

Institut de Recherche pour le Développement
Département Milieux et environnement
UR Great Ice

Université Paul Sabatier / E.N.S.E.E.I.H.T.
Toulouse

Modélisation des écoulements issus de la fonte du glacier 15 de l'Antizana en Equateur

Jérémie BRIERE

Mémoire du DEA « Sciences de la Terre et de l'Environnement »
de l'Université Paul Sabatier, Toulouse

Responsable de stage :
Eric Cadier

Rapporteurs:
M. Dartus
M. Labat

Jury :
M. Jaoul
M. Ingrin
M. Schott
M. Quintard
M. Dartus

Septembre 2004

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mon maître de stage, Eric Cadier, pour son encadrement, sa disponibilité et pour m'avoir donné l'occasion de travailler dans un cadre de recherche si enrichissant. Je remercie Rodolphe, Marcos, Jean-Philippe, Martin, Jean-Denis, Luis et Bolivar, tous collègues de travail, pour leur compétence, les aides inconditionnelles qu'ils m'ont apportées et la bonne humeur avec laquelle ils travaillent.

Une mention spéciale revient à ceux d'entre eux avec qui j'ai vécu quelques inoubliables missions longues en haute montagne. Malgré le « soroche », les doigts gelés et les nuits d'insomnie nous avons toujours trouvé le temps de rire...

Enfin, je remercie chaleureusement Rodolphe Bucher et Peggy Viola. En m'accueillant chez eux dès mon arrivée, ils m'ont permis de démarrer d'un bon pied mon séjour en Equateur.

Modélisation des écoulements issus de la fonte du glacier 15 de l'Antizana en Equateur

Introduction	5
Première partie : Contexte du stage	6
1. L'IRD, l'unité GREAT ICE et ses partenaires en Equateur	6
2. Présentation du site d'étude : le glacier 15 de l'Antizana	6
3. Problématique de l'étude	7
4. Déroulement chronologique du stage.....	8
Deuxième partie : Expérimentations au glacier 15 de l'Antizana	9
1. Le bilan de masse	9
2. Le bilan d'énergie	9
2.1 Equation du bilan d'énergie pour un glacier	9
2.2 Mesures	10
2.2.1 La station de référence.....	10
2.2.2 La station SAMA.....	10
2.2.3 Autres dispositifs de mesure.....	10
3. Le bilan hydrologique.....	11
3.1 Les stations limnigraphiques	11
3.1.1 La station 15	11
3.1.2 Les stations α et β	11
3.1.3 Le limnigraphe « Nimbus »	11
3.2 Le réseau de pluviomètres / pluviographes	11
4. Le travail sur le terrain	12
4.1 Rôle	12
4.2 Calendrier	12
Troisième partie : Calculs de débits aux stations limnigraphiques : démarche et problèmes rencontrés	13
1. Station 15	13
1.1 Description	13
1.2 Courbe de tarage.....	13
1.3 Traitement des données brutes	15
1.4 Débits calculés.....	17
2. Stations 15 α et 15 β	17
2.1 Description	17
2.2 Problèmes rencontrés	17
2.3 Courbes de tarage	18
Quatrième partie : Apports à la modélisation par analyse multi-variables	20
1. Première démarche d'approche statistique.....	20
1.1 L'analyse par composantes principales (ACP).....	20
1.2 Approche par moyenne semi-journalière	20

1.2.1	Données disponibles	20
1.2.2	Moyennes journalières et nocturnes	21
1.3	Calculs sous Statgraphics Plus 5.1	21
1.3.1	Mise en oeuvre.....	21
1.3.2	Résultats	22
1.4	Conclusions	23
2.	Comparaison entre bilan de masse et bilan hydrologique sur le glacier α.....	23
3.	Relation entre les crues de la station α et les conditions météorologiques.....	24
3.1	Données prises en compte	24
3.2	Influence de l'albédo et des précipitations	25
3.3	Les différents types de crues	25
3.4	Conclusions	26
	Conclusion.....	27
	Références bibliographiques.....	28

ANNEXES

<i>I-</i>	<i>Site d'étude et moyens techniques</i>	<i>29</i>
<i>II-</i>	<i>Sorties de terrain</i>	<i>30</i>
<i>III-</i>	<i>Bilan des stations limnigraphiques.....</i>	<i>32</i>
1.	Station 15.....	32
2.	Station α	32
3.	Station β	33

Introduction

Ce rapport présente les résultats de travaux menés au premier semestre 2004 sur la « Modélisation hydrologique des écoulements issus du glacier 15 de l'Antizana ».

Dans une première partie nous présentons le contexte de l'étude et sa problématique.

La seconde partie décrit les différentes installations de mesures présentes sur le site de l'Antizana et le travail de terrain que nous y avons mené.

La troisième partie porte sur la mesure, le calcul et la validation des débits de fonte captés par les diverses installations.

La quatrième partie apporte une contribution aux efforts de modélisation des débits de fonte en fonction des conditions météorologiques.

Première partie : Contexte du stage

1. L'IRD, l'unité GREAT ICE et ses partenaires en Equateur

La question du comportement des glaciers andins face aux fluctuations climatiques est particulièrement cruciale pour les régions avoisinantes. La fonte glaciaire, processus étroitement lié aux conditions météorologiques et donc au contexte climatique, constitue en effet une ressource hydrique majeure pour ces régions.

Afin de fournir une réponse concrète à cette préoccupation, l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) a créé en 2001 l'unité de recherche GREAT ICE (Glaciers et Ressources en Eau dans les Andes Tropicales, Indicateurs Climatiques et Environnementaux), dans la continuité du programme Neige et Glaciers Tropicaux (NGT) initié en 1995.

L'objectif du programme est d'améliorer la connaissance du fonctionnement des glaciers andins en les considérant comme témoin des variations du climat dans cette zone dans le but d'optimiser la gestion des ressources en eau dans ces régions.

Des bilans de masse, énergétique et hydrologique sont ainsi dressés sur des glaciers situés en Equateur, en Bolivie et au Pérou. Des extractions de carottes de glaces permettent aussi des analyses isotopiques.

En Equateur, le glacier d'étude principal est situé sur le volcan Antizana, à une cinquantaine de kilomètres à l'Ouest de Quito. Le programme est basé à Quito, au sein de l'Institut National de Météorologie et d'Hydrologie d'Equateur (INAMHI). L'EMAAP Quito, l'entreprise municipale de gestion d'eau potable à Quito, est également partenaire.

2. Présentation du site d'étude : le glacier 15 de l'Antizana

Le glacier 15 de l'Antizana (0°25' S, 78°09' O) est divisé à sa base en deux langues glaciaires appelées « glacier α » et « glacier β ». Il s'étend de l'altitude de 4860m jusqu'au sommet, à 5740 m (Figure1).

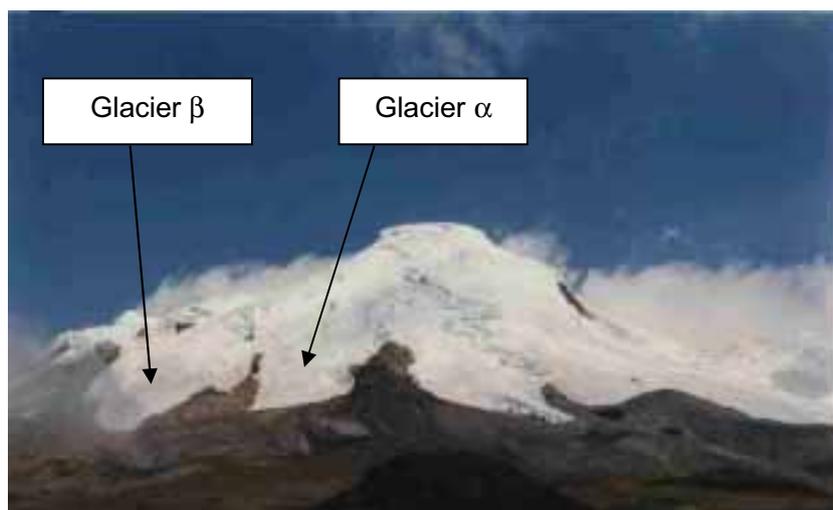


Figure 1 Le versant ouest du volcan Antizana, avec le glacier 15

L'installation d'un réseau de mesure a débuté en 1995 avec l'installation de balises d'ablation et de pluviomètres dont la mesure permet de connaître le bilan de masse de la zone d'ablation. Une station limnigraphique, la station 15, a ensuite été construite à 4550 m d'altitude afin de contrôler les débits à l'exutoire du bassin versant (1,37 km² de superficie, à 50% glaciaire). En 1997 une station météorologique dite « de référence » a été fixée sur le glacier α à 4860m. Elle a été suivie de peu par une autre station météorologique (SAMA) placée à 4950m dans le but de contrôler et d'extrapoler ses mesures. Depuis, d'autres pluviomètres ont été installés, et deux autres stations limnigraphiques (α et β) ont été construites en 2002 au pied des glaciers α et β (Voir *Annexe I, fig. I.1*).

Définitions :

Glacier : importante masse de glace se formant là où les températures permettent une accumulation puis un tassement de la neige. Les glaciers de montagne s'écoulent perpétuellement sous l'effet de leur poids. La partie inférieure des glaciers est soumise à la fonte et à la sublimation : c'est la « zone d'ablation ».

Páramo : zone située au-dessus de 4000m d'altitude, caractérisée par une végétation herbeuse sèche.

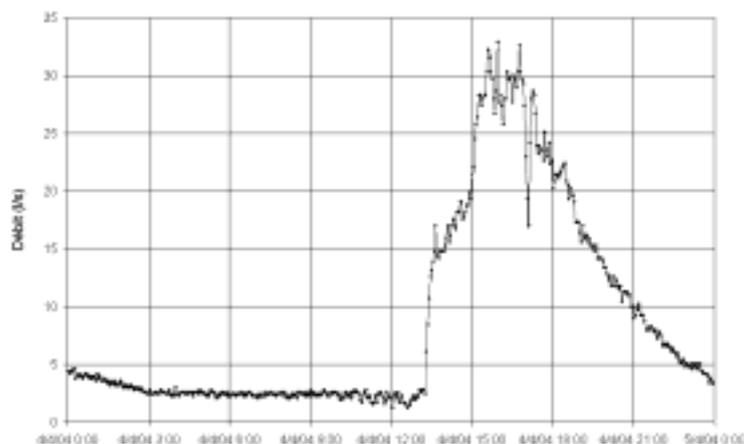
Moraine : zone intermédiaire entre le páramo et le glacier, que celui-ci découvre s'il recule à cause de sa fonte. Ce type de terrain est majoritairement minéral et hétérogène. Sa perméabilité varie beaucoup et quand elle est au contact de glaces mortes, on peut y rencontrer des chenaux d'infiltrations préférentiels rappelant les karsts.

Limnigraphe : appareil de mesure de hauteurs d'eau.

3. Problématique de l'étude

Les données issues de l'étude du glacier 15 de l'Antizana sont analysées dans le but d'affiner la connaissance du bilan d'énergie et de pouvoir déterminer les volumes de fonte par ce seul biais. Ce désir de modélisation induit la nécessité de connaître les bilans de masse et hydrologiques, afin de les comparer aux valeurs calculées par le bilan d'énergie.

La connaissance précise des débits passant aux stations limnigraphiques est alors recherchée. On s'intéresse plus particulièrement à la « crue glaciaire », phénomène quotidien dû à un maximum de l'apport énergétique par convection et surtout par rayonnement. Les débits mesurés varient en général de 0 à 50l/s, et peuvent atteindre 200l/s en cas de crue exceptionnelle.



Graphique 1 : Exemple de crue glaciaire à la station 15 : journée du 04/04/04

En Octobre 2003 les anciens limnigraphes des stations 15, α , et β ont été remplacés par de nouveaux appareils plus modernes (modèles « Nimbus »). Les données antérieures étant médiocres, il fallait traiter celles accumulées depuis Octobre 2003 afin de disposer de bons couples « données hydrologiques/données météorologiques » récents, bases même de la démarche de modélisation. De plus, en Janvier 2004 les stations α et β ont été améliorées avec l'installation de nouveaux canaux triangulaires.

Les stations fonctionnent dans des conditions extrêmes dues au transport solide, au basses températures et à la maintenance limitée du fait de leur isolement. Les récentes modifications ont donc accentué leur habituel besoin de suivi (*Annexe II*).

4. Déroulement chronologique du stage

La première partie du stage, de Février à Avril, visait à élaborer une base de données de débits satisfaisante pour la période Octobre – Avril, pour les trois stations. Cela a nécessité de nombreuses sorties de terrains (*Annexe II*) et un important traitement de données.

Au mois de Mai, après avoir synthétisé les données météorologiques disponibles nous avons essayé de mettre en place une modélisation purement statistique, basée sur la recherche de corrélations entre les variables météorologiques et les débits moyennés de la station 15. Cette démarche a été rendue difficile par le manque de données, leur qualité et leur cohérence incertaine. Nous avons même été amenés à soupçonner la disparition d'une partie des volumes d'eau, confortés dans cette idée par de précédentes études.

A partir du début du mois de Juin nous avons alors étudié plus particulièrement le glacier α . En effet, le mois de Mai constitue la première période longue pour laquelle on dispose continûment de données météorologiques et des débits de la station α . Ces circonstances étaient opportunes pour effectuer une comparaison entre bilan de masse et bilan hydrologique, puis une première analyse du lien entre conditions sur le glacier et débits à la station α .

Deuxième partie : Expérimentations au glacier 15 de l'Antizana

1. Le bilan de masse

Une trentaine de balises enfoncées verticalement dans le glacier α permettent de surveiller l'évolution de l'épaisseur du glacier et son déplacement. Elles sont situées dans la partie basse du glacier où a lieu la fonte, appelée « zone d'ablation ». Les parties des balises dépassant de la surface du glacier sont mesurées chaque mois, donnant ainsi accès à la hauteur de glace qui a fondu ou qui s'est sublimée. La hauteur de fonte H_i attribuée à chaque balise i est la suivante :

$$H_i = -D_{glace} * \Delta H_{glace} + D_{neige} * \Delta H_{neige}$$

D_{glace} et D_{neige} sont les densités respectives de la glace et de la neige, égales à 0,9 et 0,4. ΔH_{glace} et ΔH_{neige} sont les variations des épaisseurs de glace et de neige depuis le mois précédent.

Une hauteur de fonte $H_{globale}$ pour toute la surface d'ablation est ensuite calculée en pondérant les hauteurs H_i par des surfaces S_i que l'on attribue à chaque balise i :

$$H_{global} = \sum_i \frac{S_i}{S_{global}} * H_i$$

S_{global} est la surface de la zone d'ablation.

Le bilan de masse doit théoriquement être égal au bilan hydrologique.

2. Le bilan d'énergie

2.1 Equation du bilan d'énergie pour un glacier

L'équation du bilan d'énergie est la formulation de la conservation de l'énergie dans un volume de neige/glace. En faisant l'hypothèse que ce volume est suffisamment épais pour que les flux de chaleur à sa base soient nuls, le bilan d'énergie s'écrit de la façon suivante (Wagnon, 1999) :

$$R + H_l + H_s + G + P = \Delta Q_s + \Delta Q_m$$

R est la radiation nette de toute longueur d'onde

H_s est le flux turbulent de chaleur sensible (échange de chaleur avec l'atmosphère par gradient de température)

H_l est le flux turbulent de chaleur latente (échange de chaleur créé par gradient d'humidité)

G est le flux de conduction dans la neige/glace

P est le flux d'énergie apportée par les précipitations

ΔQ_m est le terme de variation du stockage de chaleur latente due à la fusion ou au regel

ΔQ_s est le terme de variation du stockage de chaleur sensible au sein du volume. Il correspond aux variations de température au sein de la neige/glace (température alors forcément inférieure ou égale à 0°).

Par convention les flux sont positifs lorsqu'il y a apport d'énergie à la surface.

G et P sont souvent négligeables (Wagnon, 1999). H_s et H_l sont significatifs mais de l'ordre de 5 fois plus faibles que R (Ménégoz, 2003). Par conséquent le facteur principal de la fonte est le rayonnement. Il est donc intéressant de préciser le bilan radiatif.

- Bilan radiatif :

En raison du zénith solaire, la zone équatoriale est la zone d'apport énergétique maximale (de courtes longueurs d'ondes) ; la forte nébulosité favorise aussi un flux important de grandes longueurs d'onde. Le bilan radiatif net à la surface de la neige constitue donc le principal apport énergétique des glaciers tropicaux (Wagnon, 1999). Le rayonnement net de toute longueur d'onde est le bilan des rayonnements de courtes (d'origine solaire) et de grandes longueurs d'onde (émis par les corps) :

$$R = (1 - a) \cdot SW_{\downarrow} + LW_{\downarrow} + LW_{\uparrow}$$

Où :

$-SW_{\downarrow}$ est le rayonnement de courtes longueurs d'onde incident (soleil)

$-a$ est l'albédo de la surface, et exprime la proportion de SW_{\downarrow} qui est réfléchi.

($a = SW_{\uparrow}/SW_{\downarrow}$).

$-LW_{\downarrow}$ est le rayonnement de grandes longueurs d'onde incident (atmosphère, nuages, terrains environnants)

$-LW_{\uparrow}$ est le rayonnement de grandes longueurs d'onde émis par le sol

L'albédo dépend principalement de l'état de surface (neige/glace, présence d'impuretés, présence d'eau...). C'est une valeur intégrée sur un volume qui dépend des couches inférieures, étant donné la transparence partielle de la neige pour le rayonnement solaire.

La valeur de l'albédo joue un rôle fondamental dans le processus de fonte, comme nous le verrons dans la Quatrième partie. Elle peut passer de 0,2 (glace sale : 80% du rayonnement solaire est absorbé) à 0,9 (neige fraîche : 90% du rayonnement solaire est réfléchi).

2.2 Mesures

2.2.1 La station de référence

Elle est installée de façon permanente sur la partie basse du glacier α à 4890 m d'altitude, où elle enregistre toutes les demi-heures la vitesse de vent, la température et l'humidité à deux hauteurs différentes (Voir Annexe I, fig. I.4). Elle possède également des capteurs de rayonnement incident et réfléchi pour les courtes et grandes longueurs d'onde. Elle fournit donc les valeurs d'albédo du glacier.

2.2.2 La station SAMA

La station SAMA (Station Automatique Météorologique d'Altitude) est placée sur le glacier α à 5000 m d'altitude où elle enregistre les mêmes paramètres que la station de référence, mais à une seule hauteur.

2.2.3 Autres dispositifs de mesure

Le TOTEM est un mât porteur d'appareils de mesure qui a été installé dans le but de mesurer avec précision les profils de vent, de température et d'humidité. Ceci dans le cadre d'une étude sur la couche limite atmosphérique au dessus du glacier.

Le « peigne » de température enregistre celles-ci à six hauteurs différentes. Il n'est installé que lors des missions longues sur le terrain.

Des mesures de fonte et de sublimation sont effectuées lors des missions longues sur le terrain.

3. Le bilan hydrologique

Dans le cadre des études menées par l'équipe « GREAT ICE », des mesures hydrologiques sont effectuées en aval du glacier 15. Le bilan hydrologique sert à valider les modèles de fonte en comparant les débits mesurés en aval du glacier avec les apports en précipitations et les apports dus à la fusion du glacier.

3.1 Les stations limnigraphiques

3.1.1 La station 15

Cette station est située au pied de la moraine du glacier 15, à 4550m d'altitude (Voir *Annexe I, fig 1.2*). Elle possède un canal en béton muni d'une échelle de mesure, d'un piézomètre, et d'un limnigraphe « Nimbus » (voir 3.1.3). Celui-ci enregistre automatiquement toutes les trois minutes la hauteur de la lame d'eau au-dessus d'un seuil de quelques centimètres.

Le rôle de cette station est de mesurer des débits issus de la fonte du glacier. Les débits dus aux précipitations compliquent l'interprétation, mais ils sont faibles et liés aux données pluviométriques.

Un système de guillotines permet de dévier le courant vers un réservoir, afin d'effectuer les jaugeages nécessaires à l'obtention des débits .

3.1.2 Les stations α et β

Ces deux stations ont été installées au pied des glaciers α et β , à environ 4800m d'altitude, afin de répondre à des interrogations quant au devenir des écoulements entre le glacier et la station 15 (Voir *Annexe I, fig. 1.3*).

Les lits des torrents y ont été aménagés pour canaliser les écoulements vers des canaux triangulaires munis d'échelles de mesure et de limnigraphes Nimbus (voir 3.1.3).

3.1.3 Le limnigraphe « Nimbus »

Cet appareil est fabriqué par l'entreprise OTT. Il fonctionne à l'aide d'une pompe qui injecte des bulles d'air dans l'eau par l'intermédiaire d'un tuyau capillaire. La pression nécessaire à l'injection est convertie en hauteur d'eau.

Une petite centrale contient la pompe, et permet de lire les mesures en cours ainsi que le déchargement des données enregistrées grâce à un port optique .

3.2 Le réseau de pluviomètres / pluviographes

Il est constitué de trois pluviomètres à augets et de trois pluviographes totalisateurs.

Les pluviomètres à auget enregistrent les heures de basculement d'un auget qui supporte l'équivalent de 0.2 mm de précipitations. Ils sont placés entre les glaciers α et β (P2), sur la moraine (P0) et à la station 15 (P15).

Les pluviographes totalisateurs servent à connaître les précipitations mensuelles; il sont donc mesurés chaque mois.

4. Le travail sur le terrain

4.1 Rôle

Les sorties de terrain sont indispensables au déroulement du programme GREAT ICE dans sa globalité. Elles permettent : l'installation d'appareils de mesure, la réalisation de travaux (réparations et modifications), la récupération de données, les mesures et les observations.

Il existe deux types de sorties de terrain : les sorties d'une journée, dites « de routine », et les sorties longues pouvant durer jusqu'à 5 jours. Les premières servent à vérifier les appareils de mesure, décharger les données, faire des observations et éventuellement installer ou modifier des appareils; les sorties longues sont plutôt destinées à faire des observations ou modifications lourdes, et à installer des appareils ou dispositifs complexes.

Lors des sorties longues un campement est installé vers 4700m d'altitude, au-dessus de la station 15, ou bien au niveau des stations 15 α et 15 β .

J'ai, lors de mon stage, passé 29 jours sur le terrain, à l'Antizana, de façon journalière ou dans le cadre de missions longues.

4.2 Calendrier

Voir *Annexe II*.

Troisième partie : Calculs de débits aux stations limnigraphiques : démarche et problèmes rencontrés

Le calcul des débits de fonte est l'étape préalable à toute étude hydrologique. Mais il a toujours été rendu difficile par les conditions dans lesquelles les limnigraphes fonctionnent.

Le premier facteur est le fort transport solide, qui bouche fréquemment les canaux et les prises de pression des limnigraphes. Les données alors recueillies sont faussées et nécessitent une attention spéciale.

Le second facteur est le gel nocturne des canaux, dû à l'altitude importante. Le gel provoque une surpression dans les prises de pression des limnigraphes, empêchant de connaître la hauteur d'eau réelle.

Pour chaque station limnigraphique (15, α et β) nous avons suivi la même démarche afin d'obtenir les séries des débits de Octobre 2003 à Mai 2004. Elle consiste en la succession des étapes suivantes : traitement des hauteurs brutes enregistrées par les limnigraphes Nimbus, calcul des hauteurs équivalentes sur les échelles des canaux, puis calcul des débits grâce aux courbes de tarage.

Nous présentons ici le travail mené pour chaque station.

1. Station 15

1.1 Description

Le canal de la station 15 mesure 3m de long et 30cm de large. Il est en légère pente. Un seuil construit au milieu sert à limiter la formation d'anti-dunes qui rendent les mesures imprécises, et à diminuer la vitesse du courant pour « lisser » la ligne d'eau. Le contrôle des hauteurs de la ligne d'eau s'effectue immédiatement en amont du seuil. Un trou a été percé dans la paroi du canal afin de permettre les mesures piézométrique (H_{piezo}) et limnigraphique (H_{nimbus}).

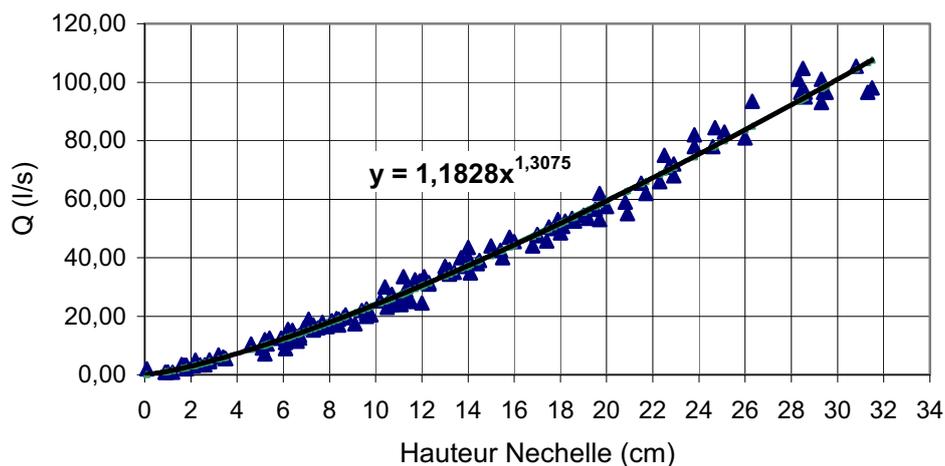
Mais la station connaît un important problème de dépôt en amont du seuil dû au transport solide. Celui-ci a pour effet de boucher la cavité logeant les sondes de mesure, et également de fausser les mesures en modifiant le fond du canal. Une nouvelle échelle (N_{echelle}) a donc été placée dans le canal afin de contrôler les mesures et détecter le problème de bouchage. En effet la nouvelle échelle ne souffre pas de ce problème, mais elle est en contrepartie plus difficile à lire.

Un autre problème rencontré est celui du gel nocturne. Son apparition a deux effets : une surpression dans la sonde du Nimbus et une modification de la section de l'écoulement qui fausse la mesure de hauteur d'eau.

1.2 Courbe de tarage

Pour établir la courbe de tarage on effectue des jaugeages volumétriques à l'aide d'un réservoir de 1.5 m³ vers lequel des vannes guillotines peuvent dévier le courant. Les jaugeages sont de bonne qualité, bien qu'une erreur provienne de la mesure du temps d'ouverture des vannes et de l'imprécision de la lecture de la hauteur d'eau dans le réservoir du fait de turbulences. Le débit de fuite de la vanne guillotine est également mesuré, à l'aide d'un bidon.

Nous avons décidé de déterminer une courbe de tarage « définitive », et pour cela réuni toutes les archives de jaugeages disponibles.



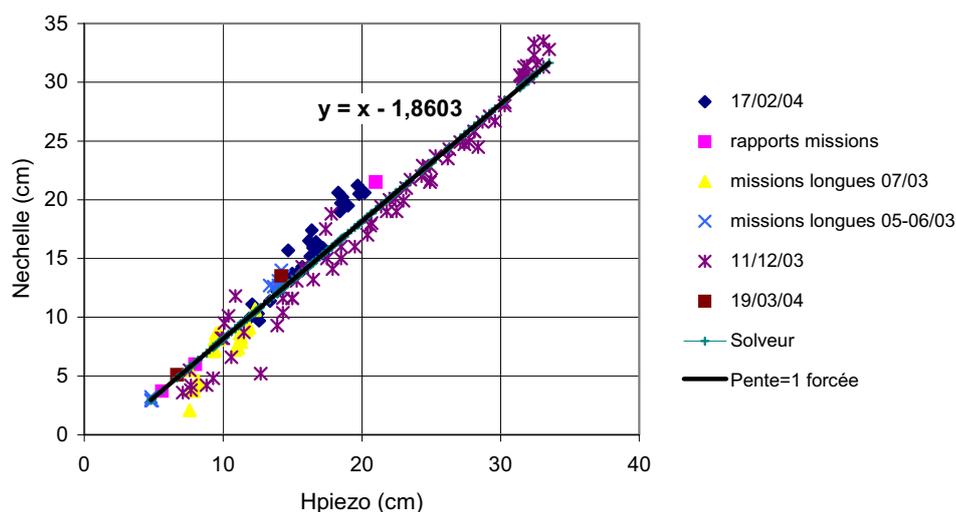
Graphique 2 : Courbe de tarage de la station 15

Les jaugeages reproduits ici sont ceux effectués lors de missions longues (quinze jours répartis sur Mai, Juin, Juillet 2003), et lors de missions journalières (23/10/03, 5/11/03, 7/11/03, 14/11/03, 11/12/03, 17/02/04). On cherche à obtenir une relation de type « puissance », et l'ajustement à l'aide d'un solveur permet d'aboutir à la relation suivante :

$$Q = 1,18.N_{echelle}^{1,30}$$

Le coefficient de détermination est : $R^2=0,989$.

Un certain nombre de jaugeages ont été effectués en notant uniquement les valeurs du piézomètre. Nous avons donc recherché la fonction « Hauteur nouvelle échelle = f(Hauteur piézomètre) » afin d'avoir une courbe de tarage complète.



Graphique 3 : Relation entre Hpiezo et Nechelle à la station 15

Nous avons donc utilisé comme précédemment toutes les notes de jaugeages disponibles, ainsi que les notes contenant seulement les hauteurs relevées lors des visites sur le terrain (Graphique 3). La pente de la droite de régression calculée automatiquement est différente de 1. On soupçonne donc ici le piézomètre, qui a dû être parfois bouché lors des lectures.

Afin de disposer d'une relation cohérente nous forçons à l'aide d'un solveur la pente de la droite de régression à 1. Nous obtenons alors la relation suivante :

$$N_{echelle} = H_{piezo} - 1,86$$

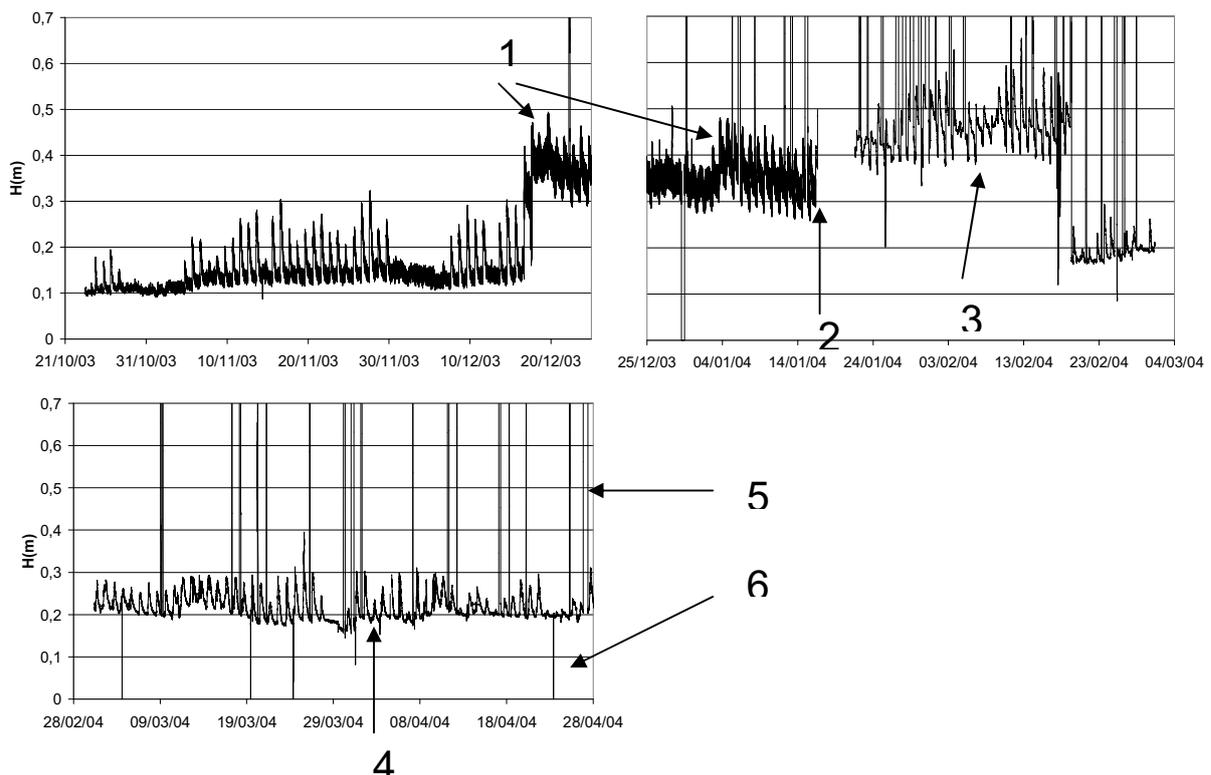
Le coefficient de détermination est malgré tout correct : $R^2=0,967$.

1.3 Traitement des données brutes

Le traitement des hauteurs d'eau enregistrées comporte deux phases. La première consiste en l'analyse critique des données, avec suppression ou modification de certaines périodes. La seconde vise à obtenir une relation « $N_{echelle} = f(H_{Nimbus})$ » afin de permettre le calcul définitif des débits.

- Analyse des données

Les hauteurs d'eau enregistrées pendant la période du 23/10/03 au 30/04/04 sont résumées sur le graphique 4 :



Graphique 4 : Hauteurs à la station 15 avant correction

La série des hauteurs d'eau enregistrées présente de nombreuses variations dans le niveau moyen. Or on sait que le niveau de base (c.a.d. le débit de nuit, faible) ne varie que très peu. Ce graphique met donc en évidence des périodes de bouchages, de décalages ou de dysfonctionnements du Nimbus, et nous avons donc dû translater verticalement certaines périodes afin d'avoir une série homogène. Ce « recalage » a été effectué avec l'hypothèse que le bouchage ne provoque qu'une translation des hauteurs. Le niveau nocturne de référence a été fixé à 0,38m, valeur enregistrée le 16/01/04 (2), jour où l'on a supposé le Nimbus en condition normale.

Pour procéder au « recalage » nous avons translaté des sections définies par leur niveau de base. En effet lorsque celui-ci est constant nous considérons que le Nimbus est dans une situation stable. Ces périodes sont celles du 23/10/03 au 17/12/03, du 19/12/03 au 15/01/04, et du 19/02/04 au 28/02/04.

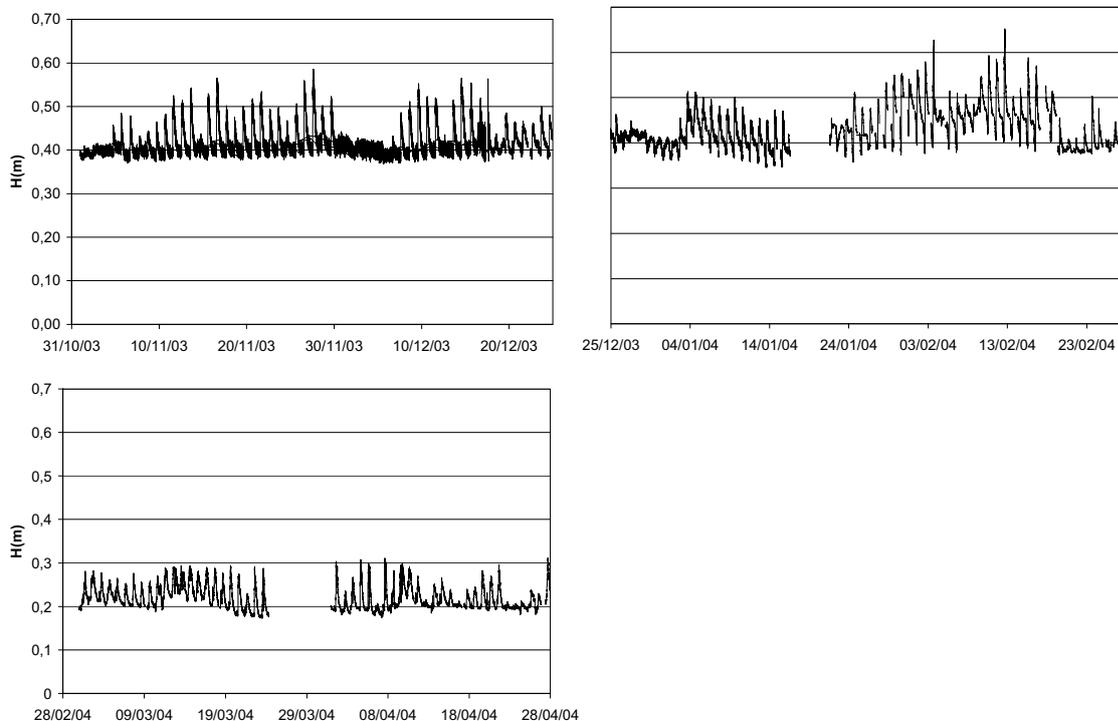
La période du 01/03/04 au 28/04/04 présentant un niveau de base relativement constant, nous l'avons laissée telle quelle.

La période du 19/12/03 au 15/01/04 (1) est marquée par la présence de fortes et rapides fluctuations de niveau (batillage) d'amplitude 5cm, probablement dues à un problème d'appareillage. Considérant les variations moyennes cohérentes nous avons lissé la courbe par moyenne mobile.

La période du 24/01/04 au 18/02/04 (3) n'a pas été modifiée car bien que le niveau de base présente des variations suspectes, il n'y a pas de translation globale.

Un certain nombre de suppressions doivent également être faites lors du traitement. La période du 25/03/04 au 01/04/04 (4) a été supprimée car les hauteurs se sont avérées incohérentes par rapport au reste de la période associée. C'est le cas également des violentes augmentations de hauteur dues au gel (5), et des chutes brutales (6). Celles-ci proviennent soit de défauts d'appareillage ponctuels ou bien de lacunes dans les données qui se traduisent par des paliers à zéro.

On obtient finalement la série définitive suivante :



Graphique 5 : Hauteurs à la station 15 après correction

- Relation « Nouvelle échelle = f(Hauteur Nimbus) »

Nous avons choisi deux périodes (du 31/10/03 au 28/02/04 et du 01/03/04 au 28/04/04) pour chacune desquelles il a fallu déterminer une relation $N_{\text{échelle}} = f(H_{\text{Nimbus}})$. Nous avons donc récupéré dans les rapports de missions tous les relevés des hauteurs d'eau pour les mettre en regard avec les Hauteurs Nimbus finalisées correspondantes. Comme pour l'établissement de la courbe de tarage, la relation $N_{\text{échelle}} = f(H_{\text{piezo}})$ a été utilisée, car dans de nombreux rapports ne figurent que les Hauteurs piezométriques.

Les deux relations obtenues sont alors :

- Période du 31/10/03 au 28/02/04 : $N_{\text{échelle}} = 0,99 \cdot (H_{\text{Nimbus}}) - 0,35$
- Période du 01/03/04 au 28/04/04 : $N_{\text{échelle}} = 0,98 \cdot (H_{\text{Nimbus}}) - 0,16$

Les pentes obtenues très proches de 1 confirment la cohérence des hauteurs enregistrées par le Nimbus et surtout celle des « recalages » effectués dans la première période. De plus les coefficients de détermination R^2 obtenus sont respectivement de 0,98 et 0,90.

1.4 Débits calculés

Les débits obtenus sont globalement satisfaisants car nous constatons qu'ils restituent correctement les débits importants (crues glaciaires) : les comparaisons avec les données de jaugeages montrent des erreurs inférieures à 15%.

Nous restons par contre plus mitigés pour ce qui est des débits nocturnes. En effet, le mois de février montre des valeurs étonnamment élevées, atteignant même 15l/s dans la première partie du mois, alors que l'ordre de grandeur attendu est plutôt de 5l/s au maximum. Il faut donc considérer ces valeurs avec précautions, d'autant plus qu'une absence malencontreuse de données météorologiques concomitantes limite leur analyse critique.

Nous avons calculé les débits du mois de Mai dans un second temps mais ils ne figurent pas dans ce rapport.

2. Stations 15 α et 15 β

2.1 Description

Les stations 15 α et 15 β ont été construites dans l'optique de l'étude spécifique de la restitution de l'eau de fonte à la station 15 en aval. Ces stations devant être provisoires ont été construites avec peu de génie civil, et nécessitent souvent des réparations ou des modifications (voir *Annexes II et III*).

2.2 Problèmes rencontrés

Nous avons rencontré beaucoup de difficultés concernant la récupération et la validité des données, à savoir :

- Le charriage important de grosses pierres et de sédiments fins qui entraîne :
 - Une obstruction fréquente des canaux, avec modification de la ligne d'eau et donc dégradation de la qualité des données

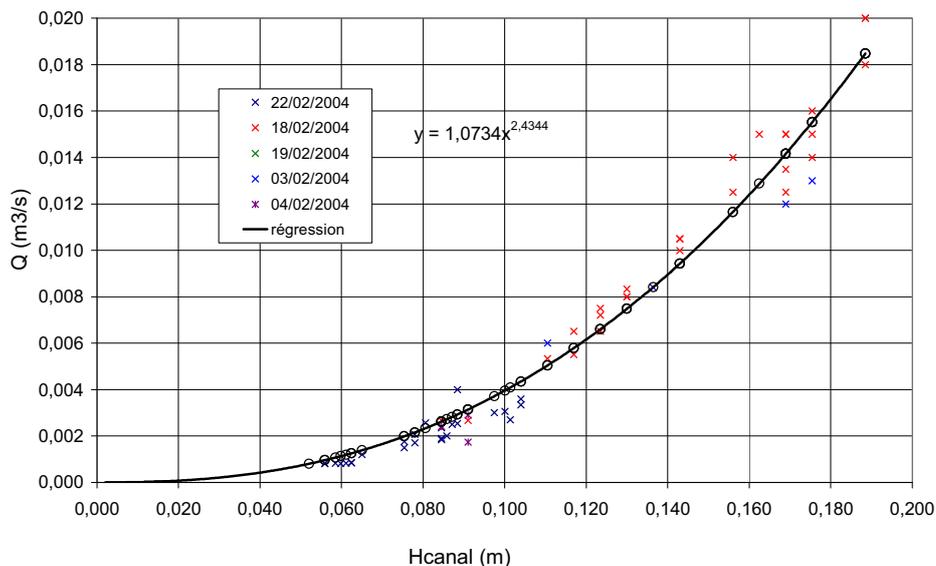
- Le bouchage des capillaires des Nimbus par du sable
 - La dégradation des stations (arrachage des capillaires, etc...)
 - La modification du lit en amont des stations avec création de fuites
- Les conditions météorologiques qui génèrent :
- Le gel fréquent de l'eau dans les canaux la nuit, provoquant la modification des sections de passage de l'eau et la perturbation des mesures de pression des Nimbus
 - Des chutes de neige pouvant modifier les sections de passage de l'eau dans les canaux, et enneiger les panneaux solaires (privant alors les Nimbus d'alimentation)
- Les problèmes matériels, tels que :
- Des dysfonctionnements des Nimbus d'origines mécanique
 - Des fuites dans les connections des capillaires des Nimbus qui induisent la mesure de la pression atmosphérique
 - La présence de liquide antigel dans les capillaires

Ces problèmes impliquent beaucoup de lacunes dans les données (Voir *Annexe III*).

2.3 Courbes de tarage

Les canaux triangulaires des stations 15 α et 15 β ont été installés en Janvier 2004. Nous avons donc dû effectuer des jaugeages dès la première sortie longue de terrain afin d'établir les courbes de tarage. Les jaugeages s'effectuent en interceptant l'écoulement avec des bidons de 150 litres gradués tous les 5 litres.

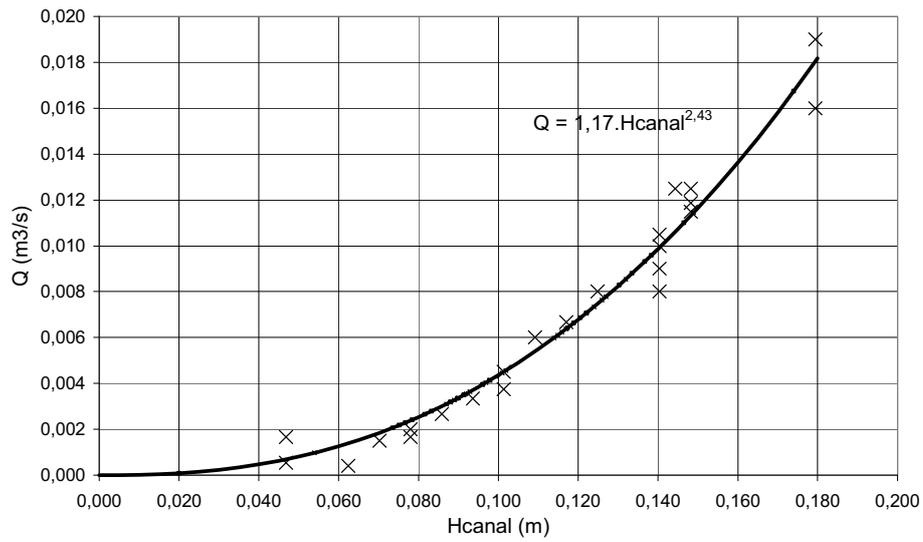
Les graphiques 7 et 8 présentent les jaugeages et les courbes de tarages.



Graphique 7 : Courbe de tarage de la station α

Pour la station α la relation de tarage ajustée est la suivante :

$$Q_{\alpha} = 1,07.H_{canal}^{2,43}$$



Graphique 8 : Courbe de tarage de la station β

Pour la station β la relation de tarage ajustée est la suivante :

$$Q_{\beta} = 1,17.H_{canal}^{2,43}$$

Les coefficients de détermination R^2 calculés pour les deux courbes de tarage sont respectivement 0,94 et 0,97.

Quatrième partie : Apports à la modélisation par analyse multi-variables

1. Première démarche d'approche statistique

Dans l'optique de modéliser le lien entre les conditions météorologiques présentes sur le bassin versant du glacier 15 et les débits mesurés à l'exutoire (station 15), nous avons tenté de rechercher des corrélations entre les différentes variables.

La méthode employée se base sur l'utilisation du logiciel Statgraphics Plus 5.1.

1.1 L'analyse par composantes principales (ACP)

Cette méthode, basée sur l'algèbre linéaire, permet de réduire un système complexe de corrélations en un plus petit nombre de dimensions. Les variables analysées sont exprimées dans un nouvel espace dont les dimensions, appelées composantes, sont des combinaisons linéaires de toutes les variables. Les nouvelles dimensions sont calculées de sorte à concentrer le maximum de variabilité des données sur le plus petit nombre de composantes (Villacis, 2001).

1.2 Approche par moyenne semi-journalière

Pour comparer les données disponibles, nous avons calculé pour chaque variable les moyennes journalières et nocturnes. Cette approche binaire se justifie par l'existence d'une activité de fonte très majoritairement diurne, liée à des paramètres météorologiques fortement gouvernés par l'alternance jour/nuit.

1.2.1 Données disponibles

Soixante-cinq jours comportent tous les paramètres nécessaires à l'étude :

- *Débit Q à la station 15*

De Octobre à Avril on dispose d'une série de débits importante, ne comportant que peu de périodes de lacunes (voir *Annexe III*). Les gels nocturnes étant fréquents, on a reconstitué les débits de nuit par extrapolation depuis les valeurs adjacentes (soir et matin), en jugeant l'erreur commise peu conséquente. Environ 30 jours de mauvaise qualité ont été exclus.

- *Données enregistrées au niveau du glacier*

Les données que l'on a réunies sont celles que l'on sait les plus influentes : précipitations, températures, albédo du glacier et rayonnement. Nous ne prenons pas ici en compte le vent et l'humidité qui entrent en jeu dans la sublimation.

-Précipitations : P2

Le pluviomètre fournissant les données les plus complètes est le P2. Situé au niveau du glacier, il garantit l'accès aux précipitations le concernant. Cependant, une panne au mois d'Avril nous a privé de toutes données. De rares lacunes ont été comblées par extrapolation à partir du pluviomètre P0.

-Températures : T180

Les différents capteurs de températures et les centrales d'acquisition correspondantes ont connu de nombreuses pannes. La série de températures la plus complète est fournie par le capteur T180, situé à la station de référence (à la hauteur de 1,80m). Des données ont là aussi été reconstituées au mois d'Avril à partir de celles du capteur TSAMA, situé à la station SAMA.

-Rayonnement, albédo : R_{netSAMA} et Alb_{SAMA}

La station SAMA a mieux fonctionné que la station de référence lors de la période étudiée, enregistrant le rayonnement net R_{netSAMA} et l'albédo Alb_{SAMA} . Trois périodes de lacunes apparaissent cependant : le mois de Novembre, une semaine en Janvier, et trois semaines en Avril. Nous avons reconstitué quatre jours de données en Novembre et la semaine de Janvier grâce au fonctionnement exceptionnel de la station de référence.

1.2.2 Moyennes journalières et nocturnes

Chaque variable évolue de façon similaire par rapport au cycle jour/nuit, avec toutefois de légères différences.

Les débits diurnes ont été moyennés de 8h à 20h, et les débits nocturnes de 20h à 8h. En effet on observe généralement que les débits se stabilisent à un niveau bas aux alentours de 20h et ce jusqu'à 8h le lendemain.

Nous avons effectué la même séparation pour les précipitations, en raison de leur très faible occurrence entre 20h et 8h.

Pour la température, l'albédo et le rayonnement, nous avons respecté les heures de lever et coucher du soleil, ce dernier conditionnant directement les valeurs de ces paramètres. Les moyennes diurnes sont donc ici calculées de 6h à 18h, et les moyennes nocturnes de 18h à 6h.

1.3 Calculs sous Statgraphics Plus 5.1

1.3.1 Mise en oeuvre

On sait que les variables météorologiques et l'albédo ont une influence directe sur les débits passant à la station 15. Par exemple, un albédo faible induit une forte absorption du rayonnement solaire et donc une fonte importante le jour même. Ce phénomène est d'autant plus vrai que le rayonnement est fort. Des pluies importantes accentuent aussi les crues, étant donnée la superficie du bassin versant (*Favier, 2001*).

Mais il existe également des relations décalées dans le temps. Par exemple, des précipitations neigeuses nocturnes peuvent provoquer des débits importants le jour suivant, selon les conditions de température et de rayonnement (*Favier, 2001*). Dès lors nous avons voulu prouver grâce à l'outil statistique les corrélations déjà connues, et surtout profiter de cette approche pour en découvrir de plus complexes .

Nous avons donc créé d'autres variables qui ne sont autres que les variables de base décalées dans le temps. Ce sont celles dont les noms portent par la suite « _1 » ou « _2 ».

Exemple : P2_1 est P2 avancé d'une demi-journée ; P2_2 est P2 avancé de 24 heures etc...

Date	Q	P2	P2_1	P2_2	T2	T2_1	T2_2	RnetSama	RnetSama_1	RnetSama_2	AlbSama	AlbSama_1	AlbSama_2
1/1/04 0:00	2,98	0	0	0,438	-0,31	4,30	0,08	55,20	72,74	82,00	1,80	0,73	1,18
1/1/04 12:00	2,13	0	0	0	-5,27	-0,31	4,30	39,90	58,78	72,74	0,70	1,80	0,73
2/1/04 0:00	3,46	0	0	0	0,94	5,27	-0,31	82,33	28,50	18,70	0,99	0,70	1,18
2/1/04 12:00	7,50	0,214	0	0	3,58	0,94	5,27	82,33	82,33	28,50	0,87	0,99	0,73
3/1/04 0:00	3,50	0	0,214	0	0,88	3,58	0,94	82,33	82,52	82,33	0,94	0,87	0,99
3/1/04 12:00	16,22	6,848	0	0,214	1,14	0,88	3,58	89,46	80,81	82,52	0,87	0,89	0,87

Figure 2 : Extrait de la matrice de données utilisées

Ainsi, en comparant par exemple les variables Q, AlbSama et P2_1, nous pouvons rechercher l'influence de l'albédo et des précipitations de la nuit antérieure sur le débit diurne. La figure 2 montre un extrait du tableau de synthèse utilisé comme matrice de données pour Statgraphics.

Nous avons effectués des essais de calculs avec la fonction d'analyse par composantes principales de Statgraphics. Préalablement, les variables ont été analysées individuellement afin de vérifier leur distribution normale. Des opérateurs ont été appliqués à certaines afin de respecter les critères dictés par le logiciel. Pour les précipitations, qui sont fréquemment nulles, l'opérateur étant le logarithme nous avons additionné 0.02 à la variable.

Des codes de qualité des débits, de disponibilité de données, et de différenciation entre jour et nuit nous ont permis de tester les configurations voulues. Les débits de jour ont été étudiés dans leur ensemble, ou en distinguant les forts débits et les faibles débits.

1.3.2 Résultats

Il a été impossible, quelque soit le nombre ni la nature des paramètres soumis à l'analyse, d'aboutir à des résultats satisfaisants. En effet, le pourcentage de variance expliqué par les composantes principales les plus significatives est toujours resté faible, de l'ordre de 60% au maximum lors d'analyses avec 4 variables. De plus, la variable Q n'a jamais montré de corrélations flagrantes avec aucune des autres variables dans le plan des deux premières composantes principales.

La figure 3 montre le type de représentation obtenue avec le logiciel Statgraphics :

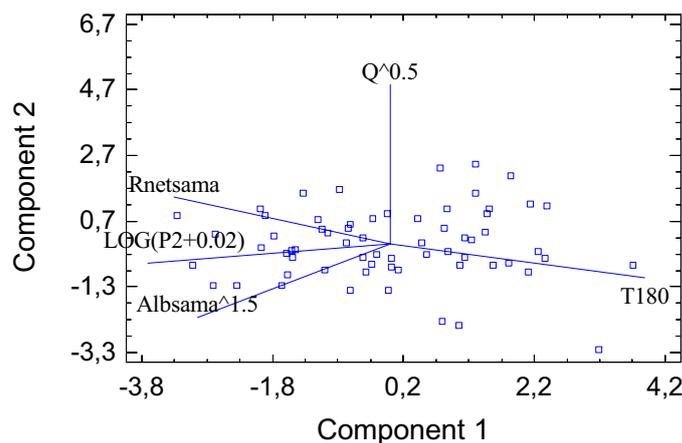


Figure 3 : Exemple d'analyse rendue par Statgraphics

Ce résultat est représentatif de ceux obtenus lors de cette étude puisqu'il montre un débit Q non corrélé avec les autres variables.

1.4 Conclusions

A cet échec nous pouvons tenter d'apporter plusieurs explications.

- En premier lieu, le fait de mélanger dans le traitement statistique toutes les crues sans distinction n'est peut-être pas viable. Mais créer différents groupes de crues de caractéristiques communes rendrait peu significatif une approche statistique compte tenu du faible nombre d'échantillons disponibles. Il faudrait donc plus de données pour appliquer cette méthode.

- Nous avons admis avec du recul que certaines journées présentaient des enregistrements de hauteurs d'eau douteux, sûrement synonymes de dysfonctionnements du Nimbus. Les débits correspondants seraient mauvais, et auraient faussé l'analyse.

Le principe de moyenne lui-même est peut-être critiquable car il provoque une perte d'information au niveau de la forme et de l'intensité de la crue. Nous avons jugé la méthode valide car tout semble montrer que la valeur moyenne d'une crue est représentative de son maximum. Cela doit être à nouveau vérifié.

- Enfin, une dernière explication serait la mauvaise restitution des débits entre le glacier et la station 15. Pradero avait déjà montré en 2002 que des pertes se produisaient à l'époque et que l'essentiel des débits passant à la station 15 ne provenaient que de la station α . Etant donné la grande variabilité du bassin versant (constitué par du dépôt morainique, instable), il est permis de supposer que les conditions de transferts furent variables au cours de notre période d'étude.

2. Comparaison entre bilan de masse et bilan hydrologique sur le glacier α

Les conclusions que nous avons faites concernant une hypothétique mauvaise restitution de l'eau nous ont incité à étudier le devenir de l'eau immédiatement après la fonte glaciaire.

L'excellente qualité des mesures de débits à la station α pour le mois de Mai s'est alors avérée opportune, car elle permettait pour la première fois de faire une comparaison entre bilan de masse et bilan hydrologique sur le glacier α .

La zone d'ablation du glacier α a une surface évaluée à 68382 m² pour le mois de Mai. Le relevé des balises de masse à la fin du mois a permis de définir pour toute la surface une ablation moyenne de 430,5 mm de hauteur d'eau. Nous en déduisons le volume d'eau fourni par le glacier :

$$\underline{V_{\text{fonte}} = 68382 \times 0,43 = 29404 \text{ m}^3}$$

Il faut également considérer le volume apporté par les précipitations (pluvieuses ou neigeuses) cumulées du mois, qui sont mesurées à 120 mm au pluviomètre P0. Si on assimile le bassin versant de la station α au glacier, on calcule :

$$\underline{V_{\text{précipitations}} = 68382 \times 0,12 = 8205 \text{ m}^3}$$

Nous obtenons donc le volume total théorique devant être mesuré à la station α :

$$\underline{V_{\text{total}} = V_{\text{fonte}} + V_{\text{précipitations}} = 37609 \text{ m}^3}$$

Or le débit moyen à la station α lors du mois de Mai est de 6 l/s, ce qui équivaut au volume total écoulé suivant dans le mois :

$$V_{\text{mesuré}} = 16070 \text{ m}^3$$

Nous calculons donc un déficit de 21539 m³ d'eau, que les erreurs de calcul de l'ordre de 10% faites sur les débits, les précipitations, la surface et les mesures d'ablation ne peuvent expliquer. Le fait d'avoir négligé la sublimation a peu d'impact : nous pourrions majorer sa valeur à 30 mm (*Ménégoz, 2004*), ce qui ne représente qu'un volume de 2000m³ à retirer du déficit calculé.

En revanche nous n'avons pas pris en compte, faute de données, l'« écoulement » du glacier sous l'effet de son poids qui est au minimum d'un mètre par mois. Celui-ci n'avançant pas visuellement il faut en conclure à la fonte du volume de glace correspondant. En admettant le glacier profond de 30m et large de 200m, on évalue alors à 6000m³ de glace et donc 5400m³ d'eau le volume à ajouter au déficit.

Conclusion :

Ces calculs effectués sur une très courte période, confirment l'existence d'infiltrations : une partie seulement de l'eau de fusion du glacier passe par la station α . On pourra utiliser la forme de l'hydrogramme pour connaître la modulation de la fonte au cours d'une même journée ou entre les différentes périodes climatiques, mais il faudra avoir recours aux bilans de masse des glaciers pour quantifier les volumes de fonte. Ceci devrait être probablement précisé dans les prochains mois par l'acquisition de nouvelles mesures.

3. Relation entre les crues de la station α et les conditions météorologiques

Il existe des types de crues très différents. Dans une optique de modélisation il faut préalablement définir les processus qui entrent en jeu dans la génération de ces crues. En 2001, Favier a effectué cette étude préliminaire avec les débits de la station 15. Or on sait depuis que les écoulements issus du glacier 15 subissent des infiltrations et qu'ils sont restitués de façon imparfaites à la station 15. Il était donc intéressant d'examiner les crues à la station α (censée représenter le comportement du glacier α) en fonction des paramètres météorologiques les plus influents.

3.1 Données prises en compte

Nous avons retenu le mois de Mai comme période d'étude, car c'est le seul mois lors duquel la station α a pu fonctionner sans interruption, avec disponibilité de toutes les données météorologiques.

Les variables que l'on a observées sont :

- les débits, avec un pas de temps de 3 minutes
- les précipitations du pluviomètre P0, sous la forme cumulative
- l'albédo de la station SAMA, moyenné sur la journée.

On a également pris en compte les valeurs de température et de rayonnement incident de courtes longueurs d'onde de la station SAMA, avec un pas de temps de 30 minutes.

Notons que les mesures directes d'albédo fonctionnent de façon régulière depuis très récemment. Il n'avait jamais été possible auparavant de comparer directement sur une aussi longue période débits et albédo.

3.2 Influence de l'albédo et des précipitations

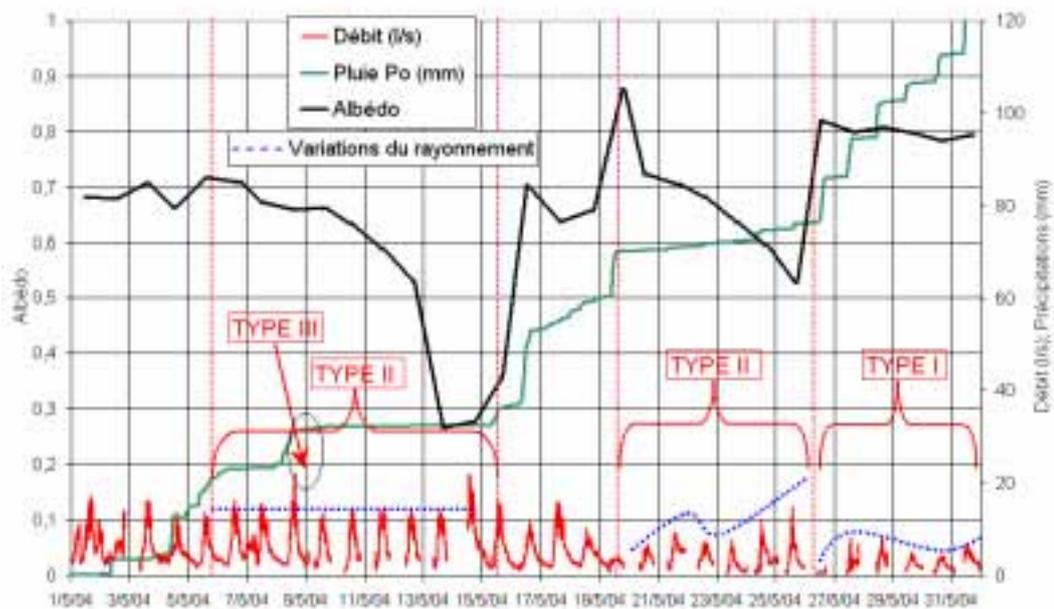
Le rayonnement net est plus directement relié à la fonte que ne l'est le rayonnement global incident. En effet, il intègre les variations de l'état de la neige à travers l'albédo. C'est ce qu'exprime l'équation du bilan d'énergie (Deuxième partie – 2.1).

L'albédo est donc un élément déterminant de la classification des crues, puisqu'il gouverne l'absorption du rayonnement solaire (de courtes longueurs d'onde, qui sont les plus énergétiques). Même par fort rayonnement incident de courtes longueurs d'onde, les débits seront faibles si l'albédo est élevé. Par contre, dans le cas où les valeurs d'albédo sont faibles, un faible rayonnement incident global (toutes longueurs d'onde) provoquera de fortes crues. (Favier, 2001)

Les précipitations jouent donc un rôle prépondérant (particulièrement lors de la saison des pluies qui s'étend d'Avril à Juin) car, étant majoritairement sous forme neigeuse, elles déterminent l'état de surface du glacier (et donc l'albédo). De plus, de fortes précipitations pluvieuses peuvent provoquer des ruissellements sur le terrain morainique et donc amplifier les crues. A la différence de l'étude de Favier (concernant la station 15), on n'observera que peu de ces événements (un seul sur le mois), étant donnée la grande proportion glaciaire du bassin versant de la station α .

3.3 Les différents types de crues

Au mois de Mai nous observons les événements suivants :



Graphique 8 : Comparaison des débits de la station α selon différents paramètres

L'analyse du graphique 8 nous permet de faire ressortir 3 types de crues :

- 1° type : Absence de crues importantes (du 26/05 à u 31/05)

Cette période est caractérisée par un fort albédo, ici liée aux précipitations quotidiennes. Les températures négatives lors de cette période confirment leur nature neigeuse. Les débits sont faibles (<10 l/s). Nous constatons que les débits de crue dépendent de l'intensité du rayonnement incident.

- 2° type : Débits de fonte (du 5/05 au 14/05, et du 19/05 au 25/05)

Les crues de ce type sont consécutives à la fonte glaciaire. Ici, les périodes lors desquelles on observe ces crues suivent d'importantes chutes de neige. Elles sont donc caractérisées par une dégradation de l'albédo causée par la fonte de la neige suivie de l'apparition de la glace.

Le rayonnement reçu par le glacier prévaut alors, comme semble l'attester la tendance des crues à suivre les variations du rayonnement journalier. Le rayonnement est constant et élevé du 5/05 au 13/05 (avec des débits de crue stables), et variable du 19/05 au 25/05 (avec des crues variables).

On observe les crues les plus intense lorsque l'albédo s'est fortement dégradé et que le glacier est « à nu » (crue du 14 Mai). Contrairement aux résultats obtenus par Favier en 2001, on n'observe pas une tendance des débits à augmenter d'un jour sur l'autre en cas de beau temps prolongé (du 5 au 13 Mai). Il serait donc bon de préciser si les échantillons de Favier montraient des conditions d'enneigement différentes, et si on observait cette tendance en situation de glace découverte.

- 3° type : Débit de fonte et de ruissellement (le 8 /05)

Ce type d'événement a lieu en cas de fortes pluies. Dans le cas présent elle surviennent la nuit et une partie de la journée du 8/05. Les débits dus au ruissellement s'ajoutent à la fonte, puis les conditions dites de « 2° type » se réinstallent.

3.4 Conclusions

L'approche qualitative présentée ici mériterait d'être affinée par la suite étant donnée les corrélations mises en évidence. Il serait d'un intérêt majeur de poursuivre cette étude étant donné que la station α constitue un témoin privilégié du comportement du glacier. La station commençant à peine à fonctionner régulièrement, il est nécessaire de poursuivre l'effort de maintenance que nous avons réalisé.

Conclusion

Lors d'une phase préliminaire nous avons calculé les débits des trois stations limnigraphiques de l'Antizana pour une période de 6 mois. Les problèmes pratiques rencontrés du fait du contexte de haute montagne ont nécessité un important travail sur le terrain et sur le traitement des données pour tirer partie au mieux de mesures souvent incomplètes et incohérentes. Nous avons ainsi été amenés, avec mes collègues de GREAT ICE, à améliorer les installations de mesures (hydrologiques notamment), ce qui sera profitable aux travaux à venir. Il serait recommandable pour l'avenir de l'étude hydrologique à l'Antizana d'améliorer la robustesse des stations α et β situées dans un environnement particulièrement sévère. Cela afin d'assurer durablement la richesse et la cohérence des archives de débits constitués.

Nous avons ensuite appliqué à ces mesures une méthode statistique pour rechercher des corrélations entre les valeurs moyennes des paramètres météorologiques et les débits à la station limnigraphique 15, située en contrebas du glacier. Cette méthode n'a pas donné les résultats escomptés à cause, à notre avis, du nombre insuffisant d'échantillons valides et de la trop grande disparité dans les types des crues considérées. Un préalable à l'application de cette méthode serait d'augmenter le nombre d'échantillons valides et de les classer selon les types de crues.

Enfin, une étude portant sur la station limnigraphique α , située au pied de la langue glacière α , a été menée d'une part sur sa capacité à restituer les volumes de fonte, et d'autre part sur le lien entre les pics de crues s'y produisant et les conditions sur le glacier α (albédo et météorologie). Nous avons ainsi établi que cette station ne suffisait probablement pas à restituer les volumes de fonte parce qu'une grande partie disparaît par infiltration. Malgré ces pertes, il apparaît que les mesures de la station α permettent d'établir de bonnes corrélations entre les crues et les conditions ambiantes sur le glacier.

On pourra noter que quelque soit la méthode d'étude choisie, il nous paraît nécessaire de renforcer et compléter à l'avenir la base de données hydrologique.

Références bibliographiques

Favier V. - *Etude hydrologique du bassin versant du glacier 15 de l'Antizana (0°25' S, 78°09'O)* – Première modélisation hydrologique à partir du bilan d'énergie et d'une approche précipitation/débit - DEA Université Montpellier II – Institut de Recherche pour le Développement, 2001

Ménégoz M. - *Etude de la couche limite atmosphérique sur le glacier de l'Antizana (Equateur) et estimation des flux turbulents.* - DEA Université Joseph Fourier – Institut de Recherche pour le Développement, 2004

Villacis M. - *Influencia de el Niño oscilacion del sur-ENOS sobre la precipitacion en los andes centrales del ecuador.* Travail de fin d'études « Escuela Polytechnica Nacional del Ecuador », 2001

Wagnon P. - *Analyse du bilan d'énergie d'un glacier tropical. Application a la relation glacier-climat* - Thèse de doctorat Université Joseph Fourier - Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement (CNRS), 1999

Sicart J.E. - *Contribution a l'étude des flux d'énergie, du bilan de masse et du débit de fonte d'un glacier tropical : le Zongo Bolivie* - Thèse de doctorat Université Paris VI Pierre et Marie Curie, 2001

Pradero E. - *Etude sur le transfert de l'eau du glacier 15 de l'Antizana, Equateur* - Travail de diplôme, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2003

Cadier E., Villacis M., Paredes D., Maishinsho L., Bucher R., Brière J. – *Etudes hydrologiques au glacier 15 de l'Antizana, Equateur* - Présentation au Congrès International de Glaciologie, Huaraz (Pérou), 2004

ANNEXES

I- Site d'étude et moyens techniques

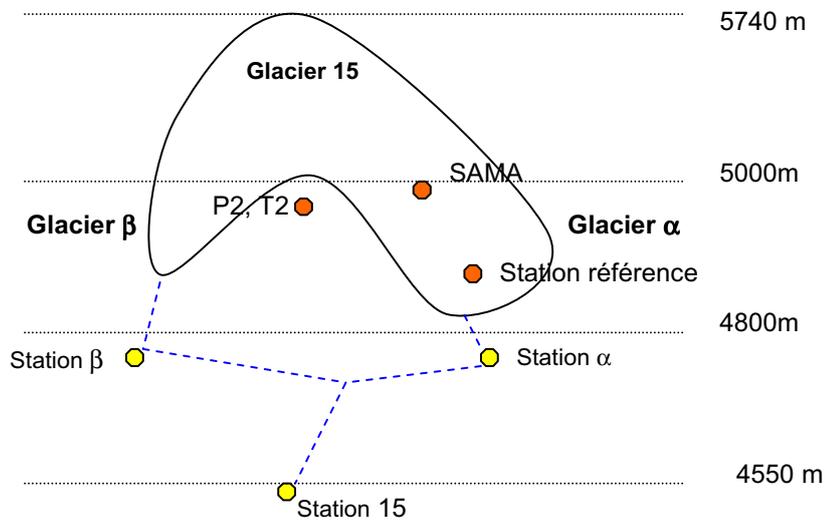


Figure I.1 : Schéma de l'implantation des moyens de mesure utilisés



Figure I.2 : Station 15



Figure I.3 : Station α



Figure I.4 : Station « météo » de référence

II- Sorties de terrain

Date	Tâches effectuées	Problèmes rencontrés
17-19/02/04	- jaugeages stations 15, α , β . Jaugeages nocturnes à la station α . -station 15 : modification du tuyau du Nimbus -station β : placement d'un nouveau support pour le Nimbus ; réparation d'un mur en amont	-station β : problèmes d'étanchéité en reconnectant le tuyau du Nimbus -problèmes dans le déchargement des données
27/02/04	-jaugeages stations 15, α , β . -déchargement limnigraphes et pluviomètres	-déchargement des hobos des pluviomètres P2 et Mica impossibles : nous les descendons -le mauvais temps écourte la journée
3-5/03/04	-jaugeages aux stations 15 et β . Jaugeages nocturnes à la station α . - station β : amélioration de la fixation au canal du tuyau du Nimbus, remplacement du système de connexion au dispositif antigel -stations α et β : renforcement au béton des ancrages des dispositifs antigel et des parois des canaux	-le mauvais temps limite le nombre de jaugeages et d'observations -station β : beaucoup de dépôt dans le canal, tube du Nimbus bouché.
11/03/04	-station α : jaugeage - station β : jaugeage, amélioration de la fixation du tube du Nimbus au canal.	-station α : panneau solaire déconnecté, heure du Nimbus dérégulée -station β : canal et boîte du Nimbus remplis de neige
19/03/04	-station 15 : jaugeages -station α : jaugeages, positionnement à la verticale du panneau solaire -station β : jaugeages, nettoyage du canal -station Humboldt : contrôle, jaugeage	-station 15: cavité des sondes remplie de sédiments -station α : heure dérégulée, fuite en amont du canal -station β : canal bouché par un lahar (torrent de terre) depuis plusieurs jours (perte de données)
24/03/04	-jaugeages stations 15, α , β . -station β : nettoyage du canal, amélioration du tracé du lit du torrent en amont	-station α : heure du Nimbus dérégulée
29/03/04 au 04/04/04	-station 15 : jaugeages, mesures de conductivité, prélèvements d'échantillons pour analyse d'isotopes -station α : jaugeages, réglage de l'heure Nimbus -station β : jaugeages, réparation des murs en amont -glacier 15: vérification et installation d'appareils de mesure, notamment de ceux du Totem. Mesures de fonte et de sublimation. Micro-topographie du glacier. Observations météorologiques constantes.	-station β : traces de débordement en amont (réparation des murs)
13/04/04	-station 15 : jaugeages, installation de l'Orphimed -station Humboldt : visite de contrôle	-cavité des sondes remplie de sédiments
10/04/04 au 14/04/04	-jaugeages station 15, α , β . -station α : installation d'un nouveau système de fixation entre le tube du Nimbus et le canal, amélioration de la connexion entre le tube et le système antigel -glacier 15: vérification et installation d'appareils de mesure, notamment de ceux du Totem. Mesures de fonte et de sublimation. Micro-topographie du glacier. Observations météorologiques constantes.	

20/04/04 au 24/04/04	<ul style="list-style-type: none"> -jaugeages stations 15, α, β. -station α : installation d'un nouveau système de fixation entre le tube du Nimbus et le canal, amélioration de la connexion entre le tube et le système antigel -glacier 15: vérification et installation d'appareils de mesure, notamment de ceux du Totem. Mise en place de l'anémomètre de vérification. Mesures de fonte et de sublimation. Micro-topographie du glacier. Observations météorologiques constantes. 	<ul style="list-style-type: none"> -station 15 : heure du Nimbus en avance -problèmes de blocage d'anémomètres, de pannes de batteries.
28/04/04	<ul style="list-style-type: none"> -stations α et β : jaugeages -station α : changement de batterie 	-station α : relation Nimbus/Hauteur canal incorrecte
14/05/04	<ul style="list-style-type: none"> -jaugeages stations 15, α, β. -station 15 : désinstallation de l'Orphimed -station α : changement de panneau solaire, nettoyage du canal, modification du lit en amont pour éviter les pertes, amélioration des supports du Nimbus et du panneau solaire. Installation de l'Orphimed -station β : changement de la batterie et du panneau solaire, nettoyage du canal, amélioration des marges du cours d'eau 	
01/06/04	<ul style="list-style-type: none"> -stations α et β : déchargement de données uniquement -pluviomètres, pluviographes : déchargement des données -glacier : mesures des hauteurs des capteurs d'humidité et de rayonnement. Démontage de tous les capteurs d'humidité et de la centrale de la station de référence 	<ul style="list-style-type: none"> -Totem incliné -certains capteurs d'humidité en panne -centrale de la station de référence en panne
04/06/04	<ul style="list-style-type: none"> -station α : désinstallation de l'Orphimed -station 15 : remplacement du Nimbus, pour vérification à Quito -réinstallation du pluviographe de la station 15 	-le mauvais temps perturbe les projets

III- Bilan des stations limnigraphiques

1. Station 15

Etat de la station

Bon état

Courbe de tarage

Une courbe de tarage définitive a été définie à partir d'une nouvelle échelle.

Qualité des mesures

Piézomètre : bouchage fréquent, certaines mesures sont erronées

Nimbus : faibles débits mal mesurés, beaucoup de variations du zéro

Période de lacunes

16/01/04 → 21/01/04 : panne de panneau solaire

24/03/04 → 01/04/04 : mesures incohérentes

Modifications réalisées

Aucune modification de la station même.

Modifications apportées à l'appareillage (déplacement du capillaire du Nimbus, installation d'un appareil Orphimed pour comparaison avec Nimbus).

2. Station α

Etat de la station

Modifiée plusieurs fois, mais stable depuis le 13/04/04

Courbe de tarage

A affiner : nombre de points insuffisants et absence de forts débits

Qualité des mesures

Bonnes mesures depuis le 13/04/04, date où l'on a apporté des modifications à la station (voir *Annexe II*)

Mesure rarement exploitables auparavant.

Périodes de lacunes

01/11/03 → 04/11/03 et 11/11/03 → 18/12/03 : dues à la période d'installation de la station

28-29/12/03 : mesures inexploitable (bouchage, etc...)

02/01/04 → 21/01/04 : idem

24/01/04 → 28/01/04 : problème de panneau solaire ou de batterie

07/02/04 → 10/02/04 : idem

01/03/04 → 06/03/04 : mesures inexploitable (bouchage, etc...)

07/03/04 → 12/03/04 : panneau solaire déconnecté

13/03/04 → 20/03/04 : mesures inexploitable (bouchage, etc...)

01/04/04 → 12/04/04 : idem

Modifications réalisées

Voir *Annexe II*

3. Station β

Etat de la station

Modifiée plusieurs fois, mais stable depuis le 19/03/04

Courbe de tarage

Correcte, mais absence de forts débits.

Qualité des mesures

Mesures correctes, excepté lors de bouchages ponctuels. L'installation d'un Orphimed début Juin confirme la cohérence des mesures.

Période de lacunes

20/01/04 → 02/02/04 : le Nimbus a mesuré directement la pression atmosphérique (fuites)

03/02/04 → 12/02/04 : débits nocturnes inconnus (gel nocturnes intenses)

12/02/04 → 11/03/04 : extrémité du Nimbus partiellement bouchée (relation Hauteur Nimbus/Hauteur Canal différente de 1)

11/03/04 → 18/03/04 : canal recouvert par un lahar (torrent de boue)

25/03/04 → 29/03/04 : dérive du zéro du Nimbus, dû peut-être à un bouchage (neige ou transport solide)

Modifications réalisées

Voir *Annexe II*