

Clément GANINO
Magistère des sciences de la Terre et de l'Univers 2^{ème} année

Rapport de Stage d'été réalisé dans l'unité Great Ice de l'IRD sous la direction d'Eric Cadier

Juin – Juillet – Août 2003

Hydrologie des glaciers 15 (et Crespo) de l'Antisana (Equateur)



Résumé :

L'étude des glaciers tropicaux permet de mieux gérer les milieux d'altitude et leur évolution dans un contexte de changement climatique, et de prévoir l'avenir des ressources en eau qui leur sont liées.

On étudie les déplacements et la variation de la géométrie des glaciers à l'aide de balises, et de la topographie glacier. Des mesures d'accumulation dans la partie haute permettent de connaître la masse de neige qui alimente le glacier. Des mesures climatologiques précises permettent de connaître les flux d'énergie et de vapeur, et donc l'évaporation et la sublimation sur le glacier. Le débit du ruisseau constitue le dernier terme du bilan et doit permettre de mieux connaître ou d'améliorer la précision sur les autres termes que nous venons de citer

Des résultats fiables ne sont possibles que dans le cadre d'un glacier idéal, sans fuite, et avec une évaporation/sublimation limitée.

C'est au niveau de la moraine qu'un important problème hydrologique se pose, à savoir : y a-t'il des fuites ou la masse est elle conservée ?

Ce problème est d'autant plus important qu'un système de cryokarst dans les glaces mortes incluses dans la moraine frontale du glacier, pourrait peut être provoquer des infiltrations indésirables vers d'autres passages que la station 15.

Cette étude portera ainsi sur les phénomènes se produisant dans la moraine. Nous utiliserons des essais de sel, d'une part pour tracer les eaux glaciaires jusqu'à la station 15, d'autre part pour mieux connaître un petit lac morainique perché (appelé « lagune ») constituant un réservoir entre les glaciers et la station 15.

Plan

1) Présentation succincte

- a) **L'IRD**
- b) **Great Ice**
- c) **Contre-partie équatorienne / Collaboration**
- d) **Le terrain**

2) L'Antisana

- a) **Présentation**
- b) **Le climat tropical**
- c) **Le glacier 15**
- d) **Problèmes hydrologiques**

3) Les essais de sel

- a) **Intérêt / Principe**
- b) **Résultats**

4) Etude de la lagune

- a) **Présentation**
- b) **Bathymétrie**
- c) **Essai de sel**

Conclusion

Bibliographie

Remerciements

1) Présentation succincte

a) L'IRD

L'Institut de recherche pour le développement (IRD) a pour mission de développer des projets scientifiques centrés sur les relations entre l'homme et son environnement dans la zone intertropicale ; cette mission comprend :

- Des recherches sur des thèmes spécifiques des pays du sud.
- Le soutien et la formation des équipes de recherche des pays du sud.
- De la recherche favorisant les projets de développement.

b) L'UR Great Ice

L'unité de recherche (UR) « Great Ice » (Glaciers et ressources en eau dans les Andes tropicales. Indicateurs climatiques et environnementaux) analyse précisément la dynamique hydrologique dans les montagnes tropicales sous l'influence des fluctuations climatiques actuelles et passées. Cet objectif impose l'utilisation de modèles de fonctionnement des systèmes hydrologiques d'altitude.

Les connaissances sur la dynamique des glaciers tropicaux et de leur environnement sont confrontées aux enregistrements climatiques (couches profondes de glace témoins des climats passés) que contiennent certains d'entre eux.

Ces recherches permettent de mieux gérer les milieux d'altitude et leur évolution dans un contexte de changement climatique, apparemment accéléré, et de prévoir l'avenir des ressources en eau qui leur sont liées.

Trois questions définissent les axes principaux de recherche :

1. Quels sont les indicateurs climatiques les plus pertinents pour caractériser et comprendre l'impact de la variabilité du climat sur le cycle hydrologique ?
2. Quels sont les processus hydrologiques, les relations entre climat et glacier, qui expliquent les fluctuations actuelles et anciennes des glaciers tropicaux ?
3. Quelle est la dynamique de l'eau dans les différents compartiments du cycle hydrologique des bassins versants d'altitude, en relation avec le climat ?

c) Les partenaires équatoriens / Collaborations

En Equateur, l'IRD travaille en partenariat avec un établissement d'enseignement supérieur et de recherche (Ecole Polytechnique Nationale à Quito), avec l'Institut National de

Météorologie et d'Hydrologie (Inamhi) et avec la Compagnie Municipale d'alimentation de Quito en eau potable (Emaap-Q).

Le laboratoire est situé au sein même de l'Inamhi.

d) Le terrain

Sur le terrain, l'Antisana (ou Antizana) est le volcan qui a été choisi par Great Ice comme laboratoire naturel : Les glaciers 15 α et β ont été équipés, et font l'objet de mesures depuis plusieurs années. L'Antisana a été choisi pour sa facilité d'accès (2h30 de Quito), et par l'intérêt de partenaires comme l'Emaap-Q qui apportent un soutien logistique (construction d'une route en vue d'aménagements - voir présentation du site), et qui offrent un maximum de garanties pour une pérennisation des études.

L'eau en tant que ressource est produite en abondance par la fonte glaciaire lorsque le climat est chaud et sec. Dans des pays très secs, comme la Bolivie, l'eau est presque exclusivement glaciaire. Dans le cas de l'Antisana, 106 millions de dollars ont été investis récemment dans l'acheminement d'eau jusqu'au secteur sud de Quito pour alimenter 500 000 personnes... L'EMAAP est donc très intéressé par les études menées par Great Ice, et s'investi dans certaines parties du programme (composante hydrologique).

Les études hydrologiques sur l'Antisana font l'objet d'aménagements importants qui permettront de suivre avec toujours plus de précision les écoulements et le fonctionnement des glaciers 15 (α et β), et du glacier « Crespo » plus intéressant pour l'EMAAP.

1) L'Antisana

a) Présentation

L'Antisana est un volcan actif, au sud-est de Quito, au coeur de la Sierra. C'est certainement le glacier le mieux étudié aussi proche de l'équateur géographique (0°28'30" S). Le glacier étudié est identifié par le numéro 15 selon la classification proposée par Hastenrath (1981) et se situe entre 4800m et 5757 mètres d'altitude.

L'orientation nord-ouest de ce glacier le situe dans une zone protégée des grands vents d'Est (venant de l'Amazonie) dominant largement sur l'Antisana.

b) Le climat tropical

En tant que « cercles » parallèles et de part et d'autre de l'équateur, les tropiques sont faciles à définir. Cependant, les définitions des climats et des régimes glaciologiques varient selon les auteurs. Une bonne compilation est faite par Kaser :

- « The tropical climate is characterized by a homogeneous atmosphere without frontal activity, a lack of thermal seasonality, and by one or two differently pronounced precipitation seasons. » (Kaser, 1999)

- « From a glaciological point of view, the delimitation of the tropics must be within the astronomical tropics (radiative delimitation), within the area where daily temperature variation exceeds the annual temperature variation (thermal delimitation), and within the oscillation area of the Inter Tropical Convergence Zone (hygric delimitation). » (Kaser, 1999)

Kaser se sert de ces définitions pour établir une carte des glaciers « tropicaux » : on n'en trouve qu'en Irian Jaya (Indonesie New Guinea), sur le Mount Kenya, le Kibo (Kilimanjaro) et le Rwenzori en Afrique, mais surtout en Amérique du Sud (Entre le Venezuela et la Bolivie d'après Kaser).

Les glaciers des hautes montagnes tropicales couvrent environ 2500 km², soient 0.16 % des surfaces glacées du Monde. (Wagnon et al, 1999).

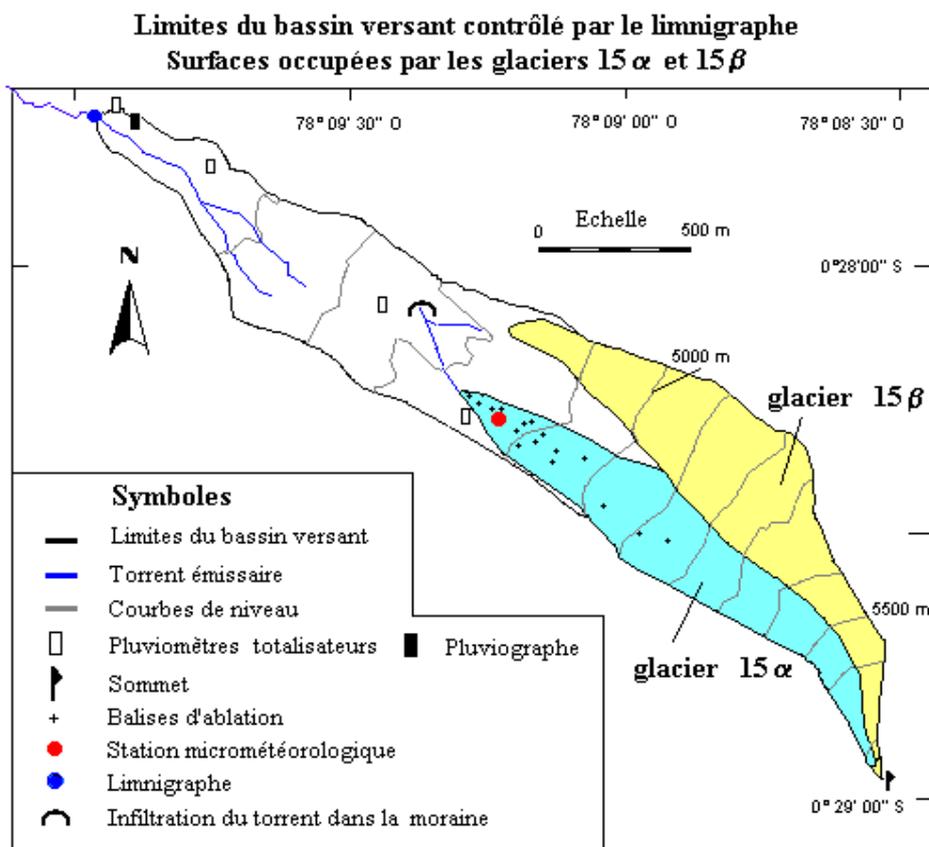
C'est également en Amérique du Sud que les glaciers sont les plus nombreux, et ont les relations les plus proches avec les habitants. Ils y sont les mieux étudiés et connus.

c) Le glacier 15

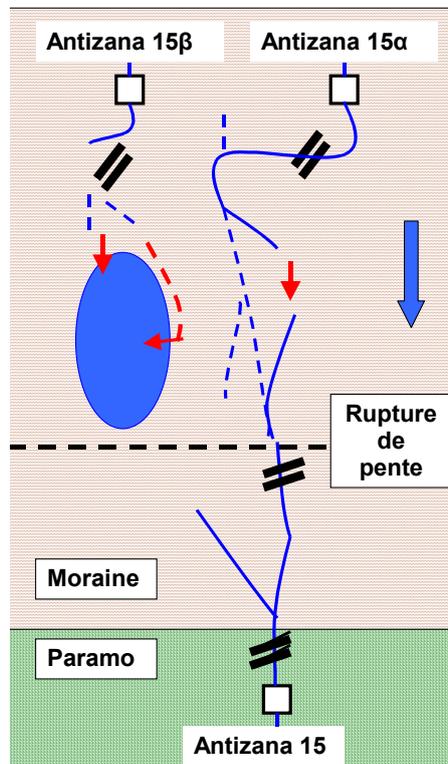
Le glacier 15 de l'Antizana, constitué de deux langues accolées (α et β) de même orientation.

Le réseau de mesures comprend :

- des balises sur le glacier (bilans mensuels d'accumulation/ablation et suivi des déplacement du glacier).
- des pluviomètres et de pluviographes (calcul de bilans mensuels d'accumulation).
- Deux stations météorologiques automatiques (Campbell et SAMA) : des mesures de température, humidité, vent (vitesse et direction) et rayonnement y sont effectuées (calcul du bilan d'énergie).
- Des stations hydrologiques



d) Problèmes hydrologiques



Les glaciers α et β donnent lieu à deux torrents, sur lesquels sont placées des stations limnimétriques (respectivement les stations α et β).

L'eau de fonte pénètre dans une moraine avant une rupture de pente. Elle serait ensuite collectée dans un torrent plus en aval sur lequel est placée une station hydrologique plus importante : la station 15. Cette dernière, améliorée d'année en année est la mieux équipée de toutes (meilleure accessibilité), et permet des mesures fiables de débit. Plusieurs problèmes d'hydrométrie sont survenus principalement dus à de très forts transports solides et à des dysfonctionnement des capteurs lors de forts gels.

Station	Date d'installation	Altitude (m)	Superficie du bassin versant (ha)	Proportion de glacier (%)
Antizana 15	déc-95	4550	137,6	55,2
Antizana 15 α	avr-02	4812	34,6	
Antizana 15 β	avr-02	4815	41,3	

Les zones non glaciaires du bassin versant étudié sont faites de dépôts morainiques et par du Páramo (espace situé entre les neiges permanentes et la forêt andine naturelle), sur des surfaces sensiblement égales.

Depuis l'installation de ce réseau de mesure, une importante base de données hydrologiques, glaciologiques et météorologiques a permis l'étude des relations entre la fonte du glacier et le climat.

On a mis ainsi en évidence l'influence sur la fonte du glacier de la température, mais aussi de l'albédo, et du vent.

L'intérêt des stations hydrologiques est évident : elles pourraient contribuer à caler le modèle de fonte du glacier.

Les débits mesurés en aval sont nécessairement liés à la fonte en amont, et par conséquent à l'énergie reçue par le glacier.

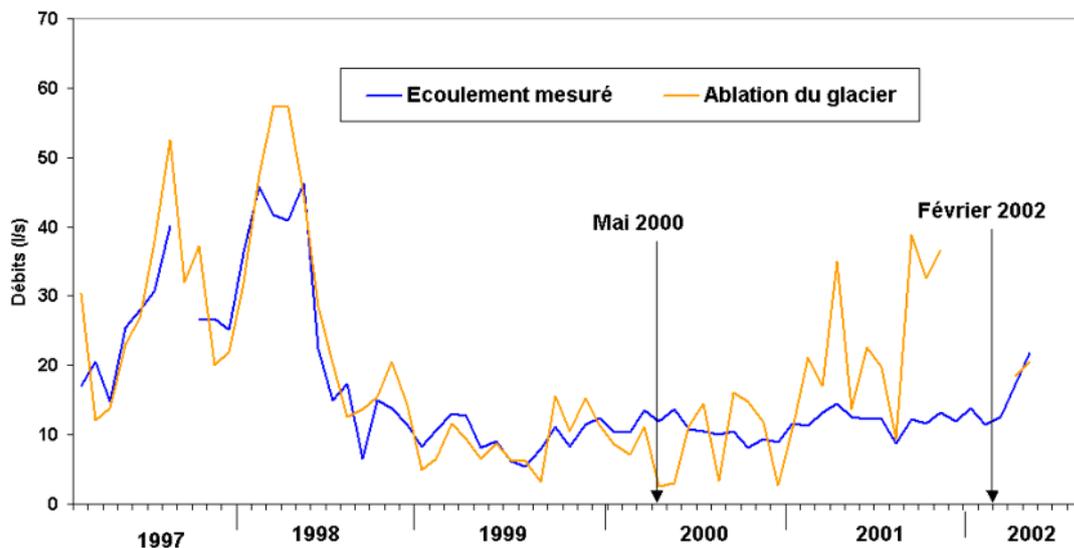
Ainsi, au bilan accumulation / ablation et au bilan d'énergie, on devrait pouvoir ajouter un bilan hydrologique, si toutefois le fonctionnement des stations était continu et permanent.

Un entretien permanent est nécessaire pour veiller au bon fonctionnement des stations, sans cesse comblées par les sédiments : les glaciers sont responsables de grandes érosions... plus encore lorsqu'ils reposent sur un « tas de cendres ».

Une première analyse des données hydrologiques récoltées sur le bassin versant du glacier 15, en relation avec les mesures du bilan d'énergie, a été effectuée par Vincent Favier en 2001.

Entre 1997 et 2002, des résultats plus ou moins satisfaisants ont pu être présentés : durant les années 1997-1998, la forte ablation mesurée (due au Niño), est bien visible au niveau de l'écoulement mesuré. Un coefficient de calage déterminé paraît changer avec le temps. En effet, la corrélation ablation / écoulement semble de moins en moins bonne jusqu'en 2002, où les résultats semblent différer de manière significative.

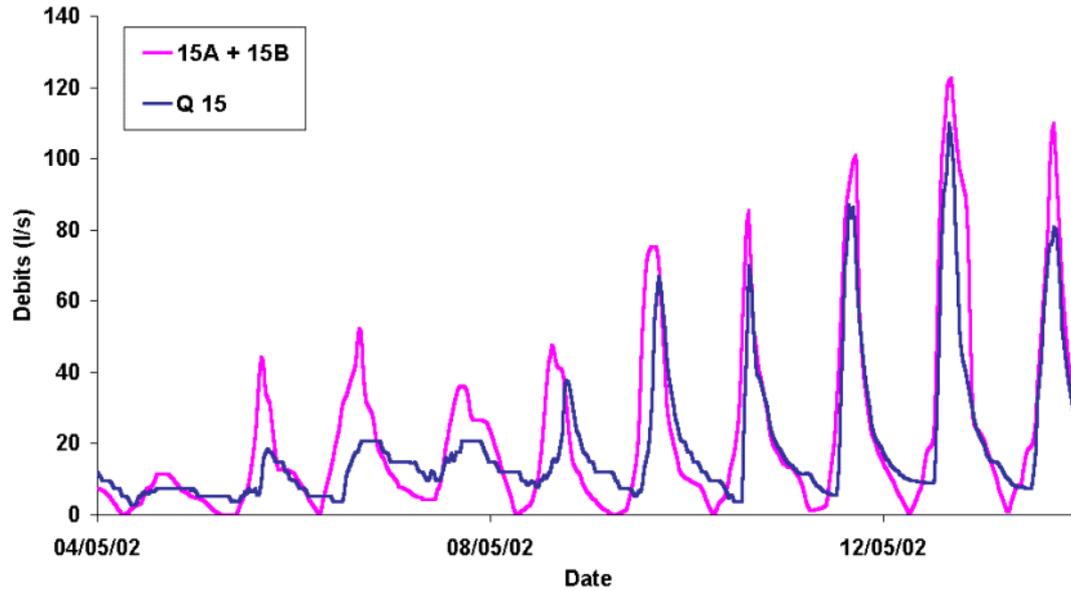
L'ablation calculée à partir des mesures glaciologiques est incohérente avec les volumes écoulés enregistrés à l'exutoire. On calcule en effet un déficit d'eau significatif en la station Antisana 15.



Comparaison des débits mesurés à la station 15 avec l'ablation du glacier entre 1997 et 2002.

C'est pour déterminer la cause d'une telle perte que deux stations hydrologiques ont été construites à l'exutoire de chaque langue glaciaire (avril 2002) : les stations Antisana 15 α et 15 β , pour pouvoir mesurer directement les volumes d'eau issus de la fonte glaciaire.

Les hydrogrammes résultants ont montrés que les volumes d'eau amont (15 α + 15 β) n'étaient probablement pas totalement restitués à l'exutoire du bassin versant, même si ces données sont à traiter avec précaution tant l'erreur de mesure est importante.



Comparaison de la somme des hydrogrammes amonts (stations 15 α et 15 β) avec l'hydrogramme de la station 15.

Ces observations posent beaucoup de questions sur les modes de transit de l'eau dans la moraine. Des pertes dans un système de cryokarst pourraient constituer une explication (Favier communication personnelle). Comprendre le fonctionnement de la moraine constitue une nécessité si l'on veut déterminer la lieu et importance des pertes d'eau.

2) Les essais de sel

Plus récemment, et afin de vérifier la conservation du débit entre $\alpha + \beta$ et la station 15, et pour préciser la fonction de transfert des essais de sel ont été réalisés (Vincent Favier, Estelle Praderio).

a) Interet / principe

Le sel de cuisine, NaCl, est un traceur bon marché, pratique et efficace pour plusieurs raisons : il est très soluble et conservé du fait de sa faible réactivité ; son adsorption peut être considérée comme nulle (le sodium et le chlore sont des ions à faible charge ; les forces de rétention ne sont donc pas importantes) ; sa restitution en aval est déterminée par simples mesures de conductivité de l'eau. L'injection d'une quantité connue de sel à l'amont de la moraine couplée à la mesure de conductivité en aval de la moraine (station 15) permet, par l'intermédiaire du débit de caractériser l'écoulement.

Une saumure est introduite en α , et la conductivité est mesurée en la station 15. Des courbes d'étalonnage permettent de juger de la concentration en sel. En intégrant vis à vis du temps, on retrouve la quantité de sel restituée :

La minéralisation est reliée linéairement à la conductivité de la solution :

$$C = K \cdot \gamma$$

où C est la minéralisation des eaux, K, le facteur de conductivité du sel dans l'eau du torrent, et γ la conductivité moyenne de l'eau entre t et t + Δt .

La masse $m_{[t, t+dt]}$ de sel passée au point de mesure entre les temps t et t + dt est donnée par la relation :

$$m_{t \rightarrow t+dt} = K \cdot \gamma \cdot Q \cdot dt$$

Avec Q le débit moyen entre t et t + dt.

Une correction «vis à vis de la température » est cependant nécessaire : la conductivité évolue linéairement avec la température :

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

La dépendance est généralement introduite avec $\alpha = 0.022 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ qui est la valeur classiquement attribuée aux eaux naturelles. Dans *Variations de la conductivité d'une eau en fonction de la température, et précision des mesures* (Bakalowicz, 1975) les variations de α , appelé coefficient de température, sont étudiées pour diverses solutions de minéralisations différentes : α est d'autant plus grand que la conductivité des eaux est faible. Dans le cas des eaux glaciaires étudiées, la conductivité est effectivement très faible. Des essais en laboratoire (mesures de la conductivité à différentes températures), nous ont montré à une dépendance du coefficient de température vis à vis de la conductivité. La correction de température est quelque chose de complexe.

Des jaugeages volumétriques précis ont été effectués en continu lors de chaque essai de sel.

La précision des mesures de débit est très importante : une sur-estimation ou une sous-estimation des débits conduiraient à une interprétation erronée des perturbations induites par la moraine.

En régime permanent, la restitution en sortie de la moraine correspondrait au transfert de l'impulsion. Dans le cas d'un débit variable ce signal va se superposer avec l'évolution du milieu : il est impossible de discerner la part des variations du signal de sortie - correspondant à la fonction de transfert de l'impulsion - de celles conséquentes de l'instabilité des débits amont.

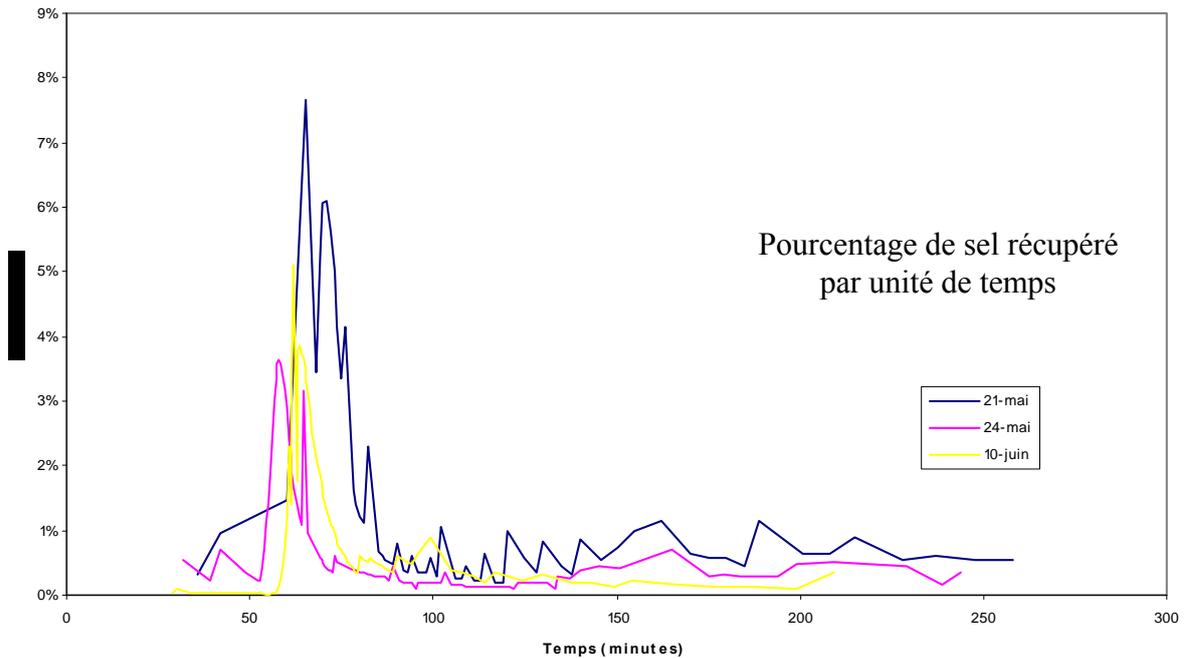
Nous nous plaçons donc dans un cas le plus proche possible d'un régime permanent. Dans notre cas, il faut réaliser l'injection juste avant le pic de débit (point de dérivée nulle) ou bien lors des débits minima nocturnes (débit à peu près constant) (Entrevue de E. Praderio avec M. Bakalowicz).

La masse de traceur restituée M_0 est estimée à partir l'équation suivante :

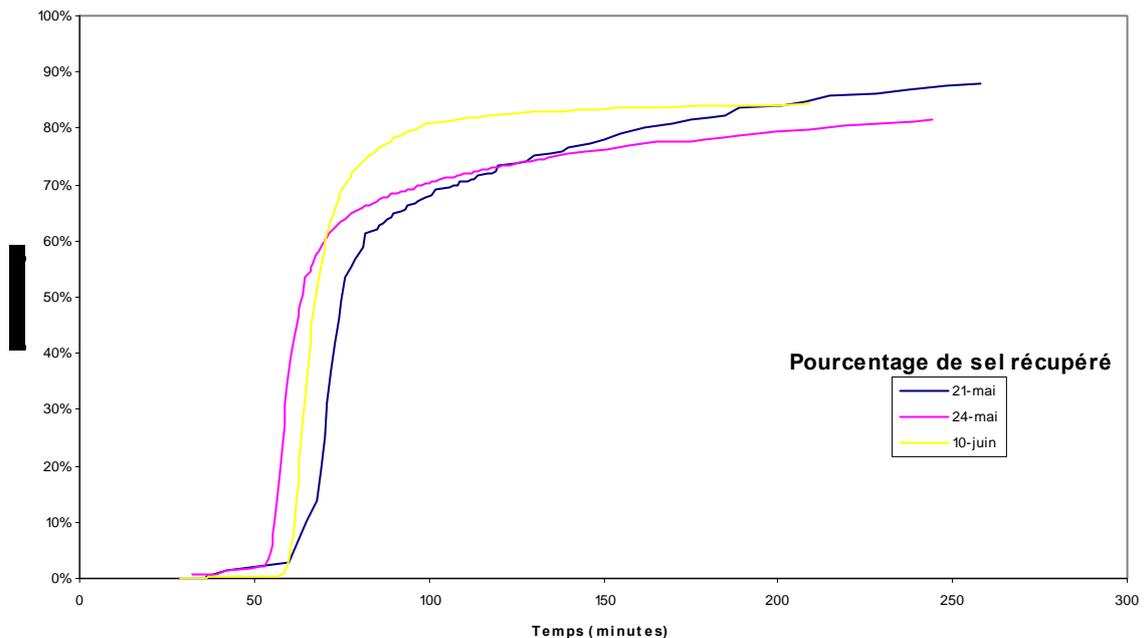
$$M_0 = \int_0^{\infty} C(t)Q(t)dt$$

avec C la concentration massique du traceur et Q le débit entre t et t+ Δt .

b) Résultats



Lors des trois essais de sel réalisés les 21 mai, 24 mai et 10 juin 2003, pris pour exemples dans cet exposé, la fonction de transfert est assez identique dans chacun des cas, avec une restitution en masse au bout de 70 minutes environ. Ces essais de sel ont été réalisés lors de fort débits et au heures de crue (Les crues glaciaires liées à l'ensoleillement quotidien ont une pseudo période de 24 heures, et le pic de crue est mesuré vers 16-17h).



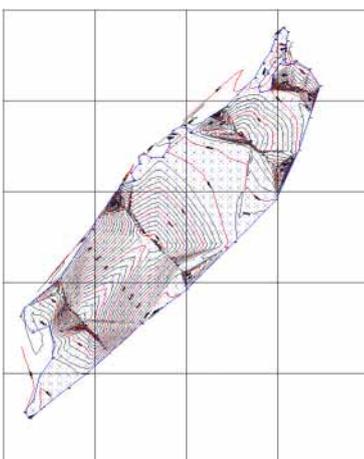
Le restitution est presque totale dans le cas de ces trois essais de sel, ce qui laisse penser qu'il n'y a aucune perte à travers la moraine. Cette conclusion est assez encourageante et crédibilise les interprétation des débits mesurés en la station 15.

3) Etude de la lagune

a) Présentation

Une lagune perturbe le système (cf figure 2). Elle est certainement responsable d'un stockage provisoire, et modifie certainement la fonction de transfert d' α et β vers la station 15. Ces modifications ne sont pas vraiment importantes pour des études de bilans à longue échelle de temps (mensuelle, annuelle), car la lagune peut être considérée comme une « boîte noire » restituant toute l'eau qu'il y entre (si bien sûr il n'y a aucune fuite). Cette lagune est apparue de façon assez récente, probablement à la suite d'un affaissement lié à la fonte des glaces mortes contenues dans la moraine, reste mal connue.

b) Bathymétrie



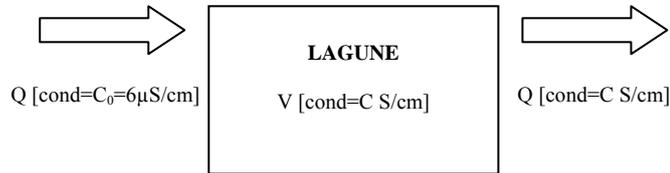
Une bathymétrie de la lagune a été réalisée (EMAAP-Praderio Janvier 2003). Une intégration de la profondeur sur la surface donnait alors un volume de 1300m^3 .

Cette mesure ne donne qu'un ordre de grandeur à un moment donné : le volume change très rapidement comme en témoigne l'augmentation de 270 m^3 observée les deux semaines suivant la bathymétrie.

c) Essai de sel (spécifique à la lagune)

A partir de mesures de conductivité réalisées après l'introduction de 20 kg de sel, nous pouvons envisager volume, et débit moyen de la lagune, en nous basant sur la dilution.

Considérant un modèle simple à une boîte.

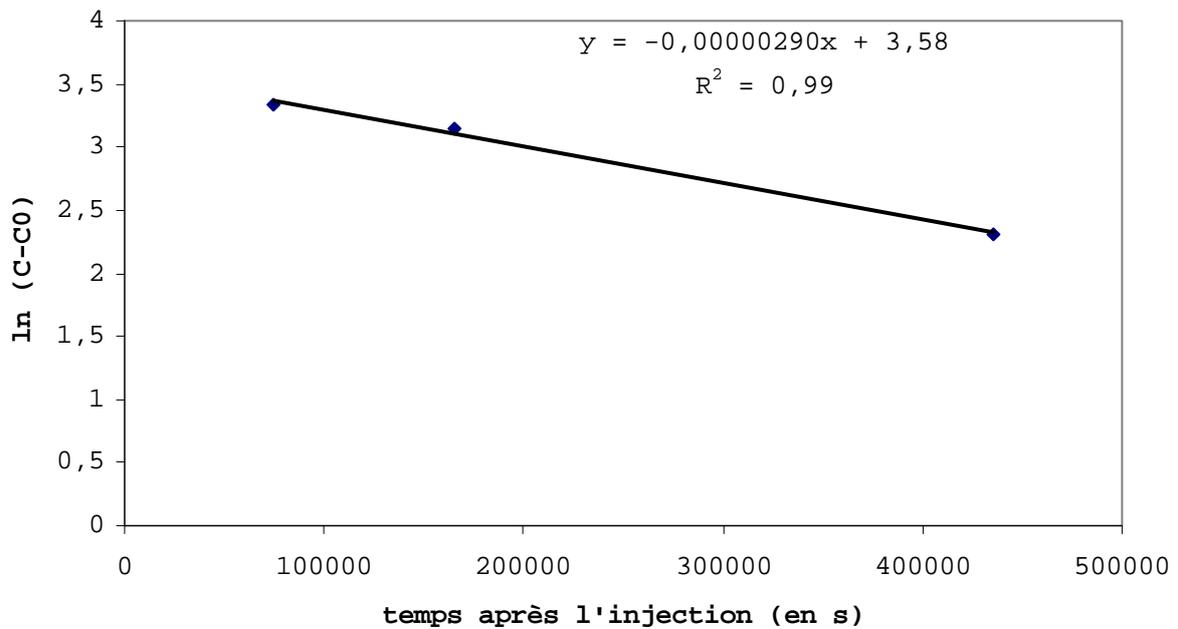


En écrivant la décroissance de la quantité de sel dans le réservoir « lagune » :

$$d(CV)/dt = Q(C_0 - C)$$

Le modèle donne, pour la décroissance de la concentration :

$$C = C_0 + C_1 \exp(-Q/V t)$$



Application numérique :

$$\ln(C-C_0) = -2,9 \cdot 10^{-6} t + 3,58$$

$$C - C_0 = \exp(-2,9 \cdot 10^{-6} t) * \exp(3,58)$$

$$C = C_0 + \exp(-2,9 \cdot 10^{-6} t) * \exp(3,58)$$

Avec le modèle $C = C_0 + C_1 \exp(-Q/V t)$ nous avons, à $t = 0$

$$C = C_0 + C_1 = 6 + \exp(3,58) = 42,02 \mu\text{S/cm}$$

Or, la courbe étalon établie en la lagune nous donne la relation :

$$\text{Conductivité} = 1,7002 \text{ concentration} + 10,52 \quad R^2 = 0,99$$

$$\text{Concentration initiale} = (42,017 - 10,52)/1,7002$$

$$\text{Concentration} = 18,52 \text{ mg/L}$$

Le volume de la lagune peut alors être calculé, en considérant que toute la saumure a été mélangée dans le réservoir :

$$\text{Volume total} = 20 \cdot 10^6 / 18,52 = 1\,079\,583 \text{ L} \approx 1000 \text{ m}^3 \text{ si mélange parfait et immédiat}$$

Or, d'après les équations 1 et 2, $Q/V = 2,9 \cdot 10^{-6}$. Le débit Q peut ainsi être calculé :

$$Q = 3,13 \cdot 10^{-6} \cdot V$$

Application numérique :

$$Q = 3,13 \text{ L/s}$$

Bilan

$$\mathbf{V \text{ présumé} = 1000 \text{ m}^3}$$

$$\mathbf{Q = 3,13 \text{ L/s}}$$

Quelle interprétation peut on faire à ce résultat ?

- Premièrement, le nombre de mesures reste assez restreint : seuls trois points sont à notre disposition pour faire la régression linéaire. Chacun de ces points ayant été obtenu par une moyenne sur les conductivités mesurées tout autour de la lagune (moyenne d'une vingtaine de mesures).
- Il est certain que le volume de la lagune varie : les débits en provenance des glaciers α et β en sont les responsables. Il est possible d'observer la lagune déversant tant elle est pleine, d'autre fois elle ne constitue qu'une grande « flaque ». Un modèle avec un volume constant pose nécessairement problème.
- D'un autre côté, dans ce dernier calcul, rien n'est moins sûr que tout le sel soit bien dans la lagune... La mesure ayant été faite le lendemain, une partie du sel a pu traverser rapidement la moraine pour arroser le Pàramo.
- Enfin, nous pouvons discuter l'intérêt de modéliser cet écoulement avec un débit constant arrivant en la lagune, tant ce débit est variable au cours de la journée. Voir graphiques des chapitres précédents.

Ces calculs montrent les limites de nos connaissances et les problèmes que peuvent poser la moraine. Dans le cas d'infiltrations il ne serait que plus difficile d'appréhender les phénomènes souterrains.

Conclusion

Le projet suivi cet été m'a permis de répondre à certains « problèmes » hydrologiques, rendant difficiles les interprétations de débits. D'autres éléments manquent, et une nouvelle vérification de la conservation du débit entre les eaux de fontes des glaciers alpha et beta (stations alpha et beta), et la station 15 devrait permettre de conclure sur l'hydrologie de la moraine très bientôt. La mise en route et l'entretien des stations hydrologiques (régulièrement bouchées par les sédiments et la glace) ont occupé une grande partie de mon temps. J'ai ainsi pu constater la difficulté de récolter des données de terrain exploitables ; difficulté accrue par le travail en altitude (4800-5000m) et en conditions assez « extrêmes ».

Dans le futur, l'hydrologie sur l'Antisana va être amenée à s'impliquer au pied du glacier « Crespo », avec une collaboration prometteuse avec l'Emaap-Q (Société d'alimentation en eau de Quito). Durant mon stage, cette partie a bénéficié de nombreux aménagements, qui devraient garantir des résultats dans les mois à venir.

A côté de la problématique hydrologique, j'ai pu également m'intéresser à d'autres travaux engagés en Equateur par le groupe « glaciaires ». Notamment des études isotopiques en cours sur les précipitations et sur des carottages. A plusieurs reprises, j'ai pu contribuer à la collecte des échantillons.

Bibliographie

- Favier, 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 , Mémoire de DEA de l'Université Montpellier II , Juin 2001
- Praderio, Etude sur le transfert d'eau du glacier 15 de l'Antizana, Equateur. Travail de diplôme de l'EPFL. Mai 2003
- Kaser, A review of the modern fluctuations of tropical glaciers. Global and Planetary Change 22 (1999), 93-103.
- Wagnon et al, Energy balance and runoff seasonality of a Bolivian Glacier. Global and Planetary Change 22 (1999), 49-58.
- **Bakalowicz**, Variations de la conductivité d'une eau en fonction de la température, et précision des mesures. Annales de spéléologie, 30(1) (1975)

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont permis de réaliser ce stage enrichissant. L'expérience que constitue ce stage a été formatrice, tant d'un point de vue scientifique, que d'un point de vue humain.

Je remercie Pierre Ribstein, directeur de l'UR Great Ice, d'avoir accepté ma candidature, et de m'avoir mis en contact avec Eric Cadier, mon « maître de stage » que je remercie pour son encadrement et ses conseils, ainsi que pour sa compagnie sympathique au cours de ses deux mois passés en Equateur.

Mes remerciements vont aussi à Vincent Favier, qui fut mon « tuteur » dans les premières semaines à Quito, ainsi qu'un correspondant disponible et de très bons conseils après son retour en France.

Mille mercis à Rodolphe, volontaire du service national, et « montagnard » exceptionnel, pour son aide précieuse et sa compagnie sympathique lors des missions longues et tout au long du stage.

Des pensées amicales à Bolivar et surtout Luis, qui m'a encadré lors de quelques sorties sur les glaciers.

Enfin, merci à Jean Denis Taupin, pilier de la délégation équatorienne du groupe Great Ice, pour sa gestion efficace des sorties du groupe, pour ses conseils et pour son accueil chaleureux.