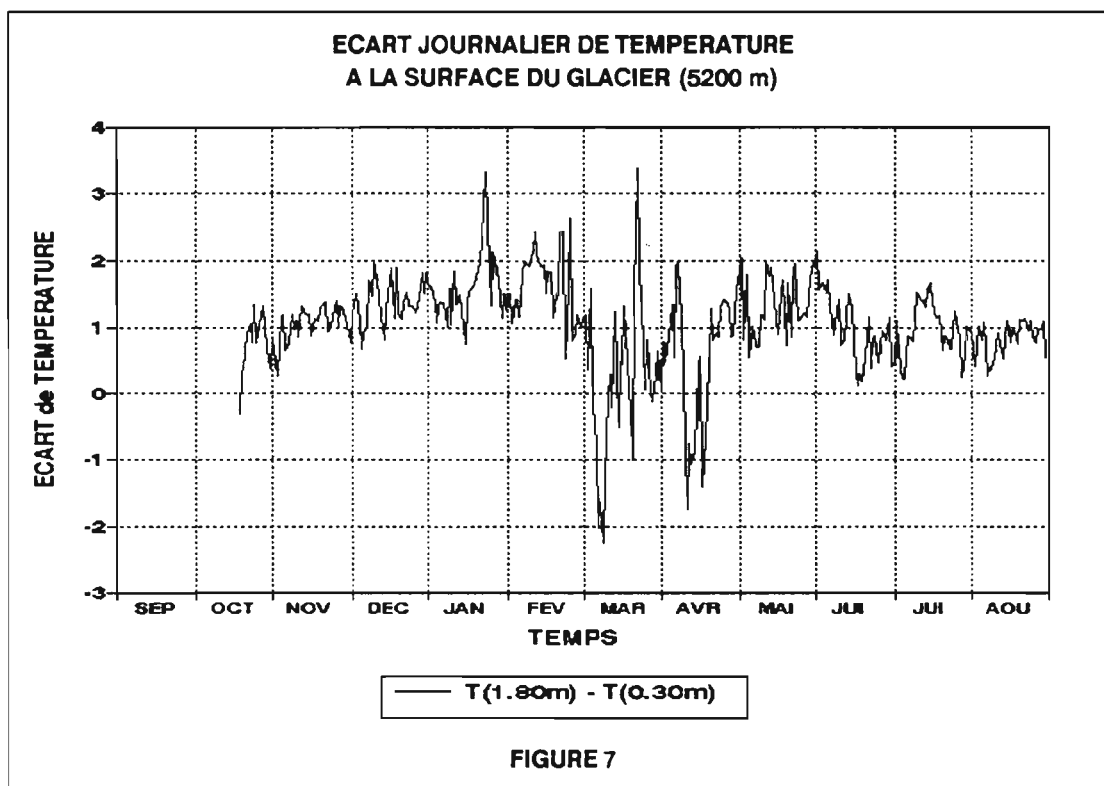
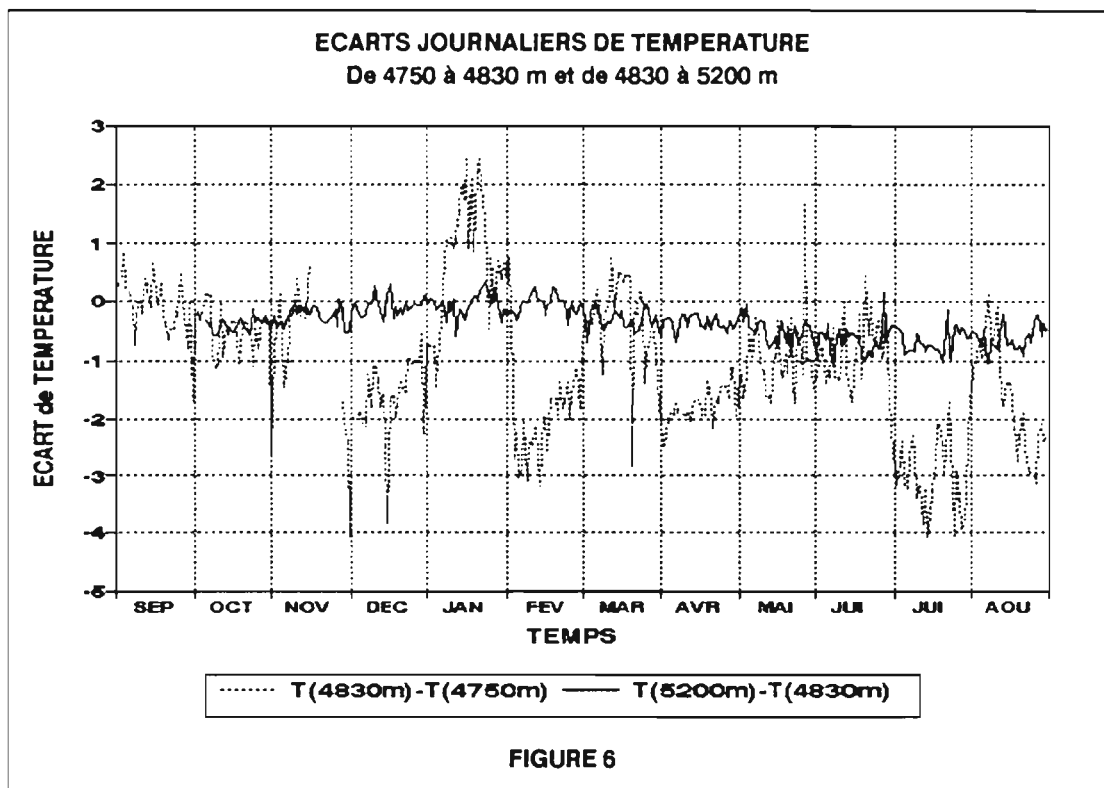
3.1.3. Gradients journaliers :

La figure 6 présente les écarts moyens journaliers de température entre la Plataforma et la station hydrométrique à 4830 mètres d'une part, et entre la station hydrométrique et le glacier à 5200 mètres (température haute) d'autre part.

On voit que les écarts entre 4830 et 5200 mètres ne dépassent guère 1.2°C (soit un gradient journalier maximal de 0.7°C pour 100 mètres), et sont plutôt plus marqués en saison froide qu'en saison chaude. Par contre, les écarts entre 4750 et 4830 mètres sont beaucoup plus irréguliers et présentent même certaines caractéristiques suspectes. En effet, il semble qu'il n'existe guère de relation entre la température à la Plataforma et la température à 4830 mètres. Ceci pourrait mettre en lumière un problème d'appareillage, qui n'apparaît pas de façon claire au simple examen des températures mesurées à l'aide du thermographe. En effet, à partir du début du mois de novembre 93, on constate souvent sur la figure 6 un décrochement (vers le début de chaque mois, diminution brutale en général), qui pourrait correspondre au changement de bande (un décalage de 1/2 millimètre en hauteur entraîne un décalage de 1 degré sur tout le mois).

La figure 7 présente les écarts moyens journaliers à 5200 mètres sur le glacier, entre les températures haute et basse, respectivement à 180 et 30 centimètres du sol, dans la configuration initiale de la station. Ces écarts sont généralement compris dans une fourchette de 0 à 2 degrés. La figure 7 met cependant en évidence quelques anomalies, notamment pendant les mois de mars et avril, durant lesquels l'écart Haute-Tbasse est négatif. Ceci correspond à deux périodes de fortes chutes de neige, au cours desquelles le thermomètre bas s'est retrouvé pris dans la neige, et indique donc des températures moyennes plus élevées que celles de l'air. On constate ainsi que les grosses chutes de

neige du début du mois de mars ont fondu pendant ce même mois. Pour le mois d'avril, on voit nettement la marque des chutes de neige importantes qui ont eu lieu entre le 10 et le 15, ainsi que l'effet de la remontée en bloc de la station le 20. Notons aussi que les écarts entre la mi-juillet et la fin août sont probablement sous-estimés. En effet, au cours de cette période, une forte ablation a placé le thermomètre bas à quasiment 1 mètre du sol.



3.2. VALEURS MENSUELLES ET ANNUELLES:

3.2.1. Températures moyennes :

Le tableau 2 présente les moyennes mensuelles des températures journalières sur différents sites (température haute sur le glacier à 5200 mètres, sur la moraine à 4830 et 5200 mètres, et à la Plataforma) pour l'année hydrologique 93-94, ainsi que pour les années 92-93 (T4830 et Tpltf) et 91-92 (Tpltf). Ces résultats pour l'année 93-94 sont reportés graphiquement sur la figure 8. Le tableau 3 donne les écarts types mensuels des températures journalières sur les mêmes sites.

TABEAU 2
TEMPERATURES JOURNALIERES : MOYENNES MENSUELLES

	T52b 93-94	T52h 93-94	T4830 93-94	T4830 92-93	Tmor 93-94	Tpltf' 93-94	Tpltf' 92-93	Tpltf 91-92
SEP			-0,06		-2,32	-0,05	0,3	0,9
OCT	-0,87	-0,72	0,74		-1,11	1,24	0,5	2,6
NOV	-0,12	0,94	1,94		0,10	2,29	1,4	2,3
DEC	0,49	1,86	2,24		0,81	3,95	-0,1	2,3
JAN	-0,24	1,33	1,57		0,80		0,5	1,3
FEV	-0,44	1,23	1,40		-0,50	3,40	1,5	1,1
MAR	-0,33	-0,08	1,06	0,51	-0,71	1,51	0,7	2,4
AVR	-0,51	-0,04	1,48	1,55	-0,54	3,25	2,0	2,6
MAI	-1,59	-0,26	1,65	1,51	-0,46	2,64	2,3	3,1
JUI	-3,31	-2,26	0,44	1,15	-2,08	1,31	2,6	0,9
JUI	-3,13	-2,20	0,49	0,36	-2,09	3,45	0,7	0,5
AOU	-2,46	-1,64	0,82	-0,29	-1,23	2,43	0,1	-0,8
MOYENNE	-1,16	-0,17	1,14	0,90*	-1,00	2,16	1,0	1,6

TABEAUX 2 et 3 : T52b = Température à 5200 mètres sur le glacier à 30 centimètres du sol, T52h = idem à 180 centimètres, T4830 = température à 4830 mètres, Tmor = Température sur la moraine à 5200 mètres, Tpltf = Température à la Plataforma (Pour 93-94, Tpltf = moyenne des valeurs mesurées, pour 91-92 et 92-93, Tpltf = (Tmin + Tmax) / 2, après vérification que cela revient au même (non montré ici mais cependant vérifié)), * = moyenne du 17/02/93 au 31/08/93.

Ces figures et tableaux permettent de formuler les commentaires suivants :

- On voit ici encore que la saisonnalité des températures s'accroît assez nettement avec l'altitude. Elle est ainsi beaucoup plus marquée à 5200 qu'à 4830 mètres. Dans tous les cas, le mois le plus chaud est décembre 93, le mois le plus froid est septembre 93.

- Les écarts de température entre la moraine et le glacier à 5200 mètres sont plus marqués en saison humide, durant laquelle ils sont de l'ordre de 1 degré, qu'en saison sèche, durant laquelle ils sont inférieurs à 0.5 degrés. Ces écarts peuvent peut-être s'expliquer, en été, d'une part par le fait qu'une couche de neige fraîche existe en permanence sur le glacier, maintenant un albédo fort, alors qu'elle a tendance à fondre très rapidement sur la moraine, et d'autre part par le rôle de tampon joué par l'humidité, nous y reviendrons dans la suite.

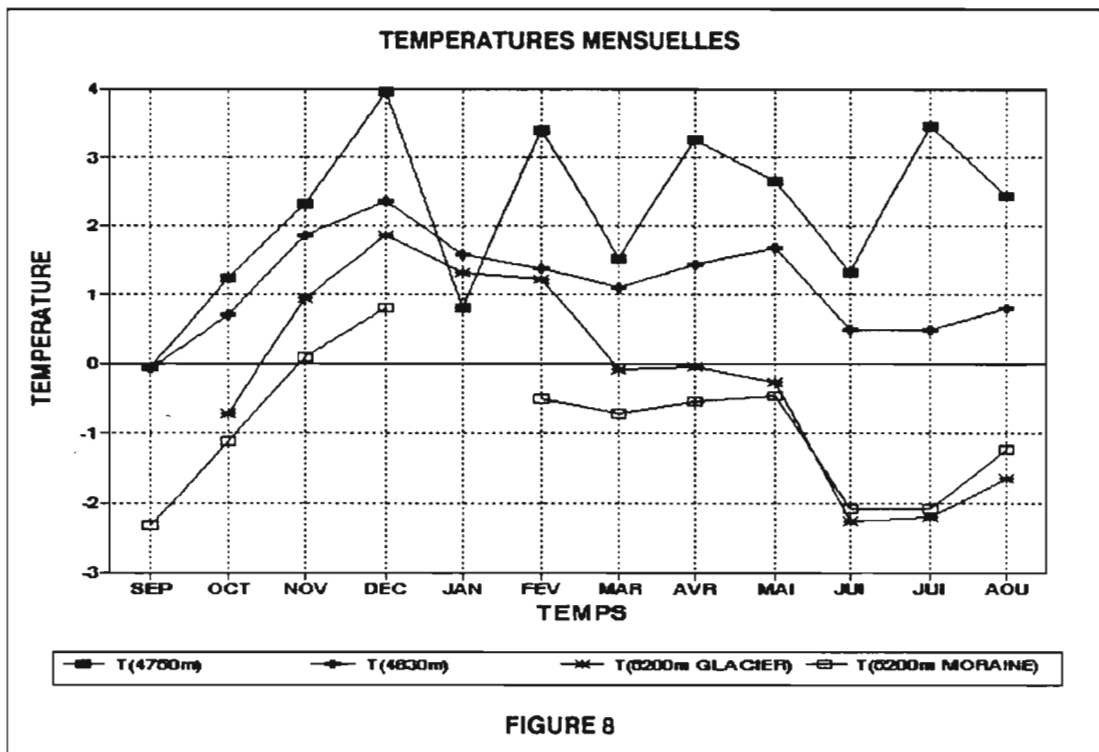
- L'examen de la courbe des températures du thermographe de la Plataforma irait plutôt dans le sens d'une confirmation du caractère suspect de ces mesures. En effet, on ne peut y distinguer de saisonnalité claire, alors que tous les autres profils en présentent une. Les problèmes semblent venir de trois mois particuliers : janvier, mars et juillet 94, qui paraissent anormalement froids. En particulier, le mois de janvier apparaît comme un des mois les plus froids de l'année. Cependant, on peut aussi considérer que cette courbe n'est pas incompatible avec les autres, puisqu'elle possède à peu près les mêmes variations, mais beaucoup plus marquées. Cela pourrait s'expliquer par le fait que la Plataforma

est située à proximité d'un col venté, contrairement aux autres sites de mesures qui sont plus protégés des vents montant de la vallée Zongo, apportant de l'air amazonien chaud et humide.

- Les courbes obtenues à Plataforma et à 4830 mètres ne présentent qu'un seul mois durant lequel la température moyenne est négative (septembre 93), alors que celles obtenues à 5200 mètres en présentent respectivement sept (sur le glacier) et neuf (sur la moraine).

TABLEAU 3
TEMPERATURES JOURNALIERES : ECARTS TYPES MENSUELS

	T52b	T52h	T4830	Tmor	Tpltf
SEP				1,66	1,71
OCT	0,41	1,14	1,01	1,09	1,11
NOV	0,96	1,10	1,32	1,32	2,05
DEC	0,66	0,69	0,90	0,26	1,22
JAN	0,90	1,04	1,03		1,45
FEV	0,81	0,87	0,73	0,96	1,00
MAR	0,89	1,10	1,19	1,19	1,75
AVR	0,63	0,96	1,27	1,11	1,28
MAI	0,95	0,91	1,65	0,93	1,37
JUI	1,03	1,45	1,03	1,65	1,26
JUI	1,07	1,19	1,64	1,43	1,50
AOU	1,35	1,47	1,36	1,67	1,88
ANNUEL	0,88	1,76	1,19	1,20	1,46



- Les écarts types mensuels des températures journalières sont à peu près tous compris entre 0.5 et 2 degrés. De façon générale, ils sont plutôt plus marqués en saison sèche qu'en saison humide. Enfin il n'est pas évident de montrer pour ces écarts types des variations systématiques entre le glacier et la moraine, ou en fonction de l'altitude.

- Les moyennes annuelles sur 93-94 sont, à la Plataforma, sur la moraine à 4830 et

5200 mètres et sur le glacier à 5200 mètres (température haute), respectivement de 2.16, 1.14, -1.00 et -0.17°C. Il est assez délicat de comparer ces chiffres à ceux des années précédentes. En effet, il n'y a pas de données pour T4830 de septembre 92 à février 93, et la moyenne annuelle obtenue à la Plataforma semble anormalement élevée, pour la raison que nous venons d'évoquer précédemment. Si l'on s'en tient à ces chiffres, on obtient une température annuelle du même ordre de grandeur à la station hydrométrique 4830 mètres en 93-94 que l'année précédente (respectivement 1.14 et 0.90°C), et supérieure à la Plataforma par rapport aux deux années précédentes (respectivement 2.16, 1.00 et 1.6°C).

3.2.2. Minima et maxima :

Le tableau 4 donne les moyennes mensuelles des minima et maxima de températures journaliers à 5200 mètres sur le glacier et à 4830 mètres. Ces chiffres sont illustrés sur la figure 9.

La différence des résultats s'explique surtout par la différence de situation des deux stations de mesure - l'une étant située sur la moraine, l'autre sur le glacier - probablement plus que par l'altitude. En effet, même si la station sur le glacier est située près de 400 mètres plus haut que la station hydrométrique, les maxima y sont sensiblement plus élevés (de 2 à 3 degrés en général), et les minima sensiblement plus bas (également de 2 à 3 degrés). L'amplitude thermique sur le glacier en ce point est donc plus marquée que sur la moraine, ce qui vient surtout (comme nous l'avons vu au paragraphe 3.1.2.) :

- d'un plus fort refroidissement nocturne par rayonnement, même si paradoxalement on peut penser que le glacier devrait jouer un rôle d'inertie. Les moyennes des minima sur le glacier sont toujours inférieures à celles sur la moraine. En moyenne sur l'année, cet écart se chiffre à 2.04°C entre 4830 et 5200 mètres. A titre de comparaison, l'écart journalier moyen sur l'année entre les températures moyennes des deux sites est environ 1.3°C. D'autre part à 5200 mètres sur le glacier, la moyenne annuelle des températures minimales est -3.62°C, soit 3.45°C de moins que la température moyenne annuelle, et à 4830 mètres la moyenne annuelle des températures minimales est -1.58°C, soit 2.72°C de moins que la température moyenne annuelle.

TABLEAU 4
MINIMA ET MAXIMA JOURNALIERS DE
TEMPERATURES : MOYENNES MENSUELLES

	Max T52h	Min T52h	Max T4830	Min T4830
SEP			4,06	-2,94
OCT	6,91	-4,24	4,45	-1,69
NOV	7,83	-2,23	5,33	-0,61
DEC	9,50	-1,13	5,94	-0,01
JAN	8,75	-1,68	4,88	-0,73
FEV	7,44	-1,50	4,34	-0,73
MAR	7,52	-4,01	4,63	-1,40
AVR	7,63	-3,73	4,88	-0,94
MAI	6,77	-4,14	5,74	-1,55
JUI	3,60	-5,96	4,81	-2,86
JUI	3,01	-5,56	4,96	-2,90
AOU	4,36	-5,34	5,41	-2,58
MOYENNE	6,68	-3,62	4,96	-1,58
EC. TYPE	3,71	2,05	2,98	2,51

TABLEAU 4 : mêmes notations que pour le tableau 2.

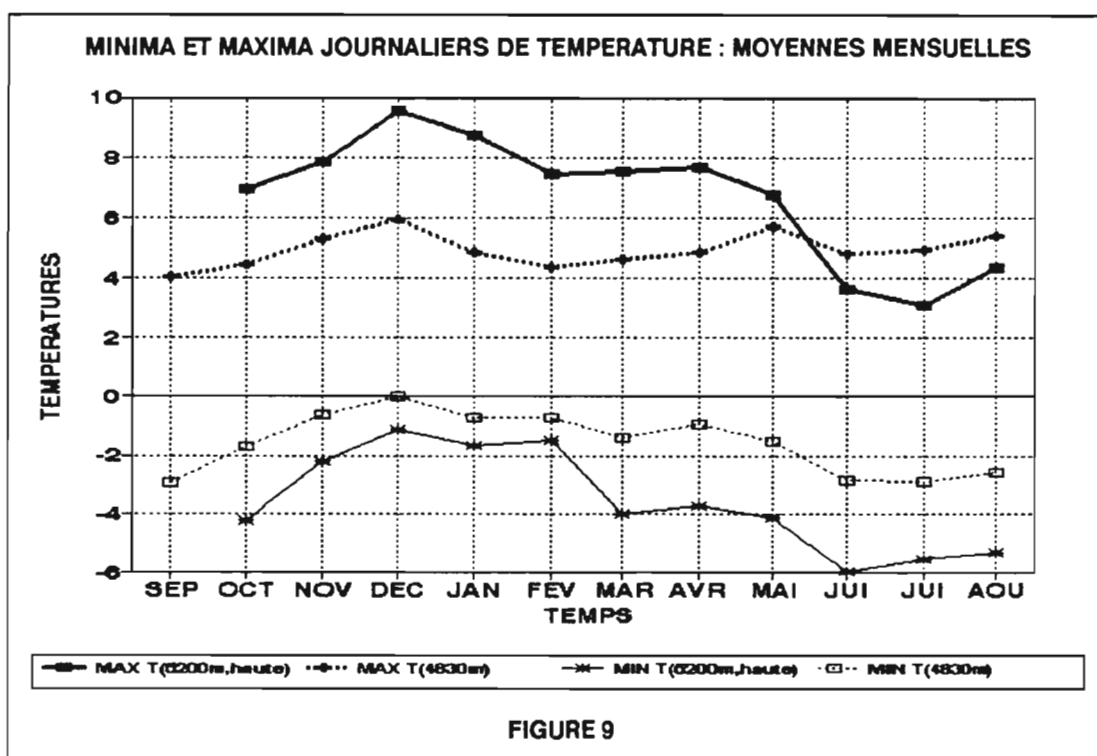
- d'un "effet de four" sur le glacier pendant les pointes de radiations diurnes, qui a une influence évidente sur les températures maximales, pratiquement toujours supérieures, sauf pendant les

mois d'hiver, à celles enregistrées plus bas sur la moraine. La moyenne annuelle des températures maximales à 5200 mètres sur le glacier est **6.68°C**, soit 6.85°C de plus que la température moyenne annuelle, et la moyenne annuelle des températures maximales à 4800 mètres est **4.96°C**, soit 3.82°C de plus que la température moyenne annuelle.

Notons également la très faible saisonnalité des maxima moyens mensuels à 4830 mètres, à côté de celle, très nette, obtenue à 5200 mètres. En ce qui concerne les minima, la saisonnalité est nette dans les deux cas, et très marquée à 5200 mètres.

De ce qui précède, on retiendra essentiellement deux choses :

- les contrastes thermiques semblent plus prononcés sur le glacier que sur la moraine,
- on peut avoir des températures maximales élevées toute l'année, qu'elles présentent ou non un caractère saisonnier. Les températures minimales quant à elles, ont une saisonnalité bien nette, et permettent de bien distinguer des périodes hivernales de fort gel (pendant lesquelles on enregistre des valeurs inférieures à -5 °C) de périodes estivales durant lesquelles il gèle peu, ce qui est déterminant du point de vue de la fonte globale sur le glacier.

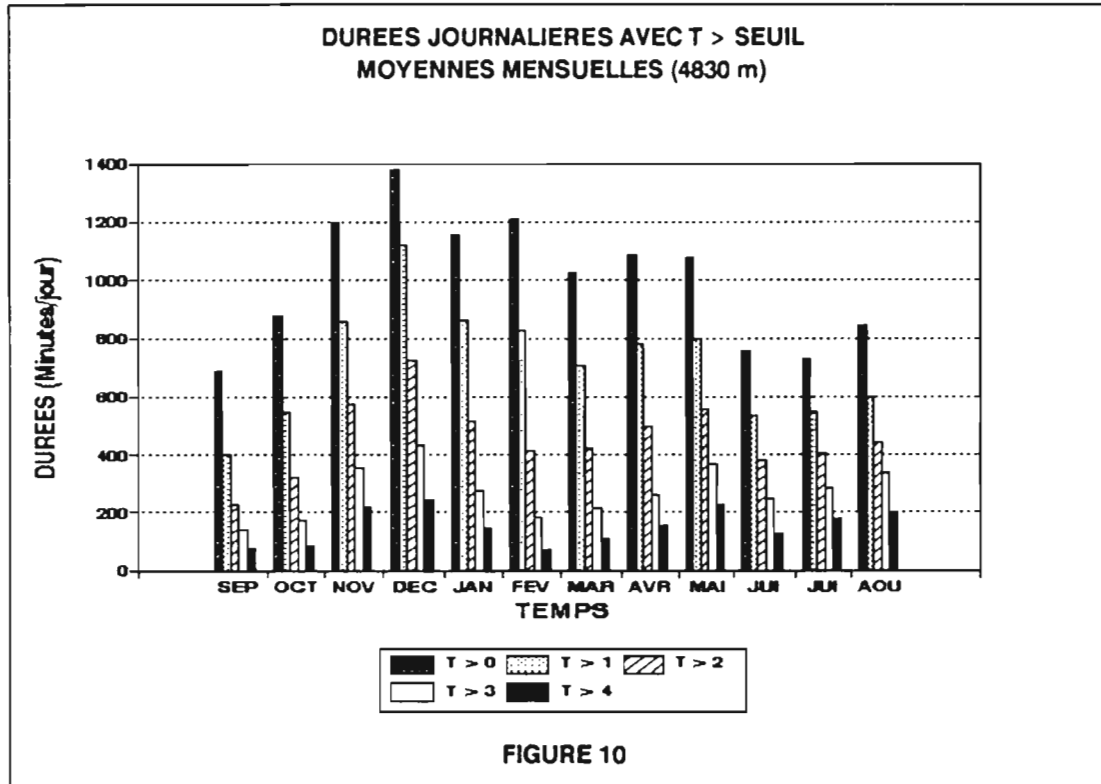


3.2.3. Durées avec la température supérieure à un seuil :

Le tableau 5 donne les moyennes mensuelles des durées journalières durant lesquelles la température est supérieure aux seuils 0, 1, 2, 3, et 4 degrés, à la station hydrométrique à 4830 mètres. Ces résultats sont illustrés graphiquement sur la figure 10.

La saisonnalité des durées pendant lesquelles il ne gèle pas est nettement marquée. Ces durées correspondent en moyenne à la quasi totalité de la journée en décembre, alors qu'elles ne sont plus que de l'ordre de la demi journée en juin et juillet. Par contre, plus on augmente le seuil de température, plus cette saisonnalité a tendance à s'effacer. Avec les seuils 2, 3 et 4 degrés, on obtient des durées moyennes assez similaires entre novembre et décembre, et juin et août. Si l'on cherche un paramètre vraiment saisonnier à cette altitude pour expliquer le débit, il semble donc, au niveau mensuel, que les durées pendant lesquelles la température est supérieure à 0°C sont plus intéressantes

que celles avec un seuil plus élevé. Notons cependant que ceci ne serait pas forcément le cas plus haut sur le glacier, à cause du caractère plus saisonnier des maxima de température, comme nous l'avons vu au paragraphe précédent.



**TABEAU 5
DUREES JOURNALIERES AVEC T > SEUIL : MOYENNE MENSUELLES**

	d(T>0)	d(T>1)	d(T>2)	d(T>3)	d(T>4)
SEP	690	401	230	140	74
OCT	877	547	320	170	83
NOV	1200	857	576	352	220
DEC	1377	1119	723	432	240
JAN	1155	861	516	273	145
FEV	1204	825	415	182	71
MAR	1025	705	421	215	109
AVR	1083	777	496	261	152
MAI	1079	796	557	367	226
JUI	756	532	380	249	124
JUI	731	550	405	284	177
AOU	842	596	439	332	199
MOYENNE	999	713	457	272	153
Ec. TYPE	372	384	325	250	187

TABEAU 5 : d(T>n) = durée en minutes avec T > n degrés.

3.2.4. Gradients :

Le tableau 6 présente les gradients de températures entre 5200 mètres sur le glacier et 4830 mètres, entre 4830 et 4750 mètres (Plataforma), et entre les températures haute et basse à 5200 mètres sur le glacier, en moyennes mensuelles des valeurs journalières.

Les gradients "avec l'altitude" (dans les deux premières colonnes du tableau 6) suggèrent les remarques suivantes :

- les gradients entre 4830 et 5200 mètres sont toujours négatifs et plus réguliers que ceux entre 4830 et 4750 mètres, qui sont plus dispersés, plus prononcés et parfois positifs .
- pour ces gradients apparaît une saisonnalité, puisqu'ils sont généralement plus marqués en hiver qu'en été.
- les valeurs faisant intervenir les températures à la Plataforma sont à considérer avec précaution, pour les mêmes raisons que celles évoquées aux paragraphes 3.1.2 et 3.2.2 (les mois de novembre 93, et janvier, mars et juin 94 peuvent apparaître comme des "anomalies").
- les valeurs moyennes annuelles sont respectivement de **-0.36** et **-1.27 °C/100 mètres** entre 5200 et 4830 mètres, et 4830 mètres et la Plataforma, soit un gradient de **-0.52°C/100 mètres** entre 5200 mètres et la Plataforma. Ce chiffre est voisin de ceux obtenus les années précédentes.

TABLEAU 6
GRADIENTS JOURNALIERS DE TEMPERATURE :
MOYENNES MENSUELLES

	GRA52/48	GRA48/47	TH-TB
SEP		-0,01	
OCT	-0,39	-0,63	0,15
NOV	-0,27	-0,45	1,06
DEC	-0,10	-2,13	1,37
JAN	-0,06	0,92	1,57
FEV	-0,05	-2,37	1,67
MAR	-0,31	-0,37	0,25
AVR	-0,41	-2,22	0,47
MAI	-0,52	-1,24	1,33
JUI	-0,73	-1,09	1,05
JUI	-0,73	-3,70	0,93
AOU	-0,66	-2,02	0,82
MOYENNE	-0,36	-1,27	1,02
EC. TYPE	0,29	1,50	0,54

TABLEAU 6 : GRA52/48 = gradient de température pour 100 mètres entre 5200 mètres sur le glacier et 4830 mètres, GRA48/47 = idem entre 4830 mètres et la Plataforma (4750 mètres), TH-TB = écart entre la température "haute" et la température "basse" à 5200 mètres sur le glacier.

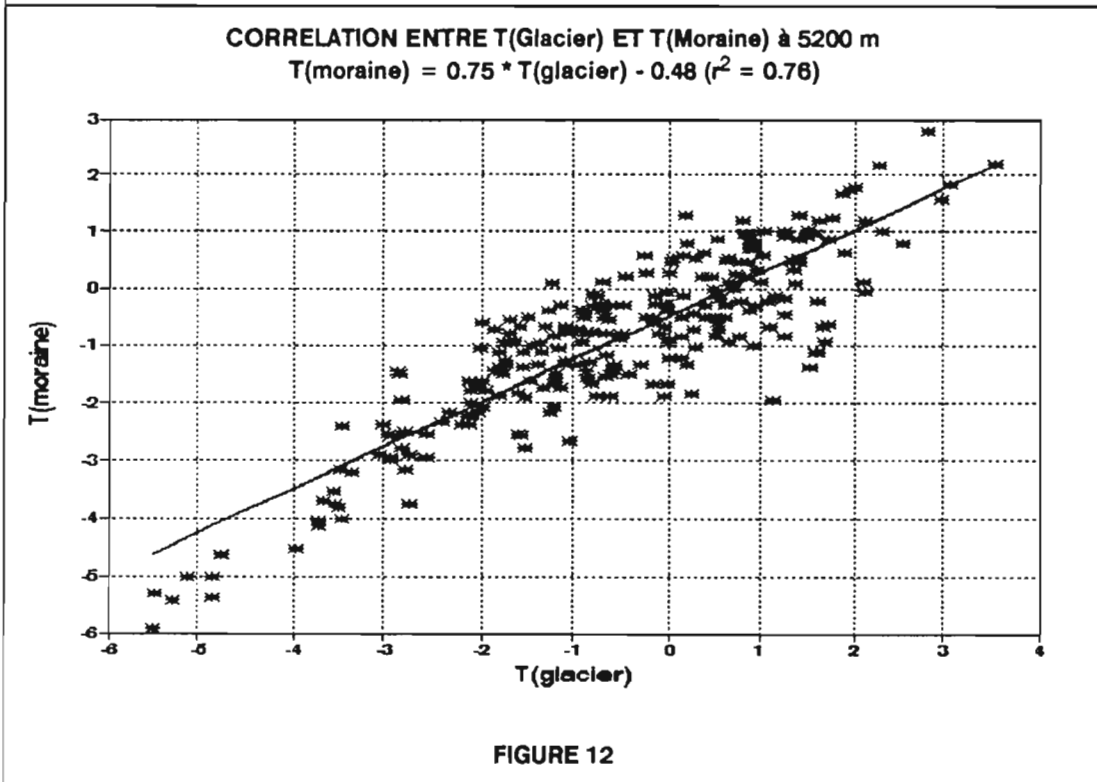
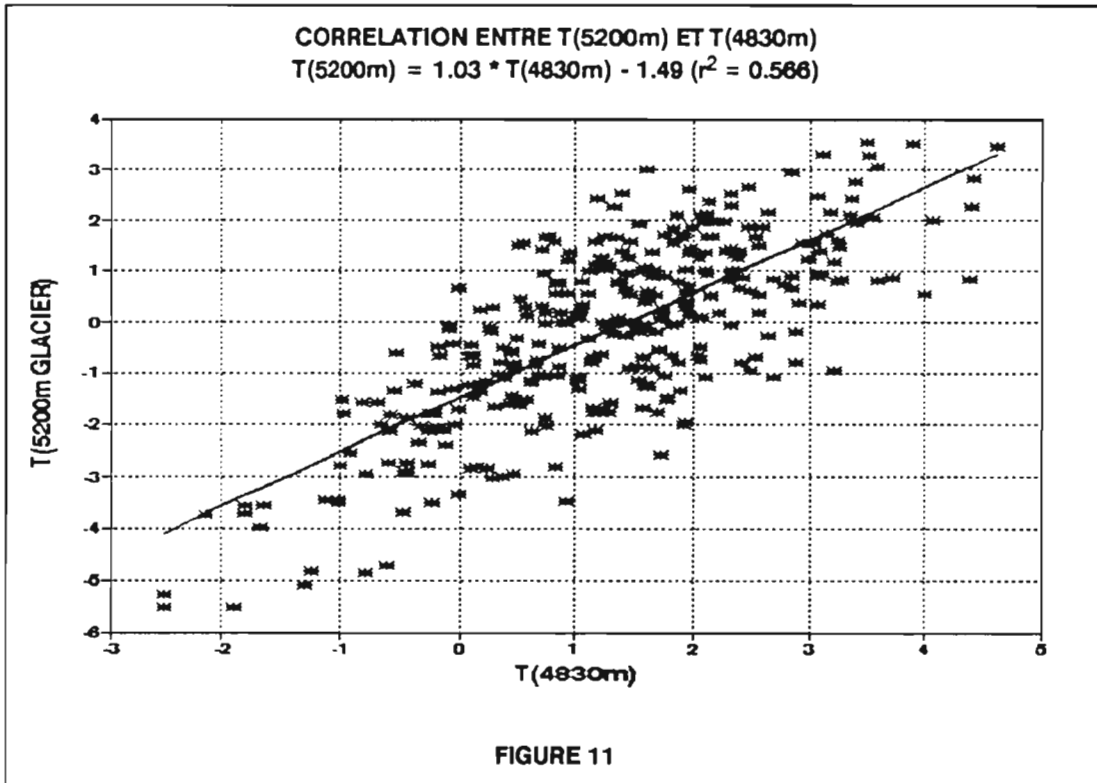
Pour le gradient de température à la surface du glacier à 5200 mètres, la valeur moyenne annuelle est de l'ordre de 1 °C. Une saisonnalité apparaît, avec des valeurs plutôt plus fortes pendant les périodes de fonte (de novembre à février), et plus faibles pendant l'hiver et les saisons intermédiaires. Ceci n'est pas étonnant, si l'on considère que ce gradient traduit un apport ou une perte de chaleur sensible.

3.3. ETUDE STATISTIQUE :

Il est intéressant de rechercher des relations simples entre les différentes températures mesurées, de façon à pouvoir - si ces relations existent - estimer certaines d'entre elles à partir d'une ou plusieurs autres, reconstituer des lacunes ou même s'affranchir de certaines mesures.

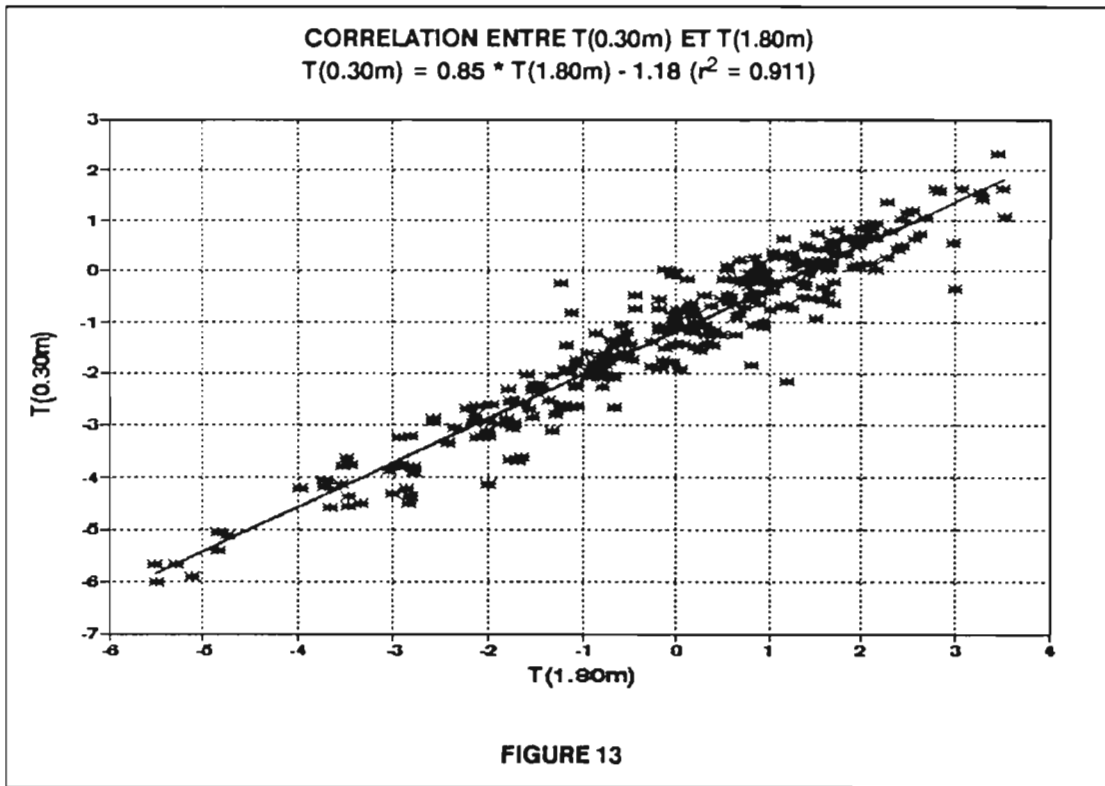
La figure 11 montre le résultat d'une corrélation simple entre la température journalière à 5200 mètres sur le glacier (température haute) et celle à 4830 mètres, effectuée sur la totalité de l'année hydrologique.

L'équation apparaissant dans le titre peut pratiquement se ramener à l'expression d'un écart de température constant de 1.49°C entre les deux stations. La corrélation cependant est loin d'être excellente ($r^2=0.566$), ce qui peut s'expliquer par le fait que la situation des deux stations est très différente (nous avons vu en particulier que l'amplitude thermique et la saisonnalité sont beaucoup plus marquées sur le glacier).



La figure 12 montre la corrélation entre la température haute sur le glacier et la température journalière sur la moraine à 5200 mètres, effectuée sur la presque totalité de l'année, entre octobre 94 et août 94.

Cette corrélation est significative ($r^2 = 0.76$), et montre bien que les températures journalières sur la moraine sont généralement inférieures à celles sur le glacier (Cf l'équation dans le titre), ce qui est dû essentiellement au fait que les maxima peuvent être forts sur le glacier (effet de "four").



La figure 13 illustre la corrélation entre les températures basse et haute sur le glacier à 5200 mètres. Cette corrélation a été calculée sur la période d'octobre 93 à août 94, en prenant soin d'exclure des séries les points correspondant aux périodes (mois de mars et avril 94) durant lesquelles le thermomètre bas était pris dans la neige. La corrélation est bonne ($r^2 = 0.911$).

4. PRECIPITATIONS :

4.1. VALEURS JOURNALIERES :

Le tableau 7 présente les pluies journalières mesurées au pluviomètre COBEE à la Plataforma Zongo. On se rappellera que la valeur donnée pour un jour correspond aux précipitations tombées entre la veille à 7h00 du matin, et ce même jour, à 7h00 du matin également. La figure 14 illustre graphiquement les résultats de ce tableau.

TABLEAU 7
PLUIES JOURNALIERES A LA PLATAFORMA ZONGO

	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUI	JUI	AOU
1	0,0	0,1	0,0	0,0	2,9	1,6	1,6	0,8	2,0	0,0	2,0	0,0
2	2,5	0,0	4,7	2,3	2,2	5,8	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0
3	3,2	1,7	0,1	2,2	9,1	11,3	0,0	2,7	0,0	0,0	0,5	0,5
4	0,2	2,3	3,7	5,6	14,5	5,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,0	4,0	0,0	1,8	2,2	2,5	0,0	0,0	0,8	0,0	5,2	0,0
6	0,0	1,7	0,0	1,1	1,9	3,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0
7	0,0	2,2	12,4	1,0	2,8	4,6	0,0	0,5	9,0	0,0	0,0	0,4
8	0,0	10,5	16,8	16,1	1,9	8,6	1,3	0,0	1,1	0,0	0,0	0,0
9	0,0	4,0	4,8	24,3	0,0	6,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	2,5	2,7	6,3	15,3	21,5	2,3	11,2	0,8	2,8	0,0	0,0	0,0
11	2,2	1,3	3,7	9,1	0,0	11,3	0,0	15,3	2,5	0,0	0,0	0,0
12	8,9	0,9	1,6	12,9	0,0	6,0	0,2	1,7	0,0	0,0	0,0	0,0
13	6,9	2,2	2,3	9,7	0,0	21,3	0,5	0,0	0,0	0,8	0,0	0,0
14	0,0	0,0	11,1	1,6	0,0	2,2	1,3	6,2	0,0	0,0	0,0	0,0
15	0,0	0,4	8,7	2,2	1,9	14,5	2,8	15,7	0,0	0,0	0,0	0,0
16	0,0	0,0	3,4	11,3	2,7	8,0	6,8	4,5	0,0	0,0	0,0	0,0
17	0,0	0,0	7,5	13,1	10,1	11,0	6,2	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0
18	0,0	0,8	3,4	5,7	0,6	5,4	6,7	0,0	0,0	2,2	0,0	0,0
19	0,0	5,8	4,0	0,0	6,7	4,8	4,9	1,0	0,0	2,7	0,0	0,0
20	0,0	0,5	1,7	0,0	6,0	3,7	5,4	0,2	0,0	0,9	0,0	0,0
21	0,3	0,0	0,0	5,7	11,2	1,1	0,9	1,4	0,0	0,0	0,0	0,0
22	2,0	12,1	0,0	1,6	12,4	0,0	2,5	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0
23	3,0	0,0	6,7	0,8	10,5	5,4	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
24	0,5	1,2	4,4	3,0	9,5	0,9	0,0	5,7	0,0	0,0	0,0	0,0
25	12,4	0,0	0,0	0,6	3,4	9,1	0,0	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0
26	0,8	0,0	0,0	2,4	5,7	0,0	6,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
27	0,3	0,1	9,1	12,4	11,0	11,4	6,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
28	0,0	0,0	0,0	1,9	7,3	5,6	5,4	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0
29	0,0	0,0	0,0	7,0	0,0		4,5	7,0	0,0	0,0	0,0	0,0
30	0,0	2,6	2,3	21,0	5,6		4,1	5,1	0,9	0,0	0,0	0,0
31		9,9		11,0	1,1		0,0		0,0		0,0	0,0
Tot	45,7	66,9	118,7	202,4	164,7	173,2	79,9	72,6	19,0	6,5	8,1	1,0

TABLEAU 7 : pluies journalières en millimètres (= valeurs brutes multipliées par 1.075, pour corriger les erreurs systématiques dues au diamètre du pluviomètre, et arrondies); Tot = total mensuel en millimètres.

Ce tableau et ce graphique mettent clairement en évidence la saison des pluies (d'octobre à avril, avec un maximum de décembre à février) et la saison sèche (de mai à septembre).

La précipitation journalière maximale a été enregistrée le 09/12/93, avec un total de **24,3 millimètres**. Malheureusement, à part celle du pluviographe à bandes papier, aucune mesure ne permet d'approcher l'intensité des pluies (ce que permettra le pluviographe à augets basculeurs installé en mai 94).

Pour les mois de décembre, janvier et février les nombres de jours sans pluie sont respectivement 3, 5 et 2, alors qu'en juin, juillet et août, les nombres de jours sans pluies sont respectivement 26, 27 et 29, les pluies correspondantes étant en général très faibles.

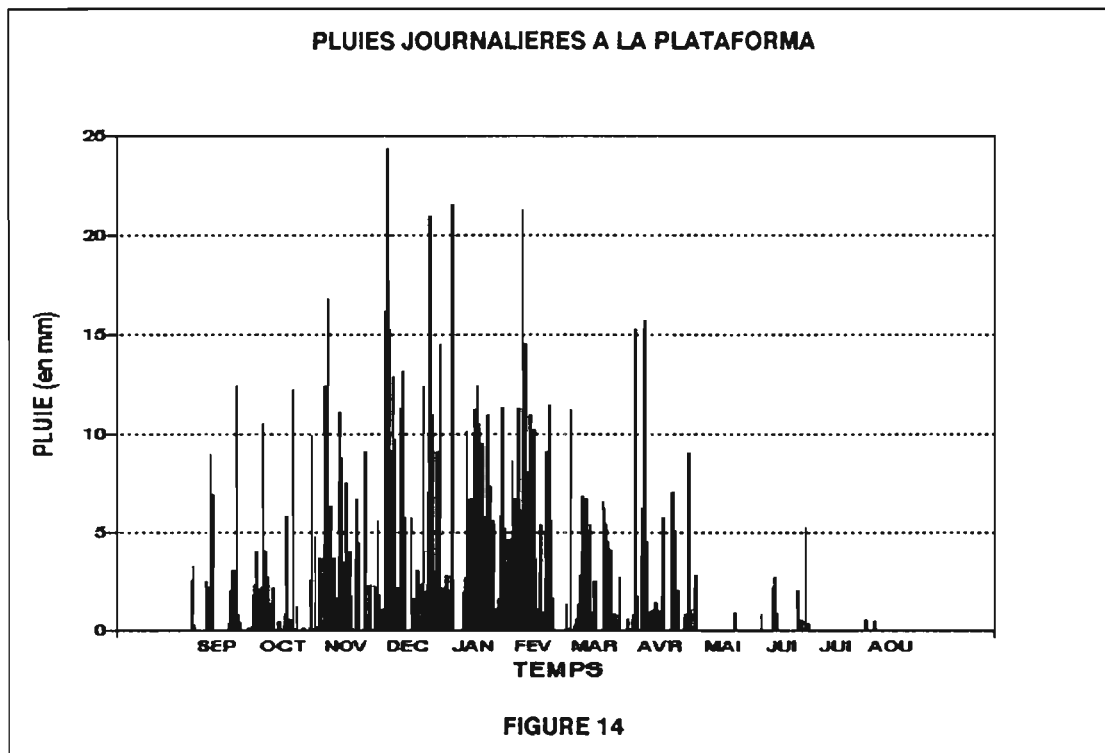


FIGURE 14

En ce qui concerne la répartition des pluies dans la journée pendant la saison des pluies, l'observation permet de dire qu'il y a peu de précipitations pendant la nuit et jusqu'en milieu de journée. Généralement, le "mauvais temps" monte de la vallée Zongo pendant la matinée, et il commence à pleuvoir ou neiger assez régulièrement autour de 13 heures jusqu'en fin d'après midi. Enfin, la limite pluie-neige peut monter à peu près jusqu'au niveau de la station hydrométrique, mais rarement au-dessus. Il y a surtout des précipitations neigeuses sur le bassin versant, mais il s'agit souvent d'une neige qui fond vite, du fait des fortes radiations et des fortes températures.

4.2. VALEURS MENSUELLES ET ANNUELLES :

4.2.1. Pluviomètres totalisateurs :

Le tableau 8 donne, pour chacun des 5 pluviomètres totalisateurs installés sur le bassin versant, la valeur mensuelle obtenue. On trouvera un plan de situation de ces pluviomètres sur la figure 2. Les lacunes, laissées en blanc, correspondent à des mois pour lesquels la mesure a été "négative", à cause de problèmes (non identifiés) de fuite ou d'évaporation. Ces résultats sont illustrés par la figure 15, qui fait apparaître en plus les pluies mensuelles à la Plataforma.

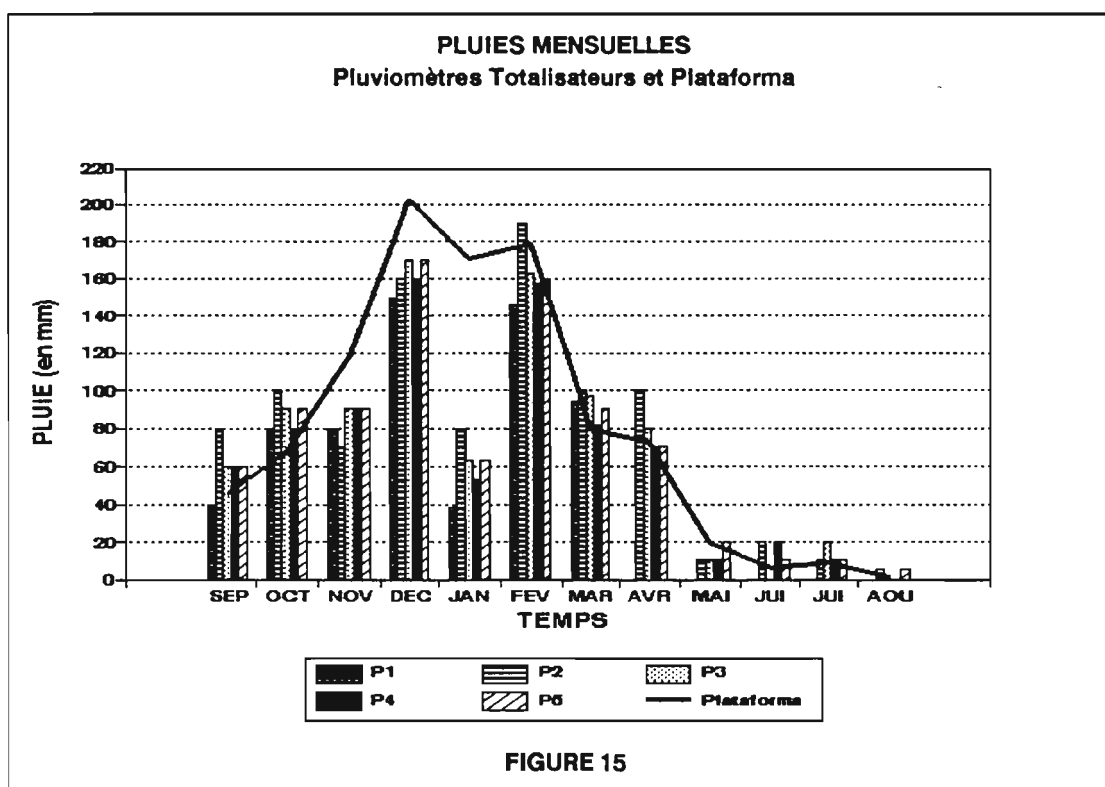
On constate des différences sensibles entre les pluviomètres totalisateurs, visibles plus particulièrement certains mois, ou dans le chiffre du bilan. Ces différences proviennent du fait que tous ces pluviomètres possèdent une situation propre. Les pluviomètres donnant les résultats les plus proches de la valeur moyenne sont les numéro P3 et P5, et probablement le numéro P1 (vrai si on

complète les lacunes avec les valeurs moyennes). Le pluviomètre P2 semble se distinguer nettement des autres par une surestimation.

TABLEAU 8
PLUVIOMETRES TOTALISATEURS : VALEURS MENSUELLES

	P1 5200m	P2 4885m	P3 4945m	P4 4860m	P5 4855m	MOYEN
SEP	40	80	60	60	60	60
OCT	80	100	90	80	90	88
NOV	80	70	90	90	90	84
DEC	150	160	170	160	170	162
JAN	38	80	63	53	63	59,4
FEV	146	190	163	158	160	163,4
MAR	94	100	97	82	90	92,6
AVR		100	80	70	70	80
MAI		10	10	10	20	12,5
JUI		20	0	20	10	12,5
JUI		10	20	10	10	12,5
AOU		5			5	5
TOTAL	628	925	843	793	838	832

TABLEAU 8 : valeurs mensuelles en millimètres. Pn = pluviomètre numéro n. MOYEN = valeur moyenne pour les 5 pluviomètres.



L'examen de la figure 15 montre qu'il existe globalement une assez bonne correspondance entre les résultats des 5 pluviomètres totalisateurs et ceux obtenus à la Plataforma. Seul le mois de janvier 94 semble présenter un problème à la Plataforma, avec un total près de trois fois supérieur à celui des autres pluviomètres. Cependant, l'étude des mesures quotidiennes effectuées par

l'observateur pendant ce mois ne permet pas de déceler d'erreur classique évidente (mesures cumulées sur plusieurs jours parce que le pluviomètre n'est pas vidé, par exemple).

4.2.2. Comparaison avec d'autres sites de mesure :

Il est intéressant de comparer les pluies obtenues sur le bassin versant du glacier Zongo ou à proximité (Plataforma) avec des stations un peu plus éloignées, mais présentant a priori des régimes de précipitation assez similaires. On pourra se reporter au plan de situation de la figure 1. Le tableau 9 donne les pluies mensuelles à la Plataforma Zongo (pour les années hydrologiques 91-92, 92-93 et 93-94), à Chacaltaya (Pluviomètre "de l'observatoire", à 5240 mètres, distant d'environ 15 km de la Plataforma), et à Botijlaca (Pluviomètre COBEE situé à 3492 mètres d'altitude dans la vallée du Zongo, et distant d'environ 15 km de la Plataforma). Le graphique 16 illustre les résultats de ces deux dernières stations, ainsi que ceux du pluviomètre de la Plataforma et du pluviomètre P5 proche du glacier.

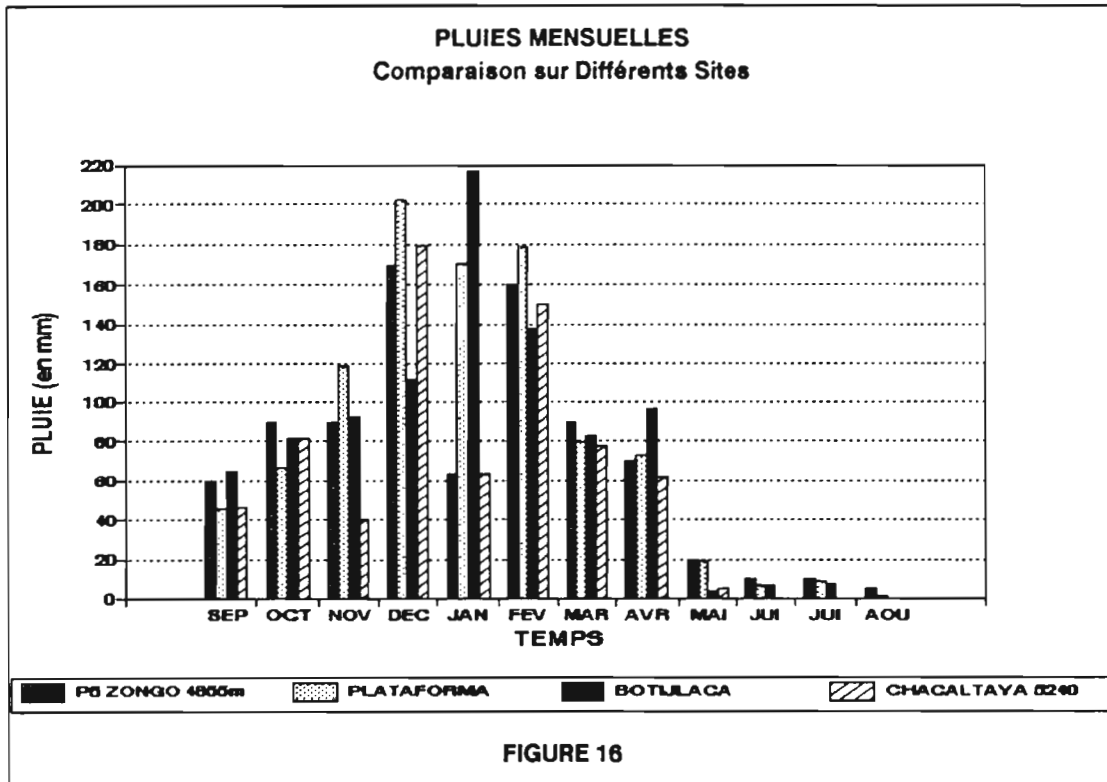
TABLEAU 9
PLUIES MENSUELLES SUR DIFFERENTS SITES

	PLTF 91-92	PLTF 92-93	PLTF 93-94	CHACA 93-94	BOTIJ 93-94
SEP	25,2	21,0	45,7	46	64,9
OCT	42,4	59,8	66,9	82	81,5
NOV	94,3	90,4	118,7	40	92,9
DEC	83,9	123,1	202,4	179	111,7
JAN	171,5	249,2	164,7	63	216,7
FEV	134,4	100,2	173,2	150	137,9
MAR	32,6	145,8	79,9	78	83
AVR	14,0	63,0	72,6	62	96,5
MAI	0,9	13,4	19,0	5	3,8
JUI	18,5	3,5	6,5		6,3
JUI	21,9	4,5	8,1		7,3
AOU	46,4	45,6	1,0		0
TOTAL	686,0	919,5	958,7	705,0	902,5

TABLEAU 9 : PLTF = pluies mensuelles à la Plataforma en millimètres (pluvio COBEE), avec année hydrologique, CHACA = idem à Chacaltaya (pluvio OBSERVATOIRE / ORSTOM), BOTIJ = idem à Botijlaca (Pluvio COBEE).

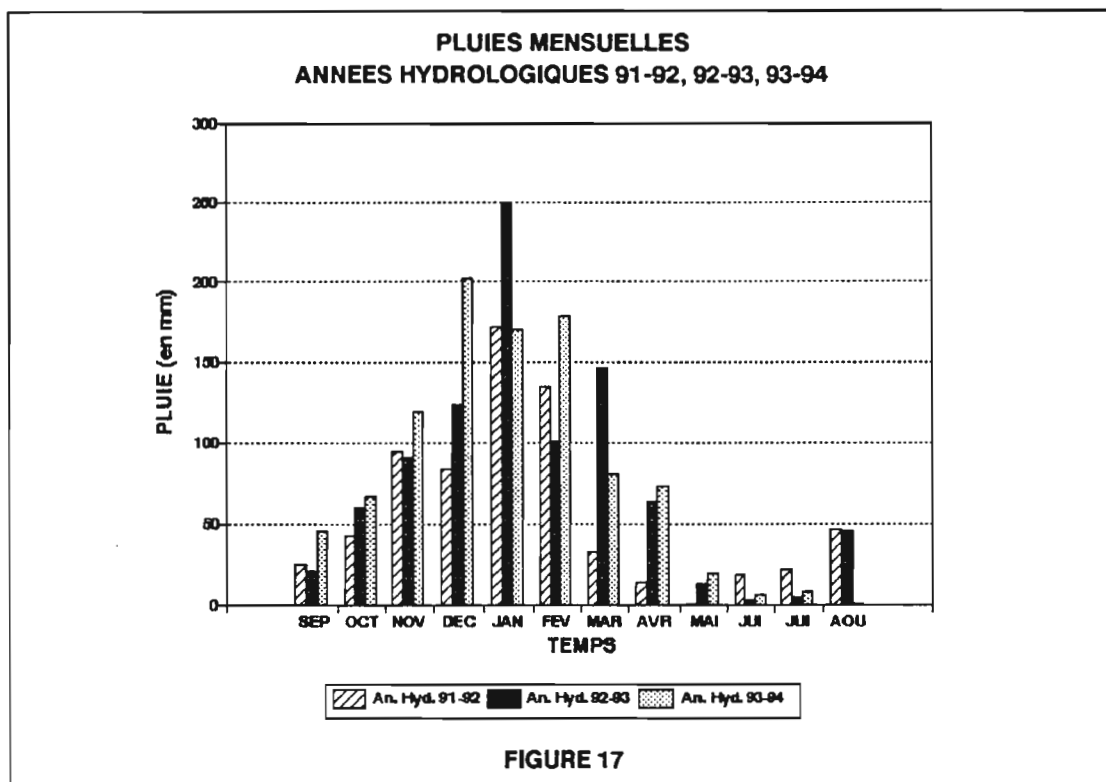
Le tableau 9 et la figure 16 mettent en évidence une variabilité assez forte des résultats entre tous les sites comparés. Ceci n'est guère étonnant si on considère que les altitudes et les conditions climatiques de tous ces sites sont très différentes. On constate que des différences marquées apparaissent, surtout pendant la saison des pluies (particulièrement d'octobre à janvier), avec des déficits ou des excédents pour Chacaltaya ou Botijlaca par rapport aux pluviomètres installés à proximité du glacier. A ce titre, le mois de janvier 94 est particulièrement intéressant. On y enregistre en effet à Botijlaca et à la Plataforma un total à peu près trois fois supérieur à celui des pluviomètres totalisateurs situés sur la moraine du glacier. Ceci implique que pendant ce mois, les précipitations ont été fortes dans la vallée du Zongo et jusqu'au col sur lequel est située la Plataforma, mais beaucoup plus faibles un peu plus en altitude, au niveau du glacier. Ceci aurait donc tendance à confirmer deux choses :

- d'une part le total de précipitations mesuré par l'observateur à la Plataforma pour le mois de janvier 94, que nous qualifions de suspect au paragraphe précédent,
- les températures enregistrées par le thermographe en ce même endroit et pour ce même mois, dont la validité a été mise en cause tout au long du paragraphe 3 (une augmentation des précipitations s'accompagne généralement d'une baisse des températures, comme on le constatera en se reportant par exemple à la figure 8).



4.2.3. Comparaison avec d'autres années :

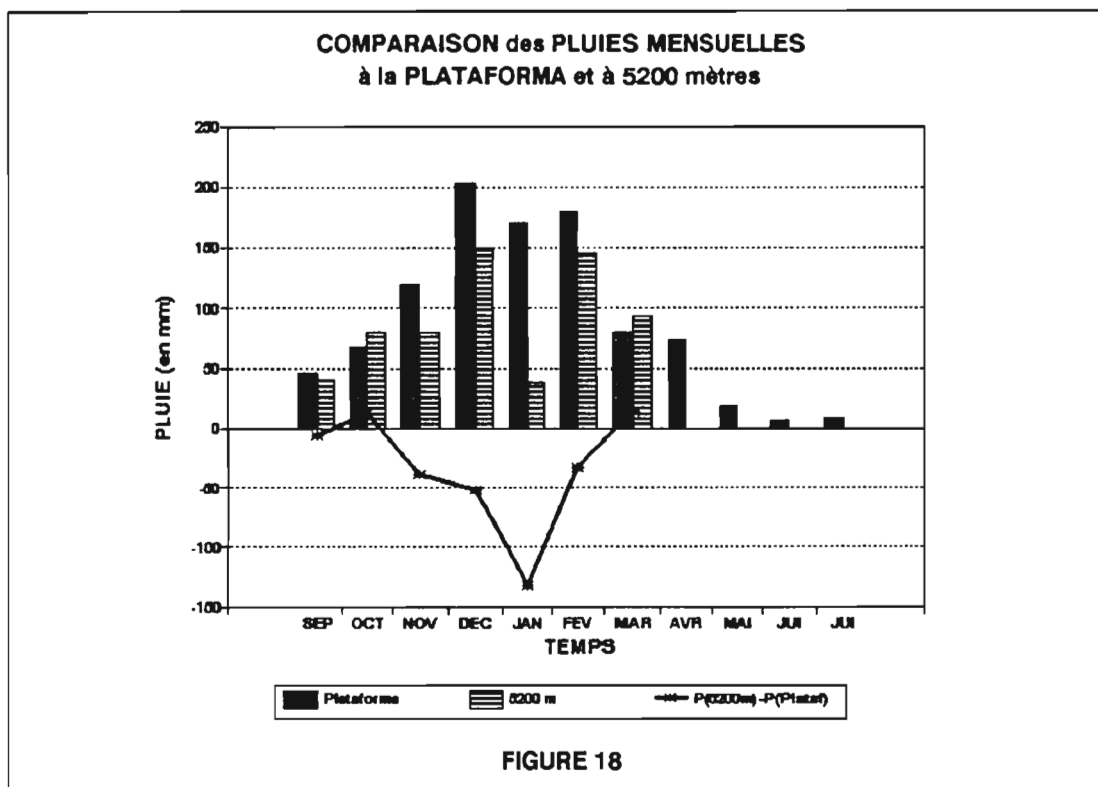
Le tableau 9 fournit une comparaison des valeurs totales mensuelles et annuelles de précipitations à la Plataforma, pour les années hydrologiques 91-92, 92-93 et 93-94. Ces résultats sont représentés graphiquement sur la figure 17.



Par rapport aux années précédentes, l'année 93-94 est la plus pluvieuse des trois (surtout par rapport à 91-92), avec un total de **958.5 millimètres** (contre **686** et **919,5 millimètres** pour 91-92 et 92-93). Elle présente des mois de décembre et février plutôt excédentaires, et un mois d'août très déficitaire, avec un total quasi nul. La saison des pluies (de novembre à mars), donne respectivement les chiffres suivants (de 91 à 94) : **516.7**, **708.7** et **738.9 millimètres**. Pour les mois de juin, juillet et août cumulés, ces chiffres sont respectivement : **86.8**, **53.6** et **15.6 millimètres**. L'année hydrologique 93-94 se caractériserait donc plutôt par de fortes précipitations en saison humide, et par un total très faible en saison sèche.

4.2.4. Gradients :

La figure 18 est une tentative de mise en évidence de l'existence d'un gradient pluviométrique entre la Plataforma et le pluviomètre P1, situé à 5200 mètres sur la moraine. Même s'il apparaît clairement que les précipitations sont plus faibles à 5200 mètres que sur la Plataforma, les sept mois de comparaison présentés ne permettent cependant guère de conclure. En effet, le gradient peut changer de signe et d'intensité d'un mois sur l'autre.



Cette recherche étendue aux autres pluviomètres situés à proximité du glacier et aux sites de Botijlaca et Chacaltaya, présentés sur les figures 15 et 16, ne permet pas non plus d'affirmer pour l'année hydrologique 93-94 l'existence d'un gradient pluviométrique négatif au niveau mensuel. Au niveau annuel, on constate quand même globalement une diminution des précipitations avec l'altitude, surtout visible à proximité du glacier (entre la Plataforma et 5200 mètres)

5. BILAN RADIATIF :

5.1. INTRODUCTION :

Le bilan radiatif au niveau du glacier, comme d'ailleurs au niveau de n'importe quelle surface, s'écrit de la façon suivante [Perrin de Brichambaud, 1963; Liboutry, 1964]:

$$R_{net} = (1 - a) * R_g + R_{atm} - R_{sol}$$

Avec $a = R_r / R_g$ soit $(1 - a) * R_g = R_g - R_r$

R_g = Radiation globale (du ciel, courtes longueurs d'onde)

R_r = Radiation réfléchie = Radiation du glacier (courtes longueurs d'onde)

R_{atm} = Radiation atmosphérique (grandes longueurs d'onde)

R_{sol} = Radiation du sol (grandes longueurs d'onde)

R_{net} = Radiation nette (bilan toutes longueurs d'ondes confondues)

a = albédo

Remarque : R_g peut se décomposer $R_g = RD + Rd$, somme des rayonnements direct (RD) et diffus (Rd), arrivant en un point après diverses réflexions .

Les radiations effectivement mesurées sur le glacier sont la radiation globale, la radiation réfléchie, l'albédo qui résulte des deux, et la radiation nette (bilan sur toutes les longueurs d'onde). La radiation atmosphérique et la radiation du sol peuvent être approchées par des formules du type (loi de Stefan Boltzmann) [Elder et Dozier, 1990; Kuhn, 1987; Obled et Rosse, 1975; Kustas et Rango, 1994; Poggi, 1977] :

$$R_{sol} = \epsilon_{sol} \times \sigma * T_{sol}^4 \quad \text{(formule physique)}$$

$$R_{atm} = \epsilon_{atm} \times \sigma * T_{air}^4 \quad \text{(formule empirique)}$$

ϵ = Emissivité

ϵ_{sol} de l'ordre de 0.98 pour la glace,

ϵ_{atm} fonction (température air, humidité spécifique, nébulosité)

σ = Constante de Stefan-Boltzmann ($5.67 * 10^{-8}$ SI)

$T_{sol/air}$ = Température du sol / de l'air (en K)

Remarque : en théorie, il faut utiliser la température de la base des nuages (obtenue par radiosondage) plutôt que T_{air} . Cependant, on peut considérer, lorsque le ciel est couvert, que ces deux températures sont proches.

5.2. VALEURS " INSTANTANÉES " :

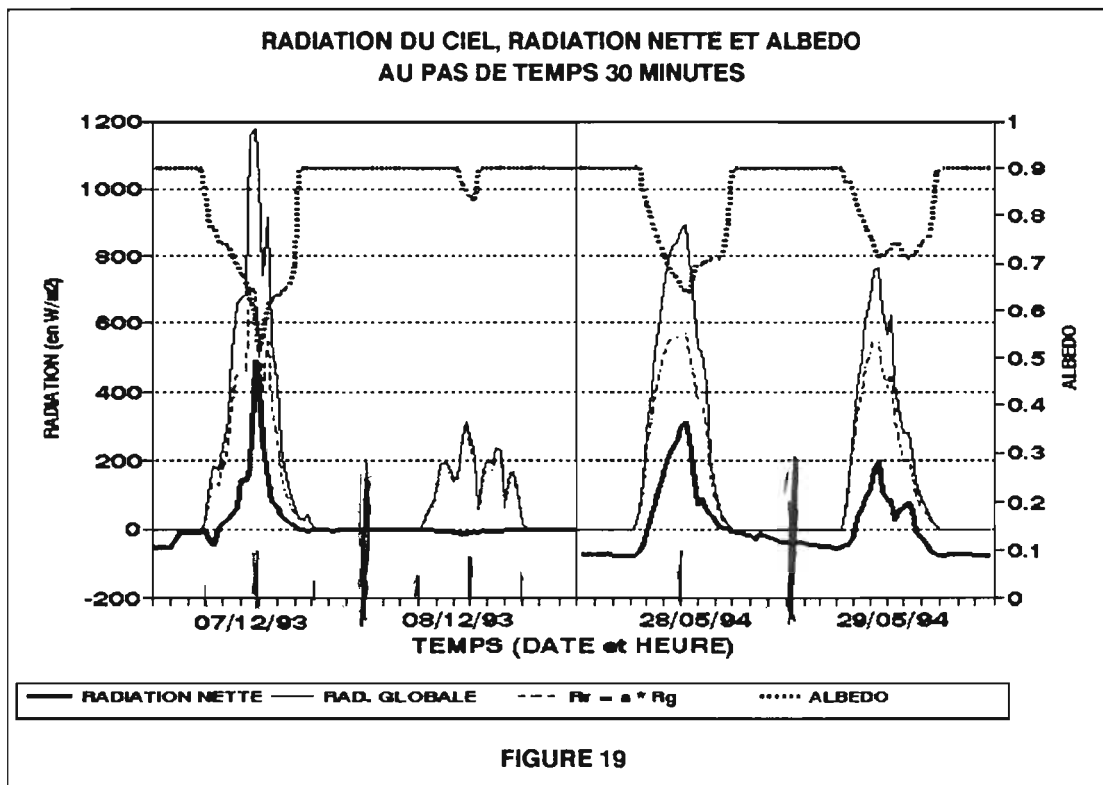
5.2.1. Bilan radiatif :

La figure 19 représente, au pas de temps de 30 minutes, la radiation globale, la radiation nette et l'albédo, sur deux journées consécutives mais différentes de la saison des pluies (07 et 08/12/93) et deux journées de la saison sèche (28 et 29/05/94).

D'une façon générale, on constate que :

- la radiation globale est nulle la nuit et positive ou nulle durant la journée, puisqu'elle est fonction de la radiation solaire à la limite de l'atmosphère (radiation extraterrestre) et de la nébulosité,
- la radiation nette est généralement positive ou nulle pendant la journée (mais peut aussi être négative) et négative la nuit, avec des valeurs pouvant descendre à -100 w/m^2 , ce qui traduit le refroidissement nocturne du sol (la nuit, seuls les termes de radiations de grandes longueurs d'onde ne sont pas nuls),

- l'albédo mesuré, quand il ne neige pas, a tendance à décroître dans la journée jusqu'à un minimum, puis à remonter. Notons que cette grandeur doit être inférieure à 1. Elle a été volontairement plafonnée à 0.9 (une couche de neige fraîche ne peut guère renvoyer plus de 90% de la radiation globale). D'autre part, elle n'a pas de sens la nuit (même si on lui attribue ici arbitrairement la valeur 0.9).



La réflexion sur le glacier de la radiation globale est une réflexion pure (ce qui signifie que l'angle de la radiation réfléchi est symétrique par rapport à la verticale de celui de la radiation globale incidente). Il apparaît clairement sur la figure 19 que l'albédo est fonction de cet angle d'incidence. On voit lorsque l'angle est faible, au lever ou au coucher du soleil, que l'albédo est fort, la plus grande partie de la radiation globale étant réfléchi. Au contraire, lorsque cet angle est proche de 90° (soleil au zénith), l'absorption de la radiation globale est maximale, ce qui revient à dire que l'albédo est minimum. Ceci est valable pour un état de surface constant dans la journée. Cependant, la surface du glacier subit fréquemment des cycles gel-dégel journaliers, ainsi que des épisodes neigeux ou des périodes de forte fonte. L'albédo est donc également fonction de l'état de la surface. Dans le cas d'un cycle gel-dégel-regel superficiel, les deux phénomènes (angle d'incidence et évolution de l'état de la

surface) jouent probablement dans le même sens, le pouvoir réfléchissant de l'eau liquide étant moindre que celui de l'eau solide.

Si nous recherchons une valeur de l'albédo représentative de la journée, on peut envisager trois possibilités:

- la solution la plus rigoureuse consiste à faire la moyenne des valeurs instantanées (qui pour nous sont en fait des valeurs moyennes sur une demi-heure). Cependant, il faut prendre soin d'exclure de cette moyenne les valeurs nocturnes qui n'ont pas de sens physique. Ceci implique que cette solution est délicate à mettre en œuvre.

- on peut également faire le rapport des intégrales (ou des moyennes) de R_r et R_g sur la journée. Cela ne revient pas au même que la solution précédente, et n'est pas vraiment un albédo moyen au sens de la définition de cette grandeur. Mais il est probable que les deux solutions sont très proches.

- enfin, on peut choisir de retenir la valeur minimale obtenue dans la journée. Il est pratique de s'orienter vers la valeur minimale, plus que vers la valeur moyenne, difficile à calculer. Ce minimum coïncide avec les périodes, de quelques minutes à quelques heures, durant lesquelles la radiation globale est la plus forte. Au contraire, cette radiation est faible lorsque l'albédo croît ou décroît fortement. Le minimum permet donc bien d'approcher simplement les quantités d'énergie mises en jeu. Nous verrons dans la suite que les résultats obtenus par ces deux derniers calculs sont bien corrélés.

L'examen de la figure 19 permet de bien différencier, du point de vue du bilan radiatif, une journée de temps beau et chaud (07/12/93) d'une journée très couverte et neigeuse (08/12/93). Dans le premier cas, de fortes valeurs obtenues pour la radiation du ciel, combinées à un albédo plutôt faible, conduisent à un bilan très nettement positif. Dans le second cas, la radiation du ciel est très faible. Une partie est absorbée par l'atmosphère et réémise sous forme d'un rayonnement de grandes longueurs d'onde. Le bilan des courtes longueurs d'onde est donc quasi nul, et ce d'autant plus que l'albédo est élevé. Le bilan des grandes longueurs d'onde est lui aussi proche de 0 : le rayonnement atmosphérique compense pratiquement celui du sol, d'une part parce qu'il augmente, d'autre part parce que les températures de l'air et de la surface du glacier sont voisines. Le bilan net reste alors pratiquement nul toute la journée.

5.2.2. Problèmes de mesures :

Les anomalies de mesures, pour les différentes radiations et l'albédo sont assez fréquentes. Cependant il est assez facile de détecter les valeurs aberrantes dans les séries. Ainsi, on est couramment amené à effectuer les corrections suivantes :

- En cas de chute de neige : le pyranomètre haut, mesurant la radiation du ciel, peut être recouvert de neige, et sous-estimer la radiation, alors que celui du bas, protégé, donne une mesure correcte. On obtient alors une valeur de la radiation réfléchie supérieure à celle de la radiation du ciel, soit un albédo supérieur à 1. Il est alors facile de remplacer cette valeur de 1 par 0.9 (valeur plafond estimée), et de recalculer R_g par $R_g = R_r/0.9$. Cette situation est illustrée sur la figure 20 (journée du 11/12/93).

- Le pyranomètre bas peut se retrouver pris dans la neige, alors que celui du haut ne l'est pas. Les valeurs de l'albédo obtenues sont alors proches de 0. On effectue alors une correction identique (albédo = 0.9, neige fraîche) et une correction de R_r par $R_r = R_g*0.9$. Cette situation est illustrée sur la figure 22 (mois d'avril, période représentée en pointillés).

- La nuit, la valeur de l'albédo mesurée n'a pas de sens. Dès que la radiation du ciel est proche de 0, il suffit d'introduire un code pour la valeur de l'albédo (nous avons choisi la valeur 1).

- Le bilanmètre peut lui aussi présenter quelques problèmes de mesure. Ceux-ci sont cependant moins persistants dans le temps que pour les pyranomètres, du fait de la forme sphérique des coupoles, qui fait que la coupole supérieure est libérée plus facilement et plus rapidement de la

neige ou du givre. La figure 20 fait apparaître un cas extrême, où la radiation nette mesurée descend jusqu'à la valeur aberrante de -400 w/m^2 , simplement parce que la coupole supérieure est complètement recouverte de neige. La correction de la mesure peut se faire de la manière suivante : remplacement par une valeur seuil minimale jusqu'au lever du jour, puis interpolation linéaire jusqu'au moment où la coupole est libérée de la glace (le dégel étant marqué sur cet exemple par une montée brutale de la mesure de -400 à $+400 \text{ W/m}^2$).

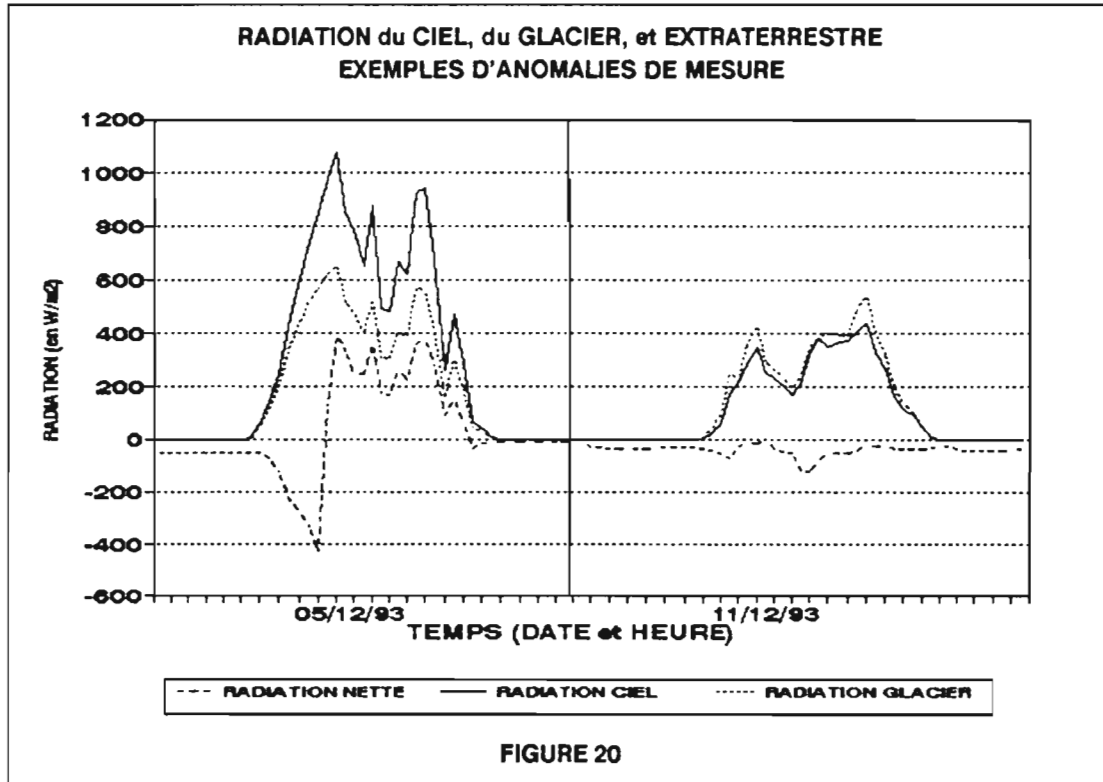


FIGURE 20

- Il se produit quelquefois juste au lever du jour des problèmes dus à l'incidence des rayons. En effet, pendant les quelques minutes où l'angle est très faible, les rayons peuvent atteindre après réflexion un pyranomètre ou une coupole du bilanmètre, sans atteindre l'autre. Peuvent alors apparaître, sur une mesure ou une autres, divers pics brefs facilement identifiables.

- Enfin, peuvent également se poser des problèmes dus à la projection de diverses ombres sur les appareils de mesure. A priori, ceux-ci ont été positionnés pour éviter ces phénomènes.

5.2.3. Valeurs maximales :

Les valeurs instantanées maximales obtenues dans l'année à 5200 mètres sont les suivantes :

- pour la radiation nette : 867 w/m^2 ,
- pour la radiation du ciel : 2198 w/m^2 ,
- pour la radiation réfléchie : 1758 w/m^2 .

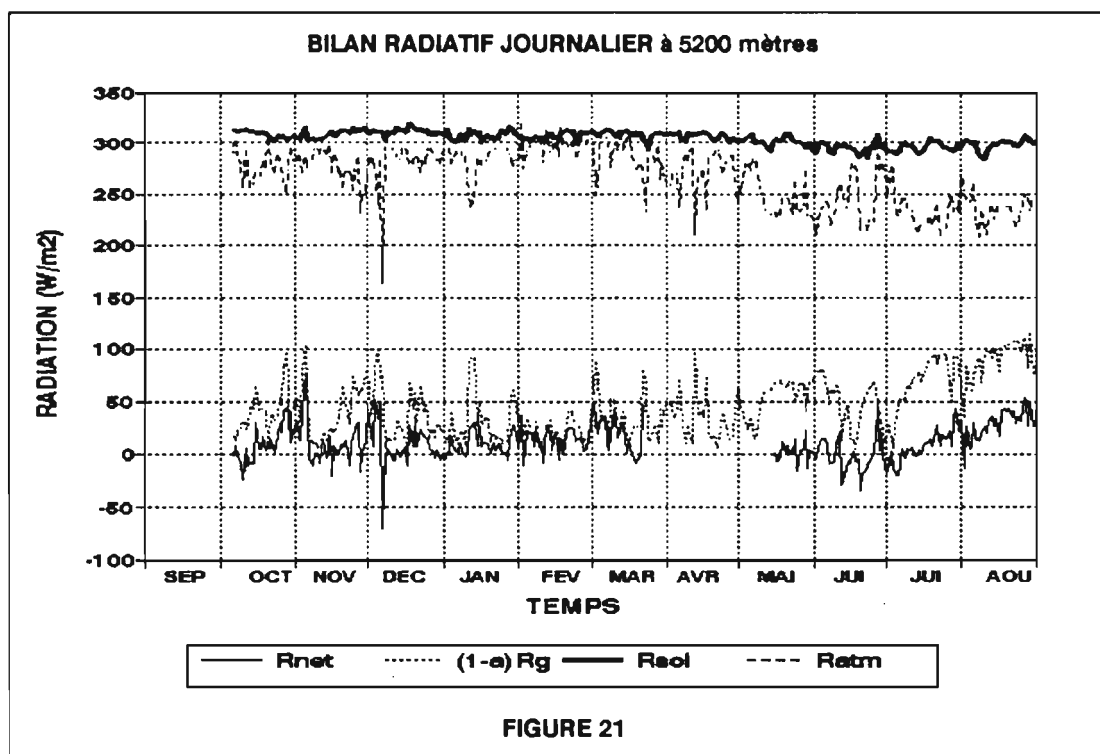
A 4830 mètres, le maximum mesuré pour la radiation du ciel est 2015 w/m^2 .

Ces valeurs sont grandes, si on les compare avec celles de la radiation extraterrestre, dont la moyenne annuelle est de l'ordre de 400 w/m^2 , et les valeurs instantanées maximales de l'ordre de 1350 w/m^2 [Paltridge et Platt, 1976]. Ceci s'explique par l'effet de "four" existant sur le glacier. Deux phénomènes peuvent en fait conjuguer leurs effets: l'effet "miroir" qui a tendance par moment à concentrer sur le site de mesure toutes les radiations arrivant sur les sommets, les séracs et les moraines environnantes, et l'effet "loupe", qui provient de la concentration au sol de la radiation globale par certains types de nuages.

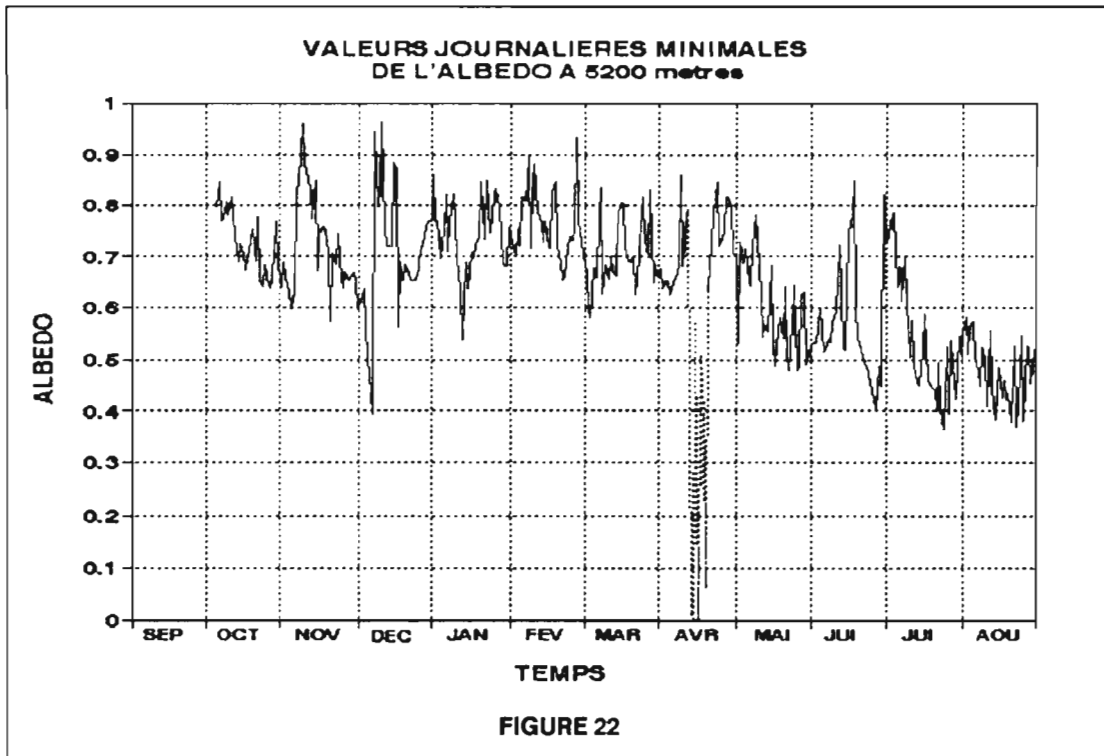
5.3. VALEURS JOURNALIERES :

La figure 21 représente les différents termes du bilan radiatif journalier à 5200 mètres sur le glacier, tel qu'il est exposé au paragraphe 5.1. Sur cette figure apparaissent : la radiation nette et le terme $(1-a)R_g$, calculés tous les deux en moyenne journalière à partir des valeurs demi horaires mesurées, ainsi que la radiation du sol, calculée selon la loi de Stefan-Boltzmann, et la radiation atmosphérique, calculée par différence de tous les autres termes. Notons que, pour le calcul de $(1-a)R_g$ en moyenne journalière, le produit des moyennes est généralement très différent de la moyenne des produits... (et c'est la moyenne des produits qu'il faut faire).

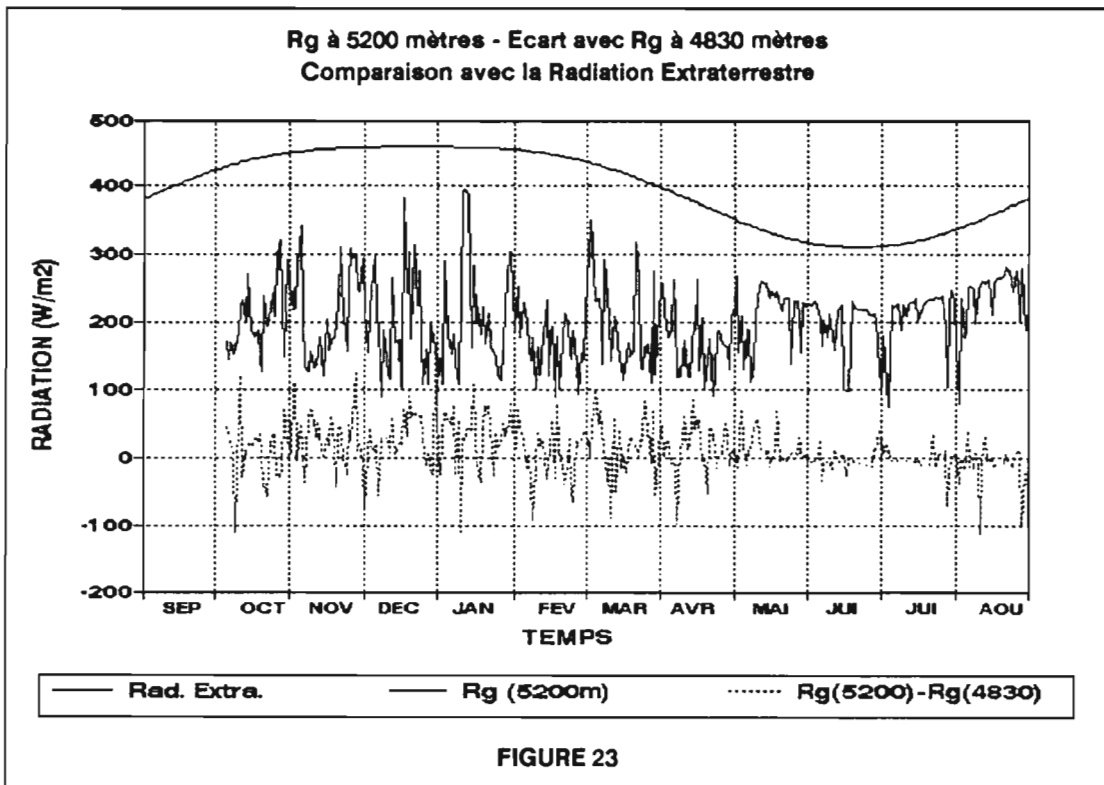
On remarquera surtout sur la figure 21 l'absence d'une saisonnalité évidente au pas de temps journalier pour tous les termes présentés : chacun d'eux semble pouvoir prendre une valeur quelconque à n'importe quel moment de l'année. Seules se détachent de mai à août des valeurs plutôt fortes de $(1-a)R_g$ et des valeurs plutôt faibles de la radiation atmosphérique, dues toutes deux au grand beau temps de la saison sèche (albédo et nébulosité faibles). Ce peu de saisonnalité est frappant, si on le rapproche de la très forte saisonnalité du débit, que nous évoquerons dans la suite. En effet, a priori, le bilan d'énergie est un des principaux facteurs explicatifs de la fonte.



La figure 22 représente les valeurs minimales de l'albédo pour l'année hydrologique 93-94, à 5200 mètres sur le glacier. Les valeurs proches de 0 obtenues en avril sont la conséquence du problème de mesure évoqué au paragraphe 5.2.2. Les valeurs obtenues restent plutôt entre 0.6 et 0.9 pendant la saison des pluies, entretenues par de fréquentes couches de neige fraîche, et plutôt entre 0.4 et 0.6 en saison sèche, ce qui correspond à une surface de neige beaucoup plus "vieille", salie et dense. On pourra peut-être s'étonner de ce que l'albédo ne descende guère au dessous de 0.4 dans l'année. Cela vient de l'emplacement de la station de mesure. A cet endroit précis en effet, on n'obtient jamais de glace vive ou de neige vraiment salie, alors que c'est le cas dans d'autres sites à proximité, ou sur tout le bas du glacier. L'observation montre qu'il est très difficile de faire une mesure d'albédo représentative de l'ensemble du glacier, parce que la variabilité de l'état de la surface dans l'espace est très grande. Il est donc probable, qu'en d'autres parties du glacier, on puisse obtenir des valeurs de l'ordre de 0.2 à 0.3. Cependant, on peut penser que la variation temporelle de l'albédo mesuré est représentative de l'ensemble du glacier (ou au moins de la zone d'ablation).



La figure 23 représente, au pas temps journalier, la radiation du ciel à 5200 mètres, la radiation solaire théorique en limite d'atmosphère au niveau du glacier, dite radiation " extraterrestre " [Paltridge et Platt, 1976].



Si l'on compare la radiation du ciel mesurée à 5200 mètres et la radiation extraterrestre, il apparaît clairement que la première est fonction de la seconde, atténuée par rapport à celle-ci des

effets dus à la traversée de la couche d'atmosphère. Ces effets sont de deux types:

- une absorption constante de l'ordre de 80 w/m^2 environ en moyenne journalière, correspondant à l'atmosphère dégagée (ces effets sont très nets en saison sèche, durant laquelle les deux courbes présentent des parties parallèles),

- une absorption supplémentaire, due à la présence de nuages, le pourcentage de rayonnement absorbé étant directement fonction de la nébulosité.

Dans les deux cas, une partie de la radiation du ciel absorbée est réémise sous forme de grandes longueurs d'onde, et contribue ainsi à l'augmentation du rayonnement atmosphérique, et l'autre partie forme le rayonnement diffus de courtes longueurs d'onde.

Il est intéressant de comparer les résultats des deux pyranomètres mesurant la radiation du ciel, implantés l'un à 5200 mètres sur la glacier, l'autre à 4830 mètres sur la moraine. La figure 23 montre la différence de mesure entre les deux appareils au niveau journalier. Cette différence est négligeable durant les périodes de grand beau temps, comme on peut le voir de mai à août, ce qui est rassurant. Par contre, en saison humide, les écarts journaliers peuvent atteindre $\pm 100 \text{ w/m}^2$, même s'ils restent généralement compris dans l'intervalle $\pm 50 \text{ W/m}^2$. Ceci s'explique facilement par les nombreux passages nuageux constatés chaque jour au dessus des appareils, et par la distance d'environ 2 km qui séparent ces appareils. Le plus souvent, les nuages montent de la vallée Zongo, et projettent leur ombre sur le pyranomètre du bas avant d'atteindre celui du haut. C'est pourquoi les écarts constatés sont plutôt positifs.

5.4. VALEURS MENSUELLES :

5.4.1. Valeurs moyennes :

Le tableau 10 donne les moyennes mensuelles des valeurs journalières de la radiation nette, de la radiation du ciel, de la radiation réfléchie, du produit $(1-a) \cdot R_g$, ainsi que des valeurs mensuelles d'"albédo" à 5200 mètres sur le glacier, calculées de deux façons différentes : on présente d'une part, la moyenne des valeurs minimales journalières mesurées d'albédo, et d'autre part la moyenne des rapports de la radiation réfléchie et de la radiation globale, obtenus à partir des moyennes journalières de ces deux grandeurs. Ces résultats sont illustrés par la figure 24, sur laquelle apparaît en plus la radiation du ciel mesurée à 4830 mètres.

Le tableau 10 fait apparaître deux calculs différents de l'"albédo" mensuel (moyennes mensuelles a (1) des minima journaliers mesurés, et moyennes mensuelles a (2) des rapports journaliers $R_{r_{\text{moyen}}}/R_{g_{\text{moyen}}}$). La corrélation entre a (1) et a (2) (selon les notations du tableau 10) est excellente avec un coefficient de corrélation $r^2 = 0.890$. L'équation de cette corrélation est la suivante : $a (1) = 1,063 \cdot a (2) - 0,192$. On voit donc que, même si les deux séries n'ont pas tout à fait les mêmes ordres de grandeur, il est équivalent d'utiliser l'une ou l'autre pour quantifier l'"albédo" mensuel. Notons quand même que l'ordre de grandeur des valeurs de a (1), comprises entre 0.48 et 0.76, nous semble plus représentatif de l'état de surface moyen du glacier (neige fraîche durant la saison des pluies, neige vieillie et sale durant la saison sèche), que celui des valeurs de a (2), comprises entre 0.62 et 0.88.

On soulignera encore la saisonnalité peu marquée des radiations de courtes longueurs d'onde mesurées. En particulier, la période de forte ablation, de novembre à février, ne se distingue pas forcément comme on aurait pu l'attendre, par des valeurs supérieures à celles des mois froids de mai à août. Le contraire se produit même parfois (voir par exemple le mois d'août, durant lequel l'ablation a été forte, mais pas cependant comparable à celle de novembre, décembre ou janvier).

Par contre, pour la radiation nette, les mois de saison humide affichent quand même tous des valeurs mensuelles positives (de l'ordre de 10 à 20 W/m^2), alors que les mois de mai à juillet donnent des résultats proches de 0, voire négatifs.

Il est d'ailleurs intéressant de noter que le terme $(1-a)R_g$, dont on pourrait penser qu'il est prépondérant dans le bilan, est plus fort pendant les mois froids, sans pour autant que le bilan soit plus positif (car alors la radiation atmosphérique est plus faible...). On arrive grossièrement au niveau mensuel à un bilan pendant les mois chauds environ 10 fois supérieur à celui des mois froids. Il apparaît

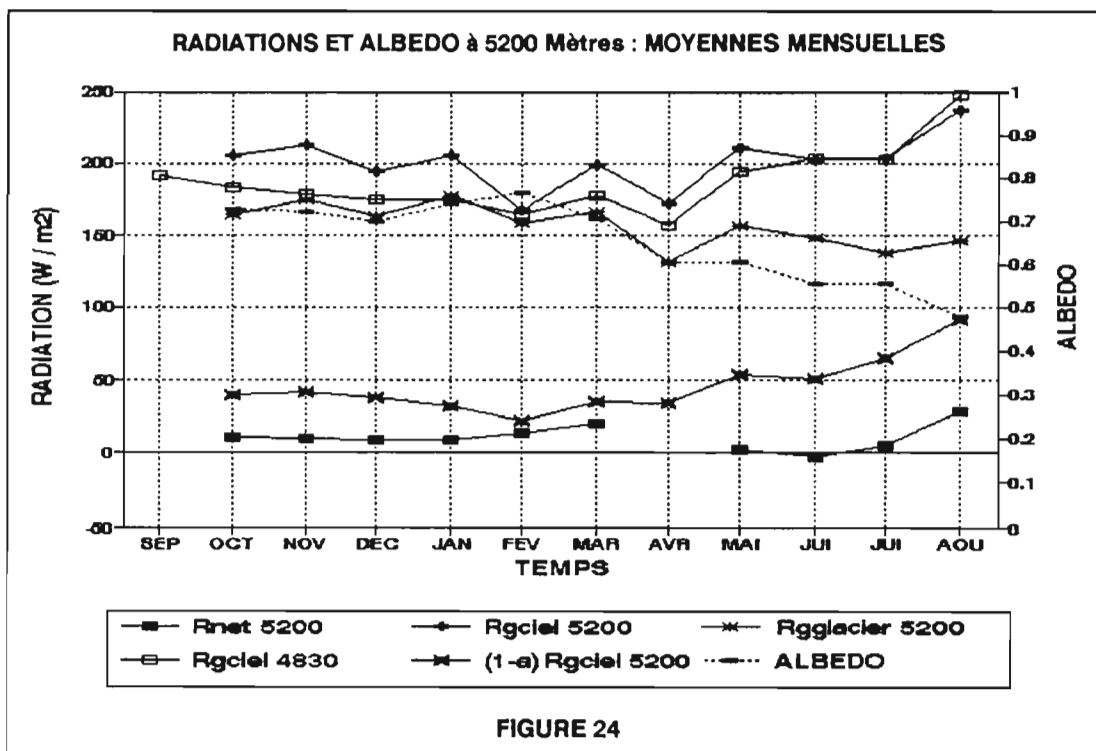
donc une saisonnalité marquée pour le bilan, qui est beaucoup plus facile à mettre en évidence avec des moyennes mensuelles qu'avec des moyennes journalières.

TABLEAU 10
RADIATIONS JOURNALIERES : MOYENNES MENSUELLES

	Rnet 5200m	Rg 5200m	Rr 5200m	(1-a)Rg 5200m	a (1) 5200m	A (2) 5200m
SEP						
OCT	10,60	205,15	164,42	39,82	0,73	0,82
NOV	10,17	213,09	174,33	41,29	0,72	0,85
DEC	8,85	193,72	163,20	37,99	0,70	0,88
JAN	9,20	205,17	177,13	31,61	0,74	0,87
FEV	13,49	167,19	158,63	22,43	0,76	0,86
MAR	19,73	198,53	165,99	34,94	0,71	0,85
AVR		171,44	131,18	34,36	0,61	0,78
MAI	2,35	211,48	156,69	53,08	0,61	0,75
JUI	-2,17	202,78	147,87	50,67	0,55	0,74
JUI	5,10	203,57	138,48	65,39	0,55	0,70
AOU	28,81	237,34	145,93	90,93	0,48	0,62
MOYEN	10,79	201,04	156,61	46,02	0,65	0,79
EC.TYP	17,71	58,75	39,62	28,481	0,50	0,45

TABLEAU 10 : Rnet = radiation nette ; Rg = radiation du ciel ; Rr = Radiation réfléchie (les radiations sont en W/m^2); a (1) = albédo mensuel (1) = moyenne mensuelle des valeurs minimales journalières d'albédo; a (2) = albédo mensuel (2) = moyenne mensuelle des rapports journaliers $[(Rr)_{moyen}/(Rg)_{moyen}]$.

En fait, le bilan est d'un ordre de grandeur environ 10 fois moindre que les termes qu'il met en jeu. Chacun de ces termes possède une saisonnalité faible, mais suffisante pour que celle du bilan apparaisse bien.



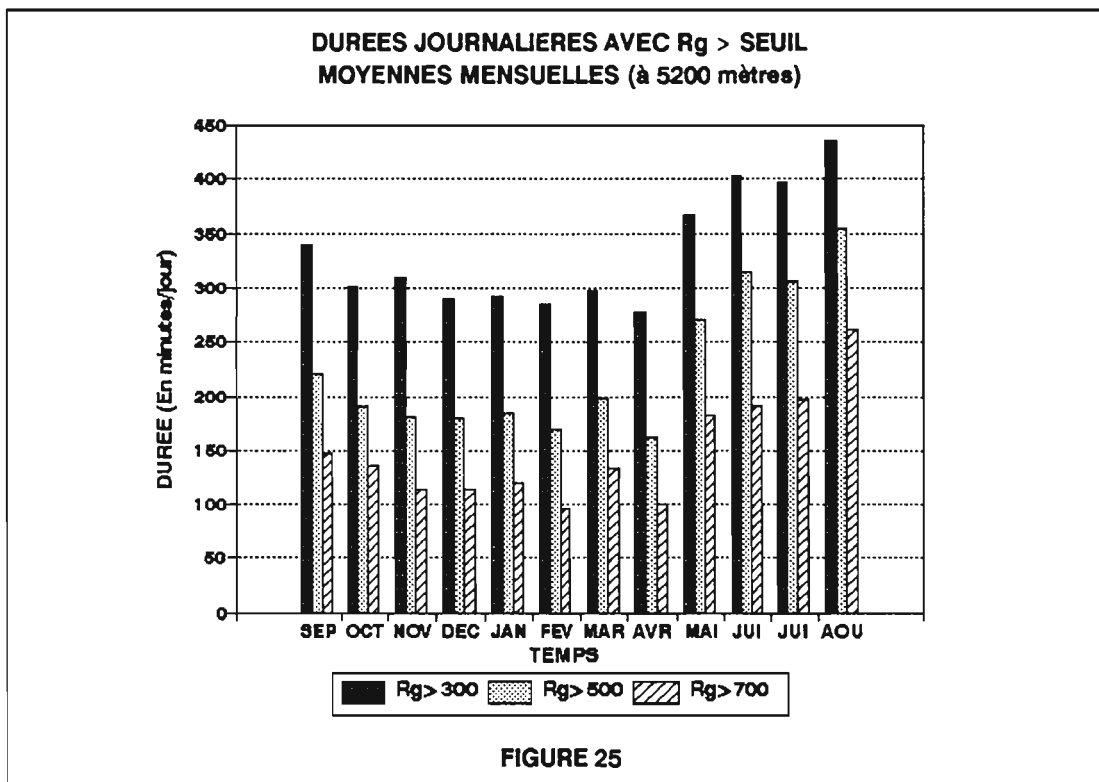
5.4.2. Durées avec la radiation supérieure à un seuil :

Le tableau 11 donne les moyennes mensuelles des durées journalières pendant lesquelles la radiation du ciel mesurée à 4830 mètres est supérieure aux seuils 300, 500 et 700 W/m². Ce tableau est illustré par la figure 25.

TABLEAU 11
DUREES JOURNALIERES AVEC Rg > SEUIL
MOYENNES MENSUELLES

	d(R > 300)	d(R > 500)	d(R > 700)
SEP	340	220	146
OCT	301	190	135
NOV	309	181	113
DEC	290	179	113
JAN	292	184	119
FEV	285	168	96
MAR	297	197	133
AVR	277	162	99
MAI	367	271	181
JUI	403	315	190
JUI	397	305	196
AOU	435	353	262
MOYENNE	333	227	149
EC. TYPE	126	128	103

TABLEAU 11 : d(R > n) = moyenne mensuelle des durées journalières durant lesquelles Rg > n W/m² (en minutes/jour).



Une saisonnalité est visible, quel que soit le seuil choisi, avec des valeurs maximales en hiver, et des valeurs minimales en été. Cette saisonnalité semble donc être en quelque sorte en opposition de phase avec celle de la radiation extraterrestre. En fait, cette contradiction s'explique facilement par l'influence de la nébulosité, dont l'influence est très forte en saison des pluies, et très faible en saison sèche.

Il est également intéressant de noter l'opposition de phase entre la saisonnalité de ces durées et de celle de la radiation nette et du débit.

En moyenne sur l'année, la durée journalière pendant laquelle la radiation du ciel est supérieure à 300 W/m^2 est de 5 heures et 30 minutes, soit environ la moitié du temps d'ensoleillement, et celle correspondant à 700 W/m^2 de 2 heures et 30 minutes.

5.4.3. Maxima :

Le tableau 12 présente les moyennes mensuelles des valeurs journalières instantanées maximales des radiations nettes, globales et réfléchies mesurées à 5200 mètres, et du ciel mesurées à 4830 mètres. Ces maxima ont en fait peu de sens physique. Il est cependant intéressant de constater que toutes les valeurs présentées sont nettement plus élevées en saison humide qu'en saison sèche. D'autre part, les maxima enregistrés sur le glacier pour la radiation du ciel sont plus forts que les mêmes mesurés à 4830 mètres (ce qui provient toujours de cet effet de "four"). Enfin, l'ordre de grandeur des maxima de radiation nette est à peu près 20 fois supérieur à celui de la moyenne.

TABLEAU 12
RADIATIONS JOURNALIERES MAXIMALES
MOYENNES MENSUELLES

	Max Rnet 5200m	Max Rg 5200m	Max Rr 5200m	Max Rg 4830m
SEP				1494,50
OCT	418,92	1747,4	1315,4	1541,35
NOV	413,72	1619,6	1257,4	1526,57
DEC	318,51	1513,0	1155,2	1422,66
JAN	207,92	1485,4	1200,2	1423,85
FEV	381,96	1486,5	1241,6	1539,39
MAR	498,28	1583,9	1204,0	1487,29
AVR		1403,6	998,1	1337,56
MAI	309,89	1135,4	813,8	1080,58
JUI	257,74	947,7	673,7	949,67
JUI	303,26	1006,9	668,6	961,24
AOU	441,76	1115,2	647,6	1063,19
MOYENNE	355,20	1367,7	1016,0	1318,99
EC. TYPE	151,25	378,26	328,93	340,19

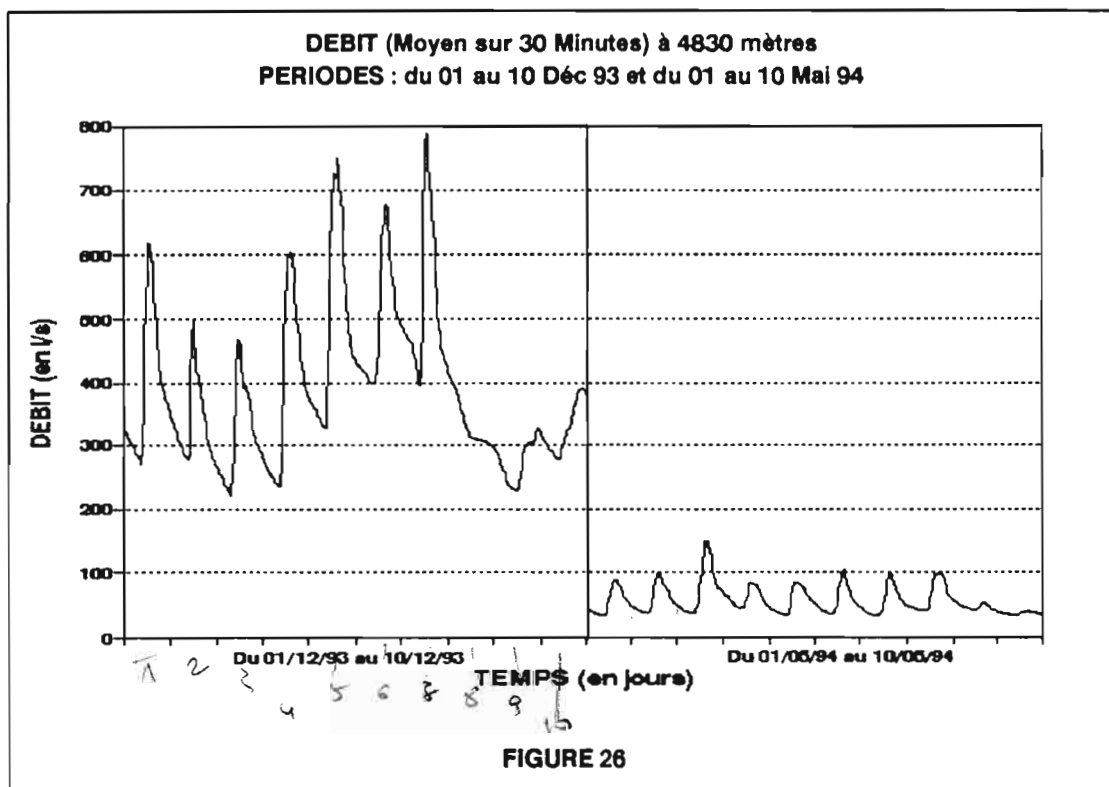
TABLEAU 12 : mêmes notations que pour le tableau 10.

6. DEBITS :

6.1. VALEURS INSTANTANÉES :

La figure 26 représente le débit instantané (en fait en moyennes demi-horaires) enregistré à la station hydrométrique à 4830 mètres, au cours de deux périodes de l'année très différentes, choisies pour leur représentativité de l'écoulement :

- en saison des pluies : période du 1^{er} au 10 décembre 1993,
- en saison sèche : période du 1^{er} au 10 mai 1994.



L'une des caractéristiques principales de l'écoulement est la présence systématique toute l'année, sauf peut-être les jours de très fort gel, d'une oscillation journalière. On observe généralement une croissance du débit depuis lever du jour jusqu'en milieu de journée, suivie d'une décroissance jusqu'à une certaine heure, variable, de la nuit, à partir de laquelle le débit reste faible jusqu'au lever du jour. Ceci traduit un cycle de refroidissements nocturnes et de réchauffements diurnes de parties du glacier, et met en évidence la relation étroite, c'est à dire à la fois la sensibilité et le temps de réponse, de l'écoulement avec certaines variables météorologiques simples (gel, ensoleillement...). Cependant, à l'échelle de l'année, on voit que le régime des débits varie très fortement. Il existe donc, outre les variations journalières, des cycles de variations saisonnières, comme le montrent les deux périodes présentées :

- en saison sèche : la saison sèche coïncide avec la saison froide. Le gel nocturne est quasiment systématique. Il n'est pas étonnant de voir que le débit est alors constitué d'un débit de base, de l'ordre de 40 l/s (pouvant même être inférieur pendant certaines périodes), sur lequel interviennent des pointes journalières directement liées aux variables météorologiques du jour et des

jours précédents. Ces pointes ajoutent de quelques litres par seconde (en cas de fort gel), à quelques dizaines de litres par secondes (si les températures et les radiations sont élevées). En moyenne, on peut dire que le débit oscille en hiver entre 20 et 150 l/s pour les cas les plus extrêmes, et se situe généralement dans une gamme 40 à 100 l/s.

- en saison humide : la saison humide coïncide avec la saison chaude. On y atteint donc des débits beaucoup plus importants, et on y constate des régimes beaucoup plus variables. Les débits de base évoluent plutôt entre 100 et 200 l/s, ce qui vient du fait qu'une grande partie de la zone d'ablation n'est soumise au gel nocturne que de temps à autres. Les pointes journalières ont une amplitude qui peut atteindre 400 à 500 l/s. On constate d'autre part qu'interviennent des cycles de plusieurs jours à plusieurs semaines, durant lesquels débits de base et débits de pointe augmentent ou diminuent. Ces cycles sont directement liés aux périodes plutôt chaudes et ensoleillées (période du 01 au 7 décembre sur la figure 26), ou à celles plutôt couvertes et neigeuses (une telle période commence le 8 décembre sur la figure 26).

Le débit maximal instantané enregistré au cours de l'année hydrologique 93-94 est 793 l/s. Pour les années précédentes, ces débits instantanés maximaux avaient été de 929 l/s (le 22/12/91) pour 91-92 et 1070 l/s pour 92-93 (le 20/12/92). La surface du bassin versant étant 2.97 km², ces débits peuvent être ramenés aux débits spécifiques maximaux respectifs suivants : 267, 312 et 360 l/s/km².

Les valeurs minimales enregistrées au cours de l'année sont de l'ordre de 10 à 20 l/s, et se produisent en hiver à la fin de la nuit. Il est difficile de les chiffrer plus précisément à cause des imprécisions dues au gel. Cette fourchette de 10 à 20 l/s correspond à des débits spécifiques très faibles de 3.4 à 6.7 l/s/km².

6.2. VALEURS JOURNALIERES :

Le tableau 13 donne les valeurs journalières du débit enregistré à la station hydrométrique pour l'année hydrologique 93-94, ainsi que les valeurs reconstituées dans le cas des lacunes. Il fait également apparaître les valeurs moyennes mensuelles et les écarts types mensuels de ces débits journaliers. Ces résultats sont illustrés sur la figure 27. La figure 28 représente graphiquement les débits journaliers enregistrés depuis septembre 91 (début des enregistrements de débits) et août 94, ainsi que les précipitations pour la même période.

La saisonnalité très marquée de l'écoulement apparaît clairement dans le tableau 13 et sur la figure 27. Pour les mois de septembre 93 et mai, juin et juillet 94, correspondant à la saison sèche et froide, l'écoulement journalier est pratiquement ramené à un débit de base. Le cas du mois d'août 94 semble un peu à part, nous y reviendrons dans la suite. Pendant la saison des pluies, on observe les deux tendances suivantes, très marquées :

- croissance du débit d'octobre 93 à décembre 94 (jusqu'à la crue du 7),
- décroissance du débit de décembre 93 à avril 94.

Ces grandes tendances font varier les débits journaliers d'un facteur 10 (de 50 à 500 l/s), d'une saison à l'autre. Elles sont d'autre part perturbées par de petits cycles croissance-décroissance de une à deux semaines, dont l'amplitude est de l'ordre d'une centaine de l/s. Ces petits cycles correspondent à des alternances de périodes plus ou moins favorables à la fonte du point de vue météorologique (températures, radiations, précipitations, nébulosité). Ils mettent en évidence une dépendance des débits avec les débits et les situations météorologiques des jours précédents.

Dans l'année hydrologique 93-94, le cas du mois d'août, mois de plein hiver, est un peu à part. En effet, on a pu voir dans les paragraphes précédents (2, 3, 4 et 5) que ce mois, s'il n'a pas été exceptionnellement chaud, a quand même connu des précipitations quasi nulles, un albédo faible et un très bon ensoleillement du fait de la faible nébulosité, qui ont conduit à la plus grande valeur moyenne mensuelle de radiation nette obtenue dans l'année (voir tableau 10). On constate d'autre part que ce mois a connu un écoulement fort, surtout si on le compare aux mêmes mois des années précédentes (Cf figure 28 et paragraphe suivant). Enfin les visites de terrain effectuées pendant ce mois ont permis l'observation du glacier dans un état jamais constaté au cours des années de mesure précédentes : la couche de neige de l'année avait pratiquement disparu, mettant à nu le reste de glace accumulé

pendant l'année hydrologique 92-93, lui-même très sali par l'accumulation de poussières. La densité de cette couche apparente a été estimée de l'ordre de 0.7 à 0.8. Nous pouvons donc expliquer le fort écoulement d'août 94 par la conjonction de deux phénomènes :

- une forte radiation nette, qui a impliqué une forte fusion superficielle,
- l'état du glacier, avec sa couche de glace (ou presque) à nu et son albédo très bas, qui a interdit la percolation et le regel dans les couches inférieures d'une grande partie de l'eau fondue. Ainsi s'est formé pendant cette période tout un réseau de petits chemins d'écoulements superficiels et de moulins, non visible en d'autres périodes de l'année, dans lequel a ruisselé l'eau qui n'a pu percoler.

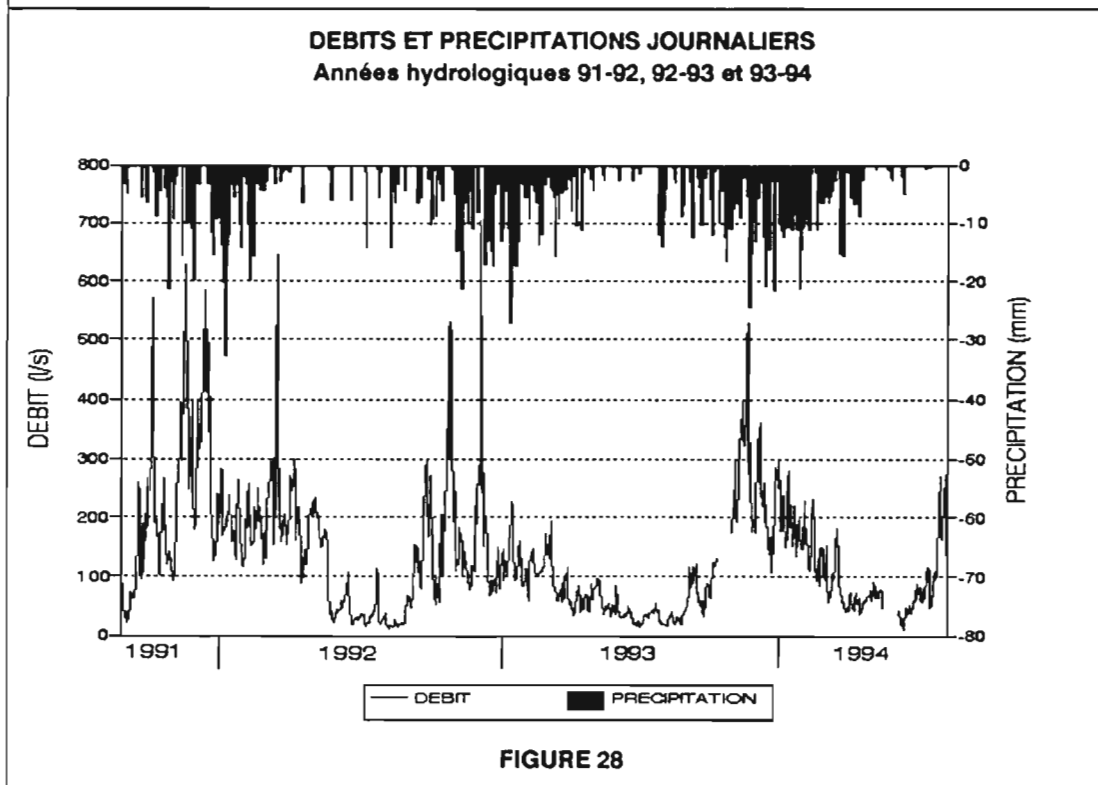
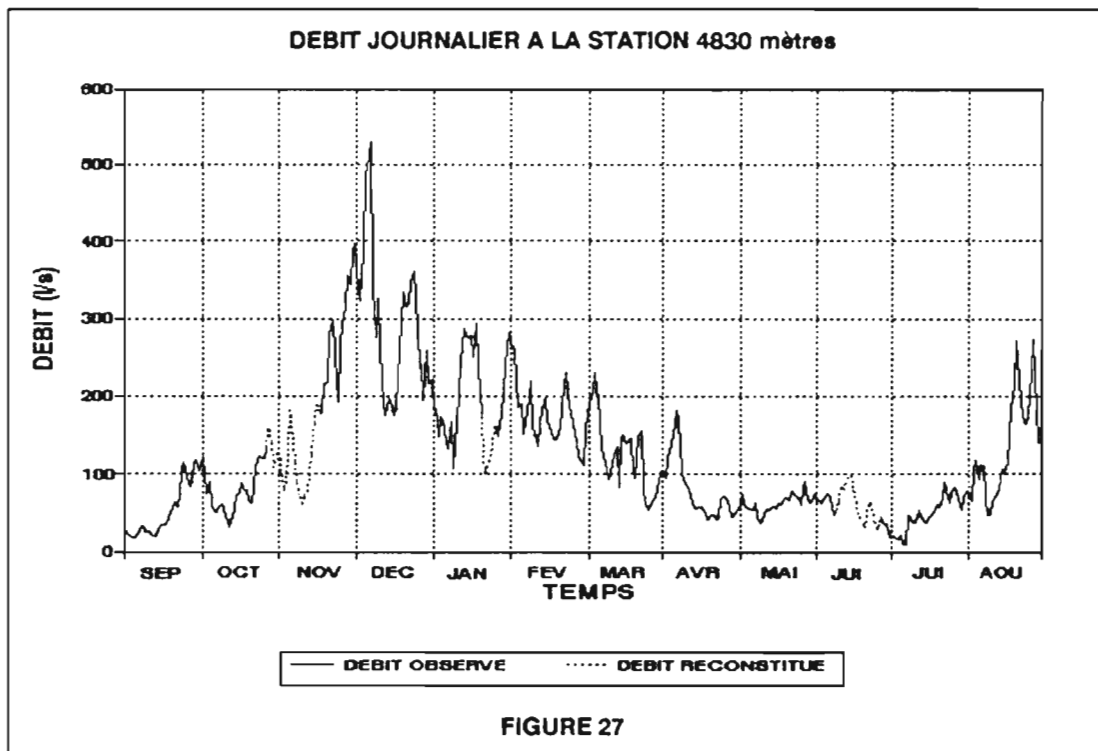
TABLEAU 13
DEBITS JOURNALIERS A LA STATION HYDROMETRIQUE

	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUI	JUI	AOU
1	27,7	122,1	120,2*	397,8	184,6	265,4	110,7	104,2	54,3	75,3	26,8	78,9
2	22,3	98,1	138,0*	336,2	183,0	257,6	157,0	105,9	59,2	66,9	18,9	74,5
3	21,2	73,8	109,6*	321,7	147,9	185,6	191,9	96,0	74,0	66,2	19,7	64,7
4	18,7	89,6	78,5*	385,9	172,7	190,3	205,1	120,9	60,2	64,3	18,3	103,4
5	18,7	59,6	84,0*	489,9	159,6	190,9	230,7	129,8	55,7	70,6	17,3	117,0
6	27,1	51,4	185,6*	494,6	139,5	152,6	206,4	150,5	55,9	76,2	23,6	93,5
7	32,0	50,4	164,3*	528,8	132,8	179,7	198,3	182,4	54,3	73,2	10,6	112,4
8	32,2	58,6	117,2*	338,4	168,7	219,6	134,7	169,0	63,7	71,0	9,8	111,6
9	25,5	60,4	92,0*	275,1	107,8	158,9	115,2	138,2	46,4	46,7	46,6	69,8
10	25,4	54,8	74,5*	326,5	166,8	152,9	104,0	102,2	36,3	56,3*	39,9	46,7
11	20,3	38,9	60,5*	258,6	204,5	135,4	94,1	87,3	40,6	65,8*	38,0	49,4
12	20,8	31,4	72,8*	189,3	243,9	165,7	102,1	80,6	53,4	85,4*	38,9	63,6
13	20,4	40,4	77,2*	174,8	286,5	196,1	125,1	71,9	56,7	81,6*	53,5	69,9
14	30,1	52,6	104,1*	196,0	275,8	195,8	136,0	63,3	53,9	91,7*	46,0	76,4
15	34,3	73,4	127,5*	194,9	275,2	168,4	83,7	56,6	59,5	100,5*	38,2	81,6
16	34,7	76,4	167,9*	175,2	278,8	154,8	144,4	57,4	56,1	101,4*	39,4	107,8
17	39,6	88,0	192,6	*185,9	250,0	146,1	150,9	57,2	63,3	82,8*	45,8	100,4
18	43,4	81,6	178,4	222,6	293,3	146,1	138,8	52,7	61,0	61,7*	48,0	115,7
19	51,3	79,4	215,3	294,8	236,0	154,0	145,3	50,3	62,6	49,1*	53,9	148,1
20	63,5	65,6	218,4	334,5	178,0	157,6	147,1	41,5	69,6	39,8*	60,8	184,0
21	56,8	63,9	279,9	315,0	204,0	213,9	102,8	47,7	66,7	32,9*	58,2	216,6
22	71,8	82,6	297,9	320,7	99,9*	229,5	95,4	47,6	74,9	31,1*	69,0	271,2
23	105,6	110,3	250,8	346,0	113,9*	184,5	149,7	42,4	78,7	65,5*	88,6	222,7
24	116,2	123,6	193,9	361,6	135,4*	181,2	154,8	44,1	73,3	66,1*	69,7	191,6
25	94,3	122,1	264,2	327,8	191,9	165,4	82,1	68,3	70,0	43,9*	62,7	166,1
26	82,2	119,7	294,8	235,6	157,9	141,6	64,5	72,0	60,2	34,5*	76,4	163,8
27	91,6	131,7	313,0	241,1	148,9	124,0	55,2	68,0	81,6	29,7*	81,9	175,2
28	115,8	159,9*	355,3	194,5	176,3	114,6	62,2	58,0	92,1	44,4	78,2	230,1
29	118,2	143,1*	344,4	258,0	239,1		67,5	46,2	76,9	38,5	59,2	272,5
30	103,6	107,1*	387,8	216,4	262,7		72,1	44,5	64,4	36,5	55,5	182,0
31				221,3	280,2		81,0		68,1		69,2	139,3
MOY	52,2	84,9	187,2	295,5	207,3	176,0	126,1	81,9	62,7	61,7	47,2	132,3
E.TY	34,6	34,6	95,3	95,8	53,3	36,7	47,1	39,8	11,8	27,0	21,9	64,6
SPE	17,6	28,6	60,3	99,5	69,8	59,2	42,4	27,6	21,1	20,8	15,9	44,5

TABLEAU 13 : débits journaliers en l/s. SPE = débit moyen spécifique mensuel en l/s/km², italique* = lacune reconstituée avec le modèle "déterministe", CF paragraphe 6.5 ; MOY = moyenne mensuelle ; E.TY = écart type mensuel des valeurs journalières.

L'écoulement moyen journalier maximal a eu lieu le 7 décembre 93, avec un débit moyen de 529 l/s (soit 178 l/s/km²). Pour les années hydrologiques 91-92 et 92-93, ces débits ont été

respectivement de 645 l/s (soit 217 l/s/km², le 26/03/92) et de 703 l/s (soit 236 l/s/km², le 21/12/92). L'écoulement moyen journalier minimal s'est produit le 7 juillet 94, avec un débit moyen de 10 l/s (soit 3.35 l/s/km²). Pour les années 91-92 et 92-93, ces débits ont été respectivement de 14 l/s (soit 4.7 l/s/km², le 22/06/92) et de 17 l/s (soit 5.7 l/s/km², le 24/08/93).



L'examen de la figure 28 montre les ressemblances, mais aussi les différences, entre l'année hydrologique 93-94 et les deux précédentes, du point de vue de l'écoulement :

- une saisonnalité très forte apparaît chaque année,

- le point culminant de la saison des pluies 93-94 a été le mois de décembre 93, marqué par une seule crue vraiment forte, centrée sur le 7 décembre 93. Les années précédentes au contraire, présentaient des écoulements plus étalés dans le temps, avec des crues de l'ordre de celle du 7 décembre 93 au nombre de 4 pour 91-92, et 2 pour 93-94. Paradoxalement, les précipitations semblent mieux réparties pendant la saison des pluies 93-94 qu'au cours des deux précédentes.

- les trois années présentent à chaque fois un écoulement très faible pendant les mois d'hiver, en général les mois de juin et juillet, cette période pouvant déborder sur mai et août selon les cas.

6.3. VALEURS MENSUELLES ET ANNUELLES :

6.3.1. Valeurs mensuelles :

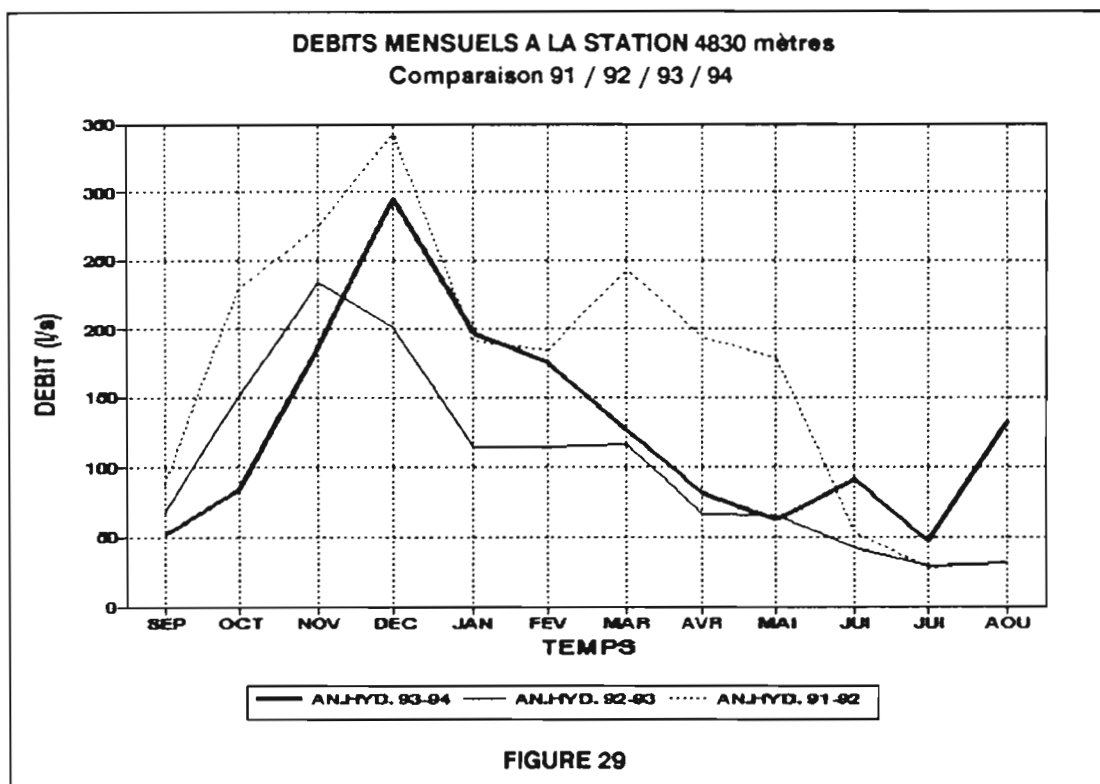
Le tableau 14 donne les valeurs de l'écoulement moyen mensuel à la station hydrométrique (4830 mètres), pour les années hydrologiques 91-92, 92-93 et 93-94. On pourra se reporter au tableau 13 pour les écarts types mensuels des débits journaliers ainsi que pour les débits spécifiques moyens mensuels pendant l'année 93-94. La figure 29 illustre les résultats du tableau 14.

TABLEAU 14
DEBITS MOYENS MENSUELS A LA STATION
HYDROMETRIQUE, DE 1991 A 1994

	91-92	92-93	93-94
SEP	88,1	67,8	52,2
OCT	230,0	152,0	84,9
NOV	274,0	234,0	187,2
DEC	342,0	201,0	295,5
JAN	192,0	114,0	207,3
FEV	185,0	114,0	176,0
MAR	243,0	116,0	126,1
AVR	194,0	66,8	81,9
MAI	179,0	65,1	62,7
JUI	52,7	42,2	61,7
JUI	28,2	29,2	47,2
AOU	32,8	31,3	132,3
MOYENNE	170,0	102,7	125,2
SPECIF	57,2	34,6	42,1

TABLEAU 14 : débits mensuels moyens en l/s. SPECIF = débit spécifique annuel en l/s/km².

On peut résumer ces graphiques et tableaux en disant que du point de vue de l'écoulement, l'année hydrologique 93-94 a connu, avec un débit moyen annuel de **125.2 l/s**, une situation un peu intermédiaire entre l'année 91-92, à écoulement plutôt fort (débit moyen annuel **170.0 l/s**, soit 36% de plus), et l'année 92-93, à écoulement plutôt faible (débit moyen annuel **102.7 l/s**, soit 18% de moins). Les débits moyens mensuels varient dans un rapport de 1 à 6, et les écarts types mensuels représentent généralement 20 à 50% des moyennes, ce qui traduit la forte variabilité des débits journaliers. Enfin le caractère exceptionnel du mois d'août 94 par rapport à août 92 et août 93 apparaît bien.



6.3.2. Valeurs annuelles :

Les valeurs moyennes annuelles de l'écoulement à la station hydrométrique depuis 1991 apparaissent dans le tableau 14, sous la forme d'un débit et d'un débit spécifique pour chacune des trois années hydrologiques. L'année 93-94 se confirme bien comme une année moyenne par rapport aux deux autres, l'écoulement en 91-92 ayant été supérieur de 25% environ, et celui en 92-93, inférieur de 25% environ.

On peut essayer de déduire simplement de ces chiffres un ordre de grandeur de la contribution annuelle du glacier à l'écoulement. Sachant que le bassin versant est constitué de 2.10 km² de surface englacée et de 0.90 km² de moraine, on fait l'hypothèse que la contribution de la moraine est égale aux précipitations ruisselées, avec un coefficient de ruissellement de 0,8. On peut ainsi estimer l'ablation sur le glacier sous la forme d'une lame d'eau annuelle, et calculer un bilan de masse. Le tableau 15 synthétise ces divers calculs. On pourra rapprocher ces résultats avec ceux du tableau 22, qui présente ceux obtenus par une approche glaciologique.

TABLEAU 15
BILAN HYDROLOGIQUE SUR LES TROIS ANNEES

	Débit Moyen	Pluie Totale	Apport Glacier	Apport Moraine	Lame d'Eau	Bilan Masse
91-92	170,0	920	149,0	21,0	2237	1317
92-93	102,7	1060	78,5	24,2	1179	119
93-94	125,2	850	105,8	19,4	1589	739

TABLEAU 15 : Débit Moyen = débit moyen annuel du bassin versant (en l/s), Pluie Totale = pluie totale moyenne sur l'année (en mm), Apport Glacier = débit moyen sur l'année provenant du glacier (= Débit Moyen - Apport Moraine, en l/s), Apport Moraine = débit moyen sur l'année provenant de la moraine (en l/s), Lama d'eau = Apport Glacier converti en lame d'eau fondue pendant l'année par m² de glacier (en mm), Bilan Masse = Lama d'Eau - Pluie Totale = ablation nette sur l'année (en mm).

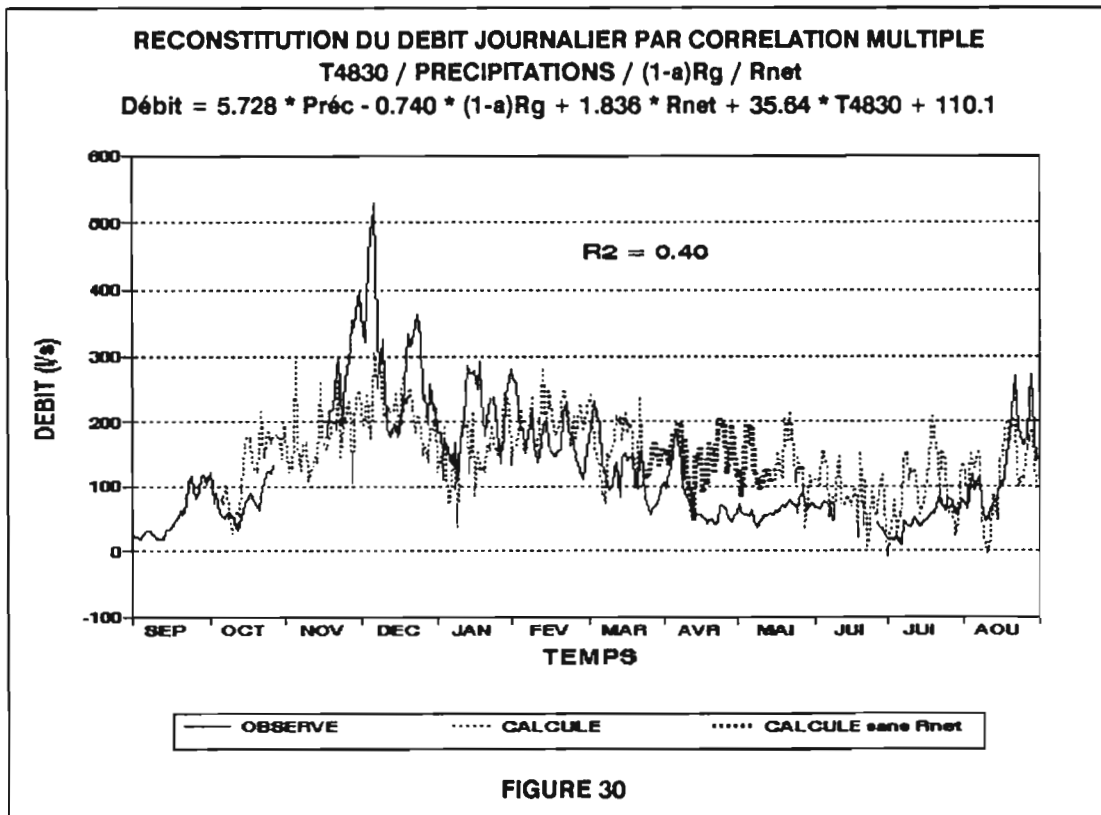
REMARQUES : les chiffres de pluies totales donnés pour 91-92, 92-93 et 93-94 sont les valeurs moyennes obtenues à partir des pluviomètres totalisateurs 2, 3, 4 et 5 pour le glacier (ces chiffres sont donc différents de ceux du tableau 9, qui sont donnés pour la Plataforma).

Ce tableau met en lumière une diversité des bilans hydrologiques sur les trois années, avec surtout des différences très marquées pour les chiffres de bilan de masse. Les ordres de grandeur des précipitations totales étant assez voisins sur les trois années, les différences de bilan s'expliquent surtout par les différences d'écoulement. Apparaissent deux comportements " extrêmes ", l'année 91-92, qui a connu une très forte ablation, et l'année 92-93, avec un bilan presque équilibré, en comparaison desquelles l'année 93-94 représenterait plutôt un comportement intermédiaire.

6.4. ETUDE STATISTIQUE :

6.4.1. Corrélations multiples :

Le débit à la station hydrométrique est clairement lié, nous l'avons vu, à certaines variables météorologiques. C'est pourquoi il est intéressant de rechercher l'existence de relations simples, ici des corrélations multiples, entre ce débit et ces variables, pour voir si ces relations peuvent l'expliquer convenablement. La figure 30 présente la reconstitution du débit journalier par une corrélation multiple avec les variables météorologiques disponibles qui, de façon intuitive, semblent présenter un lien direct avec celui-ci : la température à 4830 mètres (T4830), les précipitations, le terme $(1-a)R_g$ du bilan radiatif, et la radiation nette (Rnet), toutes ces variables étant elles-mêmes en valeurs journalières (mesurées le même jour que le débit). Le résultat de cette corrélation n'est évidemment pas satisfaisant ($r^2 = 0.40$, critère de Nash = 0.53, Cf remarque sur ce critère plus bas). Il est clair en particulier, qu'elle ne permet pas de reconstituer la saisonnalité de l'écoulement. Ceci n'est guère étonnant si l'on se rappelle que toutes ces variables météorologiques, sauf les précipitations, ont une saisonnalité peu marquée, contrairement au débit.

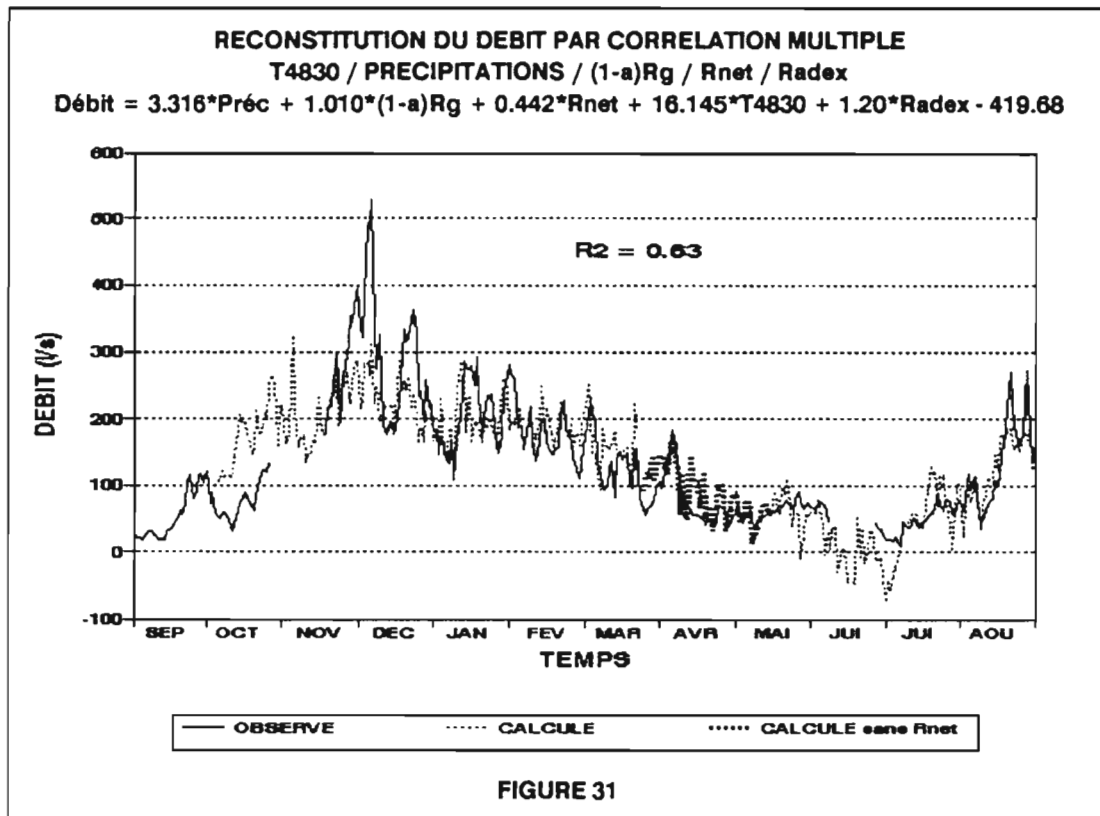


REMARQUE : à cause des lacunes de mesures de radiation nette, certaines périodes sont calculées sans cette variable, ainsi qu'il apparaît dans la légende.

Pour tenter de reconstituer cette saisonnalité, on peut introduire dans la corrélation multiple une variable supplémentaire, la radiation extraterrestre, dont les variations saisonnières influent clairement sur celles du débit. Le résultat de cette corrélation est présenté sur la figure 31. Cette corrélation est meilleure que la précédente ($r^2 = 0.63$, critère de Nash = 0.63). Elle est même acceptable si les débits restent inférieurs à 250 l/s, mais ne permet cependant pas encore de reconstituer convenablement les débits supérieurs à cette valeur, probablement encore pour la même raison que celle évoquée précédemment.

REMARQUE : critère de Nash = $1 - \frac{\sum [Q_{calculé} - Q_{observé}]^2}{\sum [Q_{moyen} - Q_{observé}]^2}$. Doit être proche de 1.

Ces deux corrélations multiples, dont aucune n'est vraiment satisfaisante, montrent que le débit est bien lié aux variables intervenant, mais d'une façon beaucoup moins directe que celle envisagée dans ce paragraphe. En particulier, les corrélations multiples gommant les extrêmes, on ne peut reconstituer les fortes valeurs. L'écoulement apparaît donc ici comme un phénomène complexe; c'est pourquoi il faut envisager des méthodes plus élaborées pour pouvoir espérer le modéliser convenablement.



6.4.2. Autocorrélation :

Il est intéressant de rechercher une éventuelle inertie des débits par rapport à ceux des jours précédents. Pour cela, il suffit de faire une étude d'autocorrélation. Nous avons évalué les 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. Les résultats de cette étude sont présentés dans le tableau 16 :

- le débit du jour j est très bien corrélé avec celui de la veille ($r^2=0.90$), ce qui traduit une forte inertie du phénomène,
- cette dépendance diminue avec le recul dans le temps, ce qui est normal, comme le traduisent l'effondrement avec n des coefficients a et des coefficients de corrélation (selon les notations du tableau 16). Cependant, le débit du jour j est encore significativement lié à celui du jour j-3, l'influence commençant à s'estomper nettement à partir de n=5.

- Une corrélation multiple entre le débit du jour j et ceux des n jours précédents, non présentée ici, n'améliore quasiment pas la corrélation simple avec le débit de la veille.

TABLEAU 16
AUTOCORRELATION DU DEBIT

	a	b	r^2
Q(j-1)	0,948	7,22	0,900
Q(j-2)	0,841	22,83	0,705
Q(j-3)	0,802	28,36	0,641
Q(j-5)	0,739	36,53	0,552
Q(j-10)	0,644	49,13	0,424

TABLEAU 16 : corrélation simple $Q(j) = a * Q(j-n) + b$, entre le débit du jour j et celui du jour $j-n$. r = coefficient de corrélation.

La figure 32 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 reconstitution avec le débit de la veille est excellente, avec un critère de Nash proche de 100%. Par contre, celle avec le débit du jour $j-10$ est mauvaise, ce qui traduit une dépendance faible.

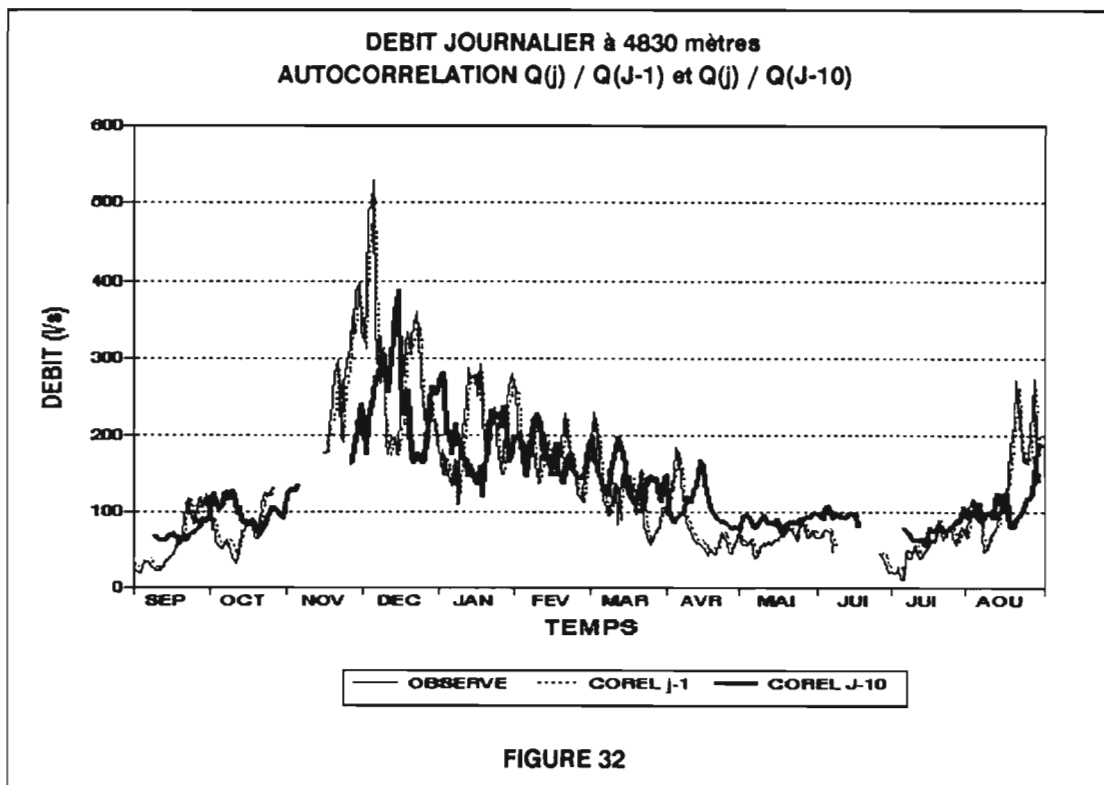


FIGURE 32

Tout ceci met en lumière le caractère fortement autocorrélatif de l'écoulement. On peut considérer que le débit journalier est très dépendant du débit de la veille, et significativement lié à ceux de l'avant veille et du jour $j-3$. Sur un bassin possédant des caractéristiques identiques (pente et surface), mais non englacé, dans lequel le débit à l'exutoire dépendrait directement des pluies du jour, on n'aurait pas cette autocorrélation, à cause du caractère aléatoire de la pluie. Or ici, si on considère le glacier comme un système, les entrées de ce système pouvant expliquer le débit, c'est à dire les variables météorologiques, sont également aléatoires. L'autocorrélation de l'écoulement est donc due

au rôle joué par le glacier lui-même. Celui-ci se comporte comme un grand " réservoir thermique " et a un effet tampon sur les entrées. Il joue de plus le rôle d'un " réservoir liquide ", qui transfère les eaux de fonte avec un certain temps caractéristique.

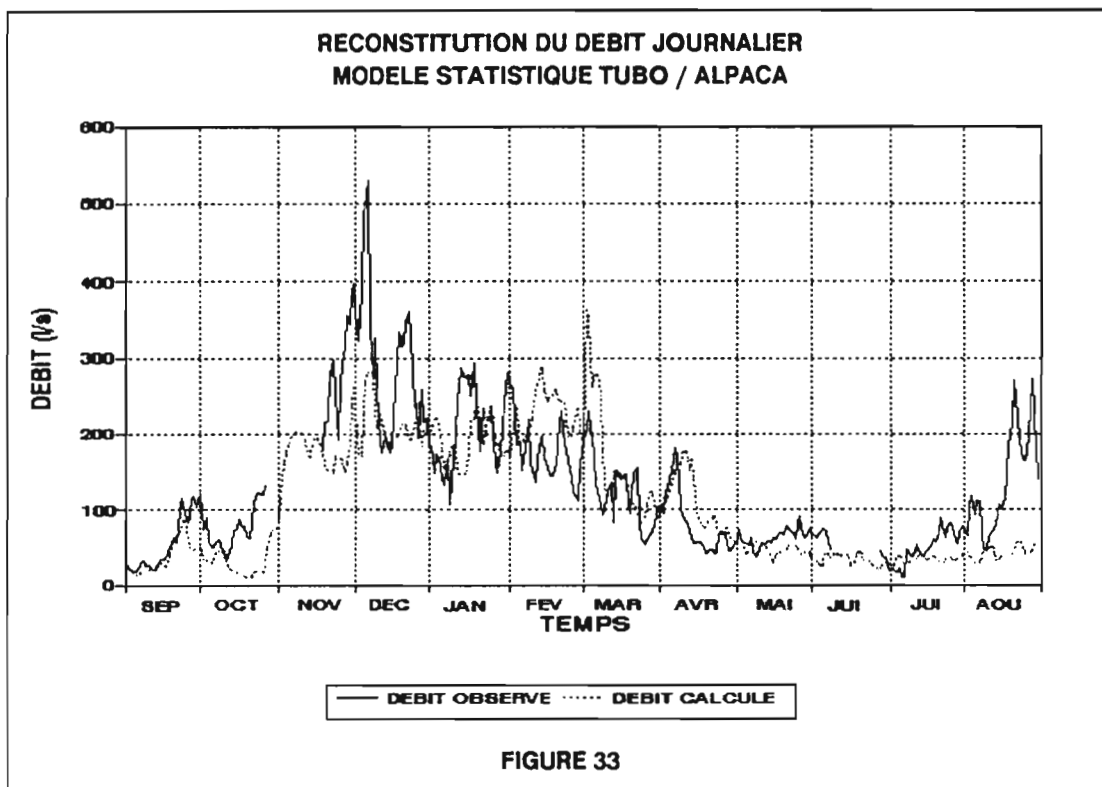
6.5. RECONSTITUTIONS :

6.5.1. Approche statistique :

6.5.1.1. Débit journalier :

La figure 33 montre le débit journalier à la station hydrométrique et sa reconstitution par un modèle statistique, élaboré à partir de corrélations multiples, faisant intervenir les débits instantanés du TUBO et du canal ALPACA :

- à 15h00 le jour précédent,
- à 7h00 et 15h00 le jour courant,
- à 7h00 le jour suivant.



La valeur de la fonction critère obtenue pour cette reconstitution est 0.42. Ce modèle marchait parfaitement pour la reconstitution des deux années hydrologiques précédentes. Le fait qu'il ne marche pas, en validation, pour l'année 93-94 est très certainement lié à la mauvaise qualité des lectures d'échelle effectuées par l'observateur en place depuis octobre 93. De nombreux contrôles ont prouvé que ces lectures étaient, pour la plupart, pas ou mal effectuées. Le cas du mois d'août 94 est à ce titre très significatif, avec des lectures d'échelles faibles, manifestement sans rapport avec l'écoulement réel. Cela est très regrettable, mais la totalité de ces lectures sont donc à considérer comme douteuses, voire inutilisables.

6.5.1.2. Débit mensuel :

Le débit moyen mensuel enregistré à la station hydrométrique a pu être reconstitué, pour les années hydrologiques 91-92 et 92-93 par une corrélation multiple à partir des moyennes mensuelles des durées journalières avec la température supérieure à 3°C (DT3) à la Plataforma et de radiation extraterrestre mensuelle (H0) [Paltridge et Platt, 1976]. L'équation obtenue avec cette régression est la suivante :

$$Q_{\text{mensuel}} = 1.28 * H0 + 23.58 * DT3 - 538.1 \quad (1) \quad (r = 0.92, n = 24)$$

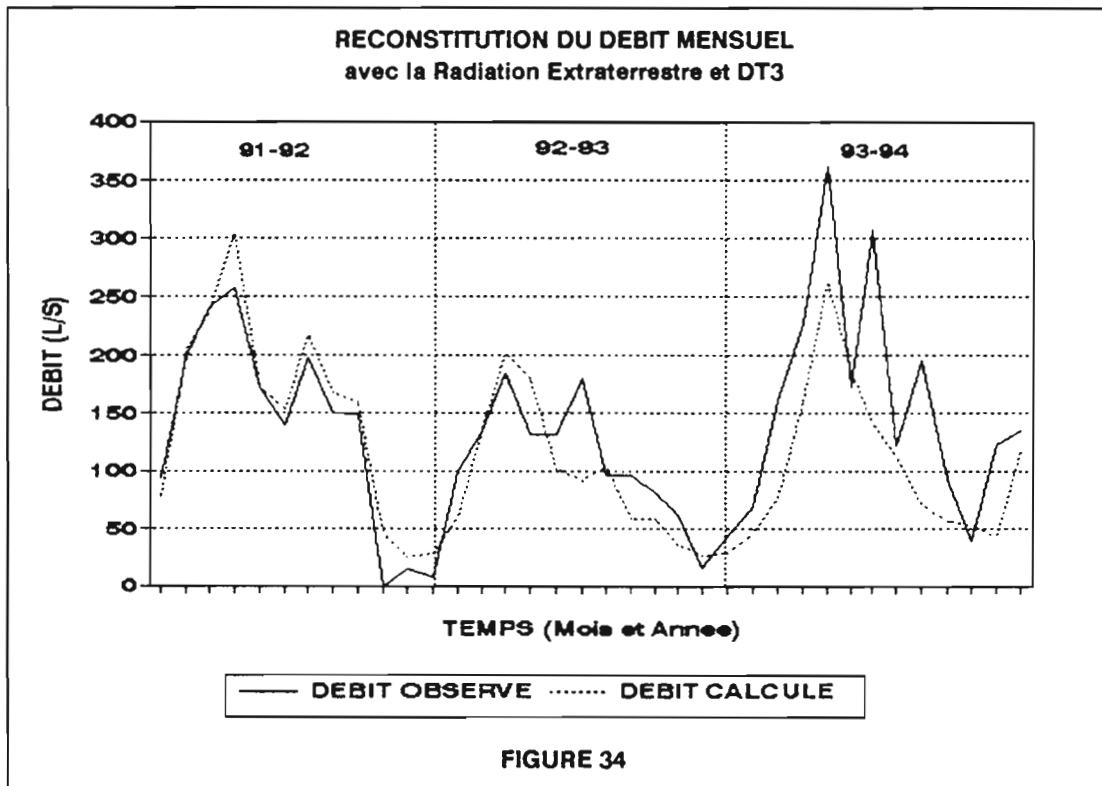
Le tableau 17 présente les résultats de cette étude pour 91-92 et 92-93, ainsi qu'une extension du calcul pour 93-94. Ces résultats sont illustrés par la figure 34.

TABLEAU 17
RECONSTITUTION DU DEBIT MENSUEL

	DEBIT	DT3	H0	CALCUL
SEP 91	76	4,9	403,8	94,3
OCT 91	205	7,4	439,2	198,6
NOV 91	237	8,3	455,9	241,2
DEC 91	305	8,8	459,8	257,9
JAN 92	171	5,2	458,3	171,1
FEV 92	154	4,4	448,5	139,7
MAR 92	217	8,3	421,5	197,1
AVR 92	168	8,7	377,5	150,2
MAI 92	160	11,0	334,0	148,8
JUI 92	45	5,9	311,6	0,0
JUI 92	25	6,0	320,9	14,1
AOU 92	29	3,7	357,9	7,3
SEP 92	59	5,1	403,8	99,0
OCT 92	136	4,7	439,2	134,9
NOV 92	202	5,9	455,9	184,6
DEC 92	179	3,4	459,8	130,6
JAN 93	102	3,5	458,3	131,1
FEV 93	92	6,1	448,5	179,8
MAR 93	104	4,0	421,5	95,7
AVR 93	58	6,4	377,5	96,0
MAI 93	58	8,1	334,0	80,4
JUI 93	36	8,5	311,6	61,2
JUI 93	26	6,1	320,9	16,5
AOU 93	28	5,2	357,9	42,6
SEP 93	45	3,8	403,8	68,4
OCT 93	76	5,8	439,2	160,8
NOV 93	161	7,7	455,9	227,0
DEC 93	264	13,2	459,8	361,7
JAN 94	185	5,3	458,3	173,5
FEV 94	142	11,5	448,5	307,2
MAR 94	113	5,1	421,5	121,7
AVR 94	71	10,6	377,5	195,0
MAI 94	56	8,6	334,0	92,2
JUI 94	53	7,6	311,6	40,0
JUI 94	42	10,6	320,9	122,6
AOU 94	118	9,1	357,9	134,6

TABLEAU 17 : DEBIT = débit moyen mensuel à la station hydrométrique, DT3 = moyenne mensuelle des durées journalières avec $T > 3^{\circ}\text{C}$, H0 = radiation extraterrestre mensuelle moyenne, CALCUL = débit mensuel calculé à partir de la relation (1).

La reconstitution était bonne pour les années 91-92 et 93-94. Le tableau 17 et la figure 34 montrent qu'elle ne l'est pas pour l'année 93-94. Il est clair que la mauvaise qualité du calcul provient des valeurs de DT3 pour cette même année. Ces valeurs, en effet, sont calculées à partir des enregistrements du thermographe de la Plataforma, au sujet desquels nous avons émis plusieurs fois des doutes dans ce qui précède. Les valeurs de DT3 obtenues sont manifestement trop élevées, notamment en décembre 93 et février et avril 94, ce qui confirmerait que la moyenne annuelle pour 93-94 est effectivement trop élevée.



6.5.2. Approche "déterministe" :

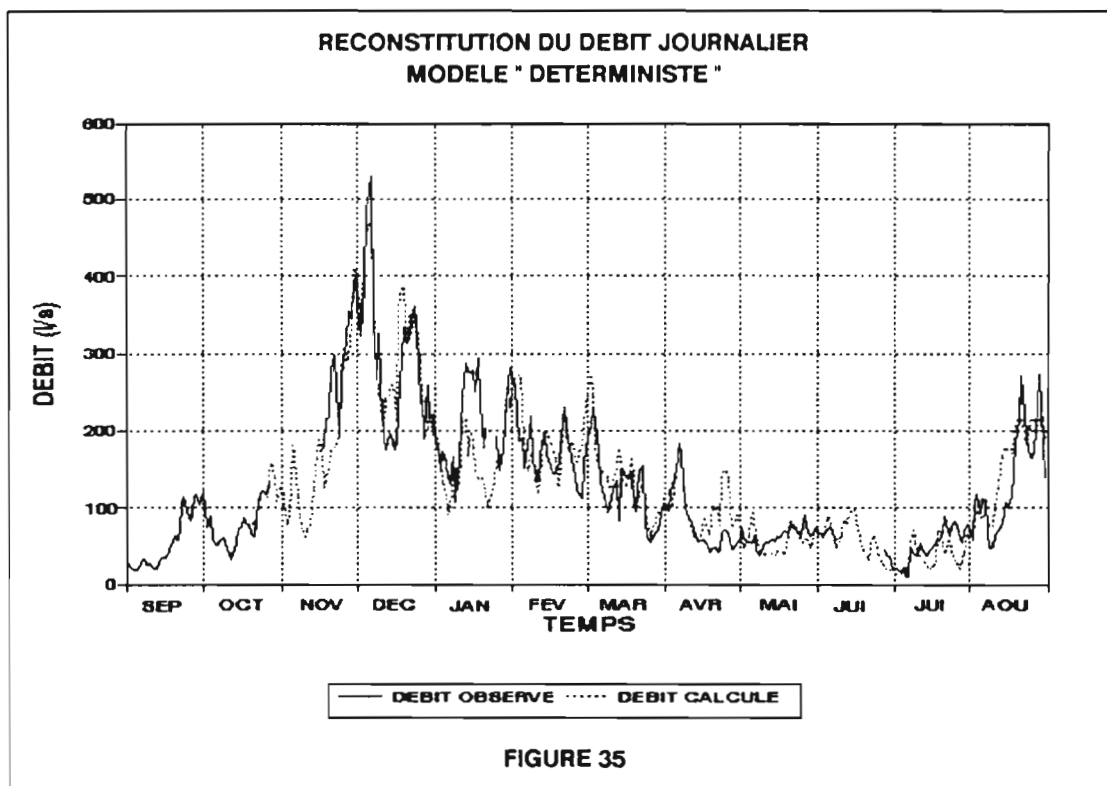
La figure 35 montre le débit moyen journalier à la station hydrométrique et sa reconstitution sur l'année hydrologique par un modèle plus " déterministe ", qui s'appuie sur :

- une équation de bilan énergétique à la surface du glacier (en fait sur une couche constituée des premiers mètres de glace et les premiers mètres d'air), qui permet d'évaluer la fusion superficielle, et les phénomènes de percolation et de regel de l'eau fondue,

- un modèle de réservoir linéaire, qui transporte l'eau issue de la fonte depuis chacun des secteurs du glacier jusqu'à l'exutoire du bassin versant.

La valeur de la fonction critère obtenue pour cette reconstitution est 0.85. Ceci est un bon résultat, si on se rappelle que cette fonction doit être proche de 1.

Nous avons donc envisagé successivement deux démarches pour essayer de reconstituer le débit journalier, l'une statistique et l'autre déterministe, les deux approches possédant à peu de chose près les mêmes entrées. Comme on pouvait s'y attendre, les résultats issus de la physique sont bien meilleurs que ceux issus de la statistique.



Cette approche déterministe , beaucoup plus élaborée, confirme donc que l'écoulement est le résultat d'une chaîne de mécanismes plus ou moins complexes, faisant intervenir des processus météorologiques, physiques, glaciologiques et hydrologiques.

7. AUTRES MESURES METEOROLOGIQUES :

7.1. INTRODUCTION :

Ce paragraphe traite brièvement des autres mesures météorologiques effectuées sur le bassin versant : humidité relative à 5200 mètres sur le glacier, vent moyen et vent maximal sur le glacier à 5200 mètres, sonde à neige sur le glacier à 5200 mètres (en place depuis mai 94), et pluviomètre à augets basculeurs à 4830 mètres à la station hydrométrique (en place depuis juin 94). Le tableau 18 donne les valeurs mensuelles et annuelles de toutes ces variables pour l'année hydrologique 93-94. Ces valeurs seront commentées dans les paragraphes suivants.

TABLEAU 18
HUMIDITE, VENT, PLUIE, SONDE
VALEURS MENSUELLES

	Humidit. Relat.	Vent Moyen	Vent Maxi	Pluie	Sonde
SEP					
OCT	74,53	2,48	9,57		
NOV	82,98	2,29	8,81		
DEC	90,22	2,15	7,96		
JAN	88,82	2,30	8,89		
FEV	93,89	1,88	8,25		
MAR	80,30	2,16	8,10		
AVR	78,70	2,29	8,20		
MAI	47,14	3,04	9,61		1138
JUI	38,85	3,56	10,72	51	1293
JUI	40,49	3,51	11,09	23	1469
AOU	37,25	3,08	9,58	2	1897
MOY/TOT	68,47	2,61	9,16	96*	-900**
EC.TYPE	27,40	0,99	2,68		

TABLEAU 18 : Humidité Relative en %, Vent Moyen et Vent Maxi (= moyenne mensuelle des maxima journaliers) en m/s, Pluie totale en mm, Sonde = distance en fin de mois entre la sonde et la surface en mm., MOY/TOT = MOYENNE/TOTAL, * = cumul en mm du 20/05/94 au 31/08/94, ** = différence entre le 17/05/94 et le 31/08/94.

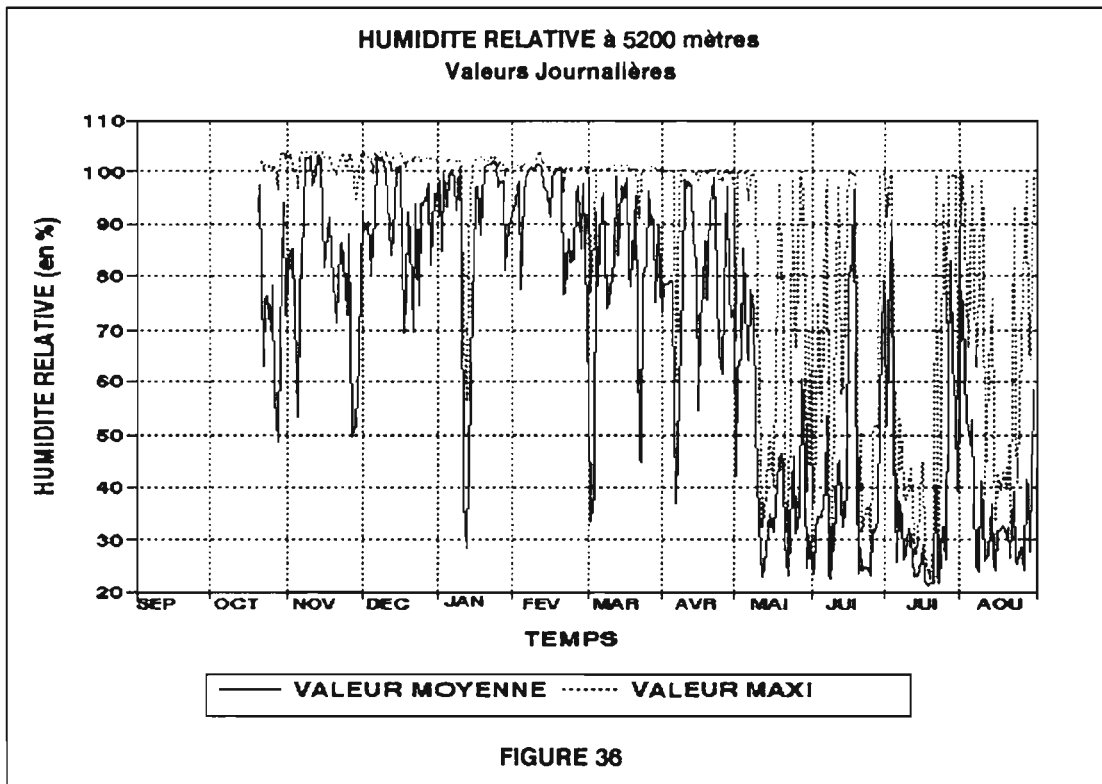
7.1. HUMIDITE :

La figure 36 présente les valeurs journalières moyennes et maximales sur le glacier à 5200 mètres de l'humidité relative, pour l'année hydrologique 93-94. On se reportera également au tableau 18.

Cette variable humidité se révèle beaucoup plus intéressante qu'on pourrait le penser a priori :

- les valeurs journalières moyennes présentent une saisonnalité marquée, avec des valeurs fortes en saison humide et plus faibles en saison sèche, ce qui est parfaitement normal. Il est intéressant de se rappeler le poids important de l'humidité relative dans le bilan radiatif. En effet,

l'émissivité de l'atmosphère est une fonction croissante de cette variable, et varie grossièrement entre 0.3 (humidité faible) et 0.7 (humidité forte), ce qui conduit à des écarts sur le glacier de 100 W/m² pour la radiation atmosphérique (qui varie généralement entre 200 et 300 W/m²) (d'après des calculs effectués sur le glacier selon la formule de Brutsaert corrigée par l'altitude, [Elder et Dozier, 1990 ; Duguay, 1993]). On pourra se reporter à la figure 21, qui présente le bilan radiatif journalier, pour une illustration de ces chiffres. L'humidité relative a donc une influence capitale sur la radiation nette. Il n'est ainsi pas étonnant de constater qu'elle possède des variations en accord avec cette dernière, et avec le débit.



- d'autre part, l'évaporation ou la condensation à la surface du glacier sont liées au gradient de tension de vapeur d'eau, lui-même fonction de l'humidité relative et de la température [Liboutry, 1964 ; Kuhn, 1987]. Si on fait l'hypothèse qu'à la surface du glacier, l'humidité relative est toujours de l'ordre de 100%, ce qui est généralement vérifié, on a un gradient de tension de vapeur plutôt plus fort en saison sèche qu'en saison humide. On peut donc dire qu'on a globalement plutôt plus d'évaporation pendant la saison sèche que pendant la saison humide. De plus, en empêchant le glacier de se refroidir par rayonnement, l'humidité maintient la fonte élevée.

- la cassure visible durant le mois de mai 94 (figure 36) correspond au passage, assez brutal, de la saison humide à la saison sèche, visible également sur le bilan radiatif ou les températures. La première quinzaine de mai, en effet, a été marquée par un profond changement des conditions climatiques.

- les valeurs journalières maximales sont utiles dans le sens où elles signalent les jours avec précipitation (maxi à 100%) et les jours sans.

- globalement, toutes ces valeurs sont cohérentes vis à vis des mesures, sur la qualité desquelles quelques doutes pouvaient être émis, notamment à cause des problèmes liés au gel et à la neige. Ces problèmes, surtout présents pendant la saison des pluies, semblent en fait peu influents, à cause du dégel rapide caractéristique de cette saison, même si les moyennes mensuelles des mois de décembre, janvier et février sont fortes (voisines de 90%). En effet, ces valeurs peuvent s'expliquer par le fait qu'on enregistre alors des précipitations quasiment tous les jours plusieurs heures par jour.

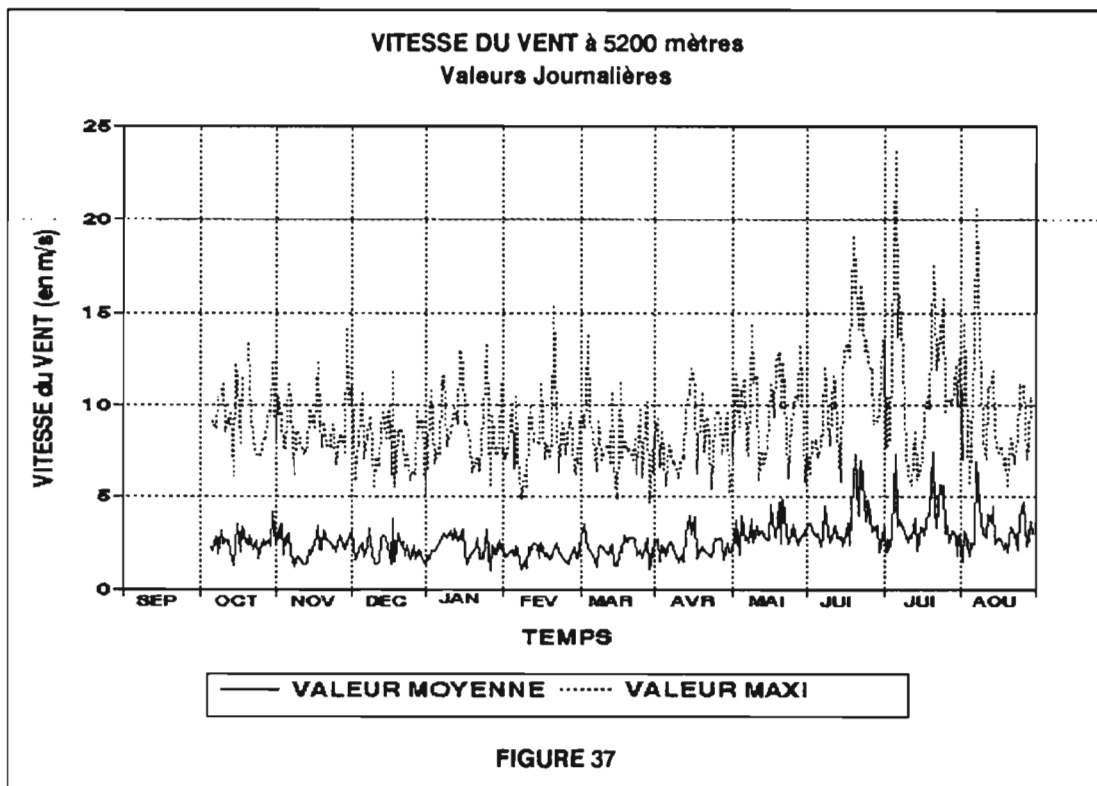
7.2. VITESSE DU VENT :

La figure 37 présente les valeurs moyennes et maximales journalières du vent à 5200 mètres sur le glacier, pendant l'année hydrologique 93-94. On trouvera dans le tableau 18 les valeurs mensuelles correspondantes.

- les valeurs moyennes journalières sont de l'ordre de 2 à 3 m/s pendant la saison des pluies, et de 3 à 6 m/s pendant la saison sèche. Toutes ces valeurs peuvent être considérées comme plutôt basses (le site de mesure est plutôt abrité).

- les valeurs maximales sont comprises généralement entre 5 et 10 m/s en saison humide, et peuvent atteindre 20 m/s en saison sèche. On notera qu'une période de fort vent s'accompagne souvent d'une diminution des températures.

- il est intéressant de se rappeler que l'apport de chaleur sensible à la surface du glacier est fonction du gradient de vent (et de la température) [Liboutry, 1964 ; kuhn, 1987]. Si on fait l'hypothèse que la vitesse du vent est nulle à la surface du glacier, cet apport, de même que l'évaporation évoquée au paragraphe précédent, serait donc globalement plus important en saison sèche qu'en saison humide, puisque les vents sont plus forts en saison sèche.

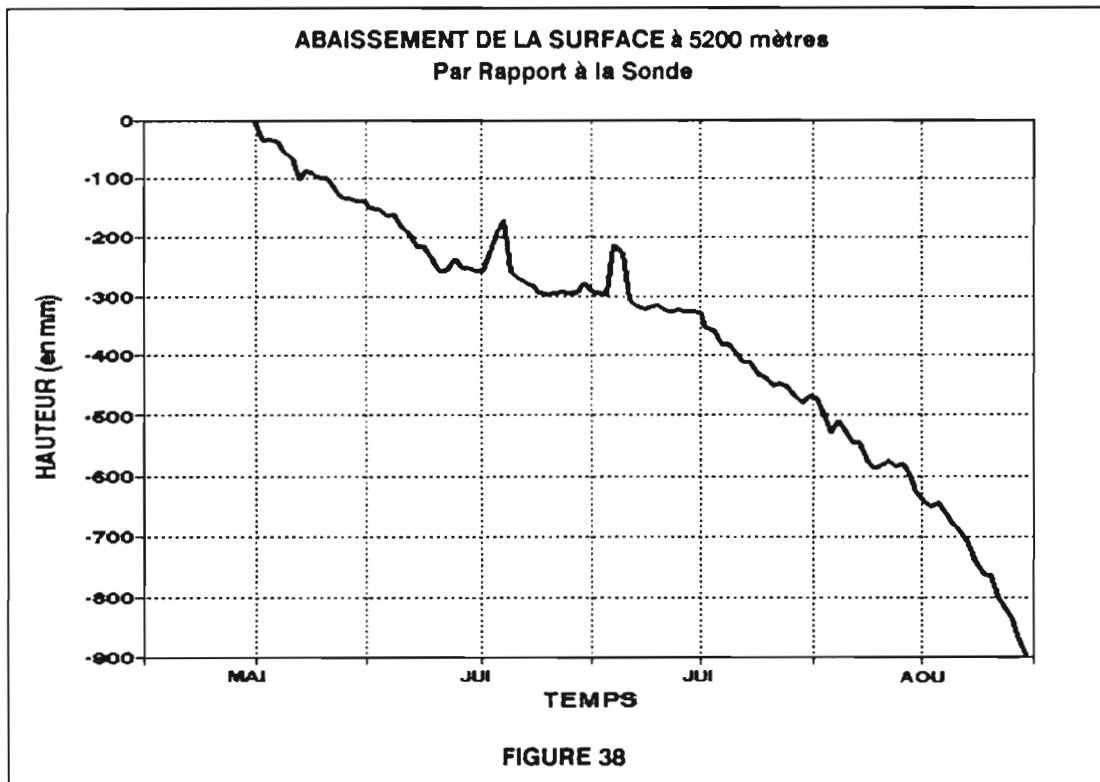


7.3. SONDE A NEIGE :

La figure 38 présente la mesure journalière (à minuit) de la sonde à neige, sur le glacier à 5200 mètres, de mai à août 94. Cette mesure est ici convertie en un abaissement de la surface par rapport à son niveau du 17/05/94, jour de la mise en place de la sonde.

On constate un abaissement de la surface de 900 mm durant cette période, dû à la fusion (ablation) et au tassement simultané du manteau neigeux, cet abaissement étant faible en juin et fort pendant les autres mois. Remarquons que, sans mesure de densité, il est impossible de faire la part entre ces deux phénomènes, et d'évaluer l'ablation réelle, c'est à dire la lame d'eau réellement fondue. On voit bien deux épisodes neigeux, début et mi-juin, élevant chacun la surface de 100 mm environ

(avec une densité de 0.1, ceci correspond à des précipitations d'à peu près 10 mm en équivalent eau). A cause de la fonte et du tassement, la trace de ces chutes de neige n'est plus visible après quelques jours.



7.4. PLUVIOGRAPHE A AUGETS BASCULEURS :

La figure 39 représente les enregistrements, au pas de temps de 30 minutes, des épisodes pluvieux du 19, 20 et 21 juin 94, par le pluviographe à augets basculeurs, installé à 4830 mètres à proximité de la station hydrométrique. Les chiffres totaux donnés par le pluviographe pour les mois de juin, juillet et août 94 apparaissent dans le tableau 18.

- les épisodes présentés sont des petites pluies. On peut cependant se faire une bonne idée de leur déroulement. L'intensité maximale enregistrée est 6 mm/h. Il ne semble pas y avoir sur ces enregistrements de problèmes liés à la neige (bien que le pluviographe ne soit pas chauffant).

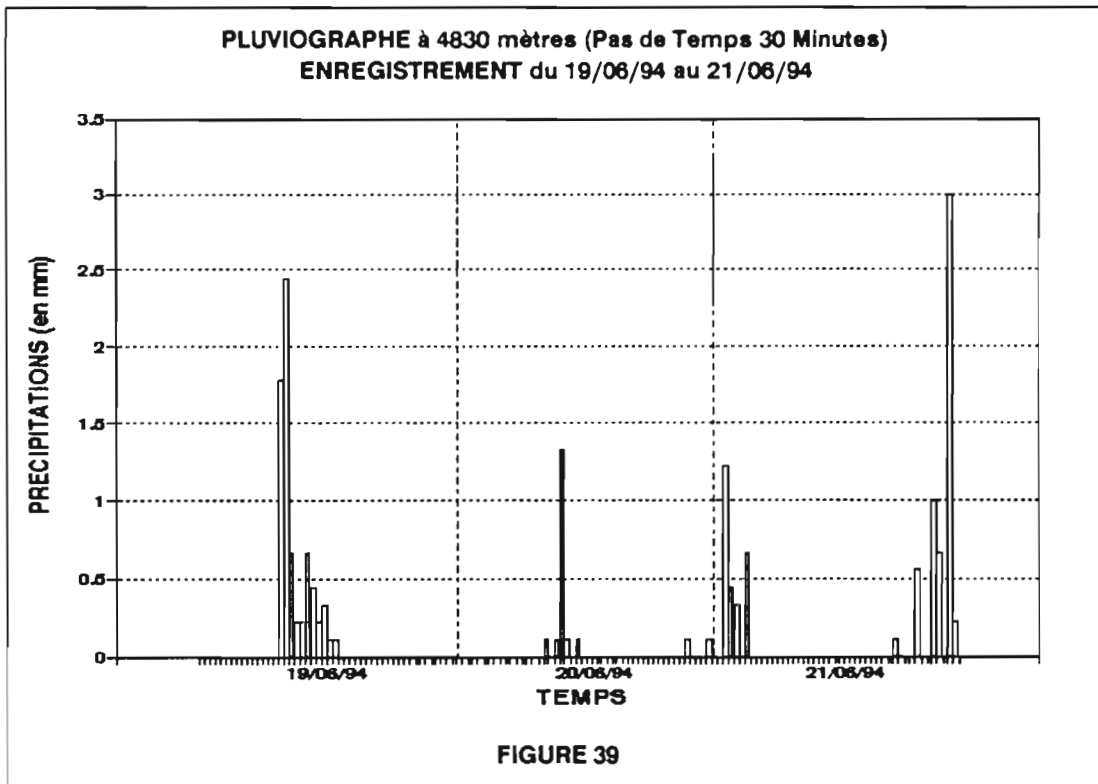
- les valeurs totales mensuelles obtenues sont compatibles avec celles des pluviographes totalisateurs pour les mois de juillet et août (CF paragraphe 4). La valeur du mois de juin, par contre, est nettement plus élevée pour le pluviographe à augets. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que les mesures sur les totalisateurs ont été faussées, probablement par un problème de fuite, pendant cette période.

Remarque : le pluviographe à augets a été livré avec une mauvaise calibration. Plusieurs tentatives ont été menées pour le recalibrer in situ. Cependant, cette manipulation est assez délicate. Ainsi, toutes les mesures effectuées:

- du 20/05/94 au 28/06/94 : possédaient une erreur d'environ -10% due à l'étalonnage du pluviographe,

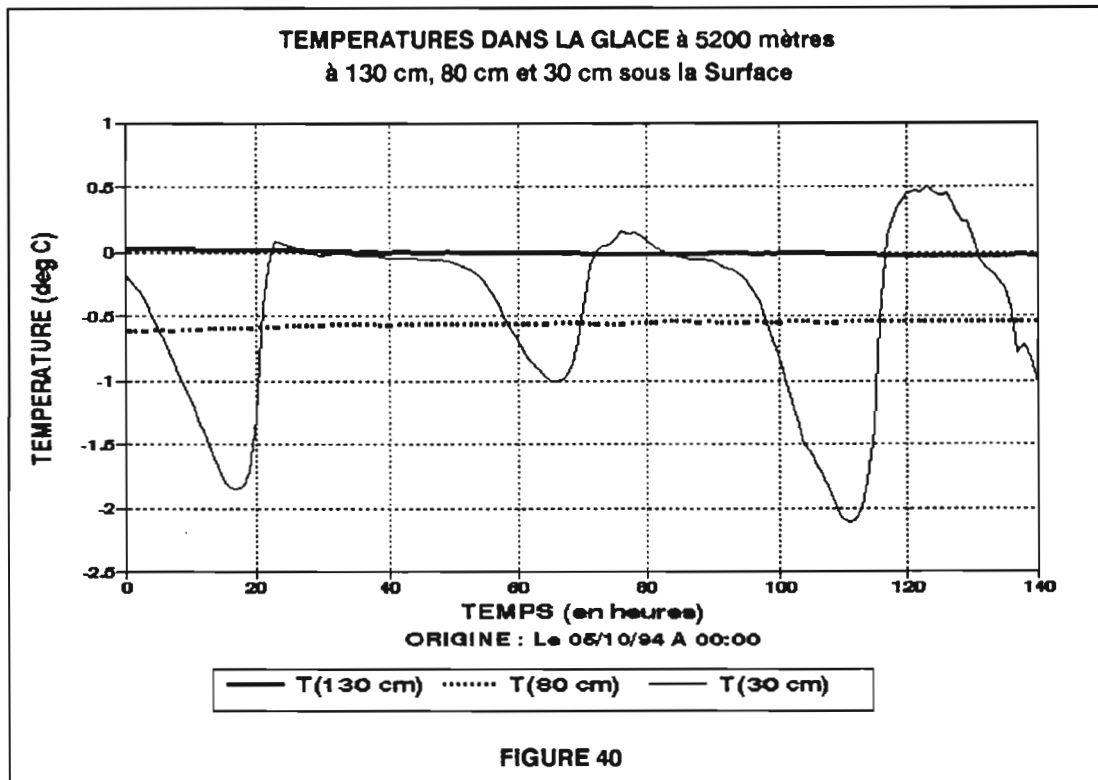
- du 28/06/94 au 12/08/94 : étaient surestimées de 10% environ (étalonnage donnant une valeur de 20% supérieure à la mesure réelle, et constante du programme égale à 0.09),

- du 12/08/94 au 18/11/94 : étaient surestimées de 20% environ (étalonnage donnant une valeur de 20% supérieure à la mesure réelle, et constante du programme égale à 0.1. Le 18/11/94, le pluviographe recalibré correctement, et espérons le, définitivement, a été remis en place).



7.5. TEMPERATURE DE LA GLACE :

La figure 40 présente, au pas de temps de 30 minutes, les 5, 6 et 7 octobre 94, la température mesurée dans le glacier à 5200 mètres aux profondeurs 30, 80 et 130 centimètres.



On constate que :

- la température à partir d'une certaine profondeur, ici de l'ordre de 1 mètre est pratiquement constante et égale à 0°C. Ceci donne un ordre de grandeur de la profondeur à partir de laquelle la glace peut être considérée comme isotherme. Cependant il est en fait très probable que la température à cette profondeur connaisse de légères oscillations saisonnières, de l'ordre de quelques dixièmes de degrés, et que la couche véritablement isotherme commence plus bas. Des mesures sur une période plus longue permettront probablement de mettre ceci en évidence. Cependant, on voit déjà qu'à cette profondeur, ne se fait ressentir aucune oscillation journalière,

- un peu plus haut on trouve une sorte de minimum relatif, inférieur à 0°C (ici environ -0.5 à 80 centimètres de profondeur), qui semble lui aussi peu affecté par des variations journalières,

- pratiquement à la surface, la température présente des oscillations journalières marquées, traduisant le refroidissement nocturne et le réchauffement diurne. Les oscillations présentées ici atteignent une amplitude de 2.5°C, ce qui reste faible si l'on considère des valeurs probables. Cette température est très dépendante de celle de l'air, et dépend en même temps à chaque instant du bilan radiatif. C'est pourquoi elle présente de telles variations journalières.

A terme, ces mesures, commencées début octobre 94, doivent permettre d'étudier l'évolution du profil de température dans la glace, au cours de la journée et au cours de l'année.

8. MESURES GLACIOLOGIQUES ET BILAN DE MASSE :

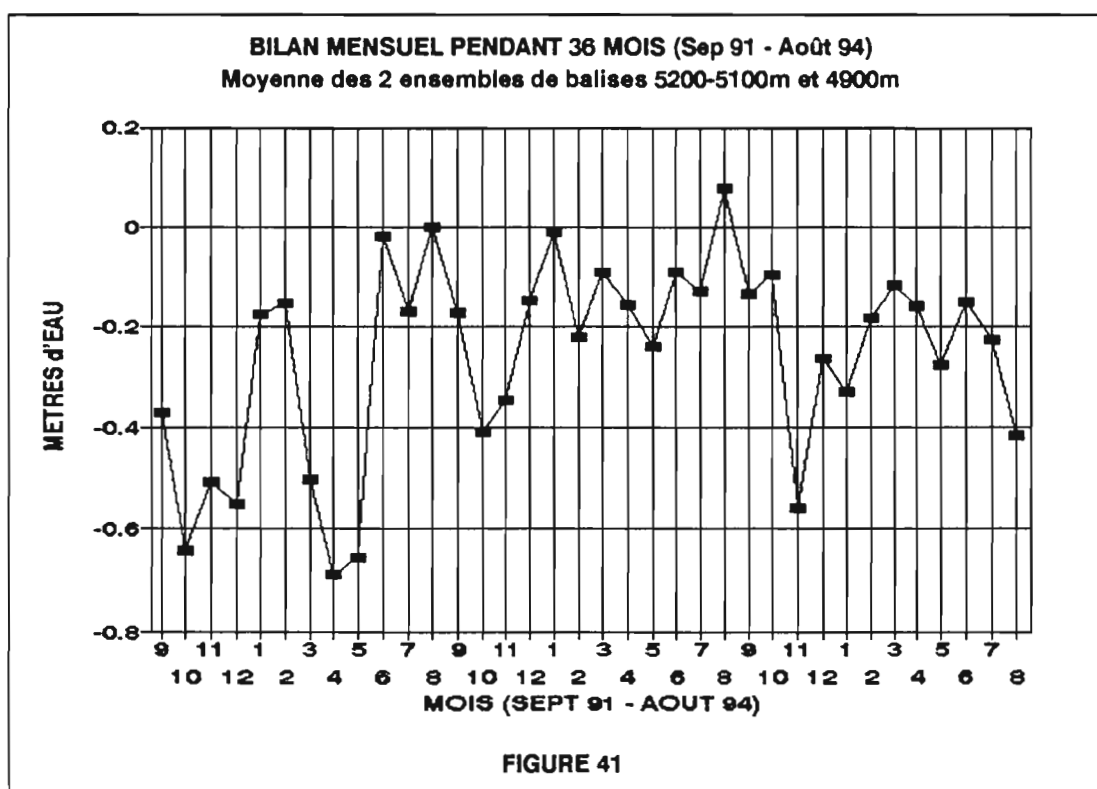
8.1. VALEURS MENSUELLES :

Le tableau 19 présente les mesures mensuelles de bilan net au niveau des balises, pour la période de septembre 91 à août 94. Apparaissent successivement :

- la moyenne des mesures sur le groupe de balises 1 ou 0, 5, 7, 9, 10 et 11 (partie haute de la zone d'ablation, 5200-5100 mètres),
- la moyenne des mesures sur le groupe de balises 13 et 15 (partie basse de la zone d'ablation, 4900 mètres),
- ces mêmes moyennes, mais cumulées,
- la moyenne des mesures sur les deux groupes de balises, soit la valeur du bilan net mensuel sur la zone d'ablation. La figure 41 représente graphiquement ces valeurs de bilan net. D'autre part, les bilans nets cumulés pour les deux groupes de balises sont illustrés sur la figure 42.

REMARQUE : le calcul de la valeur mensuelle du bilan net dans la zone d'ablation s'effectue selon les principes suivants :

- on a choisi les balises retrouvées régulièrement,
- on a fait un compromis entre rive droite du glacier, où l'ablation est toujours plus forte, et rive gauche où elle est plus faible, ceci découlant d'un effet de l'exposition,



- on fait une moyenne sur 5 balises entre 5200 et 5100 mètres (1 ou 0, 5, 7, 9, 10 et 11), et une moyenne sur 2 balises (13 et 15) placées près du front à 4900 mètres. La valeur mensuelle sur la zone d'ablation est la moyenne de ces deux moyennes. Pour ce dernier calcul, le nombre de balises pris en

considération tient en fait compte des rapports de surface du glacier entre 5050-5200 mètres et 4900-5050 mètres. Pour cette dernière tranche d'altitude, on considère que la valeur moyenne des balises 13 et 15 est représentative du bilan.

TABLEAU 19
BILAN NET : MESURE SUR DEUX GROUPES DE BALISES DE LA ZONE
D'ABLATION
CUMULS ET MOYENNES

	MOIS par MOIS (1)	MOIS par MOIS (2)	CUMUL (1)	CUMUL (2)	MOYENNE
SEP 91	-0,290	-0,453	-0,290	-0,453	-0,371
OCT 91	-0,503	-0,783	-0,792	-1,236	-0,643
NOV 91	-0,389	-0,630	-1,100	-2,106	-0,509
DEC 91	-0,309	-0,792	-1,409	-2,727	-0,551
JAN 92	0,077	-0,428	-1,331	-3,155	-0,175
FEV 92	-0,005	-0,306	-1,337	-3,461	-0,156
MAR 92	-0,143	-0,864	-1,480	-4,434	-0,504
AVR 92	-0,620	-0,756	-2,099	-5,190	-0,688
MAI 92	-0,645	-0,666	-2,744	-5,856	-0,656
JUI 92	-0,078	0,041	-2,608	-5,810	-0,019
JUI 92	-0,099	-0,243	-2,707	-6,053	-0,171
AOU 92	0,000	0,000	-2,707	-6,053	0,000
SEP 92	-0,050	-0,297	-2,757	-6,350	-0,174
OCT 92	-0,170	-0,648	-2,927	-6,890	-0,409
NOV 92	-0,201	-0,495	-3,128	-7,385	-0,348
DEC 92	0,036	-0,333	-3,092	-8,093	-0,149
JAN 93	0,131	-0,150	-2,961	-8,243	-0,010
FEV 93	-0,041	-0,399	-3,002	-8,642	-0,220
MAR 93	0,087	-0,271	-2,888	-8,913	-0,092
AVR 93	0,026	-0,338	-2,878	-9,519	-0,156
MAI 93	-0,051	-0,428	-2,935	-9,672	-0,239
JUI 93	-0,039	-0,149	-2,974	-9,317	-0,094
JUI 93	-0,089	-0,172	-3,063	-9,489	-0,131
AOU 93	0,100	0,054	-2,964	-9,433	0,077
SEP 93	-0,024	-0,243	-2,988	-9,676	-0,134
OCT 93	-0,007	-0,189	-2,995	-9,865	-0,098
NOV 93	-0,171	-0,950	-3,166	-10,972	-0,560
DEC 93	-0,035	-0,496	-3,200	-11,431	-0,265
JAN 94	-0,041	-0,618	-3,242	-12,052	-0,330
FEV 94	0,101	-0,465	-3,141	-12,574	-0,182
MAR 94	0,040	-0,279	-3,101	-12,916	-0,120
AVR 94	0,059	-0,378	-3,042	-13,294	-0,160
MAI 94	-0,129	-0,423	-3,171	-13,717	-0,276
JUI 94	-0,087	-0,216	-3,258	-13,933	-0,152
JUI 94	-0,224	-0,231	-3,482	-14,164	-0,228
AOU 94	-0,516	-0,316	-3,998	-14,480	-0,416

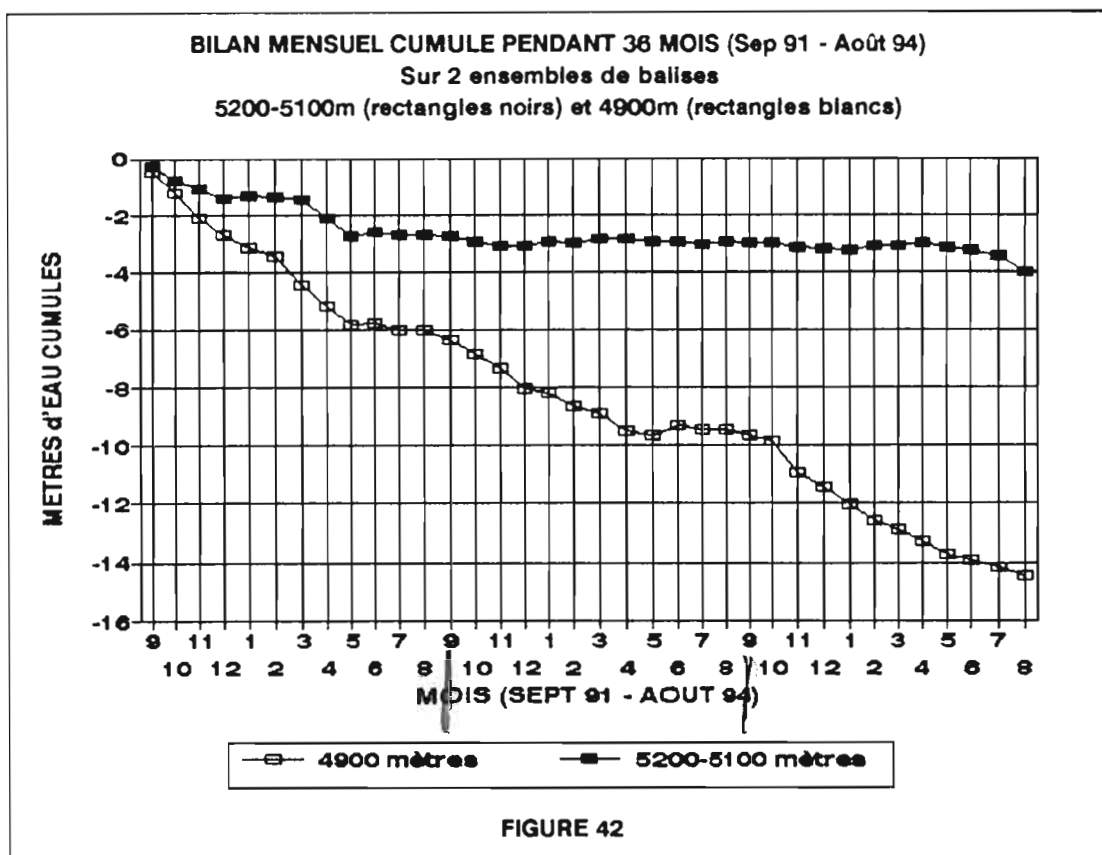
TABLEAU 19 : MOIS par MOIS (1) = valeurs mensuelles [moyenne 1 ou 0, 5, 7, 9, 10, 11] (partie haute de la zone d'ablation, 5200-5100 mètres); MOIS par MOIS (2) = valeurs mensuelles [moyenne 13, 15] (partie basse de la zone d'ablation, 4900 mètres); CUMUL (1) = valeurs mensuelles cumulées [moyenne 1 ou 0, 5, 7, 9, 10, 11]; CUMUL (2) = valeurs mensuelles cumulées [moyenne 13, 15]; MOYENNE = moyenne [(moyenne 1(0), 5, 7, 9, 10, 11),(moyenne 13, 15)]; Toutes les valeurs sont en mètres.

Le tableau 20 présente, pour les années hydrologiques 91-92, 92-93 et 93-94 les principaux éléments des bilans de masse mensuels dans la zone d'ablation du glacier Zongo (5200-4900 mètres) : le bilan net, le débit total et les précipitations.

TABLEAU 20
BILAN DE MASSE MENSUEL DANS LA ZONE D'ABLATION
(4900 / 5200 METRES)
ANNEES HYDROLOGIQUES 91-92, 92-93 ET 93-94

MOIS ANNEES	BILAN NET	DEBIT TOTAL	PRECIPI- TATIONS
SEP 91	-0,371	0.076	0.025
OCT 91	-0,643	0.205	0.042
NOV 91	-0,509	0.237	0.090
DEC 91	-0,551	0.305	0.081
JAN 92	-0,175	0.171	0.164
FEV 92	-0,156	0.154	0.129
MAR 92	-0,504	0.217	0.032
AVR 92	-0,688	0.168	0.015
MAI 92	-0,656	0.160	0.001
JUI 92	-0,019	0.045	0.018
JUI 92	-0,171	0.025	0.021
AOU 92	0,000	0.029	0.045
SEP 92	-0,174	0.059	0.021
OCT 92	-0,409	0.136	0.060
NOV 92	-0,348	0.202	0.090
DEC 92	-0,149	0.179	0.123
JAN 93	-0,010	0.102	0.249
FEV 93	-0,220	0.092	0.100
MAR 93	-0,092	0.104	0.146
AVR 93	-0,156	0.058	0.063
MAI 93	-0,239	0.058	0.013
JUI 93	-0,094	0.036	0.003
JUI 93	-0,131	0.026	0.004
AOU 93	0,077	0.028	0.046
SEP 93	-0,134	0.045	0.046
OCT 93	-0,098	0.076	0.067
NOV 93	-0,560	0.161	0.119
DEC 93	-0,265	0.264	0.202
JAN 94	-0,330	0.185	0.170
FEV 94	-0,182	0.142	0.179
MAR 94	-0,120	0.113	0.080
AVR 94	-0,160	0.071	0.073
MAI 94	-0,276	0.056	0.019
JUI 94	-0,152	0.053	0.007
JUI 94	-0,228	0.042	0.009
AOU 94	-0,416	0.118	0.001

TABLEAU 20 : BILAN NET = bilan de masse mensuel dans la zone d'ablation (5200-4900 mètres), en mètres; DEBIT TOTAL = débit en mètres enregistré à la station hydrométrique pour la totalité du bassin versant, PRECIPITATIONS = précipitations en mètres à la Plataforma Zongo.



On remarque des différences sensibles, du point de vue de l'ablation, pour les trois années. En particulier, pour 91-92 et 92-93, la période de mai à septembre a été dans les deux cas à peu près équilibrée (sur toute la zone d'ablation). Or pour 93-94, cette même période, correspondant à la saison sèche, a été marquée par une ablation continue, d'environ 1 mètre au total, y compris sur les balises 5200-5100. Ceci peut peut-être s'expliquer par :

- les précipitations très faibles, avec donc une surface de glacier très " salie ",
 - le fait que la couche de glace de l'année précédente a été mise à nu, ce qui a permis un ruissellement d'une grande partie des eaux de fusion superficielles, particulièrement pendant le mois d'août, durant lequel apparaît sur la figure 42 une ablation marquée pour le groupe des balises 5200-5100 mètres, ce qui ne s'était pas produit depuis avril 92.
- Par contre, la saison des pluies 93-94 a connu une ablation très comparable à celle des années précédentes, forte entre octobre et mars.

Le bilan cumulé sur 36 mois est de -15 mètres pour le groupe de balises 4900, et de -4 mètres pour le groupe de balises 5200-5100, qui a enregistré en 93-94 pratiquement un mètre d'ablation, après deux années de stabilité.

Le tableau 21 présente, de 91-92 à 93-94 le bilan net par tranche de 100 mètres d'altitude et le bilan net total. Il permet de bien voir selon les années :

- l'altitude de la ligne d'équilibre : respectivement de 91-92 à 93-94, 5300, 5100 et 5200 mètres,
- la contribution de chaque tranche d'altitude au chiffre total de bilan net. Il est intéressant, en particulier de comparer les résultats d'une année à l'autre pour les tranches basses (proportions,

changements de signes ...). On voit que pour les deux premières tranches, les ablations de 91-92 et 93-94 sont comparables (et bien supérieures à celles 92-93). Par contre, les ablations dans les deux tranches suivantes sont bien plus élevées en 91-92 qu'en 93-94, ce qui explique la différence de bilan.

TABLEAU 21
BILAN NET PAR TRANCHES D'ALTITUDE
ANNEES 91-92, 92-93 ET 93-94

ALTITUDE	s	s/S	BILAN 91-92	BILAN 92-93	BILAN 93-94
4890-5000	0,10	0,0483	-0,2802	-0,1594	-0,2657
5000-5100	0,18	0,0870	-0,5043	-0,2870	-0,4783
5100-5200	0,40	0,1932	-0,5604	0,0618	-0,2705
5200-5300	0,20	0,0966	-0,1401	0,0580	0,0000
5300-5400	0,21	0,1014	0,0000	0,0609	0,0203
5400-5500	0,21	0,1014	0,0122	0,0609	0,0406
5500-5600	0,23	0,1111	0,0267	0,0667	0,0667
5600-5700	0,25	0,1208	0,0290	0,0725	0,0725
5700-5800	0,20	0,0966	0,0232	0,0580	0,0580
5800-5900	0,07	0,0338	0,0081	0,0203	0,0203
5900-6000	2,07	0,0097	0,0023	0,0058	0,0058
TOTAL	2,07	1,000	-1.3836	0,0184	-0,7304

TABLEAU 21 : s = surface de la tranche d'altitude en km², s/S = surface de la tranche d'altitude / surface totale, BILAN = bilan net de la tranche d'altitude rapporté à la surface totale du glacier (= contribution de la tranche d'altitude au bilan net total).

8.2. VALEURS ANNUELLES :

Le tableau 22 fait apparaître les principaux résultats " glaciologiques " des années 91-92 à 93-94 :

- le bilan net annuel, évalué directement par un calcul intégrateur des mesures sur les balises sur tout le glacier,
- l'ablation spécifique, calculée en retranchant le bilan net aux précipitations, en sommant par tranches d'altitude sur tout le glacier,
- l'altitude de la ligne d'équilibre,
- le pourcentage que représente la zone d'accumulation par rapport à la surface totale.

Ce tableau montre également un écoulement spécifique, calculé directement à partir du débit mesuré à la station hydrométrique, et donc issu d'une démarche purement hydrologique.

Il y a donc deux façons d'obtenir le bilan net :

- par un calcul glaciologique : en intégrant sur l'ensemble du glacier les valeurs de bilan données aux balises,
 - par un calcul hydrologique : en retranchant les précipitations à l'écoulement spécifique rapporté au glacier lui-même, ainsi que l'explique le tableau 15 dans le chapitre consacré aux débits.
- On voit donc que le bilan net, issu d'une mesure glaciologique, est directement comparable, à l'évaporation près, au " bilan de masse ", obtenu par un calcul hydrologique. L'ablation spécifique est quant à elle comparable à l'écoulement spécifique rapporté au glacier, soit l' " apport glacier " apparaissant dans les tableaux 15 et 22.

Ces deux approches doivent donner des résultats voisins, à la sublimation près. En comparant la colonne " bilan masse " du tableau 15 et la colonne " bilan net " du tableau 22, ou encore

les deux colonnes " ablation spécifique " et " Apport Glacier " du tableau 22, on constate effectivement que les résultats sont très proches, particulièrement d'ailleurs pour l'année 93-94. Ceci permet sérieusement de penser que la sublimation est un phénomène négligeable dans le bilan de masse pour le glacier Zongo, puisque ce bilan semble pouvoir s'équilibrer sans qu'il soit nécessaire de la prendre en compte.

TABLEAU 22
BILANS NETS ANNUELS DE 91 A 94

ANNEES	BILAN NET Bn	PRECIPITATIONS P	ABLAT. SPECIF.	APPORT GLACIER	ELA	AAR
91-92	-1.38	0.92	2.30	2.24	5300	58
92-93	0.02	1.06	1.04	1.18	5100	86
93-94	-0.73	0.85	1.58	1.59	5200	67

TABLEAU 22 : BILAN NET : bilan net spécifique en mètres; PRECIPITATIONS = précipitations en mètres mesurées près du glacier (4880-5200 mètres); ABLAT. SPECIF = ablation spécifique (on a : $A = P - Bn$), obtenue par une approche glaciologique; APPORT GLACIER = Ecoulement spécifique rapporté au glacier lui-même, obtenu par une approche hydrologique; ELA = altitude en mètres de la ligne d'équilibre glaciaire; AAR = rapport en % entre surface de la zone d'accumulation et surface totale.

REMARQUE : le coefficient de ruissellement de 0.8 choisi pour la moraine peut peut-être sembler un peu fort. Si nous le remplaçons par la valeur 0.5 qui, elle, est plutôt faible, nous obtenons les chiffres d' " Apport Glacier " suivant, respectivement de 91-92 à 93-94 : 2.356, 1.315 et 1.698 mètres, soit en moyenne environ 0.12 mètres de plus par an qu'avec le calcul avec la valeur 0.8. Ce choix entraîne donc dans tous les cas une erreur inférieure à 10% sur l'Apport Glacier. Cependant, il est important que le chiffre Apport Glacier, issu d'un calcul hydrologique, reste inférieur à son équivalent glaciologique (ou très proche), soit l'ablation spécifique, parce que cette dernière inclue l'évaporation. On constate que ce n'est plus le cas avec la valeur 0.5 pour le coefficient de ruissellement, ce qui implique qu'il faille choisir une valeur plus forte.

Enfin se pose le problème de la représentativité des pluviomètres totalisateurs. Ceux-ci en effet, sont disposés sur la moraine, et ne décrivent pas forcément bien les précipitations sur le glacier même. L'incertitude sur ces mesures se répercute donc sur le calcul du bilan. Pour pouvoir apporter des éléments de réponse, il faudra sans doute à terme installer un ou plusieurs pluviomètres totalisateurs sur le glacier. En l'état actuel des choses, on ne peut faire autrement que de considérer que ces mesures sont représentatives.

Les bilans nets pour les trois années hydrologiques de mesure, sont très différents :

- année 91-92 : bilan net de **-1.38 mètres**, associé à un événement ENSO de moyenne amplitude,
- année 92-93 : bilan net **0.02 mètre**, équilibré,
- année 93-94 : bilan net **-0.73 mètre**, soit, de même que pour l'écoulement, une année intermédiaire entre les deux précédentes.

9. CONCLUSION :

L'année hydrologique 1993-1994 est apparue, au fil de ce rapport, comme une année intermédiaire, si on la compare aux deux précédentes, l'année 91-92 qui a connu un écoulement et une ablation plutôt forts, et l'année 92-93 qui a connu un écoulement et une ablation plutôt faibles. Certes, ces trois années d'étude ne sauraient encore constituer une " série " en tant que telle. Mais, par chance, depuis le début de l'étude du glacier Zongo en 1991, elles ont été suffisamment différentes du point de vue météorologique, hydrologique et glaciologique, pour qu'elles permettent de penser qu'elles constituent déjà un bon échantillon de situations typiques.

Pour chacune des diverses variables mesurées, on retiendra pour cette année hydrologique 93-94 essentiellement les chiffres annuels et les caractéristiques suivantes :

- **Pour les températures** : les températures moyennes annuelles ont été respectivement de 2,16°C à la Plataforma, 1,14°C à la station hydrométrique à 4830 mètres, et -0,17°C sur le glacier à 5200 mètres. La saisonnalité des températures est assez peu marquée à la Plataforma, site de mesures semblant présenter un régime des températures différents des autres, mais s'accroît très nettement avec l'altitude. Les contrastes thermiques journaliers sont beaucoup plus prononcés sur le glacier que sur la moraine. Enfin, le gradient moyen annuel est de -0,52°C/100m entre la Plataforma et le glacier à 5200 mètres, et semble plus prononcé vers le bas du bassin versant que dans sa partie intermédiaire. Notons aussi que les enregistrements du thermographe de la Plataforma sont à considérer avec beaucoup de prudence.

- **Pour les précipitations** : le total moyen de la pluie totale annuelle pour les 5 pluviomètres installés sur la moraine est 832 mm (les pluviomètres les plus représentatifs, c'est à dire ceux dont le total se rapproche le plus de cette moyenne étant P1, P3, P4 et P5). Le total obtenu à la Plataforma, d'une qualité peut-être un peu douteuse, est 958,5 mm. La saison des pluies 93-94 est plus abondante à la Plataforma, plus faible aux pluviomètres totalisateurs et plutôt mieux répartie que les précédentes. Par contre, l'hiver a connu des précipitations très faibles, avec un total de 15 mm pour les mois de juin à août 94. Avec l'installation existante, il n'est pas évident de mettre en évidence un gradient pluviométrique mensuel sur le bassin versant. Cependant, à l'échelle de l'année il est clair que le bassin versant est plus arrosé en bas qu'en haut.

- **Pour les radiations** : le bilan radiatif moyen sur l'année à 5200 mètres sur le glacier est 10,8 W/m². La moyenne de la radiation globale et du terme (1-a)R_g (bilan des courtes longueurs d'onde) sont respectivement 201 W/m² et 46 W/m². Si l'on considère que celle de la radiation du sol est 300 W/m², on obtient 264,8 W/m² pour la radiation atmosphérique, soit un bilan des grandes longueurs d'onde de -35,2 W/m². La saisonnalité de chacun des termes du bilan radiatif n'est pas facile à mettre en évidence, à cause de la grande influence du couvert nuageux. Cependant, au niveau mensuel, la radiation nette apparaît comme clairement saisonnière, forte durant les mois de saison humide, faible durant les mois de saison sèche. On peut clairement relier ses variations avec celles de l'écoulement.

- **Pour l'écoulement** : le débit moyen annuel enregistré à la station hydrométrique à 4830 mètres pour l'année 93-94 est 125,2 l/s, soit un débit moyen spécifique de 42,1 l/s/km². La saisonnalité de l'écoulement est très forte, avec une variation de 1 à 10 des débits mensuels dans l'année. Du point de vue de l'écoulement, cette année peut être considérée comme intermédiaire entre l'année 91-92 (débit moyen 170 l/s) et l'année 92-93 (débit moyen 102,7 l/s). Le point culminant de la saison des pluies a été la crue du 07/12/93, durant laquelle le débit a atteint 793 l/s. C'est la seule crue de cette ampleur enregistrée cette année. Notons que le mois d'août 94 semble se caractériser par un

écoulement fort par rapport aux deux années précédentes. Enfin, le chiffre de débit annuel converti en lame d'eau, corrigé des apports de la moraine et soustrait aux précipitations, donne une ablation nette pour l'année de 739 mm sur le glacier.

- **Pour le bilan de masse** : le bilan de masse calculé par une approche glaciologique donne, pour l'année 93-94, une ablation nette de 730 mm, soit un chiffre très proche de celui obtenu par un calcul hydrologique (à condition de considérer que la valeur 0.8 est valable pour le coefficient de ruissellement, et que les mesures des pluviomètres totalisateurs sont représentatives...). Ceci permet de penser que la sublimation, qui est la seule différence qui peut intervenir entre les deux approches, est négligeable sur le glacier Zongo. Du point de vue de l'ablation, l'année hydrologique 93-94 se caractérise surtout par une saison sèche durant laquelle la situation a été déficitaire de presque 1 mètre au total, alors que les deux années précédentes avaient été équilibrées durant cette même période. Cependant, si l'on compare les chiffres annuels, cette année apparaît encore une fois comme intermédiaire par rapport aux deux précédentes.

BIBLIOGRAPHIE

- Brutsaert W. (1975). On a derivable formula for long-wave radiation from clear skies. *Water Resources Research*, 11, 5, 742-744.
- Duguay C.R. (1993). Radiation modeling in mountainous terrain review and status. *Mountain Research and Development*, 13, 4, 339-357.
- Elder K. & Dozier J. (1990). Improving methods for measurement and estimation of snow storage in alpine watersheds. in *Hydrology in mountainous regions I - Hydrological measurements; the water cycle*, Lang & Musy ed., IAHS, 193, 147-156.
- Francou B., Bourges J., Ribstein P. & Vargas R. (1992). Un programa de estudio de un glaciar tropical. Aplicaciones en los recursos en agua de una cuenca andina. Informe de la mision ORSTOM en Bolivia, *ORSTOM*.
- Francou B., Ribstein P., Saravia R. & Tiriau E. (in press). Monthly balance and water discharge of an intertropical glacier, the Zongo Glacier, Cordillera Real, Bolivia, 16°S. *Journal of Glaciology*,
- Kuhn M. (1987). Micro-meteorological conditions for snow melt. *Journal of Glaciology*, 33, 113, 24-26.
- Kustas W.P., Rango A. & Uijlenhoet R. (1994). A simple energy budget algorithm for the snowmelt runoff model. *Water Resources Research*, 30, 5, 1515-1527.
- Lliboutry L. (1964). *Traité de glaciologie*. Masson et Cie, Paris, 1040 p.
- Obled C. & Rosse B. (1975). Modèles mathématiques de la fusion nivale en un point. *Cahiers ORSTOM, série Hydrologie*, XII, 4, 235-256.
- Paltridge G.W. & Platt C.M.R. (1976). *Radiative processes in meteorology and climatology*. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam - Oxford - New York, 318 p.
- Perrin de Brichambaud Ch. (1963). *Rayonnement solaire et échanges radiatifs naturels*. Gauthier-Villars, Paris, 300 p.
- Poggi A. (1977). *Introduction à la micrométéorologie. Transferts d'énergie atmosphère-sol*. Masson, Paris, 148 p.
- Ribstein P., Tiriau E., Francou B. & Saravia R. (in press). Tropical climate and glacier hydrology: a case study in Bolivia. *Journal of Hydrology*,