



Polytech' Montpellier
Réseau Polytech'



Etude de l'hydrologie du flanc ouest du volcan Antizana en Equateur

Antinéa Garcés

Stage de deuxième année et Projet d'Ingénieur de Fin d'Etudes
(PIFE)

Polytech' Montpellier
Sciences et Technologies de l'Eau

Auteur : Antinéa Garcés

Institution : IRD, INAMHI, EMAAP-Q dans l'Unité de Recherche GREATICE Quito Equateur

Tuteur de stage et de PIFE : Luc Neppel, Maison des Sciences de l'Eau, Polytech' Montpellier

Maître de stage : Eric Cadier, GREATICE Quito

Période du stage : 23 août au 20 décembre 2004

<p>Proyecto Greatice en Ecuador IRD – INAMHI - EMAAP-Q Casilla 17-12-857 Quito Ecuador Tel (+00.5932). 2.269.276; Fax 250.4020 Mail bolivarc@inamhi.gov.ec; lmaisinc@inamhi.gov.ec; jdtaupin@inamhi.gov.ec; diparedes@yahoo.com.mx; marcosvillacis@yahoo.com; cadier@ird.fr</p>	<p>IRD- GREATICE Maison des Sciences de l'Eau Univ. Montpellier II 300, Av. Emile Jeanbrau 34095 MONTPELLIER Cedex 5 FRANCE Tél : 04 67 14 90 58 Fax : 04 67 14 90 71 www.mpl.ird.fr/hydrologie/greatice</p>	<p>INAMHI Iñaquito y Correa, 700 Quito Ecuador Tel 224.82.68 www.inamhi.gov.ec</p>	<p>EMAAP-Q Unidad Ejecutora Rios Orientales Av. Mariana de Jesus entre Italia y Alemania Quito Ecuador Tel 2.501.225 www.emaapq.com.ec</p>
--	--	--	---

El presente informe reúne los resultados obtenidos en el año 2003 por el programa de estudio de glaciares GREATICE desarrollado por el INAMHI, EMAAP-Q y el IRD.

Como de costumbre, se presentan los principales resultados obtenidos en el Antisana repartidos en seis rubricas:

- Inventario de los aparatos instalados
- Balance de masa del glaciar 15: alimentación y fusión
- Geometría del glaciar 15: su retroceso
- Precipitaciones en el glaciar 15 y en algunas partes del flanco Oeste del Antisana
- Hidrología
- Balance de energía y mediciones meteorológicas en el glaciar

Para salvaguardar las informaciones y con objetivo de transparencia, hay que indicar que cada mes, una copia de los datos brutos es transmitida al EMAAP-Q, al INAMHI y al IRD.

A pesar de índices ENSO casi normales, el año 2003 esta caracterizado por una fusión fuerte de los glaciares. En 2003, se observo un déficit prolongado de precipitación entre mayo y septiembre, como también en noviembre. El déficit fue excepcionalmente severo en los meses de agosto y septiembre. Esta situación impidió la acumulación de una capa de nieve, dejando aparecer directamente el hielo en muchas partes de la parte baja y media del glaciar, lo que provoco una disminución del albedo y una aumento de la fusión.

Por otra parte fueron confirmadas las bajas correlaciones entre las precipitaciones medidas cerca de la laguna "La Mica" (4000msnm) y las precipitaciones medidas a proximidad del glaciar (4800msnm). Esto muestra la complejidad de los mecanismos meteorológicos y confirma la necesidad de realizar mediciones adicionales y pluviométricas junto al glaciar.

Excepcionalmente, este año, los resultados hidrológicos harán el objeto de un informe separado.



Etude de l'hydrologie du flanc ouest du volcan Antizana en Equateur

Stage de deuxième année et Projet d'Ingénieur de Fin d'Etudes (PIFE)



Polytech'Montpellier
Sciences et Technologies de l'Eau

Auteur : Antinéa Garcés

Institution : IRD, dans l'Unité de Recherche GREATICE à Quito en Equateur

Tuteur de stage et de PIFE : Luc Neppel, Maison des Sciences de l'Eau, Polytech'Montpellier

Maître de stage : Eric Cadier, GREATICE Quito

Période du stage : 23 août au 20 décembre 2004

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont aidé à bien mener cette étude.

Je remercie tout d'abord mon maître de stage Eric Cadier pour son encadrement, sa disponibilité et pour m'avoir attribué sa confiance pour les missions de terrain.

Je remercie particulièrement Rodolphe Bucher pour son accueil et son aide précieuse tout au long de mon stage. Ses nombreux conseils, sa grande disponibilité, et surtout sa bonne humeur, m'ont énormément motivé jusqu'à la fin de cette étude.

Je remercie ensuite les personnes intégrant l'Unité Great Ice pour leur accueil et leur aide :

Jean-Denis Taupin, Luis Maisincho, Bolivar Cáceres, Marcos Villacis, toujours disponible, et Jean-Philippe Chazarin, tellement créatif et pour qui tout problème a une solution...

Je remercie finalement Fanny Delachaux pour être toujours à mon écoute et prête à m'aider.

INTRODUCTION

Ce rapport présente les résultats des travaux en hydrologie glaciaire menés sur divers cours d'eau du flanc ouest du volcan Antizana au cours de mon stage réalisé entre août et octobre 2004.

Ces travaux s'insèrent dans le cadre du projet de recherche mené par l'Unité de recherche GREATICE de l'IRD en coopération avec deux instituts équatoriens : l'INAMHI (Institut National de Météorologie et d'Hydrologie) et l'EMAAP-Q (Régie municipale d'Eau et d'Assainissement de Quito).

- ❖ J'ai été amenée à accomplir les principales tâches et à affronter les principales difficultés spécifiques à l'hydrologie glaciaire (sur trois bassins versant différents):
 - Mesures et enregistrement des niveaux ,réalisation de jaugeages et élaboration de courbes d'étalonnage sur les stations 15 drainant le glacier 15, et les stations Crespos et Humboldt, drainant le glacier Los Crespos. Les principales difficultés sont : l'extrême importance du transport solide, la faiblesse des variations des niveaux que l'on doit mesurer, le gel qui perturbe les mesures de niveaux, et les dysfonctionnements des appareils dus aux conditions extrêmes (froid, gel, vent, humidité, obstruction des capteurs par du sable ou de la boue, etc.)
 - Calculs des débits à la station Humboldt.
 - Calcul des paramètres météorologiques sur le glacier 15.
 - J'ai aussi été amenée à effectuer des mesures d'ablation sur le glacier, à réaliser des vérifications de station météorologique et d'installer une station limnimétrique et d'un pluviographe.
- ❖ J'ai enfin été chargée de l'analyse et l'interprétation des données que j'avais rassemblé :
 - Une analyse multivariée (par ACP) des facteurs météorologiques responsables des crues glaciaires sur la station 15,
 - Une analyse de la variabilité des débits et de la part correspondant à la fusion glaciaire pour un bassin versant dont moins de 20% est recouvert par un glacier.

Ce stage de quatre mois inclut le Projet d'Ingénieur de Fin d'Etudes (PIFE).

Le plan de cette étude se divisant en quatre parties, le PIFE prend en compte les parties suivantes :

- Partie 1 : Etude d'un glacier,
- Partie 2 : Comparaison des bilans météorologique et hydrologique de la station 15
- Partie 3 : Calibration de la station Los Crespos.

La dernière partie concernant l'étude des données de la station Humboldt de 1999 à 2003 est une partie supplémentaire qui ne s'insère pas dans le cadre du PIFE.

1 SOMMAIRE

SOMMAIRE.....	7
1 Partie 1 : Etude d un glacier.....	11
1.1 Contexte du stage.....	11
1.1.1 Approvisionnement en eau des villes en altitude de la zone intertropicale	11
1.1.2 Quito et son approvisionnement en eau.....	11
1.1.2.1 Présentation de Quito	11
1.1.2.2 Augmentation de la population et des besoins en eau....	11
1.1.3 L'IRD, l'unité de recherche GREATICE et ses partenaires en Equateur	12
1.1.4 Le site d'étude : flanc ouest du volcan Antizana.....	12
1.1.4.1 Le glacier 15	12
1.1.4.2 Le glacier 12 ou Los Crespos	13
1.1.5 Problématique :	14
1.2 Comment étudier un glacier ? Exemple de la face ouest du glacier Antizana.....	15
1.2.1 Etude météorologique : bilan d'énergie et bilan pluviométrique 15	
1.2.1.1 Bilan énergétique	15
1.2.1.1.1 Bilan radiatif.....	16
1.2.1.2 Appareillage et mesures	17
1.2.2 Pluviométrie.....	17
1.2.2.1 Réseau de pluviomètres et pluviographes	17
1.2.2.2 Isotopies.....	18
1.2.3 Etude volumétrique.....	18
1.2.3.1 Bilan de masse :	18
1.2.3.2 Bilan hydrologique	19
1.2.3.3 Réseau	19
1.2.3.4 Appareillage des stations utilisées pour cette étude	19
1.2.4 Travail sur le terrain.....	21
2 Partie 2 : Comparaison des bilans meteorologique et hydrologique du bassin versant 15.....	22
2.1 Description et problèmes rencontrés	22
2.1.1 Description de la station 15	22
2.1.1.1 Etude de la station limnigraphique 15	22
2.1.1.2 Problèmes d'obtention de données valides et de conception de la station.	22
2.1.2 Courbe de tarage.....	23
2.1.3 Traitement des données brutes	24
2.1.3.1 Données du nimbus :	24
2.1.3.2 Données du limnigraphe mécanique:.....	25
2.1.3.3 Données obtenues :	26

2.1.4	Description de la crue glaciaire (à partir du limnigramme)....	27
2.2	Comparaison des bilans hydrologique et météorologique du glacier 15 par analyse multivariées.	28
2.2.1	L'analyse par composantes principales.....	28
2.2.2	Approche par extremums semi journaliers	29
2.2.2.1	Données utilisées.....	29
2.2.2.2	Variables decalées dans le temps	29
2.2.3	Mise en œuvre.....	30
2.2.4	Première ACP, première approche.....	30
2.2.4.1	Description des composantes :.....	31
2.2.4.2	Analyse du plan 1 - 2 :	32
2.2.4.3	Analyse du plan 1- 3 :	33
2.2.5	Deuxième étape : sélection des variables	34
2.2.5.1	Sélection des variables	34
2.2.5.2	Résultats	35
2.2.6	Troisième étape : analyse des variables mois par mois.	36
2.2.6.1	Juillet, début de l'été , plan 1-2 :	36
2.2.6.2	Août, mois très venteux, plan 1-2 :.....	37
2.2.6.3	Septembre plan 1-2 :	38
2.2.6.4	Octobre plan 1-2 :	39
2.2.7	Conclusion sur l'analyse :.....	39
2.3	Validation des relations entre les crues de la station 15 et les conditions météorologiques.....	39
1.1	Conclusion :	41
3	Partie 3 : Calibration de la station Los Crespos	42
3.1	Etude de la Station Los Crespos.....	42
3.1.1	Description (Annexe 2):.....	42
3.1.2	Calibration de la station :	42
3.1.3	jaugeage chimique	42
3.1.3.1	Principe.....	42
3.1.3.2	Choix du traceur.....	43
3.1.3.3	Caractéristiques chimiques des eaux glaciaires	43
3.1.3.4	Théorie du jaugeage au sel.....	43
3.1.3.5	Conditions d'application	44
3.1.3.6	Mise en œuvre	44
3.1.4	Protocole	45
3.1.5	Résultats et première esquisse de la courbe de tarage.....	46
3.1.6	Conclusion.....	49
4	Partie 4 : Etude des donnees de la station Humboldt de 1999 a 2003	50
4.1	Etude de la station Humboldt.....	50
4.1.1	Description (Annexe 2):.....	50
4.1.2	Traitement des données brutes.....	50
4.1.3	Détermination de la courbe de tarage	51
4.1.4	Détermination et comparaison des écoulements du glacier et du paramo :	52

	4.1.5 Détermination des débits moyens mensuels	53
5	Conclusion generale	54

2 PARTIE 1 : ETUDE D UN GLACIER

2.1 Contexte du stage

2.1.1 *Approvisionnement en eau des villes en altitude de la zone intertropicale*

Les glaciers des basses latitudes ont un régime hydrologique très différent de ceux des moyennes et hautes latitudes car le contraste saisonnier des écoulements est moindre. Il n'existe pas de saison où de période, où les écoulements, qui sont dus à la fusion du glacier, ne cessent.

C'est pour cela que les glaciers de la zone tropicale interne ont un intérêt économique majeur : ils permettent l'approvisionnement en eau des villes en altitude, approvisionnement qui a de multiples avantages :

- Les écoulements provenant des glaciers ne cessent jamais. Lors des périodes sèches, le déficit en eau du à l'absence de pluies est compensé par la fonte glaciaire,
- De plus, cet approvisionnement ne nécessite pas d'énergie car il se fait de façon gravitaire,
- Ces eaux peuvent être utilisées pour la production hydroélectrique.

Plusieurs villes des Andes tropicales utilisent ce système, dont Quito.

2.1.2 *Quito et son approvisionnement en eau*

2.1.2.1 Présentation de Quito

Quito, capitale de l'Equateur se situe sur un plateau entre deux cordillères à une altitude moyenne de 2850 m. Cette capitale est entourée entre autres par les volcans Antizana et Cotopaxi, dont les glaciers pourvoient 90 % de son approvisionnement en eau (*Annexe 1*).

2.1.2.2 Augmentation de la population et des besoins en eau.

La population de Quito ne cesse de croître, la ville s'étend de plus en plus sur les municipalités avoisinantes des vallées.

Cette augmentation va de pair avec une demande croissante en eau, tant par l'alimentation domestique qu'industrielle. Ces besoins en eau sont couverts par deux massifs montagneux comportant des glaciers : l'Antizana et le Cotopaxi, grâce à de multiples infrastructures gravitaires. Une grande partie de l'eau provient du système de captage de la lagune la Mica de l'Antizana à 3930 m d'altitude.

Actuellement, un nouveau projet appelé le PRO (Proyecto de los Rios Orientales) a été mis en place afin de pouvoir satisfaire une demande d'eau dans le futur qui sera, dans sa première étape, de 17m³/s, puis de 34m³/s. Le PRO est un projet de grande envergure qui doit capter la plupart des torrents du sud et de l'est l'Antizana .

Toutes ses infrastructures de captation, de traitement et de distribution d'eau sont gérées par l'EMAAP-Q , Empresa Metropolitana de Agua Potable y Alcantarillado de Quito (Régie municipale d'eau potable et d'assainissement de Quito) , qui travaille en collaboration avec l'INAMHI, Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (Institut national de météorologie et d'hydrologie).

2.1.3 L'IRD, l'unité de recherche GREATICE et ses partenaires en Equateur

La question du comportement des glaciers andins face aux fluctuations climatiques est particulièrement cruciale pour les régions andines dont l'approvisionnement en eau dépend en grande partie des sommets englacés de la Cordillère (Ribstein et al.,1995 ;Wagnon et al.,2001). Les glaciers tropicaux sont des indicateurs climatiques particulièrement intéressants. Leur étude a permis, entre autres, de constater une phase de recul accéléré visiblement lié au réchauffement climatique actuel. La contribution hydrologique des ces glaciers est donc susceptible de diminuer d'ici quelques années, quand ils auront fondu.

Afin de fournir une réponse concrète a 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 considérés comme marqueurs climatiques et d'optimiser la gestion en eau dans ces régions. Pour cela, des bilans de masse, énergétiques et hydrologiques sont réalisés sur des glaciers localisés en Equateur, Pérou et Bolivie.

Les institutions partenaires du programme en Equateur sont celles citées précédemment : l'EMAAP-Q et l'INAMHI.

En Equateur, le glacier d'étude principal est le volcan Antizana.

2.1.4 Le site d'étude : flanc ouest du volcan Antizana

Le glacier Antizana, volcan actif dont le sommet atteint 5757 m, est localisé à une cinquantaine de kilomètres au sud-est de Quito (0°28'30" S ;78°08'55" W).

Deux glaciers sur la face ouest du volcan sont étudiés par le programme GREAT ICE : le glacier 15 et le glacier 12 ou Los Crespos.

2.1.4.1 Le glacier 15

Le glacier 15 de l'Antizana, suivit depuis 1994, est constitué de deux langues glaciaires alpha et bêta accolées et d'orientation similaire.

Photo1 1.1.4.1 Le flanc ouest de l'Antizana

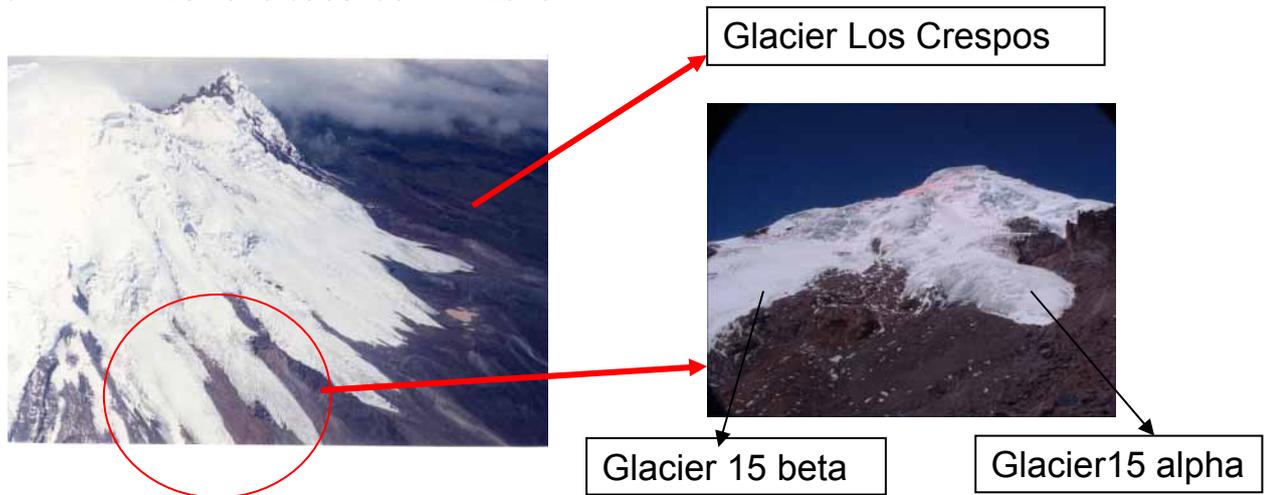


Photo2 1.1.4.1 Glacier 15 : langues 15 alpha et 15 bêta

L'aire du bassin versant de la station hydrologique 15, alimentée par le glacier 15 est de 137,6 ha dont 55,2% de formation glaciaire .

Le réseau de mesures est constitué de :

- balises d'ablation sur le glacier,
- pluviomètres et des pluviographes,
- différentes stations météorologiques automatiques,
- trois stations limnimétriques : station 15 à l'exutoire du bassin versant, stations 15 alpha et 15 bêta directement en aval de chaque langue glaciaire,
- Un appareil photo automatique pour connaître l'albédo du glacier.

Les zones non glaciaires du bassin versant étudié sont couvertes par des dépôts morainiques et par du paramo (zone située au dessus de 4000 m d'altitude et caractérisée par une végétation herbeuse sèche).

2.1.4.2 Le glacier 12 ou Los Crespos

Le glacier Los Crespos se situe plus au sud que le glacier 15, l'aire du bassin versant est de 330 ha dont 70% de formation glaciaire.

L'étude de ce glacier est importante pour Quito car il fait partie des glaciers qui alimentent la lagune de la Mica, et donc contribue à l'approvisionnement en eau de Quito.

Son réseau de mesures est composé par :

- Des balises d'ablation,
- Des pluviomètres et pluviographes,
- Une station limnimétrique : station Los Crespos, directement en aval du glacier .

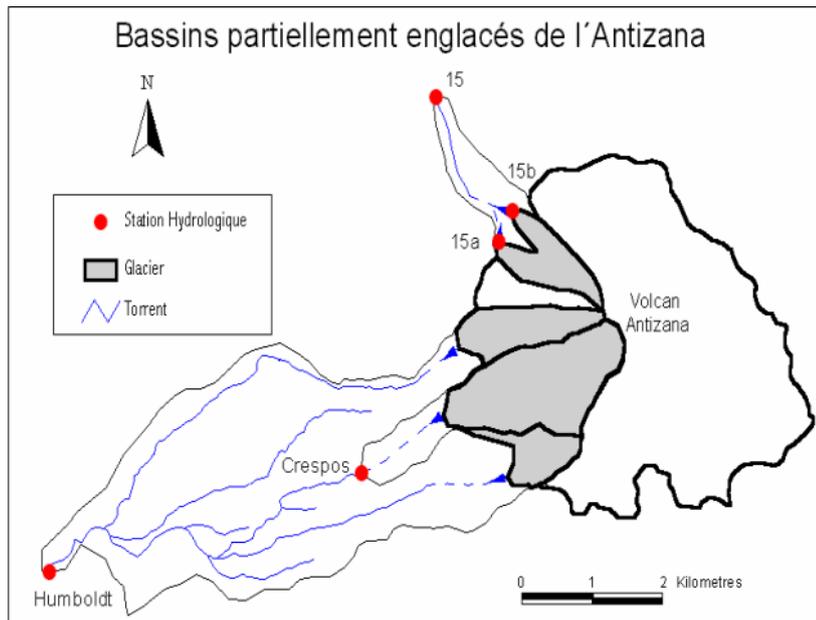


Fig 1.1.4.2 Limites des bassins versant étudiés : courbe IGN 1 :25000 è

2.1.5 Problématique :

Cette étude se divise en trois parties :

- L'étude des crues glaciaires grâce à une comparaison sur quatre mois entre les données météorologiques et hydrométriques du bassin versant 15 .L'objectif étant de comprendre les facteurs responsables de la formation des crues par fusion du glacier et de déterminer une typologie de crues,
- L'étalonnage de la station hydrométrique Los Crespos a l'aide de méthodes telles que le jaugeage chimique , au moulinet ou volumétriques,
- L'analyse de 5 années de données a la station Humboldt afin de déterminer le pourcentage d'écoulement provenant du glacier et celui provenant du paramo.

Afin de réaliser ce stage, il est indispensable de comprendre les principaux mécanismes qui régissent l'évolution d'un glacier..

2.2 Comment étudier un glacier ? Exemple de la face ouest du glacier Antizana.

2.2.1 Etude météorologique : bilan d'énergie et bilan pluviométrique

2.2.1.1 Bilan énergétique

L'analyse énergétique nous renseigne sur les réactions du glacier en réponse aux modifications des flux d'énergies induits par les changements des variables météorologiques (Favier 2001).

En effet, les métamorphoses de la neige, la fonte de la glace et l'écoulement final de l'eau sont contrôlés par les apports d'énergie directement conséquents des conditions météorologiques locales (Marks et al., 1992). L'interface entre l'atmosphère et la surface de la glace (ou de la neige) est le siège d'importants échanges d'énergie.

Afin de réaliser ce bilan, il est indispensable de faire un inventaire des flux qui arrivent à la surface et de ceux qui repartent.

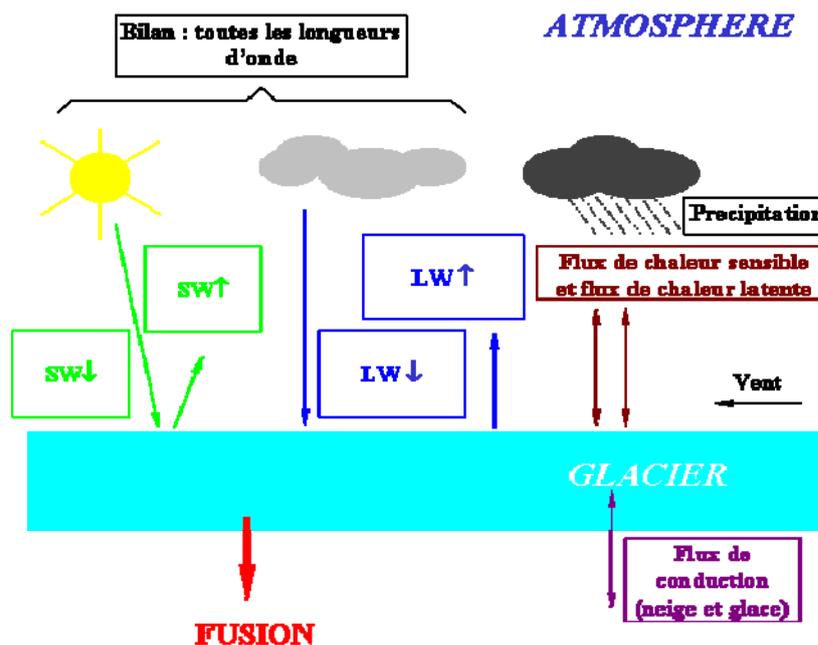


Fig 1.1.6 Illustration de l'équation du bilan d'énergie

Ceci est exprimé par l'équation du bilan d'énergie en surface.

$$R + H + LE + G + P = \Delta Q_S + \Delta Q_M$$

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 (Wagon, 1999) :

Avec : R est le rayonnement net de toutes longueurs d'onde,
 H est le flux turbulent de chaleur sensible (échange de chaleur avec l'atmosphère),
 LE est le flux turbulent de chaleur latente (échange de chaleur avec l'atmosphère). G est le flux de conduction dans la neige/glace,
 P est le flux d'énergie apporté par les précipitations,
 ΔQ_M est la variation du stockage de chaleur latente due a la fusion ou au regel,
 ΔQ_S est la variation du stockage de chaleur sensible au sein du volume.

La chaleur latente est utilisé pour un changement de phase et la chaleur se traduit par un réchauffement de la neige, de l'eau ou de la glace.

Par convention, les flux sont positifs lorsqu'il y a un apport d'énergie de l'atmosphère vers le glacier.

G et P sont souvent négligeables (Wagon, 2000), H_s et H_l sont significatifs mais en moyenne cinq fois plus faibles que R (Menegoz, 2003). Par conséquent, le facteur principal de la fonte est le rayonnement. Il est donc intéressant de préciser le bilan radiatif.

2.2.1.1.1 *Bilan radiatif*

En raison du Zénith solaire, la zone équatoriale est la zone d'apport énergétique maximale (de courtes longueurs d'onde). 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 (Wagon, 1999).

Afin de préciser le bilan radiatif, il serait intéressant de définir certains termes :

Le rayonnement solaire (RS) : c'est l'élément moteur des conditions météorologiques et climatiques, et par voie de conséquence, du cycle hydrologique. L'émission solaire se situe essentiellement dans une bande de courtes longueurs d'onde (SW).

Le rayonnement atmosphérique (RA) : émission due essentiellement à la vapeur d'eau, au gaz carbonique ainsi qu'à l'ozone. Ainsi, la présence de nuages accroît sensiblement l'importance de l'émission atmosphérique Les couches atmosphériques émettent un rayonnement de grandes longueurs d'onde (LW).

Le rayonnement terrestre (RT) : l'émission terrestre s'effectue, comme pour le rayonnement atmosphérique, dans l'infrarouge (grandes longueurs d'onde).

Le rayonnement terrestre est absorbé en quasi-totalité par l'atmosphère. Cette absorption sélective est due principalement au gaz carbonique, un peu à l'ozone et surtout à la vapeur d'eau. L'essentiel du rayonnement terrestre est

absorbé par l'atmosphère et est émis à nouveau et partiellement en direction de l'espace ou de la terre. En présence d'une couverture nuageuse, le rayonnement terrestre est réfléchi. C'est donc au cours des nuits sans nuages que les températures de surface sont les plus basses.

L'albédo : c'est le pourcentage de lumière solaire réfléchi à la surface terrestre pour une zone irradiée. L'albédo dépend principalement de l'état de surface (neige, glace, présence d'impuretés, présence d'eau).

Nous pouvons alors définir le rayonnement net, ou bilan radiatif, qui est le bilan de rayonnement des courtes et des grandes longueurs d'onde :

$$RN = SW_{\downarrow} - SW_{\uparrow} + L_{\downarrow} - L_{\uparrow} = (1-a) SW_{\downarrow} + LW_{\downarrow} - LW_{\uparrow}$$

Avec a = albédo de surface = $SW_{\downarrow} / SW_{\uparrow}$.

SW_{\downarrow} est le rayonnement courtes longueurs d'ondes incident,

SW_{\uparrow} est le rayonnement courtes longueurs d'ondes réfléchi,

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

LW_{\uparrow} est le rayonnement grandes longueurs d'ondes émis par le sol, souvent négligeable.

2.2.1.2 Appareillage et mesures

Afin d'étudier le bilan d'énergie, le glacier 15 a été aménagé avec plusieurs sortes de stations météorologiques différentes :

- Station de référence : station automatique Campbell fixe installée au pied de la zone d'ablation du glacier, à une altitude de 4860 m. Les paramètres de mesures sont (pas de temps de mesure : 30 minutes) : vitesse du vent, température et humidité à deux hauteurs différentes. Cette station possède aussi des capteurs de rayonnement incident et réfléchi pour les courtes et grandes longueurs d'onde. Elle calcule donc automatiquement l'albédo.
- Station SAMA : Station Automatique Météorologique d'Altitude, installée à la fin de l'année 2000 à une altitude de 5000 mètres sur le glacier 15alpha. Cette station mesure les mêmes paramètres que la station de référence (à une seule hauteur) et a été installée en vue de contrôler et d'extrapoler des données de la station de référence. La SAMA a été déplacée en Bolivie en mai 2004.
- Un appareil photo automatique est installé sur la moraine du glacier 15, et prend deux photos journalières qui permettent de voir l'évolution de la zone d'ablation et des variations climatiques journalières.

2.2.2 *Pluviométrie*

2.2.2.1 Réseau de pluviomètres et pluviographes

Le réseau est constitué de huit pluviomètres et cinq pluviographes à augets basculeurs.

Les augets des pluviographes basculent pour chaque 2 millimètres de précipitations, et l'heure de leur basculement est enregistrée automatiquement. La majorité de ces pluviographes se situe sur le bassin versant 15 : P0 (pluviographe n°0) en aval du glacier 15 alpha, P2 sur la moraine, et P15 au niveau de la station hydrométrique.

Pendant la durée de mon stage, avec l'aide de l'équipe, j'ai installé un pluviographe sur le bassin versant Los Crespos, afin d'avoir des données pluviométriques plus précises (avant il n'y avait qu'un seul pluviomètre).

Les pluviomètres sont relevés mensuellement (il en existe 4 sur le bassin versant).

2.2.2.2 Isotopies

Des analyses isotopiques des précipitations sont aussi réalisées afin de préciser la provenance des masses d'air sur les glaciers. En effet, ces masses d'air peuvent provenir du Pacifique ou bien du bassin amazonien. Ces études sont importantes pour observer les modifications possiblement apportées par des phénomènes tels que Niño-Niña.

L'étude de la pluviométrie permet d'estimer un volume d'eau tombée sur le glacier.

2.2.3 *Etude volumétrique*

2.2.3.1 Bilan de masse :

Le bilan de masse permet d'étudier l'évolution de la zone d'ablation du glacier (partie du glacier où a lieu la fonte) et donc de suivre l'évolution de l'épaisseur du glacier et de son déplacement au cours du temps.

Pour cela, une trentaine de balises enfoncées verticalement et réparties dans les zones d'ablation des glacier 15 alpha et Los Crespos ont été mises en place. Les parties des balises dépassant de la surface sont mesurées chaque mois, ce qui permet de calculer, en connaissant l'aire du glacier, le volume de glace fondu.

La hauteur de fonte H_i , attribuée à chaque balise i , est la suivante :

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

où D_{glace} et D_{neige} sont les densités respectives de la neige, égales à 0.9 et 0.4 et

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 des hauteurs par des surfaces que l'on attribut à chaque balise i :

$$H_{globale} = \sum_i \frac{S_i}{S_{globale}} \times H_i$$

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

S_i est la surface d'influence de la balise.

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

2.2.3.2 Bilan hydrologique

Les stations hydrologiques ont été construites dans le but de contrôler les débits à l'exutoire des bassins versants, afin de valider les modèles de fonte.

Les mesures hydrologiques réalisées en aval des glaciers permettent de comparer les débits mesurés avec les apports des précipitations et les apports dus à la fusion des glaciers (calculés grâce au bilan d'énergie).

2.2.3.3 Réseau

Le réseau est constitué de cinq stations hydrométriques (*Annexe 2*) :

Station	Altitude(m)	Superficie du bassin versant (ha)	Proportion glacier (%)	Stations gérées par :
15	4550	137.6	55.2	GREAT ICE
15a	4812	34.6	~98	GREAT ICE
15b	4815	41.3	~95	GREAT ICE
Los crespos	4500	330	70	EMMAP-Q
Humboldt	4010	1400	15-20	EMMAP-Q
aa	4450	480	42	GREAT ICE

2.2.3.4 Appareillage des stations utilisées pour cette étude

Station 15 : gamme de débits mesurés (entre 0 et 200 litres par secondes lors de crue exceptionnelle).

- Les mesures en continu se font selon deux moyens :

- Un limnigraphe automatique de marque Nimbus (entreprise OTT), qui mesure la pression de l'eau, en envoyant des bulles d'air dans l'eau par l'intermédiaire d'un tube. Les hauteurs d'eau (H_n) sont enregistrées à un pas de temps constant, toutes les trois minutes.

- Un limnigraphe papier installé depuis juillet 2004, et utilisé lorsque le "Nimbus" ne marche pas.

- Mesures ponctuelles :

- Lectures des hauteurs d'eau : lors des visites sur le terrain, les hauteurs d'eau peuvent être lues selon une échelle limnimétrique appelée Nouvelle échelle, ou une échelle piézométrique. Les prises de pression du piézomètre, du "Nimbus" et la Nouvelle échelle se trouvent toutes au même endroit.

- Jaugeages, qui se réalisent avec des bidons de 50 litres, lors de faibles débits, et avec un réservoir de 1.5 mètre cube, pour les forts débits.

Station Los Crespos (débits allant de : 0 à 650 litres par secondes):

- Mesures en continu :

- Un limnigraphe automatique de marque Chloé(SERPE/ELSYDE), doté d'un capteur de pression et enregistre les mesures chaque fois que la hauteur varie de 1 cm.

Ce limnigraphe ne fonctionne plus depuis 1 an, mais les mesures ont été prises par deux limnigraphes mécaniques.

- Deux limnigraphes papier (un au niveau du déversoir, et l'autre plus en aval) dont leur fonctionnement est assez médiocre, peu de données peuvent être récupérées.

- Mesures ponctuelles :

Elles se font grâce à deux échelles limnimétriques installées au niveau de chaque limnigraphe mécanique.

Station Humboldt (débits allant jusqu' à 1800l/s)

- Mesures en continu :

- Deux limnigraphes automatiques équipées d'un capteur de pression : le premier de type Chloé qui a fonctionné de 1999 à 2003, et le second, de type Global Water installé depuis août 2003.

- Un limnigraphe papier est utilisé lorsque les limnigraphes automatiques ne marchent pas.

- Mesures ponctuelles :

Une nouvelle échelle limnimétrique a été installée au même emplacement que la sonde du limnigraphe automatique, localisée dans un puits, sorte de citerne reliée au lit de la rivière par une plaque ajourée (installé depuis décembre 2003 afin d'éviter une lecture imprécise de l'ancienne échelle dans le canal).

Station aa (voir Annexe 2): Le premier but de mon stage était de faire une spatialisation du comportement hydrologique des torrents sur la face ouest du glacier Antizana. Je comptais au début comparer les bilans hydrologiques de trois torrents : le 15, le Crespos et un troisième torrent, nommé aa, non aménagé et localisé entre les deux glaciers 15 et Crespos. Afin d'obtenir des données, j'ai donc installé un limnigraphe automatique de marque Orphimède, sur une section naturelle de la aa, en octobre 2004. J'ai par ailleurs réalisé plusieurs jaugeages au moulinet, mais jamais en crue (mauvaises conditions climatiques). Ainsi, par manque de données valides et par manque de temps, je n'ai pas pu traiter ces données. Ceci a entraîné une modification du sujet de mon projet de stage.

2.2.4 Travail sur le terrain

Les sorties de terrain sont une part indispensable au déroulement du programme GREAT ICE. Leur objectif est de récupérer des données, de réaliser des mesures, de faire des observations, d'installer et de faire de la maintenance d'appareillage .

Il existe deux types de sorties :

- Les sorties de routine qui se réalisent en une journée et qui permettent soit de faire quelques mesures et observations, soit, comme lors des sorties de fin de mois, de récupérer toutes les données (pluviométrie et isotopie, stations limnigraphiques, balises, données météorologiques).
- Les sorties longues qui peuvent durer trois jours ou plus, destinées à faire des observations spécifiques, ou à installer ou modifier des appareillages complexes. Pour cela, les campements se font au niveau de la moraine située vers 4700 mètres d'altitude (voir protocole sorties en annexe).

Les conditions de travail sur le terrain ne sont pas toujours faciles : altitude élevée, froid, mauvais temps (début de période des pluies durant mon stage).

Au cours de ce stage, je suis allée sur l'Antizana une fois par semaine dans le cadre de missions courtes et longues (*Annexe 3*).

3 PARTIE 2 : COMPARAISON DES BILANS METEOROLOGIQUE ET HYDROLOGIQUE DU BASSIN VERSANT 15

3.1 Description et problèmes rencontrés

3.1.1 Description de la station 15

3.1.1.1 Etude de la station limnigraphique 15

La station 15, installée en janvier 1996 (Fournier 1996), se situe au pied de la moraine du glacier 15, à une altitude de 4550 mètres. Son bassin versant inclut les deux langues du glacier Antizana : la langue alpha à gauche et bêta à droite.

Le canal de la station 15 mesure 3 mètres de long , 30 centimètres de large et est légèrement en pente. Dans le but de réduire les imprécisions des mesures dues au phénomène d'anti-dunes et de diminuer la vitesse du courant afin de « lisser » la ligne d'eau, un seuil a été construit au centre du canal.

Les prises de mesures piézométrique (Hpiezo) et limnimétrique (Hn) sont situées juste en amont du seuil grâce à un trou percé dans la paroi du canal. Afin de contrôler les mesures et de détecter des problèmes d'obstruction des prises d'eau par des sédiments, la lecture d'une échelle limnimétrique (Nouv-ech) se fait au même emplacement que les prises de mesures citées précédemment. Cette lecture est réalisée avec un flexomètre.

Un limnigraphe mécanique (Hlimni-papier), dont le flotteur est placé juste en amont du seuil, a été installé dès juillet 2004 afin d'obtenir une continuité de données lorsque le Nimbus ne marche pas.

Toutes les hauteurs mesurées en continu (Nimbus, limnigraphe mécanique) sont ramenées à la Nouvelle échelle afin de pouvoir les comparer entre elles.

3.1.1.2 Problèmes d'obtention de données valides et de conception de la station.

L'obtention de données valides est rendue difficile par plusieurs facteurs, a savoir:

- Le transport solide rencontré depuis la création de la station. Ce charriage important de matériaux (qui peut aller de grosses pierres a des sédiments fins) provoque l'obstruction fréquente des appareils de mesure et un phénomène de batillage lors de faibles débits qui peut fausser mesures de pression par la sonde.
- Des problèmes mécaniques :
 - Disfonctionnement des roues du limnigraphe mécanique

- Le flotteur installé depuis juillet crée une légère perturbation en amont du seuil, ce qui pourrait éventuellement modifier les données.
 - Problèmes de batteries : parfois les limnigraphes ralentissent pendant la nuit.
- La nuit, les conditions météorologiques peuvent induire le gel de l'eau. Ce gel se traduit par une surpression au niveau du capillaire du nimbus : lors du traitement des données, il a donc été nécessaire de corriger ce gel.
 - La précision de la sonde qui est centimétrique sachant que les hauteurs d'eau sont aussi de l'ordre du centimètre. Il faudrait prévoir de modifier la station afin d'induire une augmentation du niveau d'eau soit par exemple avec un dispositif du genre venturi, ou une section transversale plus sensible (triangulaire).
 - L'installation d'un nouveau dispositif en juillet 2004, a eu pour effet de créer une dépression juste en amont du seuil en faussant les mesures et les relations établies depuis 1998 (dont la courbe de tarage).

Par ailleurs, il existe un autre inconvénient pour cette station : Favier (2001) a mis en évidence une dérive entre les résultats du bilan d'énergie et hydrologique. En effet, à cause d'infiltrations et probablement de pertes au travers de la moraine, une proportion non négligeable du volume d'eau de fonte n'atteint pas la station 15 à l'exutoire du bassin versant du glacier 15.

Pour améliorer la qualité des données hydrologiques, GREATICE est entrain d'équiper le bassin versant Los Crespos qui est plus représentatif du glacier et dont la station hydrométrique est mieux conçue et a donc un meilleur fonctionnement.

3.1.2 Courbe de tarage

Afin d'étalonner cette station, un grand nombre de jaugeages volumétriques ont été réalisées depuis 1998.

Tous les jaugeages effectués jusqu'à juillet 2004 sont situés sur la courbe de tarage établie depuis 1998. Or, à partir de juillet 2004, un nouveau dispositif a faussé la hauteur lue pour un débit donné. On appellera cette hauteur Nouvelle échelle perturbée (Nouv-ech-pert).

Pour pouvoir établir la nouvelle courbe, il faut réaliser des jaugeages entre 10 l/s et 80-120 l/s. Nous avons réalisé plusieurs missions de jaugeages dont une de trois jours afin d'augmenter la probabilité d'observer des débits élevés. Malheureusement, le mauvais temps a engendré des débits trop faibles ces jours là.

Dans la graphique suivant, on peut observer l'ancienne courbe de tarage (en bleu), et les jaugeages réalisés à partir de septembre 2004 (en rose)

Jaugeages de juin 2003 à février 2004 et jaugeages à partir de juillet 2004

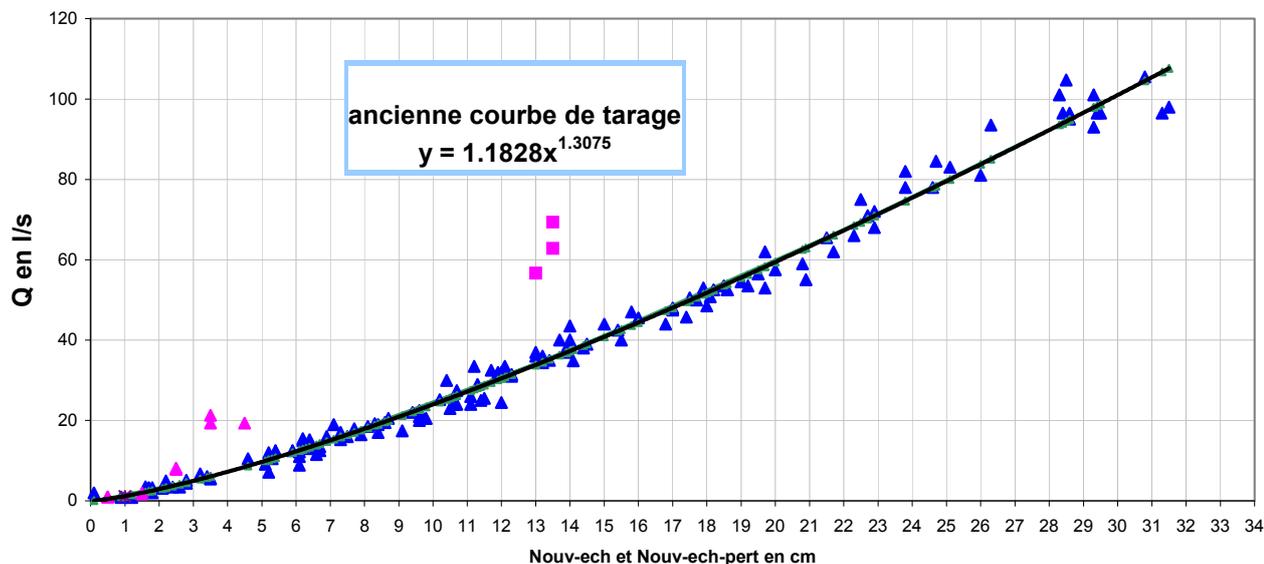


Fig 2.1.2 jaugeages réalisés à partir de juin 2003 à la station 15

Les jaugeages réalisés après juillet 2004 montrent un décalage, mais leur nombre est trop faible pour pouvoir tracer la nouvelle courbe d'étalonnage.

Ce changement d'étalonnage nous a empêché de calculer des débits et nous avons dû nous limiter à analyser les hauteurs d'eau.

3.1.3 Traitement des données brutes

Durant ces quatre mois de stage, j'ai traité deux types de données brutes : celles du Nimbus et celles du limnigraphe mécanique. Afin de pouvoir comparer ces 2 types de données, il a fallu les transformer en hauteurs équivalentes à celle de la Nouvelle échelle perturbée.

3.1.3.1 Données du nimbus :

Le traitement des hauteurs d'eau enregistrées par la sonde comporte 2 étapes préliminaires :

- Analyse critique des données afin de supprimer ou modifier certaines périodes qui risqueraient de fausser les calculs. Par exemple, si on constate un pic de crue important pendant la nuit, on peut supposer que la donnée est douteuse.
- Obtenir une nouvelle relation $\text{Nouv-ech-pert} = f(\text{HNimbus})$, avec les données obtenues de juillet à octobre (avec $H_n = \text{HNimbus}$).

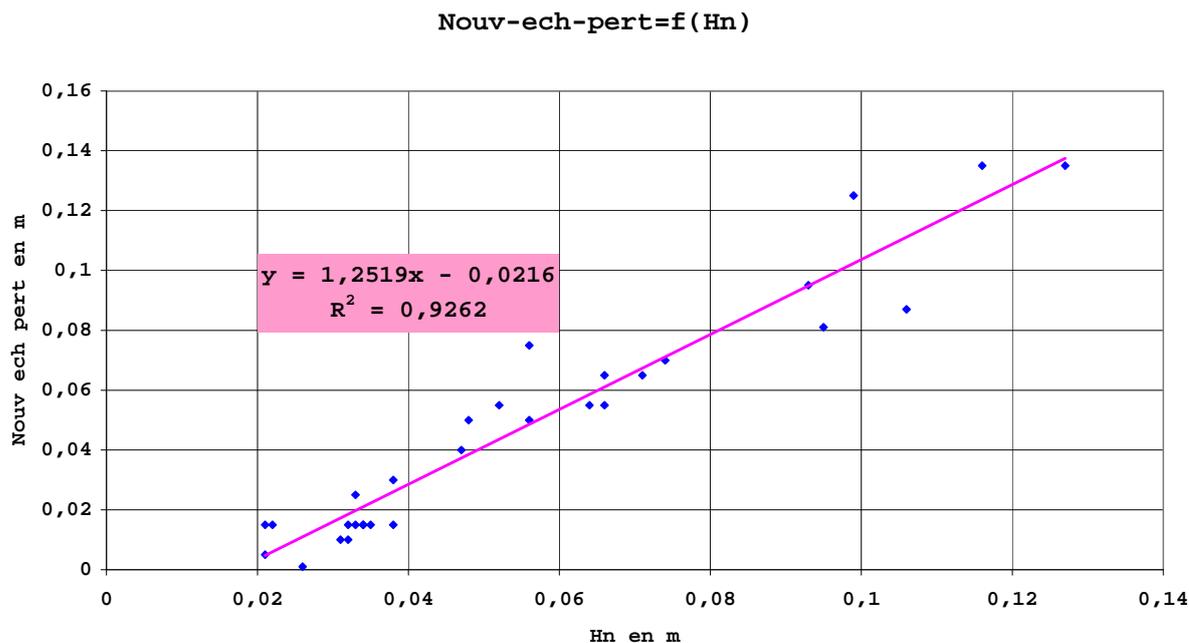


Fig 2.1.3.1 Relation des hauteurs d'eau Nouvelle échelle perturbée en fonction du Nimbus

On a ajusté l'équation (hauteurs en mètres) :

$$\text{Nouv-ech-pert} = 1,2519 \text{ Hn} - 0,0216$$

Avec $R^2 = 0.93$

On constate que contrairement à ce qu'on pourrait penser, cette relation linéaire entre deux hauteurs a un coefficient de 1.25, différent de 1. La sonde mesure la pression nécessaire pour envoyer une bulle d'air à l'extrémité du capillaire. Lorsqu'on est en conditions hydrostatiques, ou en faible courant, la bulle d'air reste collée à l'extrémité du capillaire et on obtient une relation avec une pente de 1 (Nouv-ech-pert = Hn). Il se peut que lorsque le courant est important, la bulle d'air soit arrachée, et donc que la sonde mesure une pression moindre. La pente serait alors supérieure à 1 (Nouv-ech-pert > Hn).

3.1.3.2 Données du limnigraphe mécanique:

Le Nimbus est tombé en panne en juillet et a été ramené à Quito afin d'être testé (il a été réinstallé sur le 14 septembre) j'ai donc dépouillé les données du limnigraphe mécanique du premier juillet au 29 septembre. J'ai dû éliminer certaines périodes où le limnigraphe s'arrêtait de fonctionner la nuit, et dont les données étaient douteuses (plusieurs crues par jour).

D'autre part, une relation en cm Nouv- ech-pert = f (flotteur) a été calculée afin de pouvoir comparer ces hauteurs à celles du Nimbus

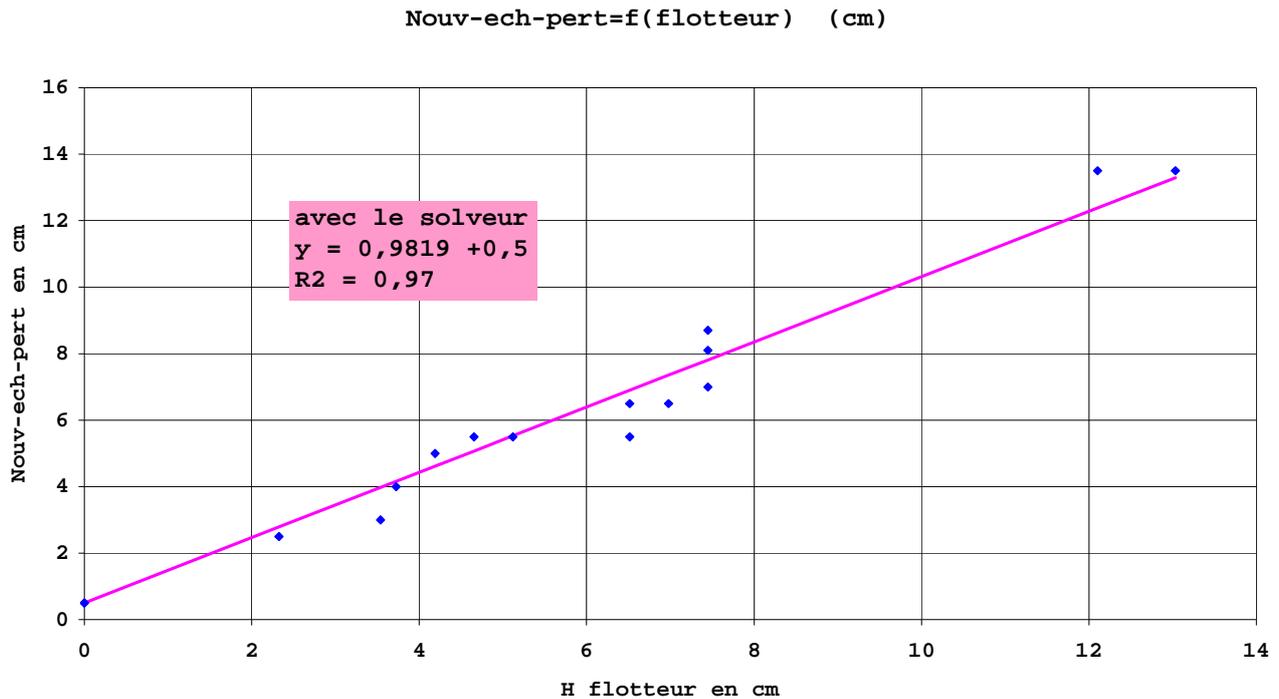


Fig 2.1.3.2 Relation des hauteurs Nouvelle échelle perturbée en fonction de la hauteur du flotteur

D'après les observations sur le terrain, j'ai ajusté la courbe de tendance de telle sorte que lorsque le flotteur touche le fond, la Nouvelle échelle perturbée soit à 0,5 cm.

J'obtiens donc la relation linéaire suivante :

$$\text{Nouv-ech-pert} = 0.9819H_{\text{flotteur}} + 0.5$$

Avec $R^2 = 0.97$

3.1.3.3 Données obtenues :

Après traitement des données : suppression ou modification de certaines périodes et calcul des hauteurs équivalentes à celles de la Nouvelle échelle perturbée, l'ensemble des données de hauteurs d'eau utilisées pour cette étude s'étale sur 4 mois :

Juillet : du 1 au 31
 Août : du 1 au 20
 Septembre : du 14 au 30
 Octobre : du 1 au 31.

ensemble des données traitées de juillet à octobre 2004

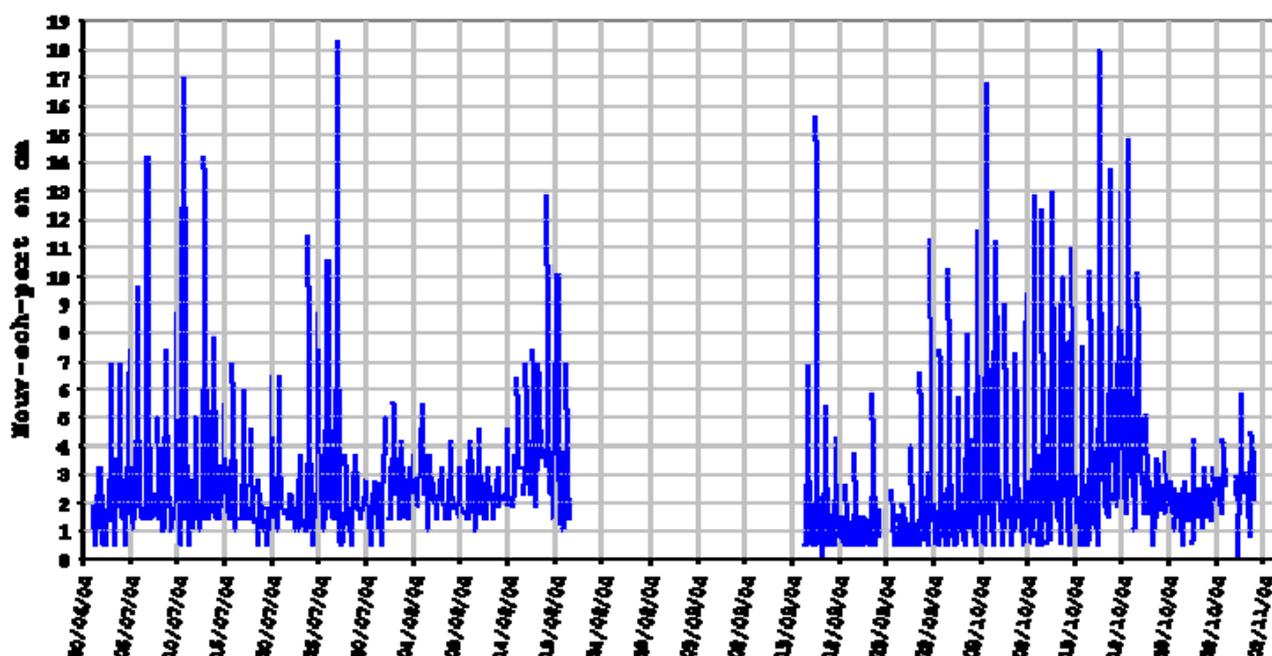


Fig 2.1.3.3 Données des hauteurs d'eau traitées de juillet à octobre 2004

3.1.4 Description de la crue glaciaire (à partir du limnigramme)

La crue glaciaire est un phénomène quotidien du a un maximum d'apport énergétique par convection et surtout par rayonnement. Ainsi, les débits observés a l'exutoire du bassin versant du glacier 15 dépendent des conditions météorologiques sur le glacier 15 telles qu'albédo, précipitations, rayonnement net, température, vent, etc..

Les crues commencent en général après 12 :00, et les débits calculés jusqu'en mai peuvent varier de 0 a 200l/s .

On a souvent constaté une particularité de forme sur les hydrogrammes de la station 15 :deux pics l'un à la suite de l'autre lors de la crue,le premier étant moins important que le deuxième (voir le limnigramme ci-après).

Le torrent 15 est alimenté deux langues glaciaires qui donnent chacune naissance a un torrent: 15alpha et 15beta. Les fonctions de transfert des 2 langues sont légèrement décalées dans le temps (exposition des langues par rapport au soleil, au vent, parcours différents de chaque torrent a travers la moraine....), ce qui pourrait expliquer ces 2 pics.

Exemples de crues glaciaires du 28, 29 et 30 septembre 2004
(analyse faite à partir des hauteurs d'eau)

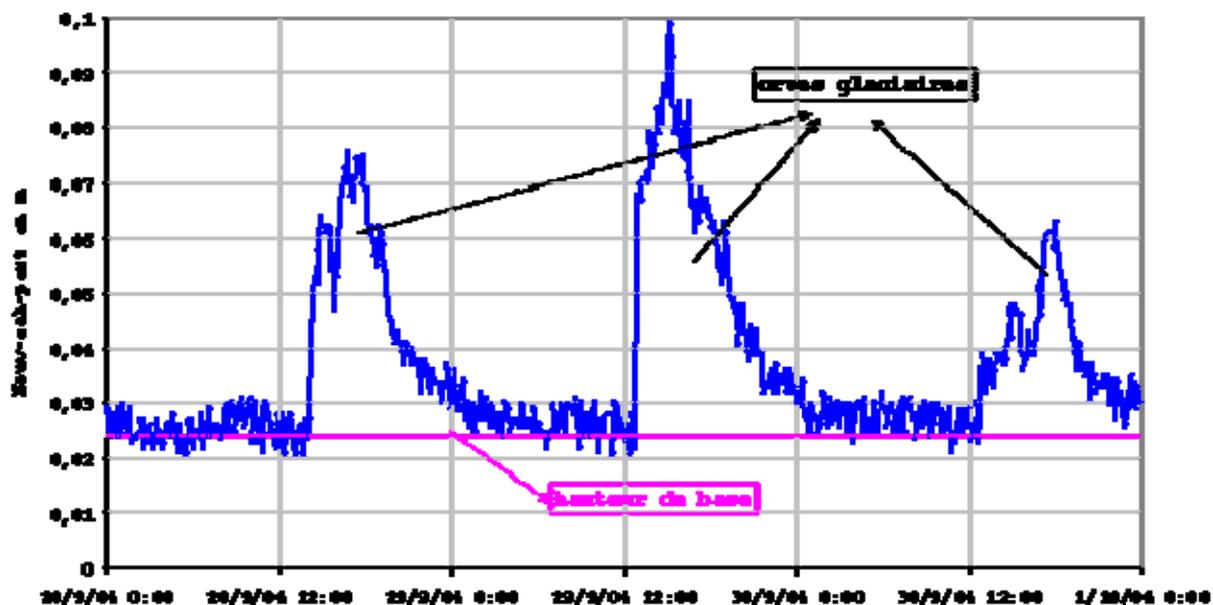


Fig 2.1.4 Exemples de crues glaciaires

On peut diviser l'hydrogramme en deux parties :

- Un débit de base, qui représente un apport quasi constant du paramo et/ou du ressuyage du système glaciaire, observé la nuit et le matin.
- Un débit de crue, largement supérieur au débit de base, qui correspond principalement à l'apport de la fonte du glacier .

3.2 Comparaison des bilans hydrologique et météorologique du glacier 15 par analyse multivariées.

Afin de mieux comprendre le lien entre les crues observées à l'exutoire (station 15) et le bilan météorologique sur la bassin versant du glacier 15, j'ai analysé les relations entre les différentes variables météorologiques et les hauteurs d'eau.

Pour cela, j'ai analysé quatre mois de données grâce à l'utilisation du logiciel Statgraphic Plus 5.1 dont l'analyse par composantes principales (ACP).

3.2.1 L'analyse par composantes principales

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).

3.2.2 Approche par extremums semi journaliers

Afin de comparer les données disponibles, j'ai déterminé les extremums instantanés diurnes pour chaque variable utilisée (sauf pour les précipitations). En effet, les paramètres météorologiques étant gouvernés par un cycle jour-nuit, la fonte survient principalement le jour. De plus, dans cette analyse, je n'ai pas choisi de comparer des moyennes car elles auraient trop « lissé » les variations journalières en rendant des résultats moins significatifs pour l'ACP.

3.2.2.1 Données utilisées

J'ai utilisé 98 jours de données comportant toutes des hauteurs d'eau à comparer avec les paramètres pouvant être liés à la fusion de la neige. Toutes les données météorologiques proviennent de la station Campbell, située sur le glacier 15 alpha (à l'exception des précipitations). Cette station a un programme qui mesure directement les extremums journaliers, mais il n'est pas très fiable, on a donc utilisé les données mesurées au pas de temps demi horaire, et on a déterminé les extremums diurnes graphiquement.

Voici les variables analysées :

- Les hauteurs d'eau maximales à la station 15 (Hmax)
- Les températures maximales diurnes (T2max).
- Le rayonnement net maximal (RNmax) diurne.
- L'albédo minimal diurne (albmin).
- La vitesse maximale diurne du vent (Vmax)
- Les précipitations (P2) extraites du pluviographe P2 installé sur la moraine, dont j'ai calculé le cumul semi-journalier (8 :00 à 20 :00), grâce à Excel. On a choisi cette plage horaire car, on a constaté qu'il ne pleut que rarement le soir après de 20 :00. Il faut savoir que les pluviographes n'indiquent pas sous quelle phase surviennent les précipitations : pluie, neige, grêle. Mais on pourra connaître cette phase en analysant les températures, et surtout les variations d'albédo après les précipitations.

3.2.2.2 Variables décalées dans le temps

Toutes les variables présentées précédemment ont un effet direct sur la fusion de la neige au niveau journalier.

Cependant, ces relations peuvent aussi avoir un effet décalé dans le temps. C'est-à-dire que l'on se réfère aux conditions météorologiques qui ont eu lieu aux jours $j-1$ ou $j-2$, qui peuvent avoir une influence sur la fonte du jour j

Afin de prendre en compte ces relations temporelles, j'ai ajouté d'autres variables qui ne sont autre que les variables expliquées précédemment décalées dans le temps et sont indicées par « -1 » ou « -2 ». Exemple : `albmin_1`, etc..

3.2.3 Mise en œuvre

J'ai réalisé cette analyse selon trois étapes :

Etape 1 : Une première approche où j'ai réalisé une ACP avec toutes les variables que nous possédons : `Hmax`, `RNmax`, `RNmax_1`, `albmin`, `albmin_1`, `Tmax`, `Vmax`, `P2`, `P2_1` et `P2_2`. Cette analyse nous a permis, grâce à l'allure globale des corrélations, de voir au premier abord si ces résultats sont cohérents ou non par rapport à la réalité.

Etape 2 : Afin de simplifier l'analyse, nous avons sélectionné les variables les plus importantes en éliminant certaines variables très fortement corrélées entre elles (qui sont redondantes).

Etape 3 : Une analyse des variables mois par mois. En effet, juillet et août sont des mois secs et venteux (période « sèche »), tandis qu'à partir de septembre, la période des pluies commence. Il nous a semblé intéressant de voir l'influence des variations saisonnières sur le bilan hydrologique afin de repérer certains regroupements de crues et ainsi essayer d'établir une typologie des crues.

3.2.4 Première ACP, première approche

Cette première analyse s'est faite avec les dix variables disponibles. Les valeurs propres obtenues et les pourcentages de variance expliqués sont dans le tableau et le graphique suivant :

Number of components extracted: 10

Principal Components Analysis

Component Number	Eigenvalue	Variance	Percent of Cumulative Percentage
1	4.16493	41.649	41.649
2	1.65186	16.519	58.168
3	1.32798	13.280	71.448
4	0.792848	7.928	79.376
5	0.669406	6.694	86.070
6	0.427156	4.272	90.342
7	0.390326	3.903	94.245
8	0.32608	3.261	97.506
9	0.158736	1.587	99.093
10	0.0906767	0.907	100.000

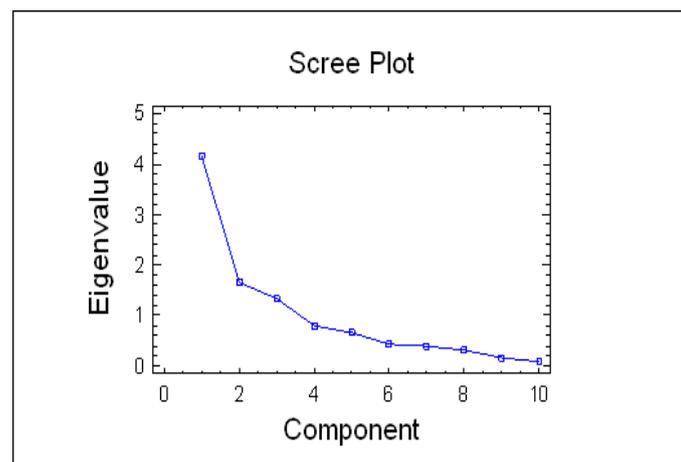


Fig.2.2.4 Valeurs propres des composantes

Tableau 2.2.4 Pourcentages des valeurs propres des composantes

3.2.4.1 Description des composantes :

Nous analyserons que les trois premières composantes qui expliquent 71.4 % de la variance.

Le tableau des poids des variables pour chaque composante est le suivant :

	Component 1	Component 2	Component 3	Component 4	Component 5	Component 6	Component 7	Component 8
RNmax	0.397586	-0.202591	-0.168141	0.0815143	0.325714	-0.179726	-0.0555389	0.530147
RNmax_1	0.315339	0.30299	0.409446	0.00765273	0.290685	0.21079	0.498898	-0.214582
albmin_1	-0.422105	-0.275498	-0.182134	0.0333411	-0.00012317	-0.0842446	-0.180363	-0.100847
P2_2	-0.117393	0.235753	-0.53596	-0.675129	0.343414	0.236133	0.112177	0.0204629
vent	-0.183844	-0.526893	0.244444	0.0836086	0.618837	0.262916	0.0160938	0.13095
P2_1	-0.171735	0.171954	-0.530327	0.69563	0.120507	0.192968	0.334265	-0.0581068
Hmax	0.379873	-0.0103449	-0.215698	0.0806334	0.383643	-0.453185	-0.283454	-0.577054
albmin	-0.432221	0.0018117	0.224135	-0.0342996	0.203609	0.00215836	-0.0595476	-0.420069
P2	-0.138716	0.617167	0.176554	0.189777	0.269862	0.130265	-0.603769	0.254203
T2max	0.369975	-0.217912	-0.12134	0.0424365	-0.180374	0.729177	-0.377467	-0.260226

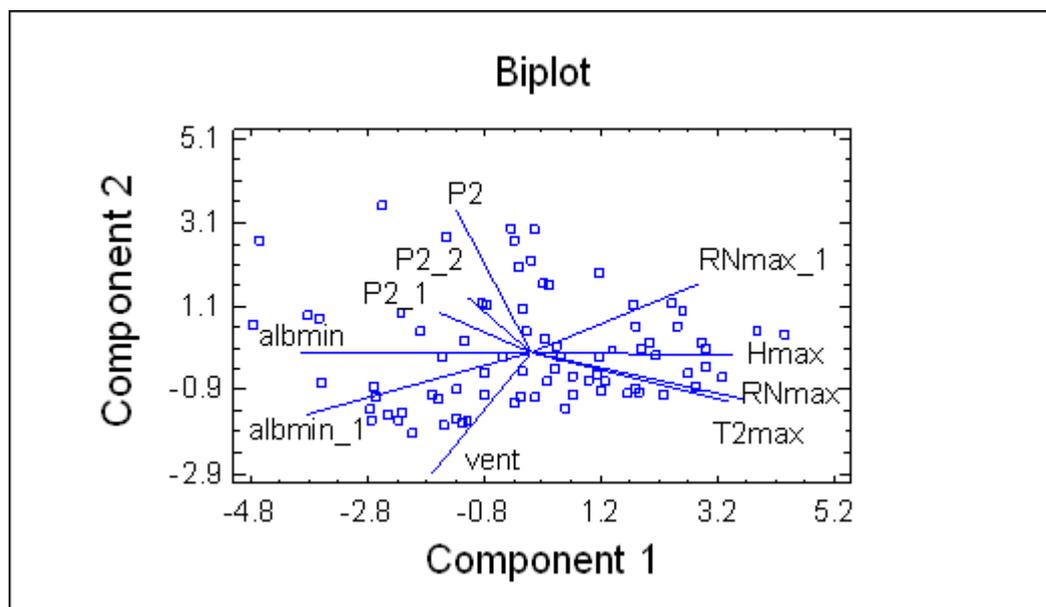
Tableau 2.2.4.1 Tableau des poids de chaque composante

La première composante, qui explique 41.6 % de la variance, est fortement corrélée à Hmax, variable que nous cherchons à expliquer. Elle est aussi corrélée aux températures et aux deux rayonnements nets. De plus, elle est fortement opposée aux albédos et plus faiblement au vent et aux précipitations.

La deuxième composante, qui ne représente que 16 % de la variance, est majoritairement corrélée à P2, RNmax_1 et albmin_1 et en moindre proportion à P2_2. Elle est fortement opposée au vent, en en moindre proportion à RNmax et Tmax.

La troisième composante, qui est d'importance moindre pour cette analyse car elle ne représente plus que 12 % de la variance, est majoritairement expliquée par RNmax_1 et en moindre proportion par le vent albmin et P2. Elle est opposée à P2_2, P2_1 et plus faiblement à Hmax et à albmin_1.

3.2.4.2 Analyse du plan 1 - 2 :



Ce premier plan est très important car ce sont ces deux premiers axes qui expliquent la plus grande partie de la variance (58.2 %), et surtout parce que la variable qu'on veut expliquer, Hmax, est pratiquement confondu avec le premier axe qui est celui qui a le plus de poids pour cette analyse.

Cette analyse explique plusieurs choses :

Première composante (41,6 % de la variance expliquée) :

Les hauteurs d'eau sont complètement opposées à l'albédo, ce qui est cohérent car plus l'albédo est élevé, plus la proportion de courtes longueurs

d'ondes réfléchies est importante (moins la neige absorbe d'énergie), et moins il y a de fusion.

Les températures et les rayonnements nets fortement et positivement corrélés à la hauteur d'eau : plus le glacier absorbe de radiation (l'albédo est donc faible), plus la température augmente et plus les crues sont importantes.

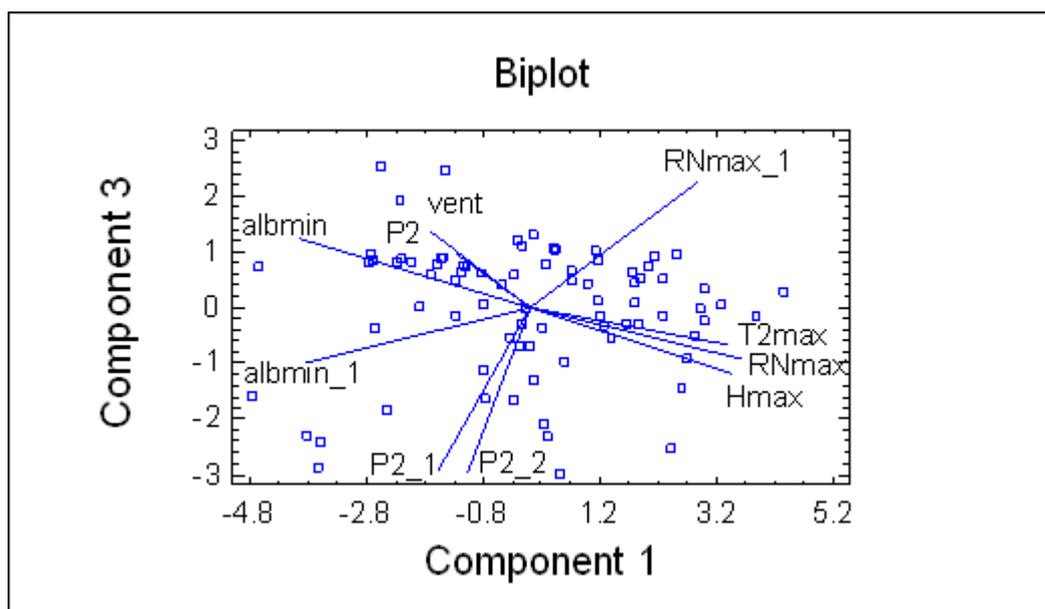
Le vent est en légère opposition aux crues, ce qui peut être expliqué par le phénomène de sublimation. En effet, le vent augmente les flux turbulents, favorisant la sublimation. La quantité de vapeur d'eau formée est moindre que celle de l'eau obtenue par fusion. Cependant, la sublimation nécessite d'un apport énergétique beaucoup plus élevé que la fusion (à peu près 10 fois plus), réduisant la part d'énergie disponible pour la fusion.

A l'inverse de ce qu'on pourrait penser, P2 et Hmax sont quasiment orthogonaux, c'est-à-dire qu'ils ne sont pas corrélés. Cette relation est assez complexe car les précipitations peuvent influencer de deux façons opposées sur les écoulements : quand elles surviennent sous forme de neige elles augmentent l'albédo ce qui bloque la fusion, alors que lorsqu'elles surviennent sous forme de pluie, elles augmentent fortement les écoulements.

Deuxième composante (16,5 % de la variance expliquée):

On peut voir que les pluies sont anticorrélées au vent. En effet, ce phénomène est surtout observable pendant la période sèche (juillet, août), qui est la plus venteuse de l'année.

3.2.4.3 Analyse du plan 1- 3 :



L'interprétation de ce plan est assez délicate car il contient une composante qui n'explique que 13 % de la variance.

Troisième composante

On constate une légère corrélation entre P2-2, P2_1 et Hmax, variables faiblement anticorrélées à P2. Ces résultats peuvent être cohérents avec la réalité car s'il a neige les jours d'avant, cette neige fraîche pourrait avoir le temps de fondre (lorsque les conditions radiatives le permettent). Cette interprétation est renforcée par la légère anticorrélation entre les précipitations des jours antérieurs et l'albédo du jour même.

Par ailleurs, la corrélation entre précipitations et albédos et l'opposition entre précipitations et rayonnements nets est mieux visible que dans le plan 1-2.

Cependant, cette troisième composante n'explique que peu de variance, il se pourrait même qu'elle n'en explique des résidus. C'est pour cela qu'on a décidé de ne pas inclure ce plan dans le reste de l'analyse.

En conclusion sur cette première analyse, on constate que les facteurs induisant la fusion sont un albédo faible, peu de vent, un rayonnement net et une température élevées. Tous ces résultats sont cohérents avec ce que l'on connaît des mécanismes physiques de la fonte.

On constate une certaine redondance entre ces variables. Quelles sont les plus significatives ?

3.2.5 Deuxième étape : sélection des variables

3.2.5.1 Sélection des variables

Après avoir réalisé une ACP avec toutes les variables disponibles, nous recherchons maintenant les variables les plus significatives.

On constate que, dans les plans des composantes 1, 2 et 3, albmin et Rnmax sont toujours fortement anticorrélées. Par ailleurs, l'albédo intervient dans le calcul du rayonnement net :

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

Nous avons donc décidé de ne garder que l'albédo, qui nous renseigne l'état des précipitations et l'état de surface du glacier (neige/glace, présence d'impuretés, présence d'eau).

On a aussi décidé d'éliminer la variable albmin_1 car elle ne nous apporte pas assez d'information pour l'interprétation.

Finalement, dans le but de simplifier l'analyse, on a aussi éliminé la variable P2-2, car elle est fortement corrélée à P2_1.

D'où, la suite de l'analyse ne s'est faite que avec les variables suivantes : Hmax, albmin, vent, P2, P2_1 et Tmax.

3.2.5.2 Résultats

Les trois premières composantes de cette analyse expliquent 79 % de la variance, ce qui est plus satisfaisant que l'analyse précédente.

Principal Components Analysis

Component Number	Eigenvalue	Percent of Variance	Cumulative Percentage
1	2.56174	42.696	42.696
2	1.34631	22.438	65.134
3	0.848484	14.141	79.275
4	0.569787	9.496	88.772
5	0.427962	7.133	95.905
6	0.245726	4.095	100.000

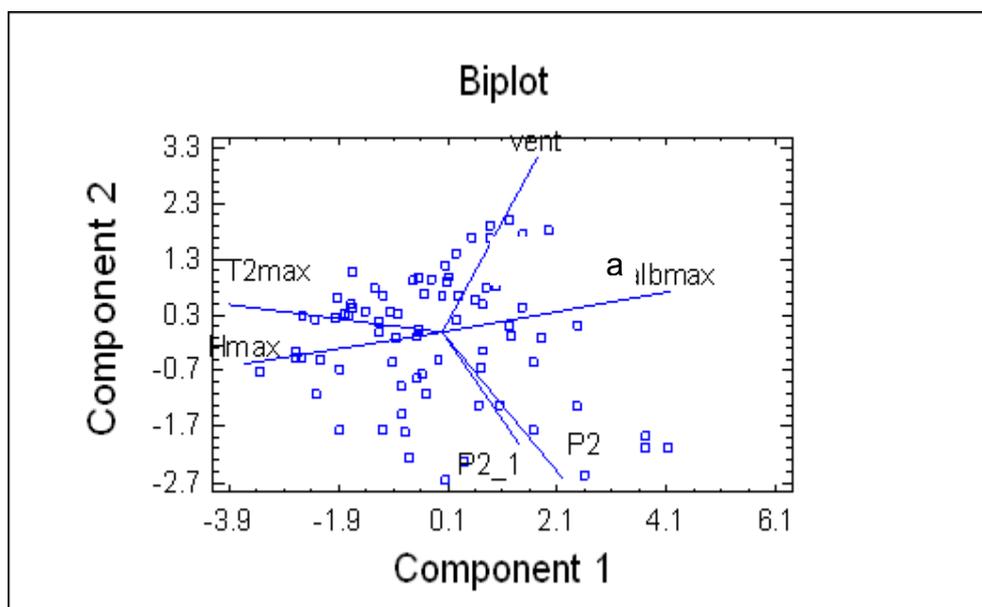
Tableau1 2.2.5.2 Pourcentages des valeurs propres des composantes

Table of Component Weights

	Component 1	Component 2	Component 3	Component 4	Component 5	Component 6
albmax	0.558894	0.154811	-0.0314891	0.105668	-0.036696	0.806329
Hmax	-0.486532	-0.125856	0.0956078	0.653597	-0.495072	0.256946
P2	0.29589	-0.563245	-0.376411	0.525287	0.388702	-0.162799
P2_1	0.189589	-0.431815	0.877925	-0.00444737	0.0819878	-0.00990525
T2max	-0.52299	0.10372	0.0982789	0.0371906	0.75068	0.375716
vent	0.232187	0.667628	0.260331	0.533213	0.179517	-0.340658

Tableau2 2.2.5.2 Poids de chaque composant

Plan 1-2 : explique 65.1 % de la variance



On constate des corrélations entre variables analogues à celles de l'analyse précédente sauf que P2 et le vent sont plus opposés sur le premier axe que dans l'analyse précédente. Pour la suite de l'étude, on ne prendra en compte que le plan 1-2 qui explique à lui tout seul plus de 65% de la variance.

3.2.6 Troisième étape : analyse des variables mois par mois.

En Equateur, dans la région de l'Antizana la saison des pluies présente deux maximums d'intensités autour des équinoxes. La première, « saison des pluies », en général la plus faible, survient entre septembre et début décembre. Elle est suivie par une période généralement plus sèche appelée « veranillo del Niño » en décembre – janvier, pendant lequel les vents sont généralement faibles.

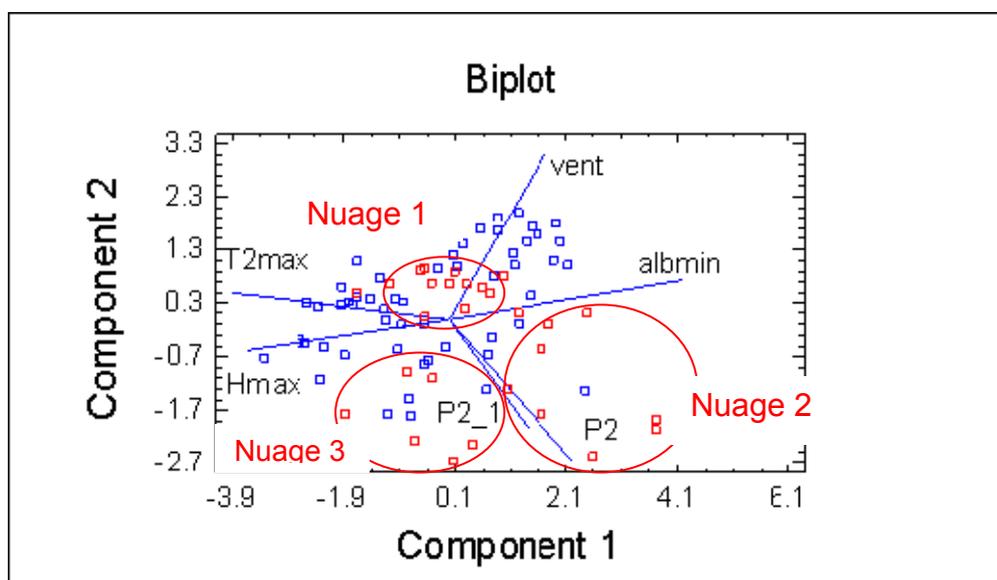
La saison des pluies la plus forte survient ensuite entre février et juin, les mois de mai et d'avril étant les plus arrosés.

En juillet- out survient la seconde saison sèche pouvant déborder sur juin et septembre. Elle est plus longue que le veranillo del Niño et est caractérisée par des vents violents très fréquents qui génèrent sur les sommets des nuages lenticulaires qui coiffent les montagnes avec des conditions souvent givrantes .

Nous avons étudié la période de juillet à octobre pendant laquelle on a observé à la fois des conditions de forts vents caractéristiques de la saison sèche (en août) et des périodes de précipitations caractéristiques de la fin de la saison des pluies principale ou du début de la secondaire.

Les données correspondant au mois analysés sont en rouge dans les graphiques ci-dessous :

3.2.6.1 Juillet, début de l'été , plan 1-2 :



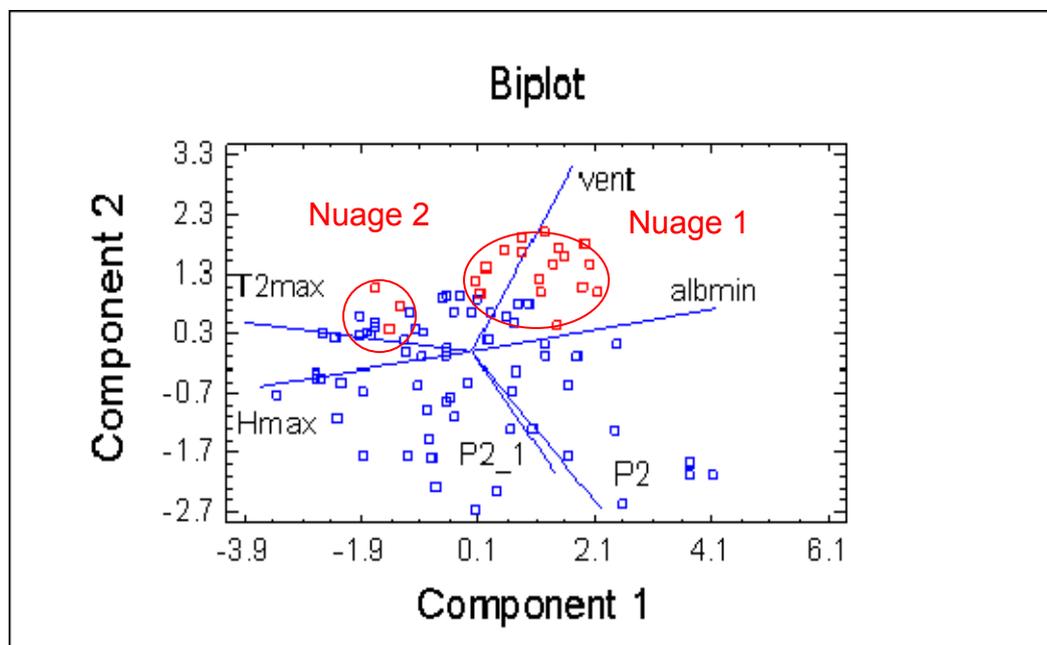
On peut voir trois groupes de points, tous ayant une caractéristique en commun : des hauteurs d'eau moyennes ou faibles.

Le premier nuage de points est caractérisé par des vents un peu plus élevés que la moyenne, peu de précipitations, des albédos moyens voire inférieurs à la moyenne et des températures plutôt moyennes. Toutes les conditions sont réunies pour avoir de fortes crues, cependant, le vent, favorise la sublimation au détriment de la fusion.

Le second groupe de point est expliqué par des précipitations importantes (ce qui n'est pas très commun pour un mois de juillet), des albédos élevés et des températures très faibles. On peut en déduire que les précipitations se sont faites sous forme de neige /grêle (baisse de température, augmentation de l'albédo), en induisant de très faibles hauteurs d'eau.

Le dernier nuage de points se caractérise par hauteurs d'eau plus élevées que dans les autres nuages de points (on a vérifié les valeurs dans le tableau de données). De plus, on pourrait penser que les précipitations sont élevées, cependant, après vérification dans le tableau de données, on constate que les précipitations sont très faibles, voire nulles, mais que les vents sont très faibles, ce qui explique probablement les débits un peu plus élevés de ce troisième groupe de points.

3.2.6.2 Août, mois très venteux, plan 1-2 :

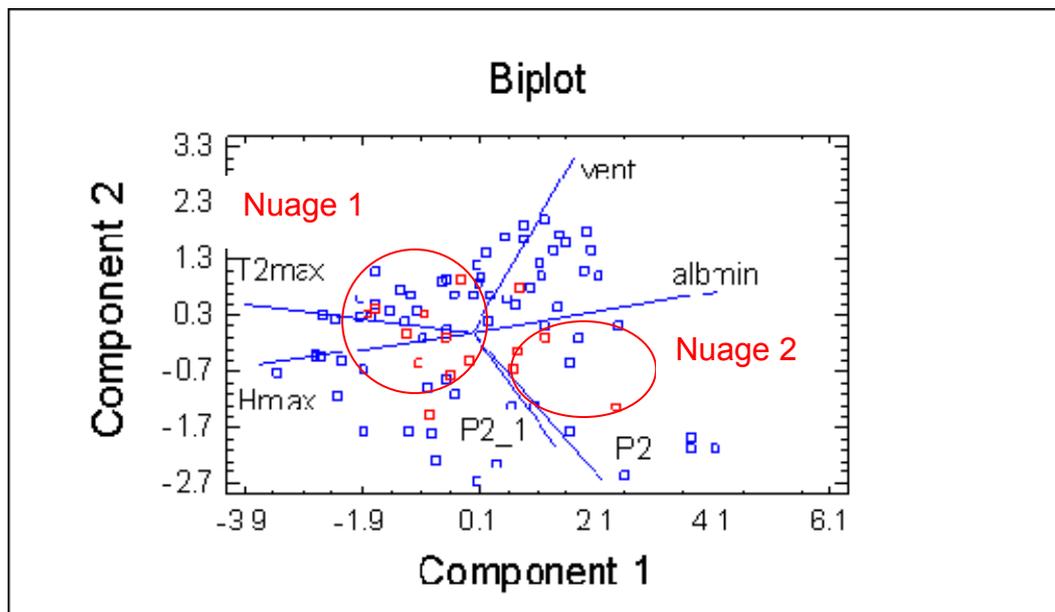


On peu voir que le mois d'août est caractérisé par être sec, très venteux et avoir peu d'écoulement (Nuage 1). On pourra donner ici la même explication que pour le premier nuage de points de juillet, sauf que les vents sont plus conséquents, et donc les crues plus faibles.

Cependant, on constate trois jours avec des conditions idéales de fonte (hauteurs d'eau supérieures a la moyenne) : températures elevees, pas de précipitations, albédo faible et peu de vent(Nuage 2).

Après avoir analysé ces deux mois représentants de l'été en Equateur, on constate qu'en général, même si ce sont des mois avec peu de précipitations et du beau temps les crues sont assez faibles. En effet, d'une part le vent favorise la sublimation au détriment de la fonte et d'autre part, le ciel dégagé la nuit provoque une chute des températures de surface des glaciers au détriment de la fusion.

3.2.6.3 Septembre plan 1-2 :

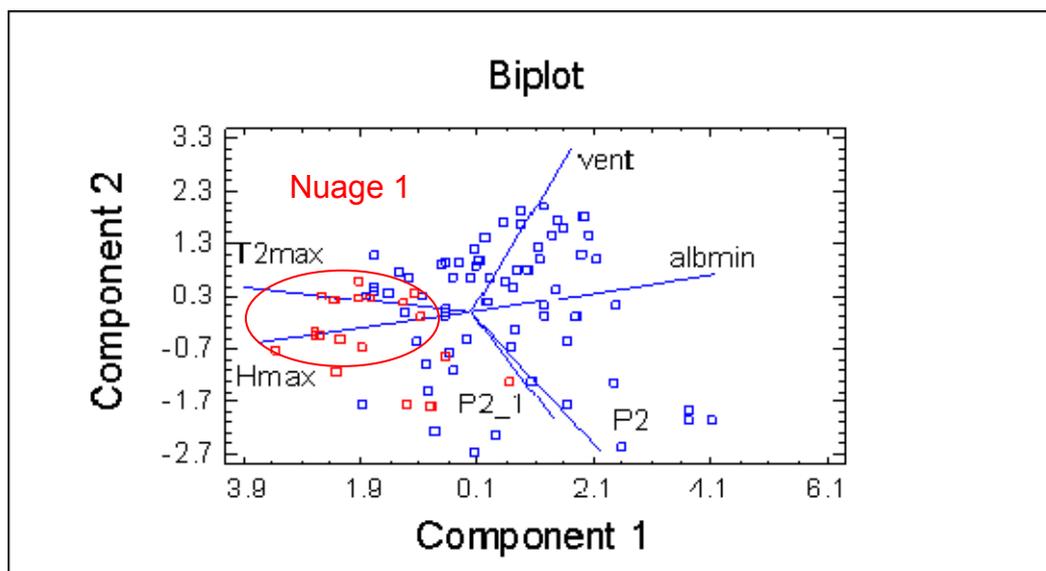


Ce mois représente le début de la saison des pluies et la chute du vent. On peut voir deux nuages de points distincts :

Des hauteurs d'eau moyennes- elevees accompagnées de peu de précipitations, peu de vent et de températures en hausse.

Des écoulements faibles accompagnés de précipitations et d'albédos élevés(précipitations sous forme solide)

3.2.6.4 Octobre plan 1-2 :



C'est le mois où les hauteurs d'eau sont les plus élevées avec de bonnes conditions météorologiques.

On constate cependant qu'il y a peu de jours de précipitations que ce soit pour septembre ou pour octobre. Il faut aussi prendre en compte que ces deux mois sont incomplets au niveau des données de hauteurs d'eau et que ces lacunes coïncident avec les jours de fortes précipitations qui ne sont malheureusement pas pris en compte dans l'analyse.

3.2.7 Conclusion sur l'analyse :

Cette analyse nous a permis de déterminer trois principaux types de crues :

Type 1 : faibles, avec beaucoup de vent et peu de précipitations (Nuage 1 juillet et août)

Type 2 : faibles, avec de fortes précipitations neigeuses, pas de vent et des températures faibles (Nuage 2 juillet et septembre)

Type 3 : élevées avec des conditions de fonte idéales qui sont peu de vent et de précipitations, albédos faibles et températures élevées (Nuage 2 août, et Nuages 1 septembre et octobre).

3.3 Validation des relations entre les crues de la station 15 et les conditions météorologiques.

Afin de vérifier la typologie de crues obtenues par l'analyse statistique, et de visualiser mieux les différents types de crues, j'ai comparé graphiquement les paramètres suivants :

Hauteur d'eau instantanées (pas de temps : 3minutes)
Albédo minimal

Température maximale diurne
 Précipitations P2 cumulées
 Vent : les moyennes des vitesses de vent maximales pour chaque mois
 sont les suivantes :

	juillet	août	septembre	octobre
Vitesse vent en m/s	8.84	11.64	6.96	5.26

Tableau 2.3 Vitesses moyennes maximales mensuelles

J'ai pris comme exemples les mois de juillet et août car ils peuvent illustrer les trois types de crues .

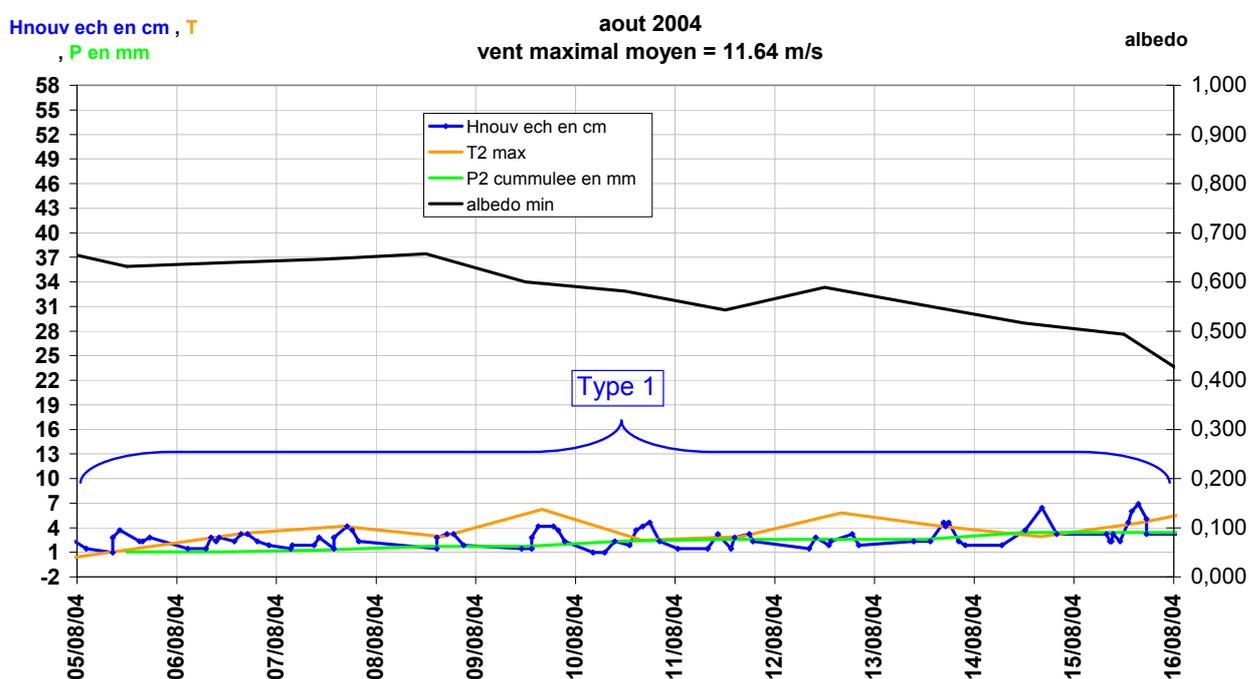


Fig 1 2.3 Exemples de crues de type 1 : mois d'août 2004

La crue de type 1 caractéristique des mois venteux, donc du mois d'août. On constate bien qu'il n'y a pratiquement aucune précipitation, l'albédo n'est pas faible et les crues sont quasiment inexistantes, (la sublimation est favorisée au détriment de la fusion du glacier).

Juillet illustre les deux autres types de crue :

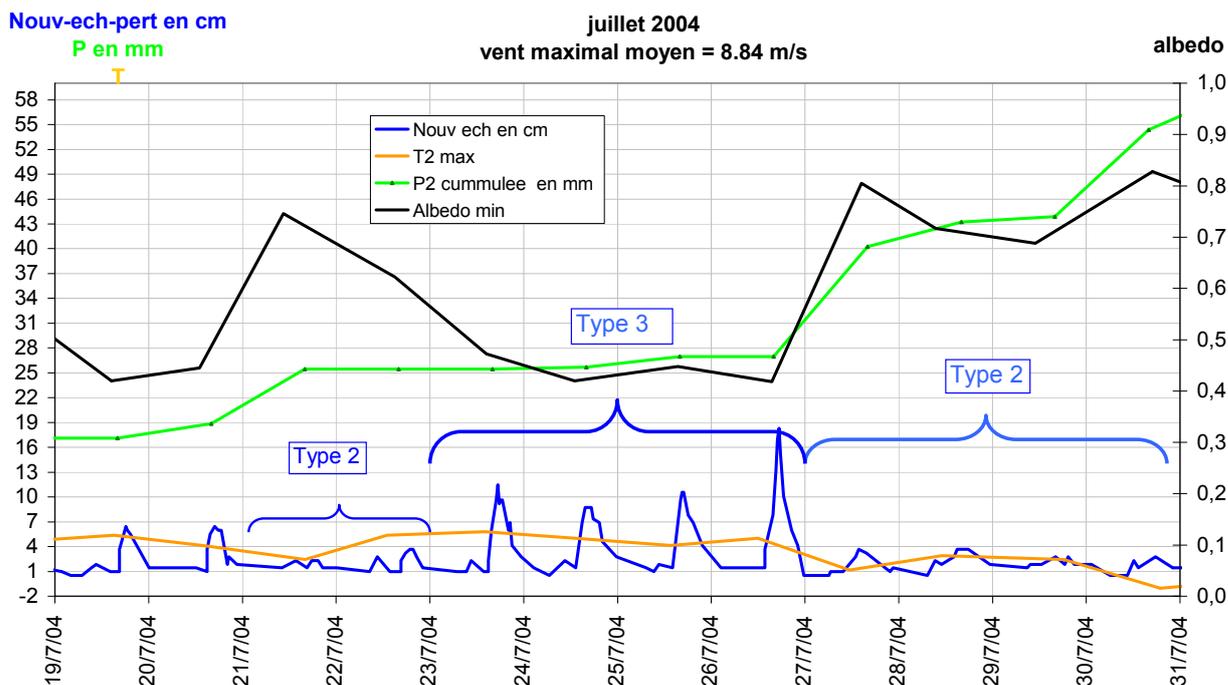


Fig 2 2.3 Exemples de crues de type 2 et 3 : mois de juillet 2004-12-19

Les crues de type 2 sont faibles et sont caractérisées par un albédo élevé conséquence de fortes chutes de neige quotidiennes, qui provoquent l'augmentation d'albédo et la diminution de la température.

Les crues de type 3, ont des débits de fonte plus élevés. Ce type de crues a lieu plusieurs jours après des précipitations neigeuses qui « recharge » le glacier. Elles sont consécutives à la fonte glaciaire qui se caractérise par une absence de précipitations, un beau temps, et surtout un albédo qui se dégrade au fur et à mesure. Les crues les plus intenses ont lieu lorsque l'albédo se dégrade le plus, en laissant le glacier « a nu » .

1.1 Conclusion :

Cette analyse nous a permis de déterminer les trois types de crues les plus importants. Cependant, on peut dire qu'elle est incomplète car je n'ai pu analyser ni les mois d'avril et mars, correspondant à la saison des pluies accentuée, ni les mois de décembre, janvier, correspondant au veranillo del Niño.

Par ailleurs, cette année 2004 n'est pas une année d'anomalie de type ENSO, qui aurait pu certainement nous donner d'autres types de crues.

4 PARTIE 3 : CALIBRATION DE LA STATION LOS CRESPOS

4.1 Etude de la Station Los Crespos

L'étude de cette station correspond à la deuxième partie de mon projet. Cette station est aménagée, mais n'était pas calibrée. J'ai donc procédé à une calibration de la station grâce à plusieurs méthodes : jaugeages chimiques, volumétriques et par exploration du champ de vitesse à l'aide du moulinet.

4.1.1 Description (Annexe 2):

La station Los Crespos se trouve en aval du glacier Los Crespos à 4500 m d'altitude. C'est une station gérée par l'EMAAP-Q car Los Crespos est un des nombreux torrents qui alimentent la retenue du lac La Mica.

Cette station est formée par un déversoir trapézoïdal. Les mesures de hauteurs d'eau sont enregistrées par deux limnigraphes mécaniques, et sont rattachées à l'échelle limnimétrique localisée près du déversoir.

De par sa construction, cette station est mieux adaptée que la 15, et une fois mieux aménagée, pourrait donner de très bons résultats.

Prochainement, GREATICE installera un limnigraphe automatique de type Orphimed.

4.1.2 Calibration de la station :

Les débits traversant la station Los Crespos sont beaucoup plus importants que ceux de la 15. De ce fait, il est difficile de faire des jaugeages volumétriques avec des bidons (sauf en faibles débits). De plus, la station ne possède pas de réservoir de mesure. En effet, l'importance des débits imposerait une cuve de jaugeage très volumineuse.

Afin de la calibrer, nous avons utilisé trois méthodes : Des jaugeages chimiques, au moulinet et volumétriques, qui ont permis d'ajuster la courbe théorique de ce déversoir trapézoïdal.

4.1.3 jaugeage chimique

4.1.3.1 Principe

Cette méthode s'applique à des torrents ou des rivières en forte pente où l'écoulement est turbulent.

Le principe général consiste à injecter dans la rivière une solution concentrée d'un traceur (sel, colorant,...) et à rechercher le taux de dilution de cette solution par la rivière, par prélèvements d'échantillons d'eau à l'aval du point d'injection.

4.1.3.2 Choix du traceur

Nous avons choisi d'utiliser comme traceur le chlorure de sodium (sel de cuisine NaCl) pour les raisons suivantes :

- Il est très soluble dans l'eau et toujours conserve
- Son adsorption peut être considéré comme négligeable : le sodium et le chlore étant des ions a faible charge, les forces de rétention ne sont pas importantes.
- Sa restitution en aval est déterminée par simple mesure de conductivité de l'eau.
- Il n'est pas toxique
- Son coût est faible

Dans le cadre d'une étude préliminaire, nous avons utilisé un colorant, la fluorescéine, afin de déterminer visuellement le temps de passage du colorant, qui doit être analogue à celui du sel.

4.1.3.3 Caractéristiques chimiques des eaux glaciaires

La conductivité d'une eau glaciaire est faible, inférieure a 10 $\mu\text{S}/\text{cm}$. En effet, l'eau des glaciers est peu chargée en ions, et si cette eau ne s'est pas infiltrée dans le sous-sol , elle n'a donc pas l'occasion de se charger. Les mesures de conductivité permettent donc d'avoir une idée du parcours de l'eau , c'est à dire de savoir si cette eau s'est infiltrée ou pas. Par ailleurs, la couleur de l'eau peu aussi nous renseigner sur ce point : une eau trouble provient directement du glacier, tandis qu'une eau claire a été filtrée.

La conductivité d'un torrent glaciaire évolue au cours de la journée. En effet, la nuit et le matin, l'eau provient d'un apport du paramo majoritairement, donc une conductivité un peu plus élevée qu'au moment de la crue , ou l'eau provient directement de la fonte journalière du glacier.

4.1.3.4 Théorie du jaugeage au sel

Après l'injection d'une masse connue de sel, on place une sonde conductimétrique en aval de l'injection, à une distance suffisamment longue pour que le mélange soit homogène. La sonde mesure la conductivité électrique de l'eau et sa température au cours du passage du nuage de sel. On peut alors tracer la courbe conductivité en fonction du temps.

La conductivité γ de l'eau est reliée a sa minéralisation C.

$$C = K \times \gamma$$

Avec C = minéralisation des eaux en g/l

K = taux de dilution du traceur dans l'eau du torrent.

• γ = conductivité moyenne de l'eau entre t et t + Δ t, en $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Cette relation nous permet de déterminer une courbe d'étalonnage entre la conductivité et la concentration.

Dans l'hypothèse de la conservation de la masse du traceur, et en négligeant d'autres ions dans l'eau, on peut exprimer le débit comme suit :

$$Q = \frac{M}{\Delta t \sum_1^n (C_i - C_0)}$$

Avec Q : débit du cours d'eau en l/s

M : masse de traceur injecté en mg

C_i : concentration a la station de mesure en mg/l

C_0 : concentration initiale en mg/l

La conductivité est aussi linéairement reliée avec la température :

$$\gamma_t = \gamma_{25} \times (1 + \alpha(T - 25))$$

avec α = coefficient de température.

Les conductimètres actuels ramenant la conductivité a une température de référence de 25°C (nous utilisons le WTF, modèle LF 318, précision de +/- 0.1 μ S/cm a 25), nous pourrions donc nous affranchir de la correction de la conductivité par la température.

4.1.3.5 Conditions d'application

Les conditions suivantes sont nécessaires pour que les méthodes par intégration ou dilution puissent être appliquée :

- Le débit de la rivière doit rester à peu près constant pendant la mesure. afin d'avoir un régime permanent,
- Le traceur doit passer dans sa totalité par le site de prélèvement des échantillons,
- A la hauteur des prélèvements, le mélange doit être tel qu'en chaque point de la section du cours d'eau, doit passer la même quantité de traceur.

4.1.3.6 Mise en œuvre

Afin d'assurer un bon mélange, nous avons choisi d'injecter le sel en amont de la chute du déversoir de la station Los Crespos, et de réaliser les mesures 200 mètres plus loin.

Dans le but de déterminer le temps de passage visuellement, nous avons réalisé une première injection de fluorescéine avant la crue. On a donc déterminé :

Temps de passage = 15 minutes



Photo 3.1.3.7 Injection de la fluorescéine dans los Crespos

Concernant la masse de sel injectée, nous nous sommes appuyés sur les expériences réalisées par Estelle Pradero sur la station 15 en mai 2003, on a donc injecté 10 kg de sel.

4.1.4 Protocole

Tout le matériel de jaugeage et de mélange utilisé (bidons de jaugeage, sceau, éprouvettes, etc.), devra être rincé en aval du point de mesure afin qu'il ne fausse pas les mesures s'il contient des substances qui pourraient modifier la conductivité de la rivière.

2 personnes se placeront au niveau de la station Los Crespos, et deux autres au niveau du site de mesure 200 m en aval

Au niveau de la station Los Crespos, préparer une saumure contenant 10 kg de sel dans un bidon de jaugeage de 150 l. Bien mélanger (l'eau froide dissout mal les cristaux de sel)

Pour faciliter la dilution : diluer 2 kg par 2 kg dans le petit seau de maçon (7 à 8 l d'eau pour chaque seau).

Attention :

- La masse de sel injectée doit être mesurée avec précision : peser chaque sachet de 1 kg de sel afin d'atteindre les 10 kg nécessaires, puis peser les sachets vides.
- Le sel absorbe l'humidité en quantités notables il doit donc être conservé dans des sachets plastiques scellés afin d'être pesés à sec.

Connaissant la masse d'injection de sel, nous aurons pris garde à Quito d'évaluer rapidement la concentration moyenne (conductivité moyenne) que nous allons mesurer 300 m en aval du site d'injection (voire détermination de la masse d'injection).

Afin de relier la conductivité de l'eau à sa minéralisation, il faut réaliser des solutions de concentrations encadrant les valeurs de conductivité prévues. Par exemple, si nous pensons que la conductivité maximale prévue est de l'ordre de 150 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (ce qui équivaut à une concentration de l'ordre de...), on préparera sur le terrain une dizaine d'échantillons tests en utilisant des

quantités de sel (le même que celui injecté) pesées à Quito et conservées dans des flacons hermétiques :

0 mg	→	10 $\mu\text{S/cm}$ (ordre de grandeur)
10 mg	→	30 $\mu\text{S/cm}$ (ordre de grandeur)
100 mg	→	200 $\mu\text{S/cm}$
200 mg	→	400 $\mu\text{S/cm}$

Injecter un peu de colorant dans le torrent (20 cl de fluorescéine suffisent) qui permettra de suivre facilement l'onde de salinité importante.

A la station Los Crespos, au niveau de la chute d'eau du déversoir, lâcher le sel assez rapidement (10 à 20 secondes) pour ne pas trop étaler le signal mais sans créer une augmentation de débit trop importante (pour ne pas faire déborder le lit en certains points et surtout pour ne pas créer une trop forte rupture du régime « quasi permanent »).

Une fois le sel injecté, au niveau du site de mesure, préparer les échantillons test.

Attention : les concentrations des échantillons étant assez faibles, les personnes les préparant devront faire attention de ne pas avoir manipulé de sel avant (l'eau doit être directement mise dans les flacons hermétiques contenant le sel pesé à Quito) afin de ne pas fausser les concentrations des solutions.

Mesurer la conductivité de ces solutions à l'aide du conductimètre. Tracer rapidement la courbe $C = f(\text{conductivité})$.

Les échantillons seront ramenés à Quito afin de vérifier si le conductimètre a bien ramené les conductivités à une température de référence et donc vérifier si on peut s'affranchir de l'évolution de la conductivité avec la température

Mesurer la conductivité et la température du torrent toutes les 10 secondes (mesures automatiques)

Une personne au niveau du déversoir Los Crespos, contrôle les débits par jaugeage volumétrique et par moulinet ainsi que les hauteurs d'eau sur l'échelle afin d'avoir une courbe de tarage en fonction des hauteurs.

La fin des mesures dépend de l'étalement du signal : nous pouvons arrêter les mesures lorsque la perturbation représente 50% de l'apport du torrent : par exemple, si la conductivité du torrent en conditions « normales » est de $10 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, nous nous arrêtons lorsque

le signal descend sous $15 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ (il est alors difficile de distinguer la part anthropique de la conductivité).

4.1.5 Résultats et première esquisse de la courbe de tarage.

Les courbes de restitution des traceurs au cours du temps sont en (Annexe 4.1).

Après dépouillage des échantillons (Annexe 4.2), la relation qui permet de passer des conductivités ($\mu\text{S/cm}$) aux concentrations (mg/l) est la suivante :

$$\text{Concentration} = 0.4679 \text{Conductivité} - 3.32$$

$$R^2 = 0.99$$

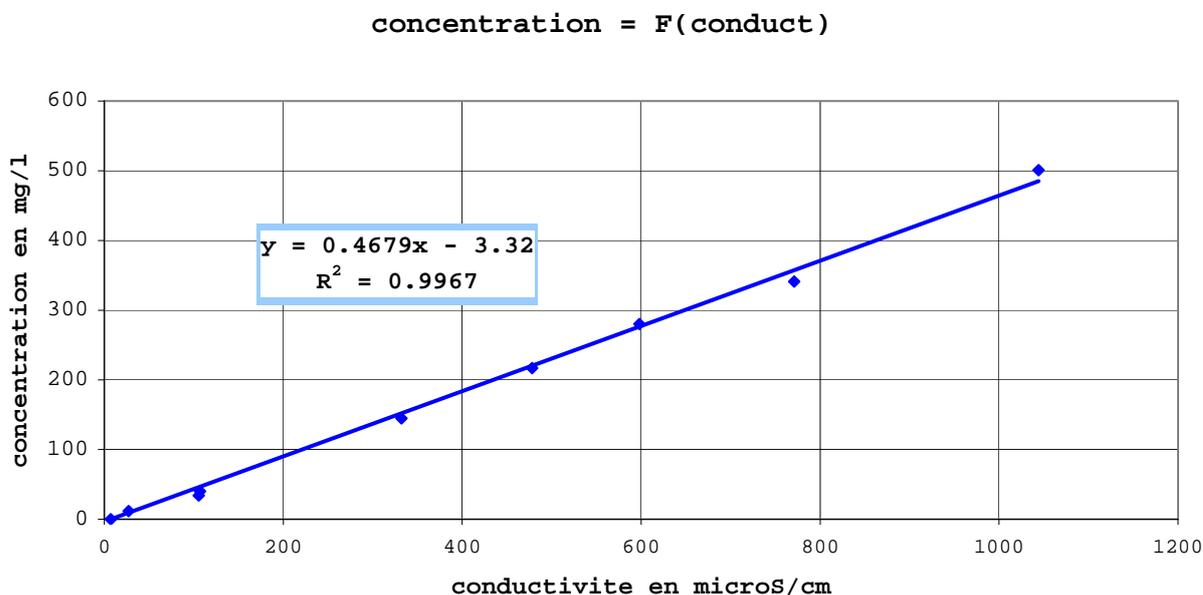


Fig1 3.1.5 Courbe d'etalonnage Concentration = f (conductivite)

(Les calcul des débits sont en Annexe 4.3).

Par ailleurs, on a aussi réalisé quelques jaugeages volumétriques (avant la crue), ainsi que trois jaugeages au moulinet. Le premier a été fait avec un micro moulinet (voir principe de jaugeages par exploration de vitesse et dépouillage des données en Annexe 5.1), et les deux autres faits par l'EMAAP-Q

Pour chaque jaugeage, on a pris la hauteur de l'échelle limnimétrique afin de pouvoir réaliser une esquisse de courbe de tarage. Afin de pouvoir réaliser des extrapolations de débits, on a calé une courbe théorique, appliquée au déversoir trapézoïdal, sur nos points expérimentaux.

Les dimensions du déversoir sont les suivantes :

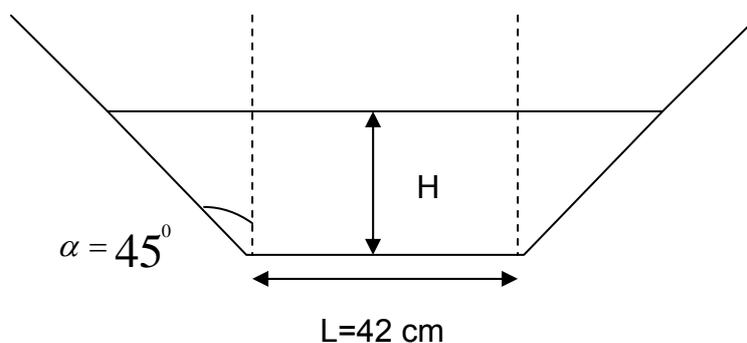


Fig 3.1.5 Schéma du déversoir trapézoïdal de la station Los Crespos

La formule retenue pour ce type d'ouvrage est celle de Gourley et Crimp :

$$Q = 1.32 \times H^{2.47} \times \tan(\alpha) + 1.69 \times L^{1.02} \times H^{1.47}$$

Avec L = base du trapèze en m

H = hauteur d'eau en m

α = angle d'inclinaison par rapport à la verticale

Ici, $\alpha = 45^\circ$, donc $\tan(\alpha) = 1$, d'où :

$$Q = 1.32 \times H^{2.47} + 1.69 \times L^{1.02} \times H^{1.47}$$

Après calage de la formule sur nos points expérimentaux, on obtient :

$$Q = a \left(1.32 \times (H + b)^{2.47} + 1.69 \times L^{1.02} \times (H + b)^{1.47} \right)$$

Avec $a = 0.7$ et $b = 0.02$

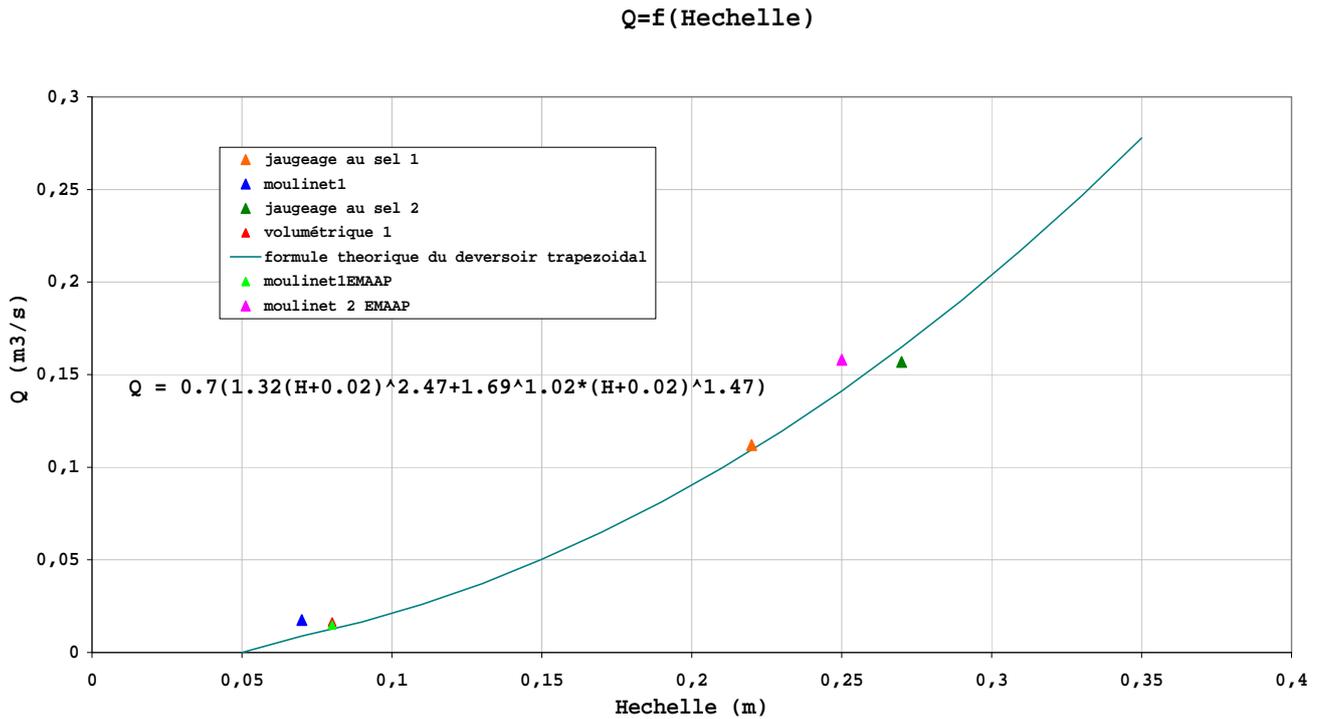


Fig2 3.1.5 Jaugeages faits a la station Los Crespos

4.1.6 Conclusion

La courbe d'étalonnage obtenue est assez satisfaisante, cependant, il faudra réaliser grand nombre d'autres jaugeages afin de la confirmer. Il faudra aussi dépouiller les jaugeages antérieurs réalisés par l'EMAAP-Q afin de voir s'ils s'accordent avec la courbe trouvée.

5 PARTIE 4 : ETUDE DES DONNEES DE LA STATION HUMBOLDT DE 1999 A 2003

5.1 Etude de la station Humboldt

Dans le cadre du stage, j'ai traité les données de la station Humboldt de novembre 1999 à mars 2003, le but étant de déterminer les pourcentages d'apport glaciaire et paramo pour ce torrent.

5.1.1 Description (Annexe 2):

Le torrent Humboldt draine une superficie de 13.7 km². A différence des autres stations étudiées, la surface de ce bassin versant recouverte par des glaciers n'est que de 17 %, c'est à dire que l'apport du paramo ne peut plus être négligeable.

Cette station, construite en 1999 à 4010 m d'altitude a des débits beaucoup plus importants qu'aux autres stations : le débit le plus fort observé est de l'ordre de 1.8 m³/s. Ce torrent, qui recueille l'eau du glacier et de la station Los Crespos, alimente le lac de la Mica (le Crespos est son affluent). Les mesures de niveau et de débit sont réalisées par l'EMAAP-Q.

Le canal rectangulaire de la station mesure 6 m de long et 1.28 m de large. Dans le but d'améliorer la précision des mesures (éviter le batillage) un puit, sorte de citerne reliée au lit, a été construit afin d'y installer tout l'appareillage de mesure : sonde limnimétrique (Hs), limnigraphe à flotteur et échelle limnimétrique (Hech).

La sonde utilisée entre novembre 1999 et août 2003 est de type Chloé, et sa précision est de l'ordre du centimètre.

5.1.2 Traitement des données brutes.

Le traitement des données brutes de novembre 1999 à mars 2003 s'est fait selon deux étapes :

- Un recalage des hauteurs minimales sur les 5 années à traiter : l'EMAAP-Q se rendait à la station assez régulièrement afin de vérifier le bon fonctionnement des appareils. Très souvent, le zéro de la sonde de la Chloé était recalée par rapport à la hauteur lue à ce moment sur l'échelle limnimétrique dans le canal. L'imprécision de mesure sur cette échelle située dans le courant a provoqué certains recalages de la Chloé approximatifs, voire erronés, que j'ai dû corriger. Cependant, le bassin versant de la Humboldt étant formé par plus de 80 % de paramo, le ruissellement due aux précipitations n'est pas négligeable. C'est à dire que ces variations de hauteurs minimales (entre 2 et 3 cm) peuvent aussi être provoquées par des pluies sur le bassin. J'ai donc utilisé les données du pluviomètre de la Humboldt (entre 2000 et 2004) afin de déterminer les moyennes mensuelles des précipitations. J'ai ainsi recalé les hauteurs minimales par rapport à ces précipitations.

- Il a aussi fallu éliminer ou modifier certaines périodes où la sonde marchait mal.

Par ailleurs, on a montré que les hauteurs mesurées dans le puit étaient très proches des hauteurs moyennes mesurées dans le canal. Il n'y a donc pas lieu d'effectuer une correction pour passer d'une hauteur à l'autre.

5.1.3 Détermination de la courbe de tarage

Grand nombre de jaugeages au moulinet ont été réalisés par l'EMAAP entre 1999 et 2003. Malheureusement, à cause de l'imprécision de mesure de l'échelle dans le canal (le puits n'étant pas encore construit), aucune courbe de tarage n'a pu être déterminée pour cette période. A partir d'août 2003, des jaugeages ont été réalisés en mesurant directement la hauteur dans le puits (voir graphique ci-après).

On constate qu'on n'a qu'un seul jaugeage pour les forts débits, donc la courbe de tarage sera assez approximative pour de forts écoulements.

Courbe de tarage de la station Humboldt

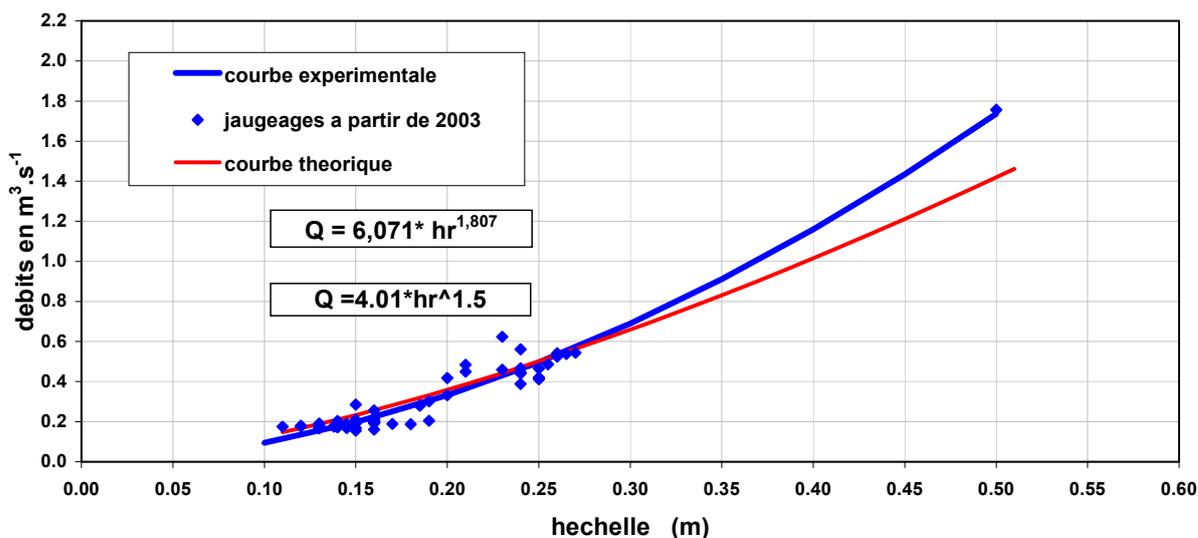


Fig 4.1.3 Courbes de tarage expérimentale et théorique pour la station Humboldt

A l'aide du solveur, on a déterminé l'équation de la courbe de tarage qui est de la forme :

$$Q = aHech^b$$

avec $a = 6.071$, $b = 1.805$ et $R^2 = 0.95$

On constate que b n'est pas le coefficient attendu pour un canal rectangulaire (théoriquement il devrait être de 1.5). En réalité, du au phénomène de transport solide, le fond du canal est érodé, et donc la section du canal n'a plus exactement la forme d'un rectangle. Il y a aussi une petite

chute en aval du canal, ce qui pourrait aussi expliquer la forte valeur de l'exposant.

On a utilisé la courbe de tarage expérimentale pour la suite des calculs (*les débits obtenus sont en Annexe 6*).

Cette courbe est provisoire et devra être ajustée dès que l'on disposera d'autres jaugeages en hautes eaux.

5.1.4 Détermination et comparaison des écoulements du glacier et du paramo :

L'hydrogramme de crue se divise en 2 parties (voir 2.2.4 :description de la crue glaciaire). Une partie provenant des écoulements glaciaires, et l'autre provenant du paramo (débit minimal).

Pour chaque année, à partir des hydrogrammes, j'ai calculé le volume d'eau total transitant par la station. J'ai ensuite déterminé un seuil (débit minimal) qui m'a permis de calculer un volume correspondant à l'écoulement du paramo, et par simple différence, un volume des crues (apport du glacier).

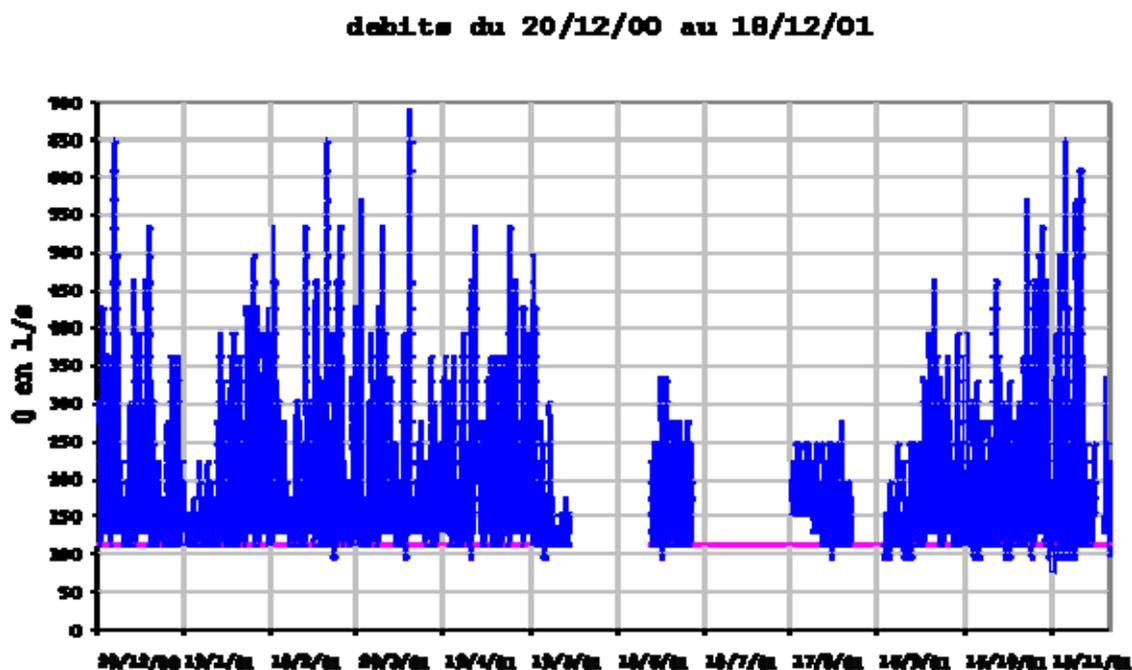


Fig 4.1.4 Débits de base et débits de crues correspondant à l'année 2000

Sachant que pour chaque année on n'a pas le même nombre de jours de données, j'ai calculé le pourcentage d'année effectif, et le volume d'eau annuel écoulé.

Les résultats obtenus sont les suivants :

année	%GLACIAIRE	%PARAMO	V annuel écoulé en m3	% année effectif
1999	30,6	67,4	7,38E+05	12,9
2000	32,6	67,4	4,57E+06	89,9
2001	57,6	42,4	4,26E+06	84,1
2002	43,8	56,1	1,44E+06	22,7

2003	46,3	53,7	2,67E+05	4,9
------	------	------	----------	-----

Afin d'avoir une idée globale sur les différents pourcentages, on obtient en moyenne 42,2 % d'apport du glacier et 57,8 % d'apport du paramo.

Sur les 13.7 km² du bassin versant de la Humboldt , seulement 17 % est recouvert par des glaciers, on a cependant 41.3 % de contribution glaciaire au niveau des écoulements.

Ces proportions d'écoulement glaciaire sont cependant inférieures à ce qu'on pouvait penser car il est fort possible qu'une partie de l'écoulement de base que l'on attribue au paramo provienne en fait du recyclage et de la restitution de l'eau des crues glaciaires précédentes par les aquifères du lit.

5.1.5 Détermination des débits moyens mensuels

Dans le cadre de mon stage, j'ai débuté une analyse sur la comparaison entre l'hydrologie et les anomalies ENSO. En effet, l'année 1999 représente une année de forte Niña , et il est assez intéressant de comparer nos débits mensuels avec les températures à 500 Hpa (les températures calculées par le modèle de la NOAA à 500hPa correspondent à peu près à celles de l'Antizana pour une même altitude) ainsi qu'avec les indices ENSO .

Par manque de temps, je n'ai malheureusement pas pu conclure cette analyse, cependant, j'ai calculé les moyennes mensuelles des débits pour chaque année qui sont les suivants :

mois	1999	2000	2001	2002	2003
1		0.162	0.15	0.193	0.193
2		0.162	0.178	0.193	
3		0.163	0.163	0.196	0.148
4			0.158		
5		0.191	0.162		
6		0.256	0.13		
7		0.19	0.137		
8		0.308	0.169		
9		0.214	0.126		
10		0.246	0.16		
11	0.142	0.186	0.183		
12	0.175	0.213	0.254		

Tableau 4.1.5 Débits moyens mensuels en m³/s à la station Humboldt.

6 CONCLUSION GENERALE

S'il fallait faire un bilan de ce travail qui m'a fait découvrir plusieurs aspects de l'hydrologie glaciaire, je pourrais regrouper mes résultats et mes apports en deux parties :

1) Techniques hydrométriques, dont le but principal est de parvenir aux débits :

- Participation à la réalisation des premiers jaugeages chimiques du programme GREATICE en Equateur sur la station Los Crespos.
- Réalisation de jaugeages volumétriques et au moulinet aux stations 15, Crespos et aa.
- Elaboration de courbes de tarage par ajustement d'équations hydrauliques théoriques aux jaugeages réalisés sur les stations Crespos et Humboldt, et extrapolation de ces courbes.
- Dépouillement critique et calcul de débits à partir de limnigrammes de la station Humboldt.

2) Analyse et interprétation des données.

- ❖ L'analyse des facteurs météorologiques responsables des crues de la station 15 a mis en évidence de manière claire l'effet et l'imbrication des multiples facteurs responsables de la fusion du glacier.

Comme on s'y attendait, un albédo faible, des températures élevées et des vents faibles engendrent une fusion plus importante. Paradoxalement, des précipitations abondantes ne provoquent pas de fortes crues. Ceci s'explique par le fait qu'elles surviennent sous forme de neige quand la température s'est abaissée. Cette neige, plus blanche, augmente l'albédo et la quantité d'énergie réfléchiée par le glacier, ce qui a pour effet de bloquer la fusion.

Ce n'est qu'au bout de plusieurs jours de précipitations que l'albédo diminue à nouveau, provoquant une augmentation de la fusion (ce qui est visible dans les figures comparatives 1 et 2 du chapitre 2.3).

Les forts vents observés en août bloquent la fonte en augmentant la sublimation au détriment de la fusion.

Notre analyse a conduit à une typologie cohérente des crues et de leurs facteurs explicatifs, qui servira de base à une modélisation ultérieure de la fonte du glacier.

- ❖ L'analyse des débits et la séparation des crues glaciaires à la station Humboldt, où elles représentent 42 % des valeurs écoulées alors que le glacier ne couvre que 17 % du bassin montre que :

- Les glaciers produisent un écoulement par unité de surface largement supérieur aux zones non englacées.

Ceci est à rapprocher du fait que la neige ou la pluie qui précipite sur la surface d'un glacier se retrouvera tôt ou tard dans le torrent glaciaire (mis à part la sublimation et des infiltrations éventuelles sous le glacier), alors qu'une proportion plus importante des précipitations sur les zones sablo-limoneuses des moraines ou de végétation, sera stockée près de la surface et reprise par l'évapotranspiration.

- La variabilité de la part glaciaire-non glaciaire d'un mois à l'autre ou d'une saison à l'autre est importante et peut être reliée à des paramètres climatiques globaux comme la SOI ou d'autres indices liés à l'ENSO.

SOMMAIRE DES ANNEXES

ANNEXE 1 : Localisation de la zone d'étude

ANNEXE 2 : Photos des Stations limnimétriques étudiées : station 15, Crespos, Humboldt et aa.

ANNEXE 3 : Calendrier des sorties de terrain

ANNEXE 4 : Jaugeages au sel :

- 1) Courbes de restitution du traceur
- 2) Courbe d'étalonnage : concentration = f(conductivité)
- 3) Calcul des débits

ANNEXE 5 : Jaugeages par exploration du champ de vitesse

- 1) Théorie
- 2) Dépouillage des jaugeages au moulinet et volumétriques

ANNEXE 6 : Traitement des données brutes à la Humboldt

- 1) Moyennes de pluies mensuelles à la station Humboldt,
- 2) Données obtenues entre 1999 et 2003

ANNEXE 2 :
PHOTOS DES STATIONS LIMNIMÉTRIQUES ETUDIÉES



Prises de pression
du piezometre et du Nimbus

Station 15



Station Los Crespos
Deversoir trapezoidal



Puits

Canal

Station Humboldt



amenagee que par une echelle
limnimetrique,
puis par un limnigraphe

Station aa

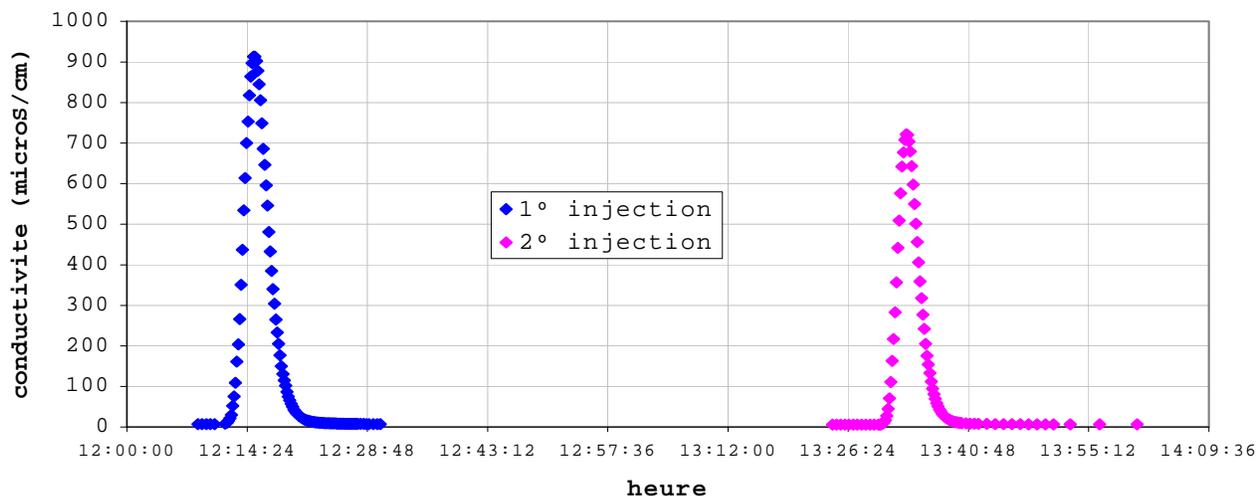
ANNEXE 3 :
CALENDRIER DES SORTIES DE TERRAIN

date	Taches effectuées
1-3/09/04	Sortie de fin de mois : relevé des balises, de la pluviographie, isotopie, déchargement des photos automatiques et des données hydrologiques
08/09/04	Vérification des appareillages des stations limnimétriques 15, 15 alpha et 15 bêta
16/09/0	Vérification des appareillages des stations limnimétriques du bassin versant 15 et Humboldt. Mesure de points GPS au niveau du torrent aa
23/09/04	Vérification du bon fonctionnement du Nimbus à la 15
29/09/04	Sortie de fin de mois
15/10/04	Jaugeages à la station 15 Vérification du bon fonctionnement des Nimbus aux stations 15 alpha et 15 bêta, ainsi que vérification du fonctionnement de la station météorologique Campbell.
27-28-29/10/04	Campagne de jaugeages à la 15 couplée à la sortie de fin de mois, malheureusement, on n'a pu observer aucun débit dépassant les 20l/s.
12/11/04	Campagne de jaugeage à la 15, mais on n'a pu observer aucune crue

ANNEXE 4 :
JAUGEAGE AU SEL

1) Courbes de restitution du traceur

courbe de restitution du traceur
Conduct=f(temps)



2) Traitement des échantillons : Concentration = f(conductivité)

échantillons
réalisés

numero	concentration mg/l	conductivité ($\mu\text{S/cm}$)
1	217	478
2	280	598
T	0	7,1
4	40	107,1
5	501	1044
6	12	27,2
8	145	332
9	341	771
10	34	105,5

3) Calcul des débits (jaugeages au sel)

injection	1	2
heure	12 :01	12 :21
Masse pesée injectée	10.008	9.672
Conductivité initiale de l'eau($\mu\text{S/cm}$)	7.1	5.9

On constate que la conductivité initiale du torrent au moment de la première injection est de 1.2 microS/cm supérieure a celle de la deuxième, ce qui est normal car la crue a commence vers 12 :30. Cependant, afin d'appliquer la courbe d'étalonnage a la deuxième injection, j'ai corrigé les conductivités de 1.2 mS/cm.

$$Q=M/(\text{somme}(\text{deltaTi} \cdot \text{Ci}))$$

injection à 12:01

Hechelle = 0.21m

masse injectee = en kg 10,008 kg

injection à 13:21 en pleine crue

Hechelle=26.5

masse injectee en kg 9,672

heure	C(microS/cm)	C(mg/l)	deltat°Ci	heure	C(microS/cm)	Cmodifiée	C(mg/l)	deltat°Ci
12:08:30	7,1	0,00209		13:24:30	5,9	7,1	0,00209	
12:09:00	7,1	0,00209	0,0627	13:25:00	5,9	7,1	0,00209	0,0627
12:09:30	7,1	0,00209	0,0627	13:25:30	5,9	7,1	0,00209	0,0627
12:10:00	7,1	0,00209	0,0627	13:26:00	5,9	7,1	0,00209	0,0627
12:10:30	7,1	0,00209	0,0627	13:26:30	5,9	7,1	0,00209	0,0627
12:11:45	8,4	0,61036	45,777	13:27:00	5,9	7,1	0,00209	0,0627
12:12:00	10,8	1,73332	25,9998	13:27:30	5,9	7,1	0,00209	0,0627
12:12:10	15,3	3,83887	38,3887	13:28:00	5,9	7,1	0,00209	0,0627
12:12:20	21,7	6,83343	68,3343	13:28:30	5,9	7,1	0,00209	0,0627
12:12:30	30,1	10,76379	107,6379	13:29:00	5,9	7,1	0,00209	0,0627

12:12:40	52	21,0108	210,108	13:29:30	5,9	7,1	0,00209	0,0627
12:12:50	75,8	32,14682	321,4682	13:30:00	6	7,2	0,04888	1,4664
12:13:00	109,1	47,72789	477,2789	13:30:10	6,2	7,4	0,14246	1,4246
12:13:10	161,4	72,19906	721,9906	13:30:20	6,8	8	0,4232	4,232
12:13:20	204	92,1316	921,316	13:30:30	8,2	9,4	1,07826	10,7826
12:13:30	266	121,1414	1211,414	13:30:40	10,5	11,7	2,15443	21,5443
12:13:40	351	160,9129	1609,129	13:30:50	16,5	17,7	4,96183	49,6183
12:13:50	437	201,1523	2011,523	13:31:00	27,8	29	10,2491	102,491
12:14:00	534	246,5386	2465,386	13:31:10	45,2	46,4	18,39056	183,9056
12:14:10	614	283,9706	2839,706	13:31:20	71	72,2	30,46238	304,6238
12:14:20	700	324,21	3242,1	13:31:30	111,1	112,3	49,22517	492,2517
12:14:30	753	349,0087	3490,087	13:31:40	163,3	164,5	73,64955	736,4955
12:14:40	818	379,4222	3794,222	13:31:50	217	218,2	98,77578	987,7578
12:14:50	864	400,9456	4009,456	13:32:00	283	284,2	129,65718	1296,5718
12:15:00	897	416,3863	4163,863	13:32:10	357	358,2	164,28178	1642,8178
12:15:10	913	423,8727	4238,727	13:32:20	442	443,2	204,05328	2040,5328
12:15:20	913	423,8727	4238,727	13:32:30	509	510,2	235,40258	2354,0258
12:15:30	902	418,7258	4187,258	13:32:40	576	577,2	266,75188	2667,5188
12:15:40	878	407,4962	4074,962	13:32:50	642	643,2	297,63328	2976,3328
12:15:50	845	392,0555	3920,555	13:33:00	677	678,2	314,00978	3140,0978
12:16:00	806	373,8074	3738,074	13:33:10	708	709,2	328,51468	3285,1468
12:16:10	749	347,1371	3471,371	13:33:20	722	723,2	335,06528	3350,6528
12:16:20	686	317,6594	3176,594	13:33:30	720	721,2	334,12948	3341,2948
12:16:30	646	298,9434	2989,434	13:33:40	704	705,2	326,64308	3266,4308
12:16:40	596	275,5484	2755,484	13:33:50	679	680,2	314,94558	3149,4558
12:16:50	546	252,1534	2521,534	13:34:00	643	644,2	298,10118	2981,0118
12:17:00	481	221,7399	2217,399	13:34:10	598	599,2	277,04568	2770,4568
12:17:10	433	199,2807	1992,807	13:34:20	550	551,2	254,58648	2545,8648
12:17:20	385	176,8215	1768,215	13:34:30	501	502,2	231,65938	2316,5938
12:17:30	340	155,766	1557,66	13:34:40	456	457,2	210,60388	2106,0388
12:17:40	304	138,9216	1389,216	13:34:50	406	407,2	187,20888	1872,0888
12:17:50	265	120,6735	1206,735	13:35:00	359	360,2	165,21758	1652,1758
12:18:00	233	105,7007	1057,007	13:35:10	318	319,2	146,03368	1460,3368
12:18:10	205	92,5995	925,995	13:35:20	277	278,2	126,84978	1268,4978
12:18:20	177,1	79,54509	795,4509	13:35:30	242	243,2	110,47328	1104,7328
12:18:30	150,1	66,91179	669,1179	13:35:40	205	206,2	93,16098	931,6098
12:18:40	130,5	57,74095	577,4095	13:35:50	175,6	176,8	79,40472	794,0472
12:18:50	115,3	50,62887	506,2887	13:36:00	153,8	155	69,2045	692,045
12:19:00	102	44,4058	444,058	13:36:10	132,9	134,1	59,42539	594,2539
12:19:10	87,2	37,48088	374,8088	13:36:20	112	113,2	49,64628	496,4628
12:19:20	74,7	31,63213	316,3213	13:36:30	95	96,2	41,69198	416,9198
12:19:30	65,9	27,51461	275,1461	13:36:40	80,8	82	35,0478	350,478
12:19:40	56,8	23,25672	232,5672	13:36:50	69,8	71	29,9009	299,009
12:19:50	49,7	19,93463	199,3463	13:37:00	59	60,2	24,84758	248,4758
12:20:00	42,7	16,65933	166,5933	13:37:10	51,1	52,3	21,15117	211,5117
12:20:10	38,1	14,50699	145,0699	13:37:20	43,2	44,4	17,45476	174,5476
12:20:20	33,3	12,26107	122,6107	13:37:30	37,6	38,8	14,83452	148,3452
12:20:30	30,7	11,04453	110,4453	13:37:40	32,1	33,3	12,26107	122,6107
12:20:40	27,1	9,36009	93,6009	13:37:50	28,2	29,4	10,43626	104,3626
12:20:50	23,8	7,81602	78,1602	13:38:00	25,2	26,4	9,03256	90,3256
12:21:00	21,9	6,92701	69,2701	13:38:10	22	23,2	7,53528	75,3528
12:21:10	19,9	5,99121	59,9121	13:38:20	19,9	21,1	6,55269	65,5269
12:21:20	18,2	5,19578	51,9578	13:38:30	17,8	19	5,5701	55,701
12:21:30	16,8	4,54072	45,4072	13:38:40	16,1	17,3	4,77467	47,7467
12:21:40	15,8	4,07282	40,7282	13:38:50	14,6	15,8	4,07282	40,7282
12:21:50	14,9	3,65171	36,5171	13:39:00	13,5	14,7	3,55813	35,5813
12:22:00	14	3,2306	32,306	13:39:10	12,7	13,9	3,18381	31,8381
12:22:10	13,3	2,90307	29,0307	13:39:20	11,7	12,9	2,71591	27,1591
12:22:20	12,7	2,62233	26,2233	13:39:30	11,2	12,4	2,48196	24,8196
12:22:30	12,1	2,34159	23,4159	13:39:40	10,7	11,9	2,24801	22,4801
12:22:40	11,4	2,01406	20,1406	13:39:50	10,2	11,4	2,01406	20,1406
12:22:50	11,2	1,92048	19,2048	13:40:00	9,8	11	1,8269	18,269
12:23:00	10,9	1,78011	17,8011	13:40:30	9	10,2	1,45258	14,5258
12:23:10	10,5	1,59295	15,9295	13:41:00	8,5	9,7	1,21863	12,1863
12:23:20	10,2	1,45258	14,5258	13:41:30	8,2	9,4	1,07826	10,7826
12:23:30	10	1,359	13,59	13:42:00	8	9,2	0,98468	9,8468
12:23:40	9,8	1,26542	12,6542	13:43:00	7,7	8,9	0,84431	8,4431
12:23:50	9,6	1,17184	11,7184	13:44:00	7,4	8,6	0,70394	7,0394
12:24:00	9,4	1,07826	10,7826	13:45:00	7,2	8,4	0,61036	6,1036

12:24:10	9,3	1,03147	10,3147	13:46:00	7	8,2	0,51678	31,0068
12:24:20	9,1	0,93789	9,3789	13:47:00	6,9	8,1	0,46999	28,1994
12:24:30	9	0,8911	8,911	13:48:00	6,7	7,9	0,37641	22,5846
12:24:40	8,9	0,84431	8,4431	13:49:00	6,7	7,9	0,37641	22,5846
12:24:50	8,7	0,75073	7,5073	13:50:00	6,6	7,8	0,32962	19,7772
12:25:00	8,7	0,75073	7,5073	13:51:00	6,5	7,7	0,28283	16,9698
12:25:10	8,6	0,70394	7,0394	13:53:00	6,5	7,7	0,28283	33,9396
12:25:20	8,5	0,65715	6,5715	13:56:30	6,4	7,6	0,23604	49,5684
12:25:30	8,4	0,61036	6,1036	14:01:00	6,3	7,5	0,18925	51,0975
12:25:40	8,3	0,56357	5,6357				somme	62173,5143
12:25:50	8,2	0,51678	5,1678				Q en l/s	155,5646341
12:26:00	8,1	0,46999	4,6999					
12:26:10	8	0,4232	4,232					
12:26:20	8	0,4232	4,232					
12:26:30	7,9	0,37641	3,7641					
12:26:40	7,9	0,37641	3,7641					
12:26:50	7,8	0,32962	3,2962					
12:27:00	7,8	0,32962	3,2962					
12:27:10	7,6	0,23604	2,3604					
12:27:20	7,7	0,28283	2,8283					
12:27:30	7,7	0,28283	2,8283					
12:27:40	7,6	0,23604	2,3604					
12:28:00	7,5	0,18925	3,785					
12:28:20	7,5	0,18925	3,785					
12:28:40	7,4	0,14246	2,8492					
12:29:00	7,3	0,09567	1,9134					
12:29:30	7,2	0,04888	1,4664					
12:30:00	7,2	0,04888	1,4664					
12:30:20	7,1	0,00209	0,0418					
		somme	88996,85					
		Q= M/(somme(deltati*Ci)	Q					112,45

ANNEXE 5 : JAUGEAGES PAR EXPLORATION DU CHAMP DE VITESSE

1) Théorie

La vitesse d'écoulement n'est jamais uniforme dans la section transversale d'un cours d'eau, même aménagée. Le principe de cette méthode consiste donc à calculer le débit à partir du champ de vitesse déterminé dans une section transversale du cours d'eau (en un certain nombre de points, situés le long de verticales judicieusement réparties sur la largeur du cours d'eau). Parallèlement à cette exploration du champ de vitesse, on relève le profil en travers du cours d'eau en mesurant sa largeur et en effectuant des mesures de profondeur. Le débit Q [m^3/s] s'écoulant dans une section d'écoulement S [m^2] d'une rivière peut être défini à partir de la vitesse moyenne V [m/s] perpendiculaire à cette section par la relation : $Q = V * S$.

La vitesse moyenne de l'eau a été déterminé par moulinet.

Le jaugeage au moulinet

Le moulinet hydrométrique (cf. Fig) permet de mesurer la vitesse ponctuelle de l'écoulement. Le nombre de mesures sur une verticale est choisi de façon à obtenir une bonne description de la répartition des vitesses sur cette verticale. De manière générale, on fera entre 1, 3 ou 5 mesures suivant la profondeur du lit et la régularité de l'écoulement.

			0,144512	0			
			0,18064	0,11			
0,2	83	30	0,19004	0,05	0,019004	0,0028506	
			0,152032	0			
			0,19004	0,11			
0,05	20	30	0,0716	0,05	0,00669518	0,000267807	RD
	77	30	0,17876	0,09			
			0,05728	0			
			0,17876	0,11			

somme= Qtot 0,01749382 m3/s

moulinet EMAAP (en haut)	10:10	
Hechelle=	0,08	m3/s
Q=	0,0148	m3/s
Moulinet EMAAP (en bas)	13:00	
Hechelle	0,25	m3/s
Q=	0,1579	m3/s

volumetrique 10:04

Hechelle en m 0,08

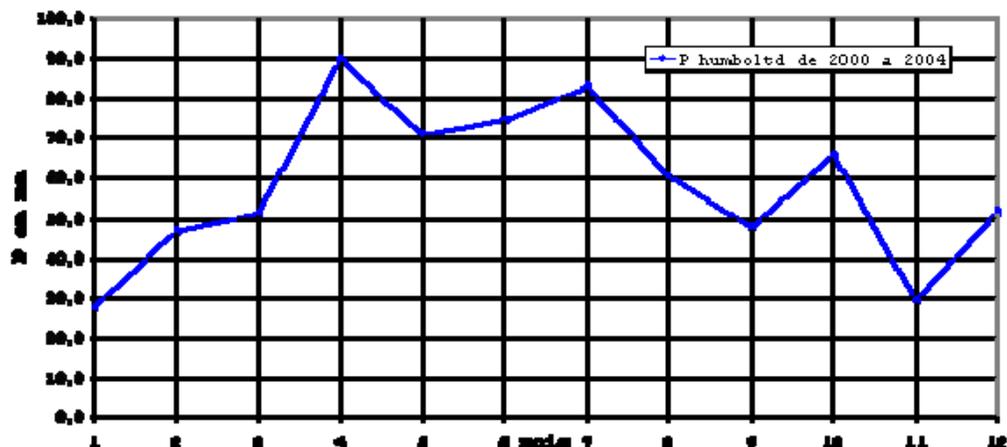
Volume (l)	temps (s)	Qfuite	Q (l/s)
50	3	1	17,6666667
32	2,2	1	15,5454545
48	3,26	1	15,7239264

moyenne =Q 0,01631 m3/s

ANNEXE 6 : TRAITEMENT DES HAUTEURS D'EAU BRUTES A LA HUMBOLDT

1) Précipitations moyennes mensuelles à la station Humboldt

**Précipitations moyennes mensuelles de la station Humboldt
(données utilisées :de 2000 à 2004)**



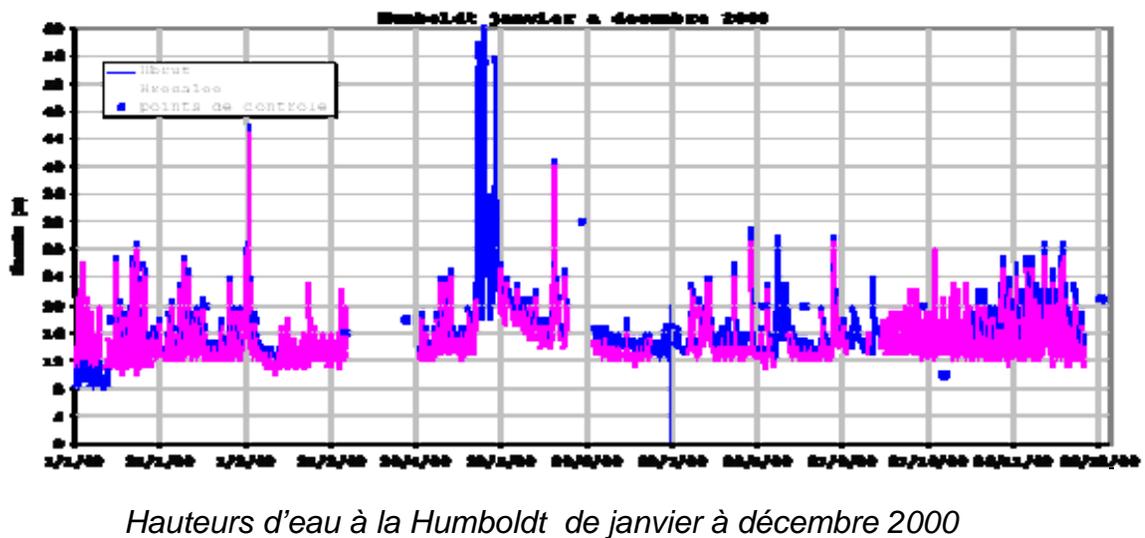
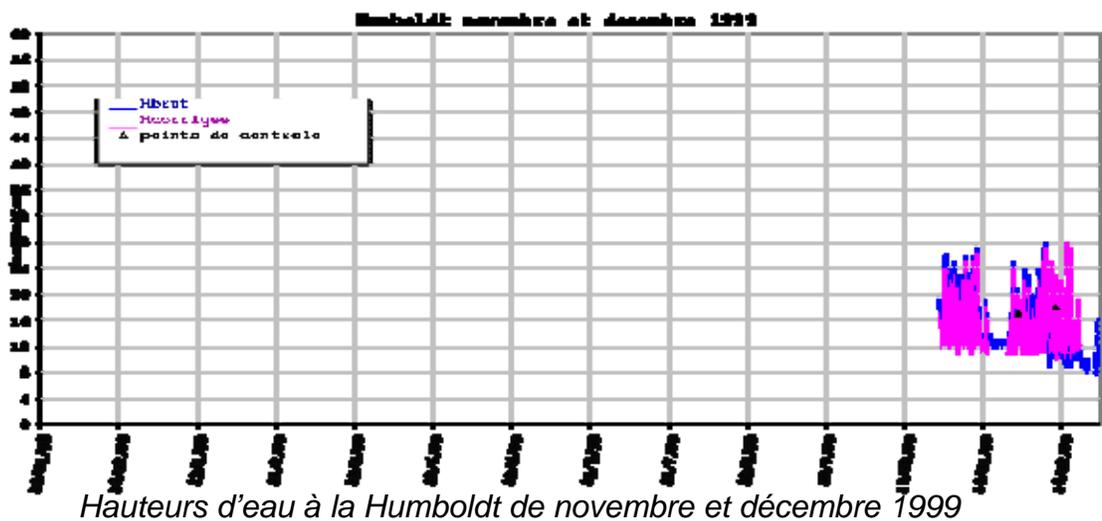
On constate qu'en novembre et janvier, les précipitations sont les plus basses. Donc, pour ce mois ci, si les hauteurs brutes sont plus basses que pour

le reste des mois, on peut considérer que c'est une variation naturelle. De même pour les mois d'avril et juillet, mais cette fois ci avec de fortes précipitations.

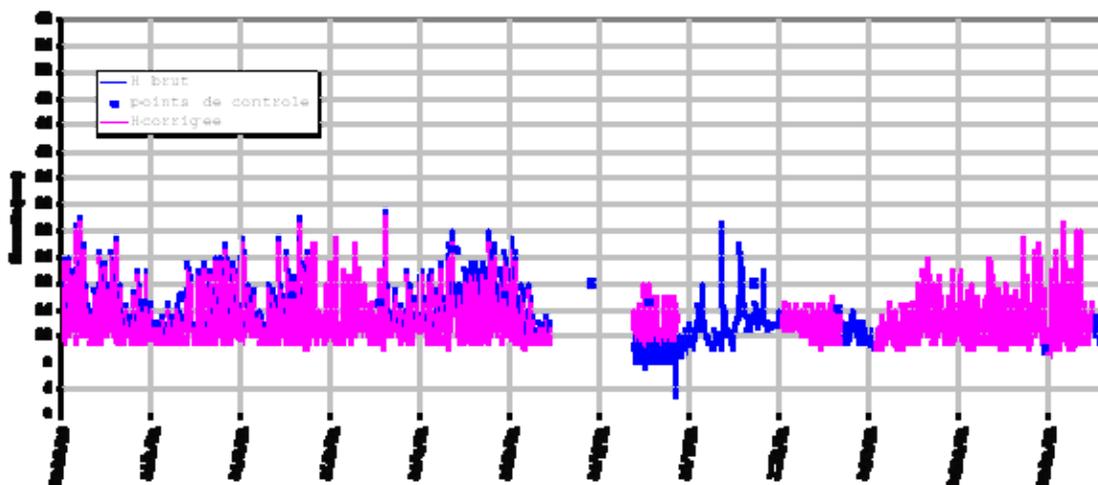
Par ailleurs, en me servant des compte rendus de l'EMAAP-Q, j'ai ajoutée à tous les graphiques des hauteurs les points de contrôle, c'est-à-dire les dates et heures auxquelles l'EMAAP-Q a visité la station et a marqué les hauteurs d'eau de l'échelles. Ces points m'ont permis de voir si certaines variations étaient bien dues à l'intervention de l'homme.

2) Données obtenues entre 1999 et 2003

Les données brutes sont en bleu, et les corrigées en rose.

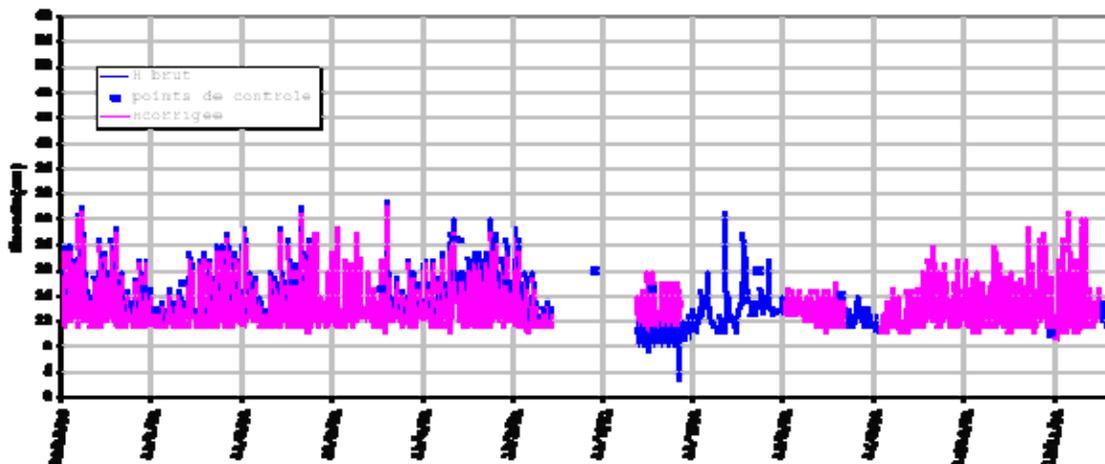


Humboldt 28/12/00 au 10/12/01

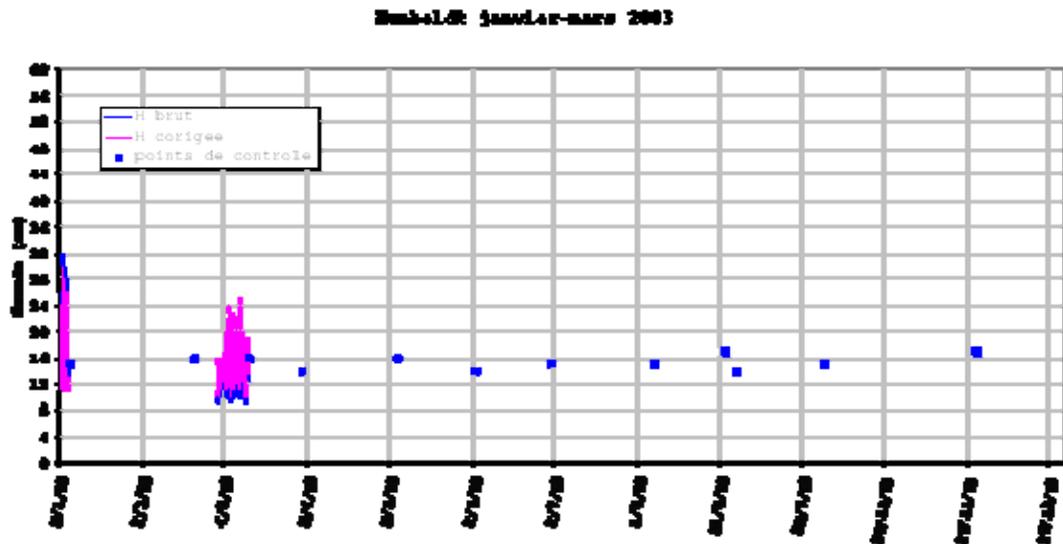


Hauteurs d'eau à la Humboldt du 28/12/00 au 10/12/01

Humboldt 20/12/01 au 20/12/02



Hauteurs d'eau à la Humboldt du 20/12/01 au 20/12/02



Hauteurs d'eau à la Humboldt de janvier et mars 2003

ANNEXE 8 :

CALCUL DES POURCENTAGES APPORT GLACIER – APPORT PARAMO POUR LA HUMBOLDT

Exemple d'obtention des pourcentages glaciaire et paramo a partir des hydrogrammes annuels.

J'ai divisé l'année en plusieurs périodes valables, et pour chacune, j'ai calculée son volume total et son volume de base en utilisant l'intégration par méthodes des trapèzes. Voici un exemple de début de calcul pour l'année 2000

date heure	diff du temps en fraction de s	Q en m3/s	trapezes	calcul des %
01/01/2000 2:15	900	0,11	109,8454167	volume tot en m3
01/01/2000 2:30	900	0,13	109,8454166	du 1/1 au 4/4 1,36E+06
01/01/2000 2:45	48600	0,11	8735,033137	du 1/5 au 21/6 9,00E+05
01/01/2000 16:15	900	0,25	234,3855951	du 1/7 au 20/12 2,30E+06
01/01/2000 16:30	900	0,27		Vol tot 4,57E+06
01/01/2000 16:45	900	0,30	298,7135333	
01/01/2000 17:00	1800	0,36	623,8214432	vol paramo en m3
01/01/2000 17:30	1800	0,33	569,9456218	seuil en m3/s 1,12E-01
01/01/2000 18:00	900	0,30	259,1273781	du 1/1 au 4/4 9,22E+05
01/01/2000 18:15	3600	0,27	937,5423801	du 1/5 au 20/5 1,97E+05
01/01/2000 19:15	1800	0,25	421,5187607	du 21/5 au 28/5 7,77E+04
01/01/2000 19:45	900	0,22	188,2614972	du 29/5 au 21/6 2,32E+05
01/01/2000 20:00	1800	0,20	333,8113393	du 1/7 au 20/7 1,93E+05
01/01/2000 20:30	2700	0,17	440,1201777	du 21/7 au 2/8 1,24E+05
01/01/2000 21:15	900	0,15	146,706726	du 3/8 au 2/9 2,99E+05
01/01/2000 21:30	900	0,17	146,7067259	du 3/9 au 7/9 4,42E+04
01/01/2000 21:45	900	0,15	146,7067259	du 8/9 au 28/9 2,03E+05
01/01/2000 22:00	1800	0,17	293,4134519	du 29/9 au 4/10 5,55E+04
01/01/2000 22:30	5400	0,15	766,0846386	du 5/10 au 6/10 9,72E+03
02/01/2000 0:00	30600	0,13	3734,744167	du 7/10 au 9/10 2,68E+04
02/01/2000 8:30	900	0,11	109,8454166	du 10/10 au 20/12 6,95E+05
02/01/2000 8:45	7200	0,13	878,7633333	
02/01/2000 10:45	15300	0,11	2367,453824	vol tot 3,08E+06
02/01/2000 15:00	2700	0,20	599,3825191	
02/01/2000 15:45	900	0,25	234,385595	vol GL en m3 1,49E+06
02/01/2000 16:00	900	0,27	259,1273781	
02/01/2000 16:15	1800	0,30	569,945622	Pourcentages
02/01/2000 16:45	1800	0,33	623,8214432	GL % 32,6
02/01/2000 17:15	2700	0,36	1019,791809	PARAMO % 67,4
.....	
.....	

BIBLIOGRAPHIE

Carlier., Hydraulique générale et appliquée.

Sicart, J.E. , Contribution à 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 de Paris VI, 325 pp., 2002.

Wagnon, P., Analyse du bilan d'énergie d'un glacier tropical, application à la relation glacier-climat, thèse de doctorat, Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'environnement, Université Joseph Fourier, Grenoble I, 199 pp., 1999.

Brière, J., 2004; Modélisation des écoulements issus de la fonte du glacier 15 de l'Antizana; DEA Sciences de la Terre et de l'Environnement; Université Paul Sabatier, Toulouse; IRD, 33p

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

Favier V. – 2001 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 – IRD

Francou, B., Vuille, M., Favier, V. & Cáceres, B., 2004: New evidences of ENSO impacts on glaciers at low latitude : Antizana 15, Andes of Ecuador, 0°28' (in press). Journal of Geophysical Research, 109, doi: 10.1029/2003JD004484.

Francou, B., Pouyaud, B. 2004; (avec la collaboration de 13 autres auteurs, 2004 : Método de observación de glaciares en los Andes tropicales. Mediciones de terreno y procesamiento de datos. Document GREAT ICE en version électronique (CD-WEB): 243 p.

Pradero E., 2003 - Etude sur le transfert de l'eau du glacier 15 de l'Antizana, Equateur - Travail de diplôme, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne; IRD, 70p

Informes anuales de los glaciares del Antisana:

Cáceres, B., Maisincho, L., Taupin J.D.; Favier, V., Tachker, P., Chazarin, J.P., Francou, B., Cadier, E., & Cruz, F. 2003 : Glaciar 15 del Antizana (Ecuador). Balance de masa, topografía, meteorología, hidrología y balance de energía. Año 2002. Rapport 5, IRD, INAMHI, EMAAP-Quito,: 100 p. (avec une version CD).