



**Mémoire - Master 2 Recherche Eau et Environnement
Université Montpellier II**

RAMALLO Cinthya

**EVOLUTION DES DEBITS DU ZONGO A 4830 m. RELATIONS AVEC LE GLACIER ET
LE CLIMAT**

Master 2 Recherche Eau et Environnement – Université Montpellier II

DIRECTEURS DE STAGE

***A. Coudrain (Maître de Stage)
R. Gallaire***

Juin 2008

REMERCIEMENTS

Je tiens d'abord à remercier Monsieur Eric Servat qui m'accueilli dans le laboratoire de la M.S.E.

Mme. Anne Coudrain qui a assumé la responsabilité de Maître de stage, merci particulièrement pour sa patience, ses conseils, son appui et son amitié pendant le stage.

Jean Emanuel Sicart pour tous ses conseils, son aide précieuse pendant les moments de faiblesse.

Robert Gallaire et Thomas Condom pour le soin qu'ils ont apporté a la correction de ma mémoire.

Edson Ramirez, pour sa confiance, ses encouragements, son amitié et pour tout le reste.

Ma mère et mon père pour leur constante confiance et leur appui inconditionnel.....

Carlos pour tout son appuie, sa patience et surtout sa compréhension.

Toute l'équipe Great - Ice de l'IRD Montpellier pour l'accueil, l'appui et l'amitié en particulier Julien, Vanessa, Paulina et Marcos, amis rarissimes.

Je n'oublie pas non plus les amies du Master, Natalia, Dragana, Sewa, Cecile, Maimuna etc, avec qui j'ai passée de très bons moments.

Merci beaucoup a tous

Cintha

SOMMAIRE

Préambule

1.	INTRODUCTION.....	1
1.1	Glaciers tropicaux.....	1
1.1.1	<i>Différence entre glaciers tropicaux et glaciers des zones tempérées.....</i>	1
1.1.2	<i>Pourquoi étudier les glaciers tropicaux ?.....</i>	2
1.2	Travaux déjà réalisés	2
1.3	Problématique et hypothèses	3
2.	DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE	7
2.1	Situation géographique de la zone d'étude	7
2.2	Aspect climatique	8
2.2.1	<i>Système d'oscillation du sud</i>	8
2.2.2	<i>« El Niño » « La Niña » - Description climatique</i>	8
2.2.3	<i>Influence des événements « El Niño » et «La Niña » sur la l'hydrologie glaciaire.</i>	9
2.3	Précipitation.....	9
3.	PRESENTATION DES DONNEES ET STATIONS UTILISEES	11
3.1	Présentation des stations	11
3.1.1	<i>Le réseau pluviométrique</i>	12
3.1.2	<i>Les stations météorologiques</i>	12
3.1.3	<i>Les stations limnigraphique et limnimétrique du Tubo.....</i>	12
3.1.4	<i>Le réseau de balise sur le glacier :</i>	12
3.1.5	<i>Les Indicateurs Niño et Niña.....</i>	13
3.1.6	<i>Les Températures de ré analyses</i>	13
3.2	Données disponibles et base de données.....	13
4.	TRAITEMENT ET ANALYSE DES DONNEES HYDROCLIMATIQUES.....	15
4.1	Analyse de la précipitation.....	15
4.1.1	<i>Méthode du vecteur Régional.....</i>	15
4.1.2	<i>Analyse double masse.....</i>	16
4.2	Analyse des débits	16
4.3	Analyse de la température.....	17
4.4	Analyse des températures et des débits.....	19
4.5	Conclusion	21
5.	VARIABILITE INTERANNUELLE DU STOCKAGE DE NEIGE.....	22
5.1	Calcul de l'isotherme 0°C	22
5.1.1	<i>Variation interannuelle de l'isotherme 0°C.....</i>	22
5.1.2	<i>Variation saisonnière de l'altitude de l'isotherme 0°C.....</i>	23
5.2	Estimation des débits dehors de la zone englacé	24
5.2.1	<i>Variation interannuelle</i>	25
5.2.2	<i>Variation saisonnière</i>	26
5.3	Variation interannuelle de la zone d'ablation.....	27
5.3.1	<i>Variation annuelle.....</i>	27
5.3.2	<i>Variation de la Ligne d'équilibre. (ELA)</i>	29
5.4	Conclusion.....	30
6.	CHANGEMENT DE REGIME DE PRECIPITATION	31
6.1	Valeurs annuelles	31
6.2	Pluies mensuelles.....	31

6.2.1	<i>Variation durant la saison humide : mois de décembre, janvier, février et mars</i>	33
6.3	Relation entre la précipitation, les débits et phénomène EL Niño et La Niña	35
6.4	Conclusion	38
CONCLUSIONS GENERALES		39
BIBLIOGRAPHIE		40

Liste des figures

Chapitre 1

Fig. 1.1.- Localisation des glaciers tropicaux dans le monde

Fig. 1-2. Cycles annuels des bilans de masse annuels pour différentes latitudes

Fig. 1-3 : Evolution de températures moyennes mobiles mensuelles de ré - analyses et des débits du Zongo durant le période 1973-2004.

Fig. 1-4 : Réchauffement global dans la Cordillère Américaine (hémisphères sud et nord). Prévisions du changement de la température moyenne entre 1990-1999 et 2090-2099.

Chapitre 2

Fig. 2- 1 : Situation géographique du glacier Zongo en Bolivie. Caractéristiques du bassin pour des débits mesurés à 4830 m.

Fig. 2-2 : Différentiation de la saisonnalité entre l'hémisphère Nord et sud.

Fig. 2-3 : Evolution du bilan net mensuel et MEI (multi variant ENSO index) dans la zone d'ablation

Fig. 2-4. Evolution des moyennes mensuelles interannuelles de la précipitation durant une année hydrologique (Septembre –aout) sur les pluviomètres se trouvant sur le glacier.

Chapitre 3

Fig. 3-1: Dispositif des mesures météorologiques, hydrologiques qui ont été utilisée pour le present étude

Fig.3-2 : Pluviomètre Totalisateur

Fig. 3-3 : Capteur Hobo Installée sur la moraine

Fig. 3-4 : Station limnigraphique à 4830m.

Chapitre 4

Figure 4 - 1. Indices annuels du vecteur régional

Figure 4-2 : Analyse double masse des données de précipitation de la station Plataforma. Résultats obtenus à partir du vecteur régional.

Fig. 4.3- Analyse de ruptures des données de débits

Fig. 4-4. Comparaison entre la température mesurée au sol et les températures de ré-analyse à 500 et 600 hPa.

Fig. 4-5: Comparaison de températures de ré analyse (Centre réduits) a différents pression (400, 500,600 et 700 hPa)

Fig. 4-6.- Différences entre les températures de ré - analyses à 500 et 600 hPa par rapport à la station El Alto.

Fig. 4-7. Températures de moyennes mobiles de ré - analyses à 500, 600hPa, station Mevis et 5165 et les débits a 4830 m. .

Chapitre 5

Fig.5- 1: L'isotherme 0°C et la précipitation depuis l'année 1971.

Fig. 5-2.- Variation de l'isotherme 0°C pendant la saison de pluie (D-J-F-M) et pendant la saison sèche (A-M-J-J).

Fig. 5-3 : Variation de la surface au dessous de l'isotherme 0°C et de la précipitation

Fig. 5-4: Variation de débits annuels de la partie non englacée et l' Indice d'oscillation du sud – SOI.

Fig. 5-5 : a) Déficit de débits associé a un stockage potentiel de neige pendant la saison de pluie (décembre, janvier, février et mars)

Fig. 5-6. Evolution cumulée de la zone d'ablation à partir de 1948 jusque l'année 2006.

Fig. 5-7 : Evolution du bilan de masse du glacier Chacaltaya et du Zongo.

Fig. 5-8 : Variation annuelle de la superficie de la zone d'ablation et les débits entre 1991 et 2006.

Chapitre 6

Fig. 6-1 : Précipitation annuelle depuis 1971 des stations El Alto, Milluni et Plataforma.

Fig. 6-2 : Pluies mensuelles depuis 1971 des stations Milluni et Plataforma .

Fig. 6 - 3 Moyennes mensuelles (1971-2006) des pluies des stations qui se trouvent sur le bassin versant.

Fig. 6 - 4 : Tendances de précipitation et des débits (1973-2006) pendant les mois de décembre, janvier, février et mars (mois de plus forts écoulements)

Fig. 6-5.- Comparaison entre la précipitation, les débits et le SOI entre le période 1971-1989. Le SOI positif montre une phénomène El Niño et le SOI négative montre un Phénomène de La NIÑA.

Fig. 6-6.- Comparaison entre la précipitation, les débits et le SOI entre le période 1990- 2006

Liste de tableaux

Table 3- 1 : Données disponibles sur la zone d'étude.

Table 4-1 : Résultats obtenus à partir du « Test de student »

PREAMBULE

Ce travail de recherche a été réalisé dans le cadre du Master 2 « eau et environnement » de l'université Montpellier 2. Ce mémoire expose les résultats obtenus lors du stage de recherche réalisé à la Maison de science de l'eau.

J'ai choisi le sujet présenté par l'Unité de Recherche Great Ice de l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement - anciennement ORSTOM) au sein de son implantation de Montpellier en France et en collaboration avec l'IHH (Institut d'Hydraulique et d'Hydrologie) de l'Université Mayor San Andrés (UMSA) La Paz (Bolivie).

En 1991, l'IRD, en coopération avec la COBEE (Compagnie Bolivienne d'Énergie Électrique) et l'IHH (Institut d'Hydraulique et d'Hydrologie de l'Université Mayor de San Andrés (UMSA) de La Paz), a lancé le programme NGT (Neige et Glaciers Tropicaux) centré sur l'étude du fonctionnement et de l'évolution des glaciers en zone intertropicale (*Francou et Ribstein, 1995 ; Pouyaud et al., 1995*). Par la suite cette Unité de Recherche de l'IRD qui a pris le nom de GREAT ICE en 2000 (Glaciers et Ressources en Eau dans les Andes Tropicales – Indicateurs Climatiques et Environnementaux), a parallèlement à ces études développé d'autres axes de recherche qui sont, d'une part, l'étude de la variabilité climatique et du phénomène ENSO (El Niño Southern Oscillation) et d'autre part, l'étude de la dynamique des écoulements en haute montagne tropicale et la gestion de la ressource en eau.

Aujourd'hui, le domaine d'étude s'étend aux zones non englacées qui permettent d'étudier la formation du stock de neige et la dynamique de la couverture neigeuse des surfaces à l'aval de glaciers, lesquelles peuvent avoir une importance au niveau des écoulements en particulier.

Personnellement, j'étudie le comportement hydrologique du glacier Zongo avec l'équipe GREAT ICE depuis 2004. J'ai ainsi eu l'opportunité de préparer un mémoire pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur de la UMSA, dont le thème était : Image satellite ASTER et modèles hydrologiques pour la quantification de ressources hydriques d'un bassin Versant de Haut Montagne (Zongo).

Le présent rapport est inscrit en continuation de mon travail précédent, dans le domaine de l'hydrologie glaciaire, et tentera de déterminer l'influence des anomalies climatiques comme le phénomène « El Niño » et « La Niña » et l'évolution des conditions climatiques sur les écoulements.

1. INTRODUCTION

Glaciers tropicaux

Les glaciers tropicaux sont situés entre le tropique du Cancer et le tropique du Capricorne, soit entre les latitudes 23° 26' 22" de part et d'autre de l'équateur. Un pourcentage de 99% de la surface de ces glaciers se trouve dans les régions andines (*Fig. 1-1*).

Entre les tropiques, les glaciers sont souvent de petite taille, l'ablation en dessous de 5000 mètres étant élevée tout au long de l'année. En conséquence de cette petite taille et les mouvements du front traduisent de façon presque synchrone la tendance du bilan (*Franco, Vincent, 2007*).

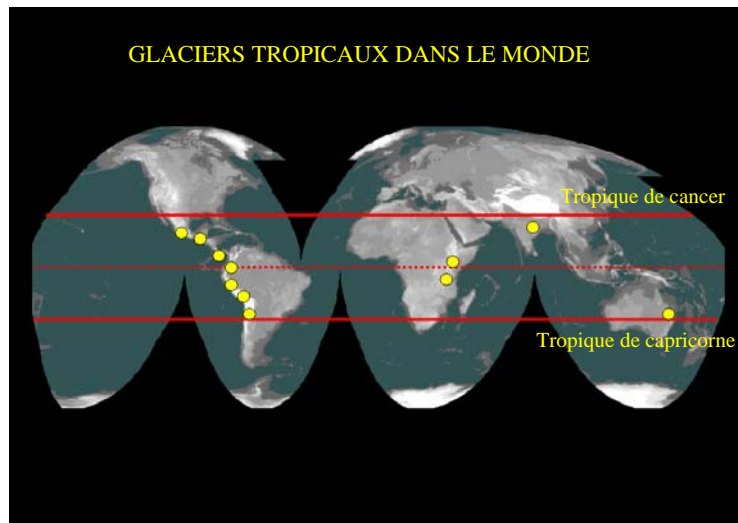


Fig. 1.1.- Localisation des glaciers tropicaux dans le monde dont 99% de la surface est concentrée dans les Andes (70% du Pérou et 20 % en Bolivie)

Différence entre glaciers tropicaux et glaciers des zones tempérées

Un facteur essentiel différencie les glaciers tropicaux de ceux des autres latitudes : la latitude basse induit de plus fortes radiations et des températures locales plus élevées qui ne permettent pas aux glaciers tropicaux d'exister en dessous de 5000 m (isotherme 0° entre 5000 et 5200 m actuellement dans les Andes des basses latitudes).

La *Fig. 1-2* schématise les comportements du bilan de masse des glaciers qui se trouvent sous différentes latitudes. Aux latitudes moyennes, comme par exemple dans les Alpes, la saison d'accumulation des glaciers se produit pendant l'hiver (froid) et la saison d'ablation pendant l'été (chaud). Aux latitudes intertropicales comme au Pérou ou en Bolivie, l'accumulation et l'ablation intervient simultanément tout au long de l'année mais avec un pic pendant l'été qui est la saison des pluies. (*Kaser et al., 1999*)

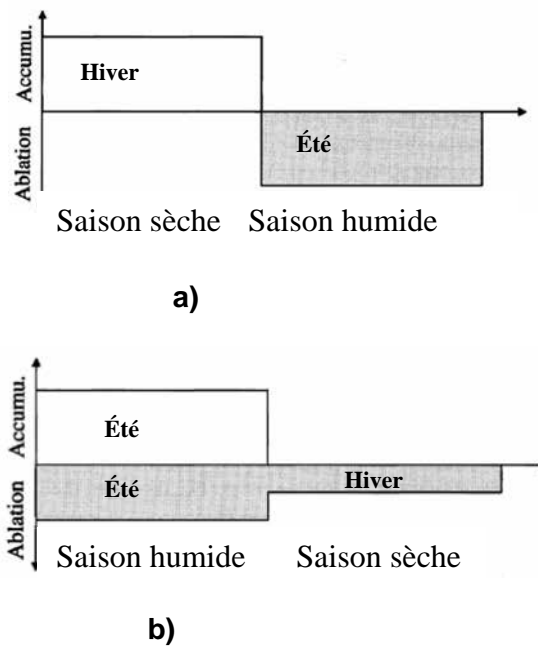


Fig. 1-2. Cycles annuels des bilans de masse annuels pour différentes latitudes a) Latitude moyenne (Alpes) b) latitude externe (Kaser et Osmaton, 2002)

Pourquoi étudier les glaciers tropicaux ?

Les glaciers tropicaux sont d'excellents indicateurs de l'évolution du climat à cause de leur extrême sensibilité aux variations des paramètres météorologiques tels que les températures, la radiation, les précipitations etc.

Ils sont aussi un enjeu économique car leur contribution à la ressource en eau des bassins versants de haute montagne est plus que significative. D'eux dépend en partie l'approvisionnement en eau potable de métropoles de plus d'un million d'habitants comme La Paz (Bolivie), Quito (Equateur) ou Lima (Pérou) ainsi que l'irrigation de territoires désertiques, comme la cote pacifique du Pérou, ou l'approvisionnement de centrales hydroélectriques comme en Bolivie (Francou et Vincent, 2007)

Travaux déjà réalisés

Depuis l'installation des dispositifs de mesures glaciologiques et hydrométéorologiques plusieurs travaux de thèses, de master, de licences et des articles scientifiques ont été développés sur le bassin englacé du Zongo.

Thèses de Doctorat

- *Wagnon (1999)* a étudié les flux d'énergie sur le glacier et leur influence sur le débit de fonte
- *Caballero (2002)* a fait une modélisation des écoulements de la vallée de Zongo en utilisant le schéma de surface ISBA (Interaction Sol – Biosphère - Atmosphère).
- *Sicart (2002)* a fait une étude du bilan d'énergie du glacier de Zongo, axée principalement sur les flux turbulents.

- Soruco (en cours) fait un travail de reconstitution de bilan de masse des glaciers sur la base d'analyse photogramétrique de documents depuis 1956.

Travaux au niveau de DEA et Master.

- *Poirier (2004)* a fait une étude de comparaison de réaction entre le bassin de Zongo (1997-2004) et de Tuni Condoriri (1999 – 2004) à pas annuel, en fonction de leurs paramètres géographiques et d'orientation par rapport aux flux de masse d'air depuis le bassin amazonien (1997-2004).
- *Olmos (2005)* a étudié les paramètres à pas mensuel qui influencent le comportement des bassins glaciaires comme le taux d'englacement et des paramètres climatiques et son orientation (1973-2005).
- *Ramallo (2006)* a fait une quantification des écoulements d'origine glaciaire, en utilisant l'image satellitaire ASTER pour déterminer différents types de sol auxquels ont été affecté des valeurs de paramètres hydrologiques utilisés dans des modèles hydrologiques distribués dans l'espace et utilisés au pas mensuel.

Articles scientifiques

De nombreux articles scientifiques ont été publiés sur l'hydro - glaciologie du bassin englacé du Zongo et de ses relations avec le climat.

Pour la présente étude, nous avons plus particulièrement utilisé les suivants :

- Sicart JE., Ribstein P., Francou B., Gallaire R., 2003. Etude des précipitations et de la fonte sur un glacier tropical : le glacier du Zongo, Bolivie, 16°S. JSH 48(5). 799-801 p.
- L'hote Y., Chevallier P., 2004. Pluie ou neige ? Dispositifs de mesures pluviographiques dans les Andes de Bolivie et interprétation des enregistrements. JSH 49(2). 10p.
- Sicart JE., Ribstein P., Francou B., Pouyaud., B., Condom T. 2007 glacier mass balance of tropical Zongo glacier, Bolivia, comparing hydrological and glaciological methods. Global and planetary change 59 (2007) 27 – 36 p.
- Gallaire R., Taupin JD., Coudrain A. *Soumis*. Variabilité récente des paramètres cryo climatiques et des isotopes des précipitations dans les Andes boliviennes : La Paz et glacier du Zongo

Rapports annuels

Le programme de recherche développé depuis 1991 présente des rapports annuels sur les mesures glaciologiques, climatiques et hydrologiques du glacier Zongo.

Problématique et hypothèses

La question de base de notre travail tire son origine d'une étude sur l'évolution des isotopes des précipitations et des paramètres climatiques associés sur l'altiplano andin entre 1995 et 2005. Cette étude a donné lieu à un article (*Gallaire et al. soumis*) qui montre qu'un

événement el Niño comme celui de 1997 – 98 aurait des conséquences durant plusieurs années, sur la signature isotopique (^{18}O) des précipitations.

Dans ce même travail, les températures de ré - analyses montrent une tendance au réchauffement d'environ 0.5 °C sur les 30 dernières années. Les conséquences de cette augmentation de température se font directement sentir sur un glacier comme celui du Zongo dont le retrait s'accompagne d'une augmentation de débits (Fig. - 1.3). Cependant les moyennes mobiles de valeurs mensuelles (janvier 1973 à janvier 1999) de températures des ré analyses et de débits montrent un décrochage (diminution des débits) à partir de 2001, malgré la tendance persistante d'augmentation de la température. (Gallaire et al., soumis).

Ce comportement coïncide avec le cas de la Cordillère Blanche au Pérou où il a été montré qu'il existait une variabilité synchrone inter - annuelle entre 1953 – 1996 des valeurs de débits et de température de ré - analyse, avec une forte corrélation ($R^2 = 0,72$), (Pouyaud et al., 2005).

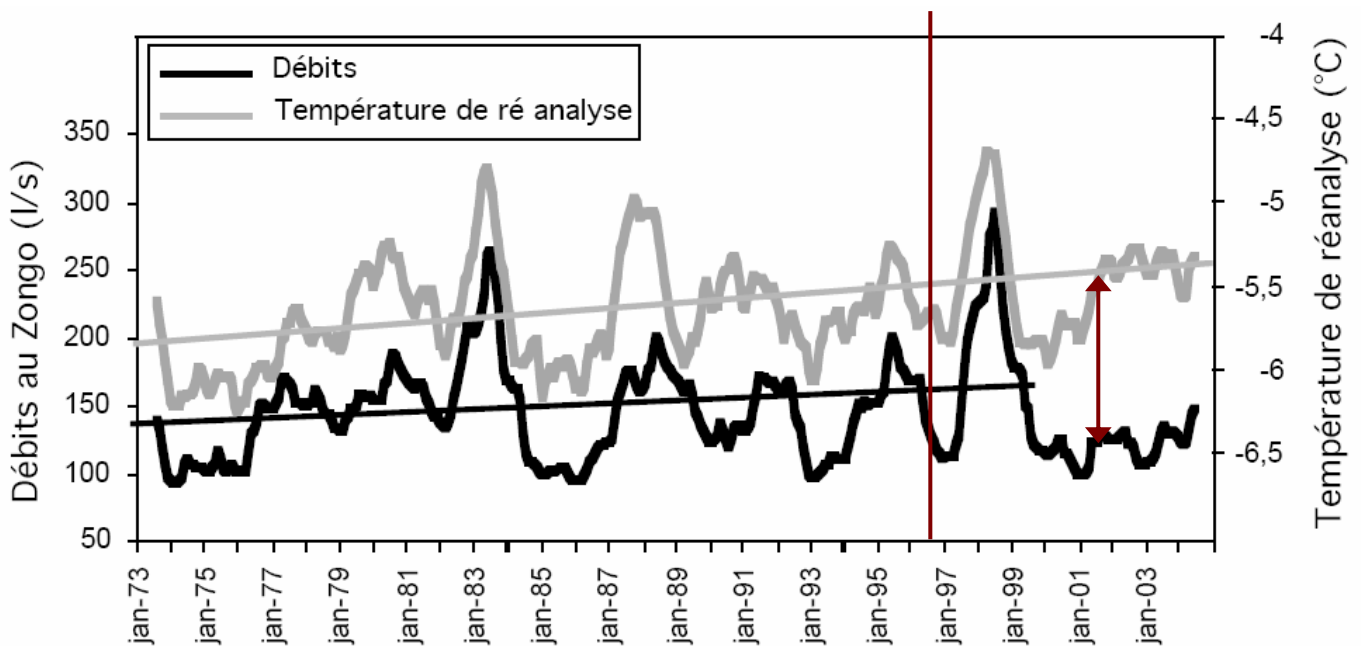


Fig. 1-3 : Evolution de températures moyennes mobiles mensuelles de ré - analyses et des débits du Zongo durant le période 1973-2004. (Gallaire et al., soumis)

Plusieurs études sur le changement climatique et l'augmentation de la température a niveau global viennent d'être développées. Le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) a développé différents modelés climatiques qui présentent différents scénarios de l'augmentation de la température pour la fin du XXI ème siècle. Pour la partie concernant l'Amérique du Sud entre 20° et 19° il est prévu une augmentation de 4 à 5 °C (Fig.1-4). Cette augmentation dans la zone intertropicale devrait être plus importante encore à haute altitude, comparativement aux zones de plus hautes latitudes (Bradley, 2006).

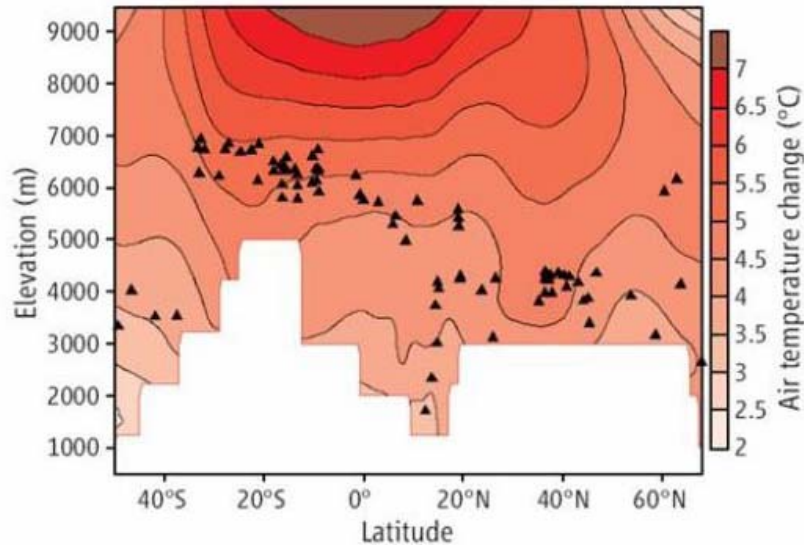


Fig. 1-4 : Réchauffement global dans la Cordillère Américaine (hémisphères sud et nord). Prévisions du changement de la température moyenne entre 1990-1999 et 2090-2099. Les triangles en noir représentent la montagne la plus haute à chaque latitude ; les surfaces en couleur blanche n'ont pas de données. D'après Bradley et al. (2006).

La présente étude a pour objet d'identifier et de quantifier l'évolution des données de débits de ce bassin de haute montagne (Zongo), et d'analyser les différentes causes potentielles du décrochage entre la température et les débits à la suite de l'année 2000.

Pour répondre à cette question de décrochage entre la température de ré analyse à 500 hPa et les débits nous avons émis plusieurs hypothèses présentées ci-dessous et dont les développements seront abordés successivement dans le corps de ce document:

1) Erreur des données.

a) La température des ré analyses à 500 hPa qui apparaît comme un bon indicateur de la variabilité interannuelle de débits entre 1971 à 1998 pourrait ne plus l'être à partir de l'année 2000 jusqu'à 2006.

On déterminera une différence possible entre la qualité des données de température prises au sol et celles de ré analyse à 500 et à 600 hPa, avant et après 1998.

b) Les mesures des débits pourraient être entachés d'erreurs systématiques différentes avant et après l'année 2000. La multiplicité des points de mesures de débits (station automatique et canal Tubo) et météorologiques sur le bassin devrait permettre de détecter une éventuelle erreur d'acquisition.

2) Stockage de neige

Une autre cause de décrochage pourrait être imputée à un stockage de neige associé à la Niña qui a immédiatement suivi le fort Niño1998. Le glacier durant cette période présente une couverture neigeuse nettement plus importante dont le fort albédo le protège de la fusion (Franco et al., 2004). Les moraines environnantes bénéficient du même abondant enneigement qu'elles ne restitueront que très progressivement aux écoulements du bassin au cours de l'année qui suit. Aussi, cette période plus froide et humide est associée à une avancée de la ligne d'équilibre du glacier qui, au contraire recule au cours d'un phénomène « El niño ». (Coudrain et.al, 2005)

L'analyse des données de précipitation, de température, et de débits nous permettra de déterminer un possible stockage de neige en vérifiant les volumes restés sur la partie non englacée.

3) Géométrie du glacier modifiée Pendant des années.

Le changement en taille du glacier pourrait en 1998 pourrait être à l'origine de la modification de la relation climat/glacier et donc les débits de fonte du glacier. Cette analyse pourrait également permettre d'expliquer l'affaiblissement des écoulements des années suivants. Avec les mesures annuelles de la variation de la ligne ELA (Equilibrium ligne altitude) d'équilibre de la ligne) et le bilan de masse, qui sont fait chaque année sur le glacier, on vérifiera cette hypothèse.

4) Changement du régime des précipitations

Des études récentes montrent que des changements de quantité de précipitation et de nébulosité peuvent expliquer le récent recul des glaciers (*Vuille, 2003*) et donc expliquer les variations de débits qui en sont issus.

Une analyse de tendance à pas de temps annuel et mensuelle et ensuite une analyse de la saisonnalité pendant les dernières décades, nous permettra d'identifier cette hypothèse.

2. DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE

Situation géographique de la zone d'étude

Le glacier du Zongo se trouve dans la Cordillère Royale des Andes Boliviennes (16°15' S, 68°10'W) à environ 30km au Nord-Ouest de la ville de La Paz.

La rivière Zongo prend sa source au pied du massif glaciaire du Huayna Potosi dont le sommet culmine à 6088 m. La présence de celui-ci confère à la rivière un régime fortement dépendant de la dynamique journalière de fonte du glacier.

Le bassin glaciaire du Zongo est aménagé par la COBEE (Compagnie Bolivienne d'Énergie Électrique). Un réservoir artificiel stocke les eaux de fonte du glacier en vue d'une régulation des débits, afin d'alimenter en énergie la capitale La Paz/ El alto.

C'est pourquoi, l'étude scientifique et pratique de ce glacier, est intéressante dans le but de développer des mesures de prédiction, de prévention et d'adaptation face au changement climatique constaté régionalement.

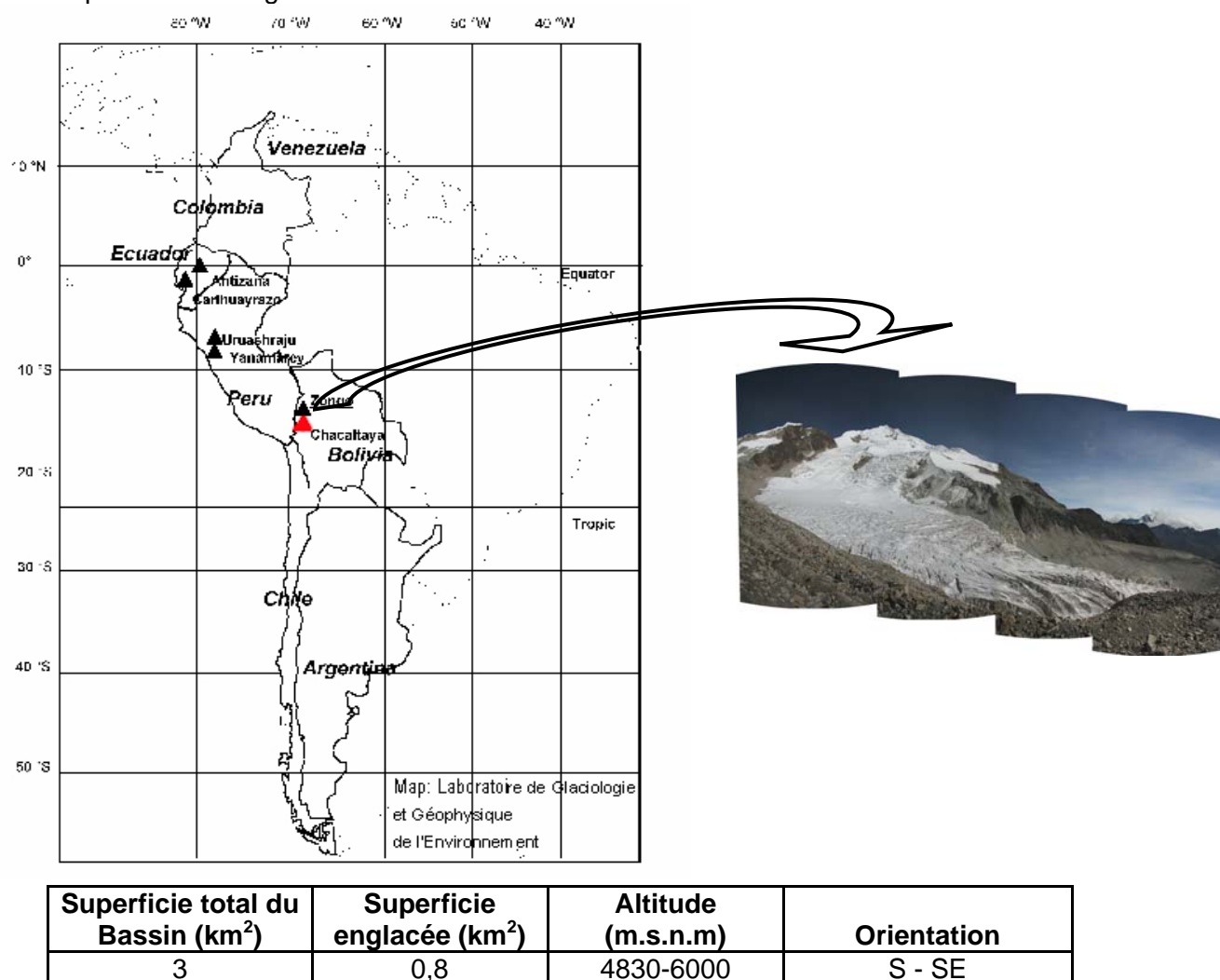


Fig. 2- 1 : Situation géographique du glacier Zongo en Bolivie (Photo : Ginot, 2007).
Caractéristiques du bassin pour des débits mesurés à 4830 m.

Aspect climatique

Systeme d'oscillation du sud

Dans les Andes Boliviennes, le climat est caractérisé par une forte saisonnalité liée au mouvement de la zone de convergence intertropicale (ZCIT : Intertropical Convergence Zone). De mai à septembre, (hiver austral), ZCIT, se trouve au Nord de la Bolivie : les anticyclones tropicaux engendrent un climat froid et sec. Pendant l'été austral, de décembre à mars, la ZCIT est descendue plus au Sud, est à l'origine d'un climat plus chaud et humide.

Le graphique suivant nous montre que lorsque la ZCIT se trouve au nord de l'Equateur c'est la saison humide dans l'hémisphère nord, pendant que dans le hémisphère sud se produit la saison sèche.

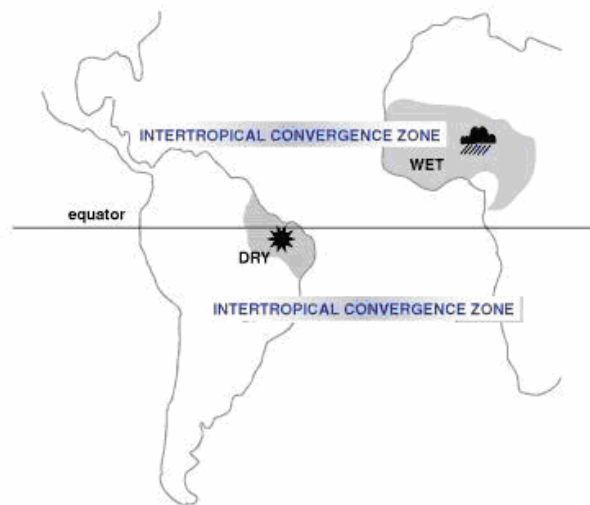


Fig. 2-2 : Différentiation de la saisonnalité entre l'hémisphère Nord et sud. La saison humide se met en place au hémisphère nord quand la ZCIT se trouve au nord. Au contraire de l'hémisphère sud que la saison humide se met en place quand la ZCIT se trouve au sud.

« El Niño » « La Niña » - Description climatique

On peut dire qu'« El Niño » est un phénomène climatique particulier qui diffère du climat usuel, et qui se caractérise par une élévation anormale de la température de l'océan Pacifique le long des côtes péruviennes et équatoriennes autour des mois de décembre et de janvier. Ce phénomène, relativement rare, produit un changement régional et local dans l'écologie (Trenberth, 1997). Chaque événement ENSO présente ses caractéristiques propres qui peuvent modifier le mécanisme de téléconnection climatique. Ces modifications peuvent perdurer plusieurs années (Veuille, 2007).

Dans ce phénomène d'oscillation se distinguent la phase chaude, El Niño Southern Oscillation (ENSO), et la phase froide La Niña Southern Oscillation (LNSO).

Le Southern Oscillation Index (SOI) permet de caractériser ces deux phases. Cet indice se définit comme la différence centrée réduite de la pression atmosphérique entre Tahiti (Polynésie Française) et Darwin (Australie). Lorsque le SOI est négatif c'est une phase El Niño et lorsqu'il est positif c'est une La Niña.

Influence des événements « El Niño » et « La Niña » sur la l'hydrologie glaciaire.

L'impact des événements El Niño sur le bilan de masse du glacier est d'autant plus sensible que les perturbations climatiques qu'il entraîne se font surtout ressentir en saison humide. Différentes études sur la variation de bilan de masse interannuel du glacier Zongo (Ribstein et al., 1999), nous montrent que les années avec un bilan de masse négatif coïncide avec la présence des événements El Niño. La Fig.2-5 montre la comparaison entre le bilan de masse et le MEI (Multivarié ENSO index), qui est un indice qui caractérise les phénomènes « EL Niño » et « La Niña ».

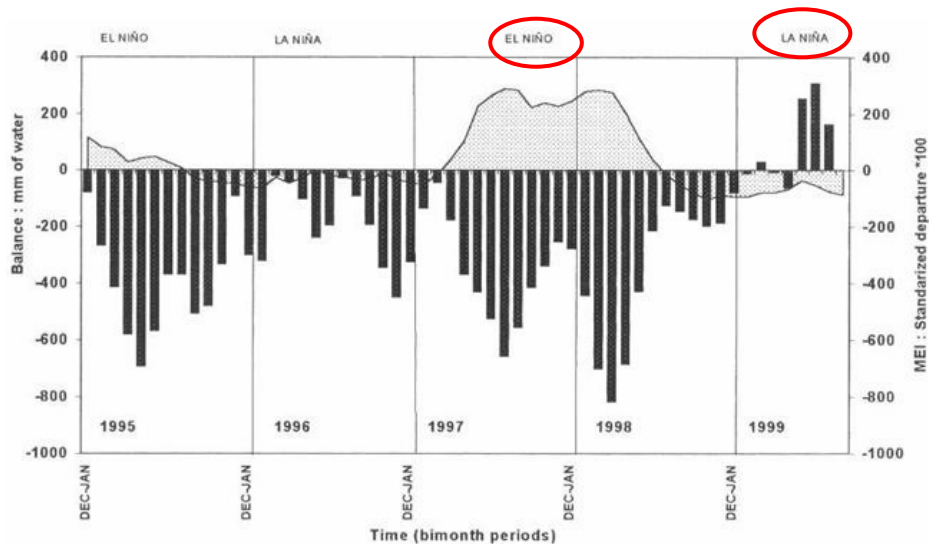


Fig. 2-3 : Evolution du bilan net mensuel et MEI (multi varié ENSO index) dans la zone d'ablation (Ribstein et al., 1999).

Le phénomène El Niño est caractérisé dans les Andes centrales par une diminution notable des précipitations pendant l'été austral et une augmentation des températures de l'air. Ceci entraîne une diminution de l'albédo et stimule la fusion du glacier (Coudrain et al., 2005). Les valeurs d'albédo, qui dépendent de l'état de la neige (fraîche ou pas), peuvent varier entre 0.3 et 0.9. (Singh, 2001).

Ainsi, pendant les événements El Niño, le déficit de précipitations solides observé au début de la saison des pluies (Décembre – Février), et le déplacement de la limite pluie-neige vers des altitudes plus élevées favorisent un albédo réduit à la surface des zones d'ablation glaciaires, et sont donc responsables d'une fusion accentuée. Pendant les phases froides La Niña, la situation opposée est observée et l'ablation est de fait réduite.

Une augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements El Niño combinée à une baisse de la fréquence des phases froides La Niña depuis la fin des années 1970 est à l'origine du retrait glaciaire accéléré observé dans les Andes tropicales (Francou et Vincent, 2007).

Précipitation

Une étude entre 381 stations situées entre Pérou, Bolivie et Brésil montre que la précipitation présente une saisonnalité marquée (Fig.2-4). Le pourcentage moyen s'élève à 54% des précipitations annuelles pour la saison des pluies (DJF), en été, alors qu'il représente seulement 5% des précipitations annuelles en hiver (JJA). (Jaffrain, 2007).

Pendant la saison sèche le régime des alizées du sud-ouest n'amènent pas les pluies parce que les masses d'air arrivant au nord de l'altiplano ont perdu leur humidité en traversant de d'importantes zones continentales d'altitude.

Pendant la Saison humide, les masses d'air chargées d'humidité proviennent de l'océan Atlantique via l'Amazonie. Elles sont forcées par la cordillère Andine occasionnant de fortes pluies dans la zone comprise entre 1000 et 2500 mètres où se situe l'optimum pluviométrique. (*Montes de Oca. I 1997, Ronchail et al., 2006, Vimeux et al., 2005*).

Ces pluies, d'origine essentiellement atlantique et principalement de type orographique profitent avant tout au versant amazonien, constitué de vallées encaissées à fortes pentes (10% en moyenne). Les masses d'air sont contraintes par le relief à s'élever, et condensent en altitude (*Ronchail et Gallaire, 2006*).

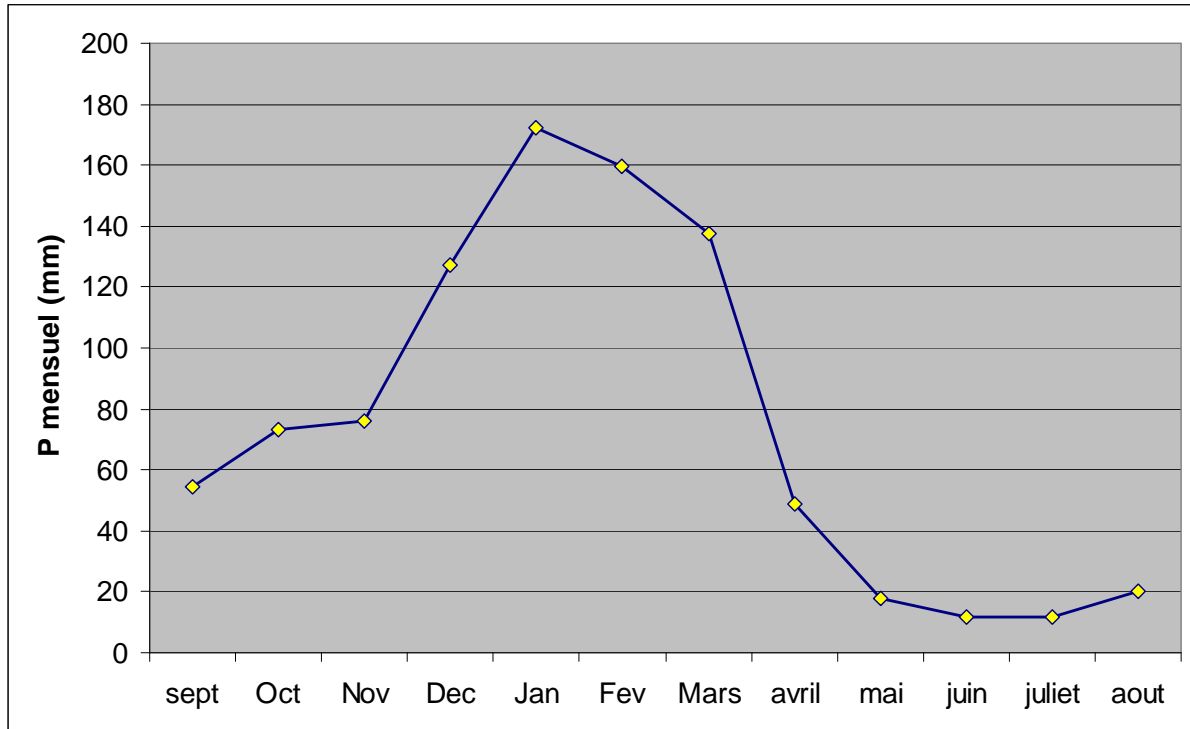


Fig. 2.4. Evolution des moyennes mensuelles interannuelles de la précipitation entre 1996-2006 en correspondant à une année hydrologique (Septembre –aout) sur les pluviomètres se trouvant sur le glacier.

Pendant le phénomène El Niño il existe un déficit de précipitation suivi d'une atténuation du régime des vents alizés de nord a est (*Aceituno et al., 1998*). La diminution de la précipitation peut être associée au refroidissement de l'air en altitude et sur l'Altiplano. Pendant ce phénomène la diminution de la précipitation pendant l'été est de l'ordre de 50% (*Ronchail et al, 2006*)

3. PRESENTATION DES DONNEES ET STATIONS UTILISEES

Dans ce chapitre sont décrits le dispositif de mesure et l'information disponible sur la zone du glacier

Présentation des stations

Sur le glacier d'étude, différents dispositifs de mesure sont présents, qui fournissent des données météorologiques instantanées (température, radiation, précipitation, vent, humidité relative). Immédiatement à l'aval du front glaciaire une station hydrométrique située à une altitude de 4830 m, qui lui donne son nom, comprend un limnigraphe et un déversoir triangulaire qui permet de contrôler les écoulements provenant du glacier. Finalement et grâce au personnel de La Compagnie Bolivienne d'Energie Electrique (COBEE), on peut compter avec des mesures de hauteurs d'eau sur le canal Tubo, deux fois par jour (7h et 15h) à l'exutoire du bassin sur la retenue artificielle de la Plataforma.

Ces différentes installations permettent d'instruire les termes de trois bilans glaciologique, hydrologique et énergétique du glacier, et de les comparer.

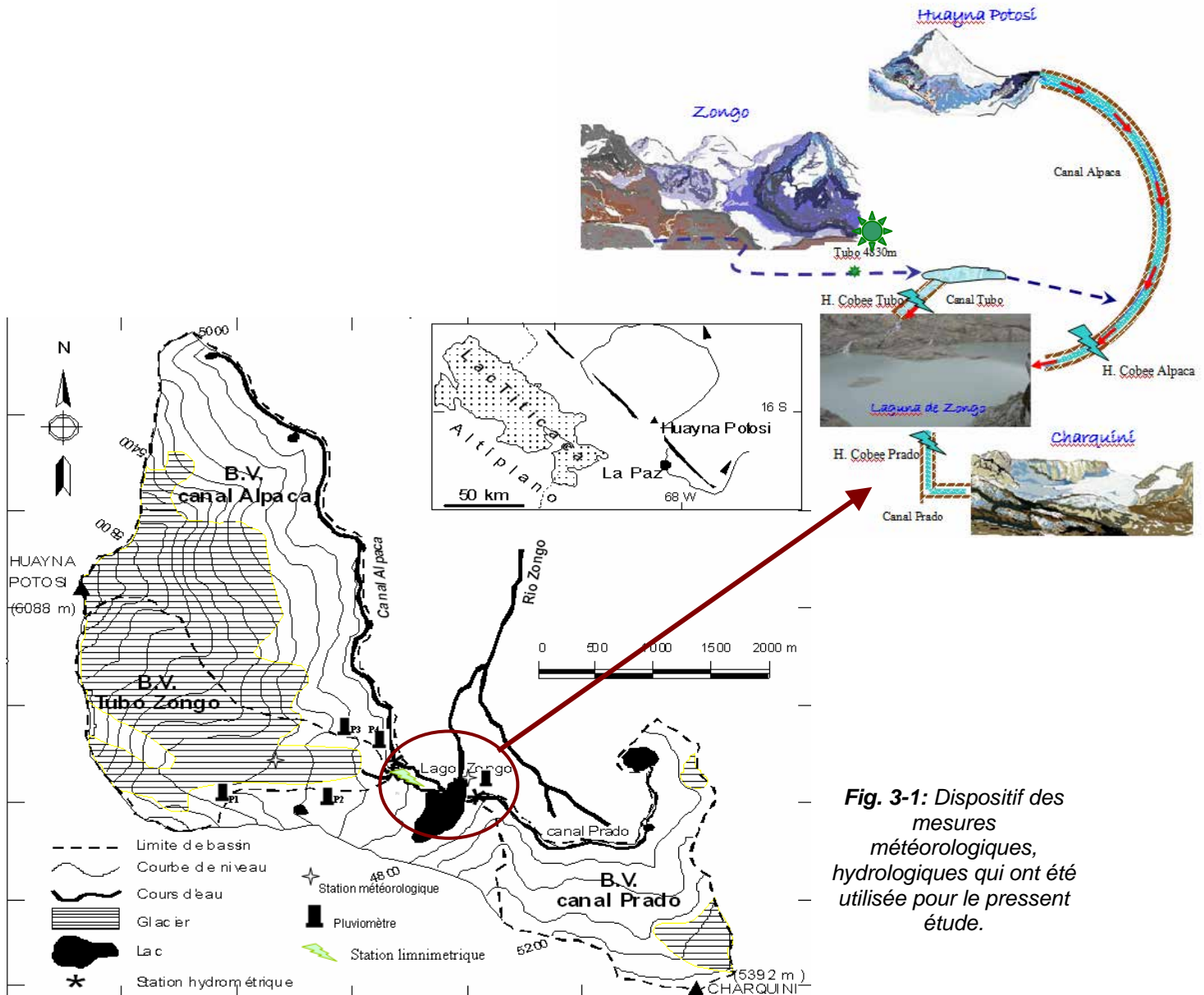


Fig. 3-1: Dispositif des mesures météorologiques, hydrologiques qui ont été utilisées pour le présent étude.

Le réseau pluviométrique

Un réseau de 5 pluviomètres totalisateurs est installé sur les moraines latérales du glacier à différentes altitudes, de façon à appréhender la variabilité spatiale des précipitations (Fig. 3-1)

L'émergence de la couche d'huile qui permet d'éviter l'évaporation est mesurée chaque fin de mois (Fig. 3-2).

Un dernier pluviomètre a pas d'observation mensuelle se trouve à la station « Plataforma » qui est contrôlée par le personnel de COBEE

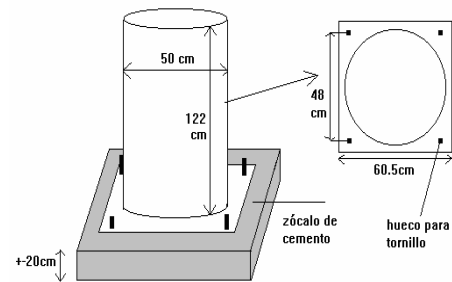


Fig.3-2 : Pluviomètre Totalisateur

Les stations météorologiques

La station Mevis (Fig. 3-1) la plus complète se trouve en dehors du glacier à une altitude de 4750 m (Plataforma). Elle permet d'obtenir des données de température de l'air à différentes altitudes, d'humidité relative, de radiations et de vent (vitesse et direction). Un capteur Hobo (Fig 3-3) situé sur la moraine Rive Gauche à 5165 m, permet de disposer des données de température et d'humidité relative de l'air, au niveau de la partie supérieure de la zone d'ablation du glacier. Ces deux stations permettent de disposer d'informations à pas de temps courts (30 et 15 mn respectivement). Grâce aux capteurs situés dans la ville de La Paz (San Calixto) et sur l'aéroport de el Alto (ASSANA) à 4000 m on peut disposer de séries de températures journalières plus longues (plus d'un siècle pour San Calixto).

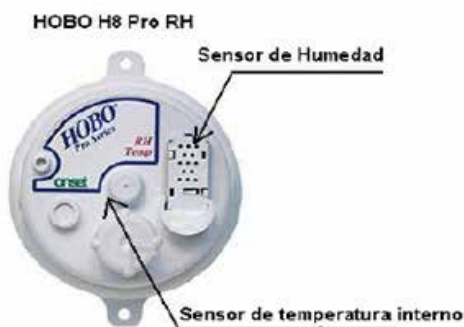


Fig. 3-3 : Capteur Hobo Installée sur la moraine

Les stations limnigraphique et limnimétrique du Tubo.

La station limnigraphique (Fig.3-4) est située à environ 250 mètres de distance du front du glacier (Fig.3-1) et a été installée dès le début du programme d'étude en 1992. Celle-ci permet de mesurer en continu les hauteurs d'eau du torrent émissaire du glacier, et à partir du contrôle hydrologique constitué par le "V" de la station de les traduire en débits.

Une échelle limnimétrique située en contrebas de la station 4830, à la sortie d'un tube conduisant l'eau glaciaire vers la retenue de la plataforma est mesurée deux fois par jour par le personnel du COBEE. Elle constitue une sérieuse garantie en cas de défaillance du limnigraphe.



Fig.3-4 : Station limnigraphique à 4830m.

Le réseau de balise sur le glacier :

La lecture de l'émergence des balises est effectuée chaque début du mois sur la zone d'ablation. Elles permettent de déterminer le bilan de masse sur laquelle les balises de 2m sont efforcées de la glace vertical avec une sonde à vapeur.

A la fin de l'année hydro-glaciologique (premier septembre) un bilan net est calculé par tranche d'altitude à partir de ces mesures de balises et de forages et mesures

densimétriques de la neige dans la partie haute du glacier qui correspond à la zone d'accumulation.

Pour chaque année est établie ainsi l'altitude de la ligne d'équilibre (ELA), à partir de la courbe représentant le bilan net selon l'altitude.

Les Indicateurs Niño et Niña

Pour caractériser les événements « El Niño » et « La Niña » on a utilisé un indice Southern Oscillation Index (SOI). Cet index est valable des latitudes +30° à -30°.

Les données sont facilement disponibles sur le site internet nord-américain de la NOAA : www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/index.html.

Les Températures de ré analyses

La technique du ré analyse—consistant à réexaminer toutes les données historiques disponibles, obtenues à la fois in situ et par observation satellite—a considérablement amélioré notre capacité à analyser la variabilité climatique et à fournir un fondement aux projections climatiques. La ré analyse livre des jeux de données complets et intégrés décrivant l'évolution de composantes du système climatique sur les dernières décennies à l'aide du processus d'assimilation des données.

Plus exactement, la ré analyse traite des bases de données d'observation hétérogènes constituées au fil des ans et les convertit en une description cohérente des changements survenant dans l'atmosphère en les fusionnant avec un modèle numérique. Les données relatives aux océans, à la surface terrestre ou à la glace de mer sont traitées et les variations dans ces domaines analysées afin d'obtenir une description cohérente du système climatique.

Les températures de ré analyse sont développées à partir de modèles météorologiques. Trois laboratoires travaillent sur ce type de données.

- NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Predictions)
- ECMWF (European Centre for Medium Range Weather Forecasts)
- NASA/DAO (National Aeronautics and space Administration / Data Assimilation Office)

Pour notre étude on a pris les données de NCEP/NCAR qui a comme source la NOAA et les données sont disponibles sur internet <http://www.cdc.noaa.gov/cdc/reanalysis/>

Le laboratoire travaille depuis 1995 sur les programmes « réanalyses 1 » et « réanalyses 2 ». La différence entre les deux programmes de réanalyses porte principalement sur la longueur de la série de données et sur les outils pour le traitement de celles-ci.

Données disponibles et base de données.

On compte avec un registre de données depuis 1991 qui est l'année où l'IRD a mis en place les différents dispositifs de mesures (balises et hydrométéorologiques). Une recompilation des données à partir des rapports annuels a été effectuée. D'autre part, on dispose d'un registre de températures de ré – analyse à 500 et 600 hPa depuis 1949.

Toutes les données hydrométéorologiques ont été traitées grâce au logiciel de base de données HYDRACCESS (logiciel de l'IRD développé par *Philippe VAUCHEL*) qui a une capacité de deux Gigas Octets. Ce logiciel complet, homogène et convivial, permet d'importer et de stocker divers types de données hydrologiques dans une base au format *Microsoft Access*, et de réaliser les traitements hydrologiques de base.

La table 3 - 1 nous montre le registre annuel des stations que on a utilisée pour la présente étude

Station meteorologique	1949	1959	1969	1971	1979	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	
Temperature de Re-analysee a 500 et 600 hPa																								
MEVIS 4750 m																								
Mesures sur la moraine 5165																								
T Alto																								
Station pluviometriques																								
P1,P2, P3, P4, P5, P8																								
Plataforma																								
Stations hydrologiques																								
Station 4830																								
Station observé (Tubo)																								
Indicateurs Nino Nina																								
SOI																								
Enso Index																								
Données Glaciologiques																								
Bilan de masse du glacier																								
Variation ELA																								

Table 3- 1 : Données disponibles sur la zone d'étude

4. TRAITEMENT ET ANALYSE DES DONNEES HYDROCLIMATIQUES

Avant toute utilisation des variables hydro - météorologiques il faut contrôler leur qualité afin de détecter les erreurs systématiques qui pourraient les affecter. Pour cette raison on a fait une analyse de consistance des données de précipitations et de débits.

Analyse de la précipitation

Méthode du vecteur Régional

La méthode du vecteur Régional s'applique aux précipitations et consiste à élaborer à partir de l'ensemble de l'information disponible une sorte de station fictive qui soit représentative de toute la zone d'étude (Climatiquement homogène). La méthode calcule la moyenne étendue d'une station et les indices du vecteur Régional par une méthode des moindres carrés, en cherchant à minimiser les écarts entre les indices des stations et le Vecteur. Elle considère que l'indice régional d'une année est la moyenne des indices de toutes les stations. Pour chaque année, est calculé un indice qui sera supérieur à 1 lorsque l'année sera excédentaire, et inférieur à 1 lorsque l'année sera déficitaire (*Aide Hydraccess*). A partir des indices calculés par cette méthode on a pu analyser et critiquer les séries de données pluviométriques à partir de la méthode des doubles masses.

Pour cette analyse on a pris les données mensuelles de précipitation entre 1995 et 2006 de 5 pluviomètres se trouvant sur le glacier. L'information a été traitée avec le logiciel Hydraccess qui contient un module de vecteur régional.

Sur le graphique suivant les résultats obtenus, montrent l'existence d'une variation de précipitation entre chaque pluviomètre. Cet effet est produit par des effets locaux comme la variation du vent qui a une influence sur la précipitation, ou la taille des pluviomètres totalisateurs (*Sicart, 2007*).

Les données de précipitation du Zongo se trouvent bien dans les limites du vecteur régional et il existe une bonne corrélation entre elles. Sur le graphique le cercle bleu nous indique une possible erreur de données sur le pluviomètre 3 pendant la dernière année.

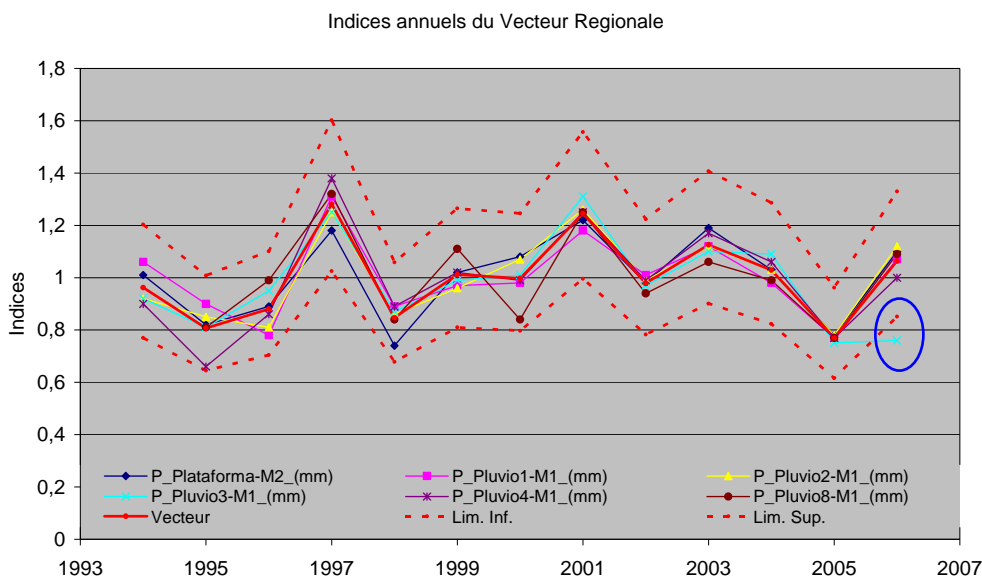


Fig. 4 - 1. Indices annuels du vecteur régional, où on peut voir une homogénéisation des conditions climatiques entre les pluviomètres. Les limites inférieures et supérieures représentent les limites du vecteur régional. Le point en bleu situé en dehors de ces limites est éloigné de la moyenne de toutes les stations (possible erreur de mesure).

Analyse double masse

Cette analyse est utilisée pour tester la fiabilité des séries de données à pas de temps annuel et permet en particulier d'analyser les possibles erreurs systématiques au niveau de la station. Elle consiste à vérifier les erreurs à partir des ruptures dans la valeur cumulée des stations, avec l'utilisation de méthodes statistiques et de tests d'hypothèse comme le « T de student », en vérifiant si les valeurs moyennes des échantillons sont statistiquement similaires. (Villon, 2002). Dans la Fig. 4-2 on peut voir l'analyse double masse des données de précipitation. Elles ont été comparées avec le pluviomètre 2 puisqu'il présentait la meilleure série de données. On peut voir qu'il existe une rupture de la tendance sur 14 ans lors de l'année El Niño 1997-98 causée par une notable diminution de précipitation.

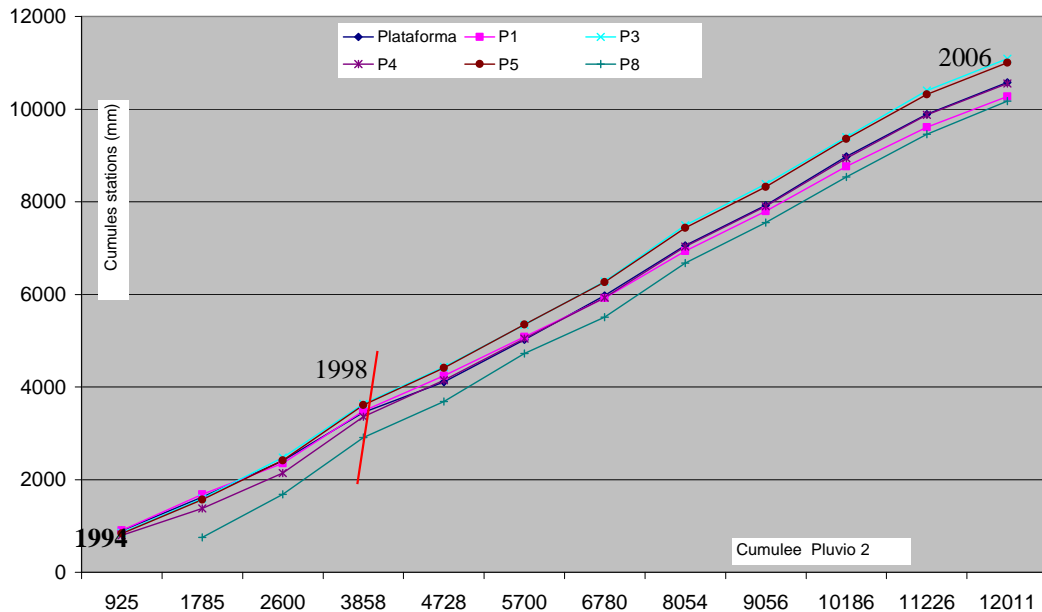


Figure 4-2 : Analyse double masse des données de précipitation de la station Plataforma. Résultats obtenus à partir du vecteur régional.

On a appliqué un test statistique, le « Test de student », pour vérifier si les données de précipitation avaient besoin d'être corrigées. On peut conclure que malgré la rupture de l'année 1997-98, les valeurs du coefficient Tc des pluviomètres sont comprises entre -0.241 et 0.231 et donc significativement inférieures à la valeur tabulaire Tt=3.017. Ce test d'évaluation nous donne un intervalle de confiance de 95%.

	Plataforma	P1	P2	P3	P4	P5	P8
Tc	-0,165	0,098	-0,241	-0,116	-0,202	-0,091	0,231
Tt	3,017	3,017	3,017	3,017	3,017	3,017	3,017

Table 4-1 : Résultats obtenus à partir du « Test de student » pour les données de précipitation qui nous indique que les données n'ont pas besoin de correction.

Analyse des débits

Pour l'analyse de la stationnarité des données de nos stations, on a employé le logiciel KhronoStat pour déterminer les ruptures qui pourraient exister. Il cherche des ruptures qui sont définies par un changement d'un ou plusieurs paramètres (moyenne, écart type, etc.) de la série chronologique à un instant donné. On a pris la moyenne de données à pas de temps annuel.

L'analyse des débits ne montre pas de rupture modifiant la série des données. Les débits varient entre 0 et 0.2 m³/s (Fig.4-3)

Identification Tuvo;
Variante étudiée Débit moyen annuel;
Unité m³/s;
Chronique de 1975 à 2006

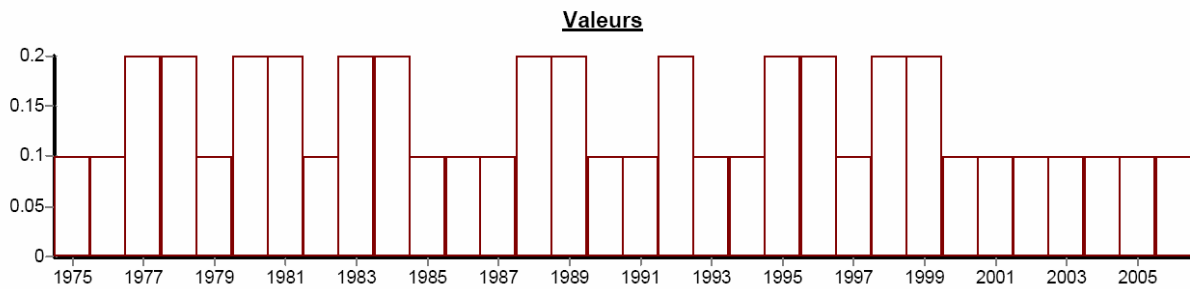


Fig. 4.3- Analyse de ruptures des données de débits

Analyse de la température

La série de températures annuelles de ré - analyse à 500 hPa, qui correspond environ à une altitude de 5500 m, a été comparée aux températures mesurées aux stations 5165 (Hobo), Mevis, El Alto et à la température de ré-analyse à 600 hPa correspondant à 4200m d'altitude (Fig. 4-4). Pour mieux comparer on a utilisé les valeurs centrées réduites (CR) sur la série des données annuelles.

Pour valider les stations de température on a pris la station El alto comme station de référence, puisque c'est la station ayant la série de données la plus longue.

On peut voir (Fig 4-4) que depuis l'année 1971 et jusqu'en 1991-92 les températures du sol et de ré-analyse à 500 et 600 hPa présentent une bonne corrélation. Sur la période comprise entre les années hydrologique 1991-92 et 1995-96 cette corrélation est plus faible à cause d'une augmentation des températures à la station El Alto. Entre 1996 et 1999 la comparaison des températures de ré-analyses avec les données des stations mevis et hobo nous montre une bonne corrélation; à partir de l'année 1998-99 on peut observer que les températures de ré-analyse à 500 hPa et à 600 hPa présentent une forte augmentation jusqu'en le 2006 (de 2.5°C et 2°C respectivement). En plus, on peut dire que les données de la station « El Alto » présentent une incohérence lors de l'année 1998-99.

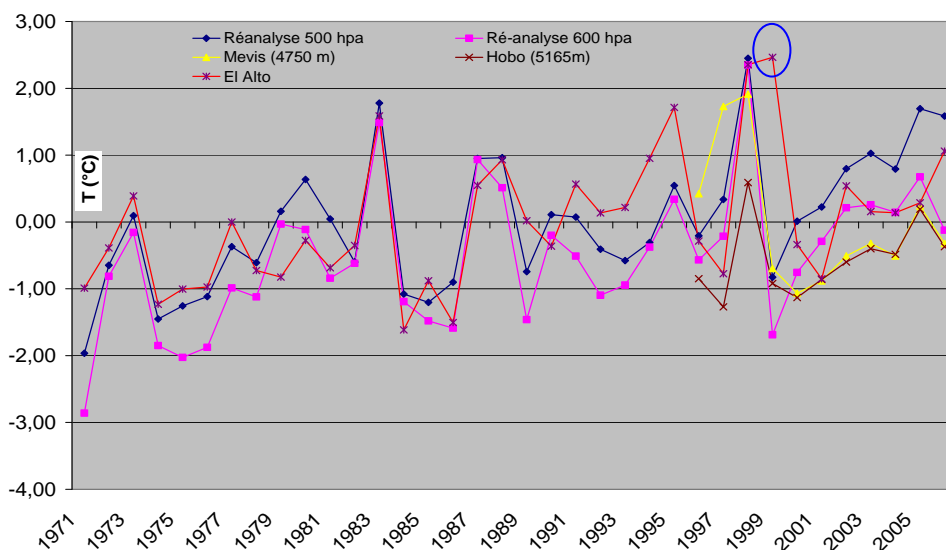


Fig. 4-4. Comparaison entre la température mesurée au sol (Mevis, El Alto et hobo) et les températures de ré-analyse à 500 et 600 hPa. Les coefficients de détermination (r^2) entre la température mesurée à la station ORE et les températures à 500hPa et 600 hPa, sont de 0.37 et 0.55. Le cercle bleu montre une possible erreur des données.

Pour savoir s'il existe une forte augmentation de températures à partir de l'année hydrologique 1998-99 on a comparé différentes températures de ré analyse a :

- 700hPa = 3000m
- 600hPa = 4200m
- 500hPa = 5500m
- 400hPa = 7200m

Les températures de ré analyse à 400, 500, 600 et 700 hPa (Fig. 4-5) montrent une forte dispersion à partir de l'année 1998 – 99. Les T ré à 400, 500 et 600 hPa montrent une forte tendance à l'augmentation (600hPa plus faible que les autres), alors que les températures à 700 hPa présentent plutôt une tendance à la diminution.

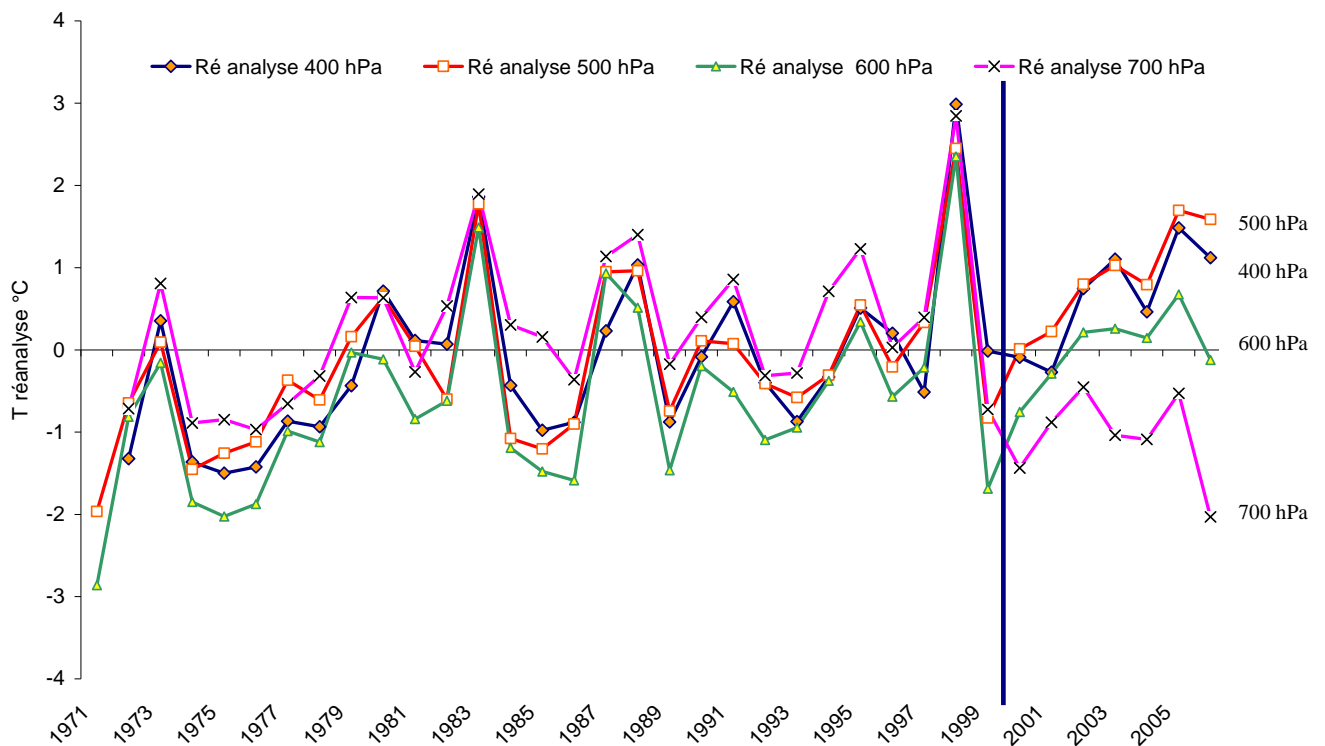


Fig. 4-5: Comparaison de températures de ré analyse (Centre réduits) a différents pression (400, 500,600 et 700 hPa)

Le gradient thermique vertical entre la station El Alto et les niveaux des températures de ré analyse est de 0.7 °C/100m coïncide bien avec les résultats de Yann L'hote (2004) qui avait obtenu un gradient altitudinal de 0.65 °C/100m sur le glacier du Zongo.

On cherche à savoir quelle température de ré – analyse (500 ou 600 hPa) est la plus proche de la température au sol à la station « El Alto ». On a donc calculé la différence entre les températures à la station « El Alto » et de ré - analyse. A partir de l'année 1998 la différence de température est plus grande à 500 hPa qu'à 600 hPa (Fig.4-6).

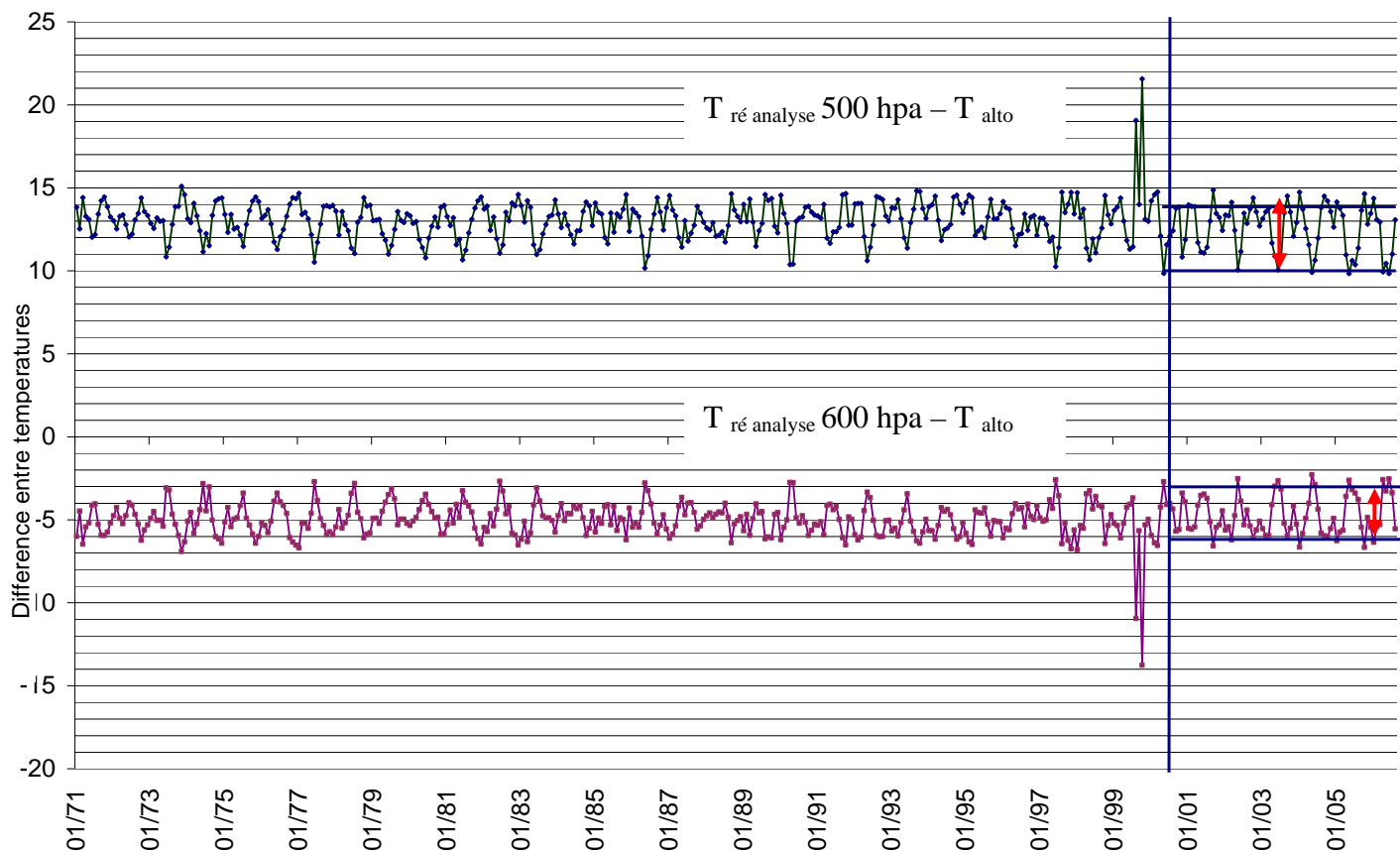


Fig. 4-6.- Différences entre les températures de ré - analyses à 500 (bleu) et 600 hPa (violet) par rapport à la station El Alto (mesures sur terrain)

Analyse des températures et des débits

Dans le graphique suivant on peut voir que la température de ré - analyses à 500 hPa est un bon indicateur de la ressource en eau glaciaire ($R=0.4$) jusqu'à l'année 2000. Ce résultat coïncide avec un travail réalisé au Pérou qui montre que cette température est un bon indicateur pour les écoulements d'origine glaciaire avec un coefficient de corrélation de $r=0.7$ jusqu'à l'année 1997 (Pouyaud, 2005). Dans un autre travail sur la Cordillère blanche au Pérou, il a été montré que les températures de ré analyse et les données d'humidité relative à 500 hPa présentent une bonne corrélation avec les données au sol (4830m), à pas de temps mensuel, pour la période de 2004 à 2007. (Hoffer, 2007).

Les différences d'altitude entre la station de débit et les altitudes de réanalyses sont de l'ordre de 770m pour 500 hPa et de 630m pour 600 hPa. Ainsi la température de ré analyse à 600 hPa apparaît plus proche des stations mesurées sur le terrain (Fig.4-7). Des résultats similaires ont été trouvés en Equateur (Villacis, 2008).

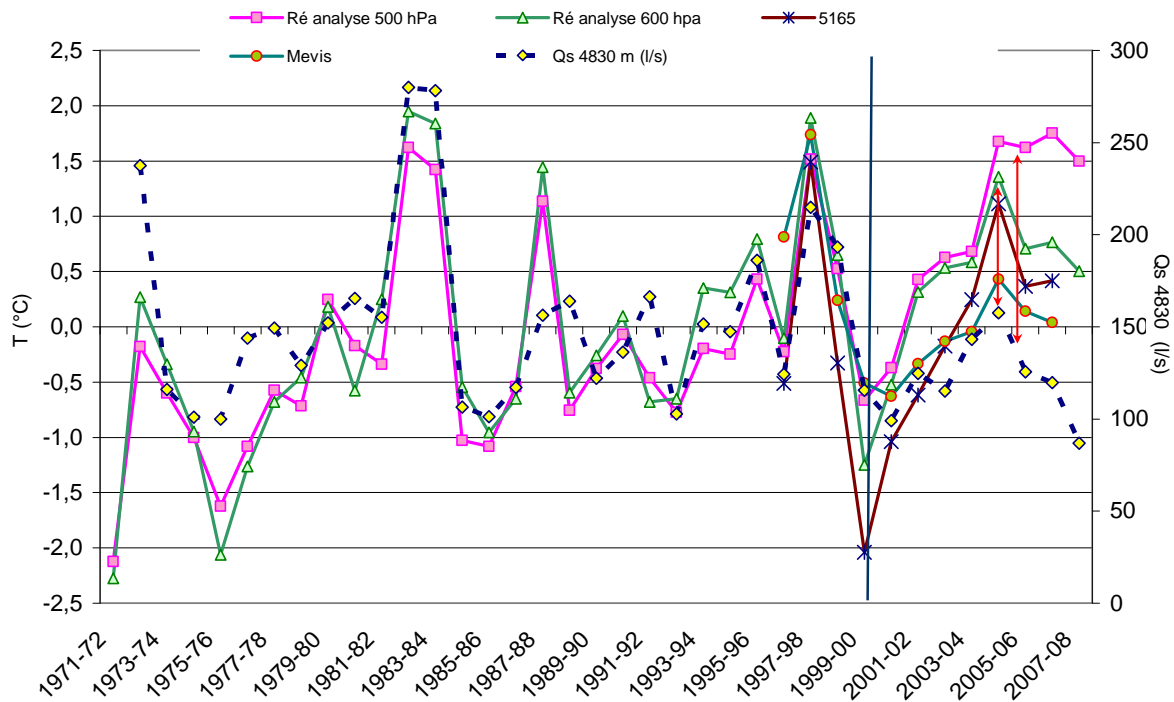


Fig. 4-7. Températures de moyennes mobiles de ré - analyses à 500, 600hPa, station Mevis et 5165 et les débits a 4830 m.. Les flèches rouges indiquent la distance de séparation qu'il existe entre les températures de réanalyses et les débits. A 500 hPa il existe une différence de 770 m et à 600 hPa 630 m de différence par rapport aux débits.

Sur le période 1971 -1998 l' analyse entre la température de ré analyse et les débits montre que la corrélation est mieux pour la T ré à 500 hPa que pour 600 hPa ($R= 0.63$, 0.59 respectivement). Cependant, entre le période 1998 – 2008 la T ré analyse a 600 hPa nous montre une mieux corrélation que la T ré analyse a 500 hPa ($R= 0.0189$, 0.068 respectivement).

Conclusion

A partir de l'analyse des données hydro - climatiques on peut conclure que :

- Les données de précipitation analysées entre 1993 et 2007 présentent une incohérence pendant l'année 1997-98 causée par le fort impact du phénomène El Niño. Pendant cette période la forte diminution de la précipitation a produit une rupture de la tendance. Néanmoins, l'analyse statistique appliquée à la série de précipitation montre qu'il n'est pas nécessaire d'appliquer une correction.
- L'analyse statistique appliquée pour le logiciel Khronostat à la série des données de débits montre une homogénéité sur la série des données, sans rupture dans la tendance
- Les données de température à la station El Alto montrent une valeur de 2.3 °C en 1998-99 qui peut être attribuée à une erreur de mesure. Les températures de ré - analysés à 500 et 600 hPa montrent une dispersion importante depuis 1998 par rapport aux stations situées au sol. Ces températures de ré analyses présentent une plus forte augmentation à partir de l'année hydrologique 1998-99 surtout pour la Tré à 500 hPa. L'analyse des températures de ré analyse à 400, 500, 600 et 700 hPa nous indiquent que cette augmentation peut être attribuée plutôt à un phénomène local et non à un phénomène global.
- En faisant une analyse entre la Tré et les débits on peut dire que la Tré 500 hPa était représentative des écoulements du glacier jusqu' en 1998. Mais après 1998 elle présente une forte augmentation qui crée un décrochage avec les débits
A partir de l'année 1998 la Tré à 600 hPa montre en effet une meilleure relation avec les débits mesurés à l'aval du glacier Zongo.

5. VARIABILITE INTERANNUELLE DU STOCKAGE DE NEIGE

Ce chapitre porte de la variation du stock de neige sur le bassin hors glacier, en particulier après le phénomène El Niño de 1997 -98.

Calcul de l'isotherme 0°C

Pour connaître la quantité de neige qui reste on doit savoir d'abord où et combien de neige précipite. Pour le savoir on a utilisé l'isotherme 0°C en supposant que cette altitude est la limite entre la pluie liquide et solide, et que pour $T < 0^\circ\text{C}$ on a de la neige. On a donc calculé au pas mensuel et annuel l'altitude de l'isotherme 0°C

Pour calculer la variation de l'isotherme 0°C on a utilisé la relation suivante qui est utilisée dans les Andes centrales par exemple sur le glacier du Zongo (*Condom et al., 2007*) ou plus récemment dans la thèse de Marcos Villacis, 2008 en Equateur.

$$Z_{0^\circ\text{C}} = Z_{\text{ref}} + g * T_{\text{ref}} \text{ (Eq. 5-1)}$$

Z 0°C : Altitude de l'isotherme (m)

Z réf. : Altitude de la station météorologique (m.s.n.m.)

g : Gradient de variation de la *T* avec l'altitude ($^\circ\text{C}/100\text{m}^{-1}$)

T réf. : Température mesurée à l'altitude de la station météo (*Z*réf) ($^\circ\text{C}$)

Variation interannuelle de l'isotherme 0°C

Pour le présent travail, on a utilisé la station « El Alto » à 4071m. comme station de référence météorologique (*T* réf., *Z* réf.), et un gradient altitudinal de $0.7 \text{ }^\circ\text{C}/100\text{m}^{-1}$ déterminé à partir de la station « El Alto » et coïncidant avec la base d'observations sur le bassin du Zongo (*L'Hôte et al., 2004*).

Dans la *Fig. 5-1* on peut remarquer la variation de l'isotherme 0°C au pas annuel depuis l'année 1971. Il existe une relation entre les données de SOI (Enso index) et la variation en altitude de l'isotherme 0°C. Ainsi, pendant un événement El Niño comme celui de 1983 et 1998, l'isotherme 0°C monte en altitude 5250 et 5300 respectivement. Et inversement pendant un phénomène « La Niña » comme celui de 2000 -01 l'altitude de l'isotherme 0°C est plus basse (5050m).

On peut remarquer que l'année 1999-00 présente une incohérence dans le calcul causée par une erreur dans les données de température (cf. analyse détaillée dans Chapitre 4).

Sur la période 1971 – 2006, la moyenne interannuelle de l'altitude moyenne annuelle de l'isotherme 0°C est de 5128m, et varie entre 5116 m.s.n.m en 1983-84 et 4852m.s.n.m. en 1985-86. Sur cette période on a 15 années avec isotherme 0°C supérieure à 5128 m. Pour toutes ces années on a un SOI moyenne de -11.89 et 2 sont depuis 1998.

Dans les Andes, la forte variabilité climatique interannuelle peut engendrer une variation de l'isotherme 0°C jusqu'à 500 m d'une année à l'autre. (*Condom, et al. 2007*)

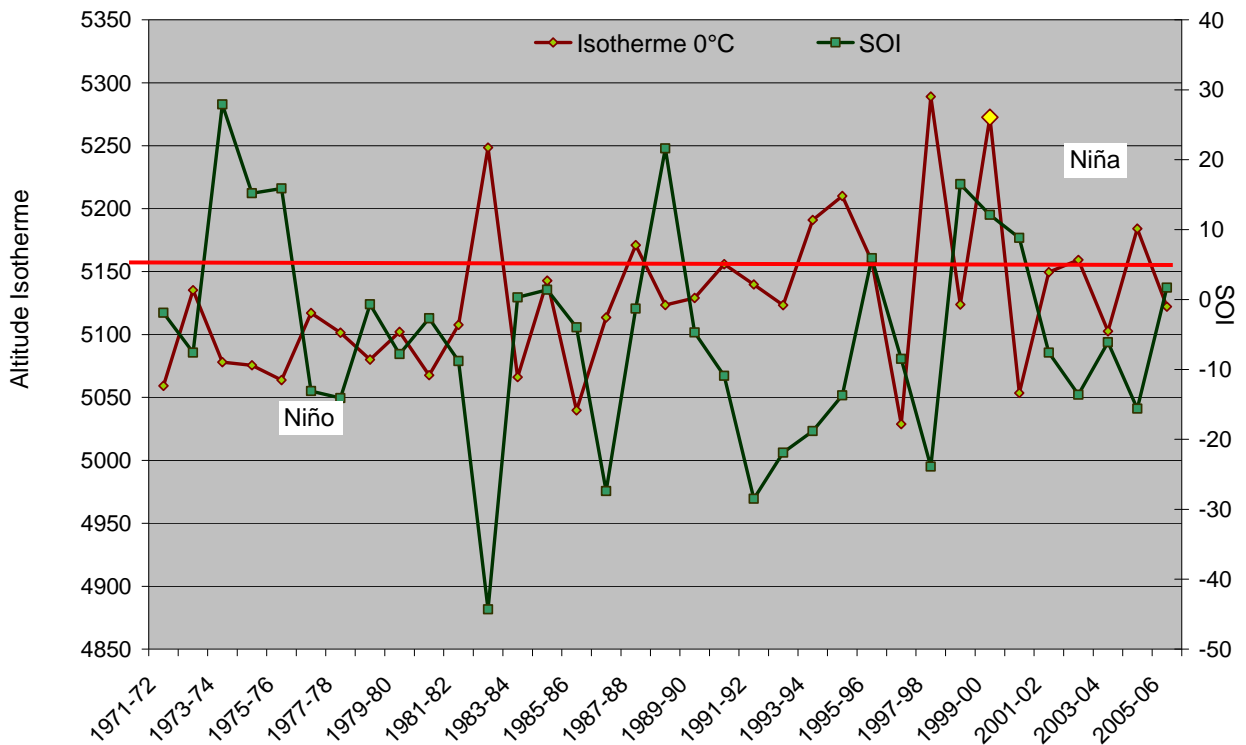


Fig.5- 1: L'isotherme 0°C et la précipitation depuis l'année 1971. Le point jaune montre une possible erreur de donnée.

Variation saisonnière de l'altitude de l'isotherme 0°C

Pour une analyse saisonnière de l'isotherme 0°C nous avons calculé les valeurs moyenne de la saison humide (moyenne de décembre, janvier, février et mars) et de la saison sèche (moyenne de avril, mai, juin et Juillet) depuis 1971. A partir de l'année 1985-86 existe une tendance d'augmentation (Carrasco, et I, 2005) de près de 400m entre 5234 (min) et 5618 (max). Dans la Fig. 5-2 on peut voir que la saison humide présente une tendance à l'augmentation de l'isotherme 0° qui varie entre 5234 (min) et 5618 m (max). Par contre la tendance de la saison sèche montre plutôt un plat avec une légère diminution entre 5031 (max) et 4879m (min).

Il est intéressant de noter que après les deux forts Niño (1982-83 et 1997-98), on observe pendant trois ans une baisse d'altitude de l'isotherme 0°C.

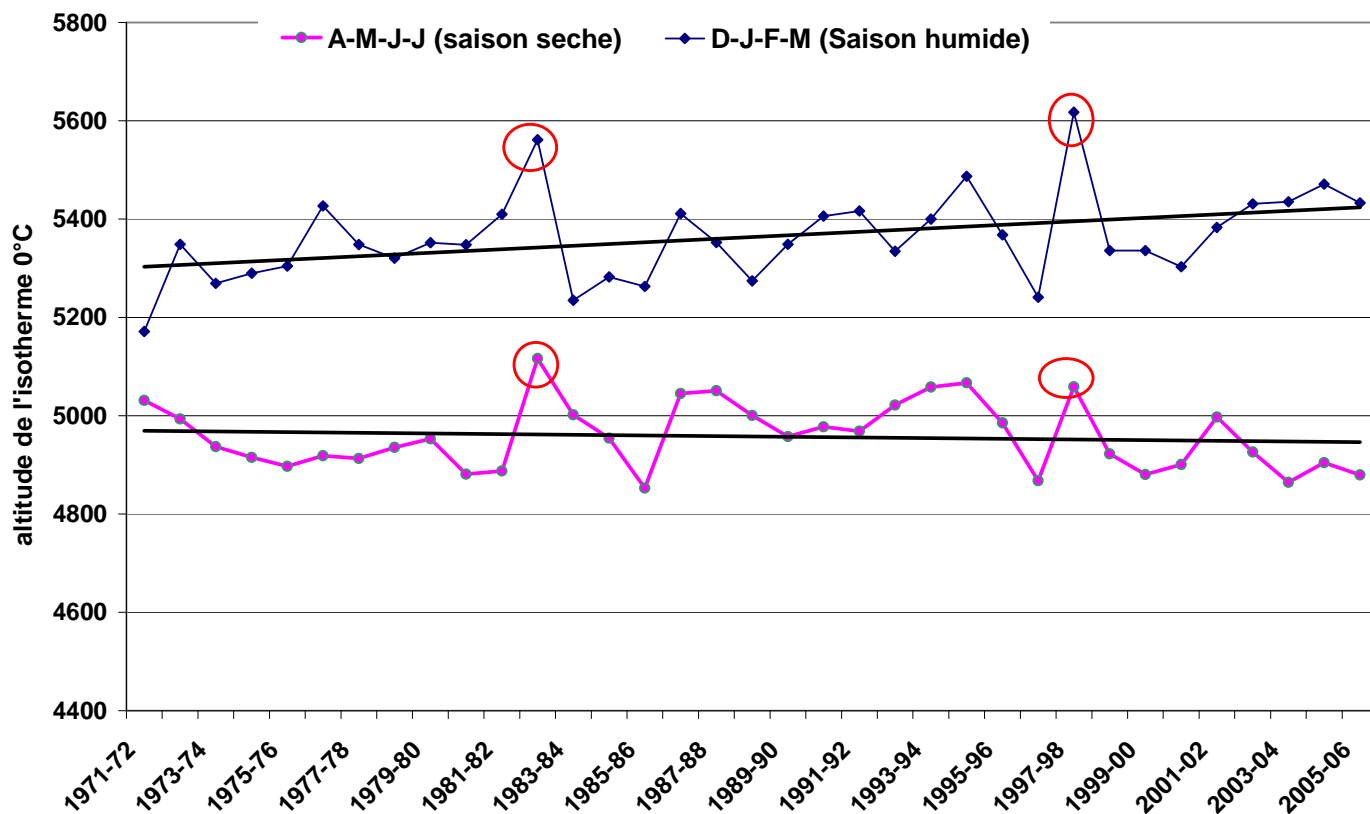


Fig. 5-2.- Variation de l'isotherme 0°C pendant la saison de pluie (D-J-F-M) et pendant la saison sèche (A-M-J-J). Les cercles rouges nous montrent les deux plus forts événements « El Niño » enregistrée depuis 1971.

Estimation des débits en dehors de la zone englacée

Pour étudier le stockage de la neige dans la partie non englacée on a supposé 1) que la précipitation est la même pour tout le bassin 2) La précipitation qui chute au dessus de l'isotherme 0°C est solide.

On a calculé les débits de la partie non englacée à partir de la formule de la méthode hydrologique ($B_{n,h}$) utilisée pour estimer le bilan de masse annuel du glacier (Sicart et al., 2007

$$Q_s \text{ non englacé (m}^3\text{/s)} = S_{\text{non englacée (m}^2\text{)}} * P_{\text{liquide (m)}} * Ce \quad (\text{Eq. 5-2})$$

$Q_s \text{ non englacé (m}^3\text{/s)}$: Débit théorique à 4830 m. alimenté par la pluie – liquide sur le bassin non englacé

$S_{\text{non englacée (m}^2\text{)}$: Surface au dessous l'isotherme 0°C qui varie en fonction des années.

$P_{\text{liquide (m)}}$: Précipitation liquide (m)

Ce: Coefficient de Ruissellement (Ribstein et al. 1995)

La surface a été calculée à partir de la somme des surfaces des tranches altitudinales qui se trouvent au dessous de l'isotherme 0°C et qui varie entre 120 et 1478 m

La Fig. 5-3 montre la variation de la surface au dessous de l'isotherme 0°C (variation entre 120m² et 1478 m²) et la précipitation. Notons que pendant un événement « El Niño » cette surface augmente (max. 1478 m²), en exposant la zone d'ablation à la précipitation liquide

Au contraire pendant le Phénomène La Niña cette surface diminue (min. 300m) et aussi l'exposition du glacier a la précipitation liquide.

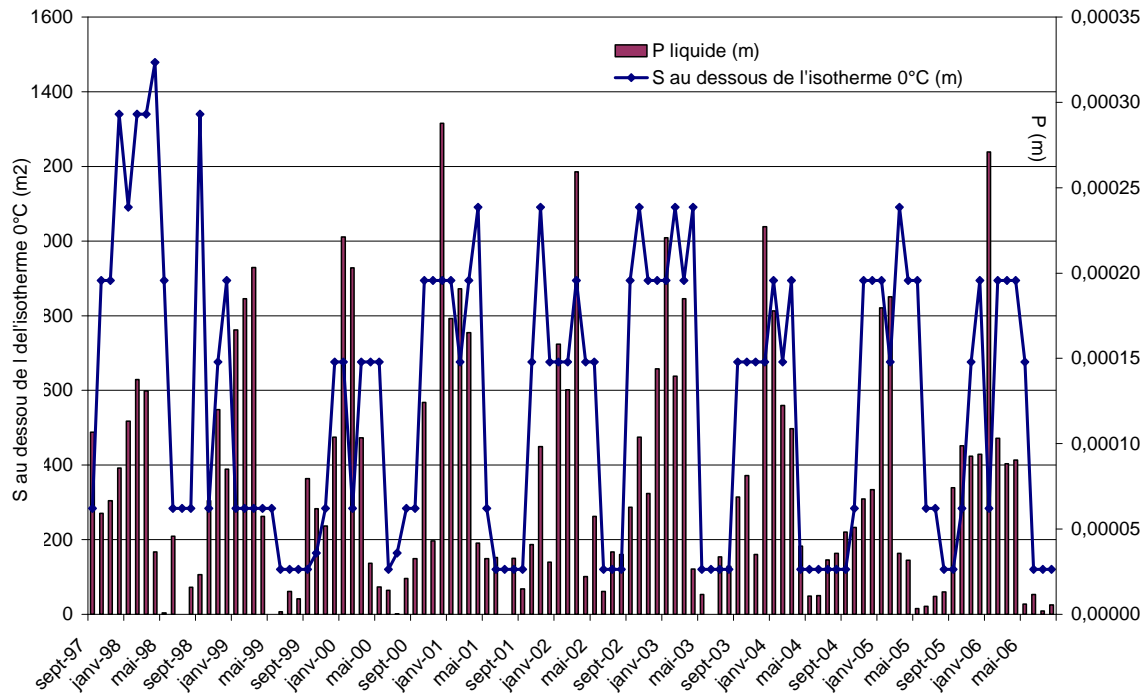


Fig. 5-3 : Variation de la surface au dessous de l'isotherme 0°C (Bleu) et de la précipitation (rouge)

Variation interannuelle

La Fig. 5-3 montre la variation des débits annuels depuis 1971 calculés par l'équation 5.2. L'année 2000-01 présente de faibles débits coïncidant avec le phénomène La Niña et des débits plus forts coïncidant avec les phénomènes « El Niño » les plus forts enregistrés durant les dernières décennies (1983 et 1998). Le SOI annuel est calculé à partir de la Déviation Standard (Poirer, 2004)

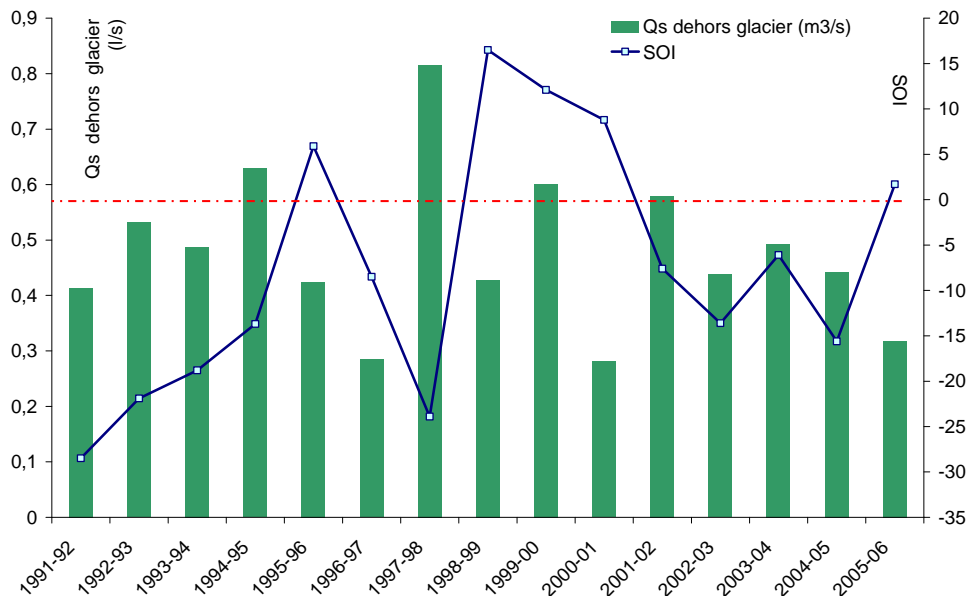


Fig. 5-4: Variation de débits annuels de la partie non englacée. (Vert). Indice d'oscillation du sud – SOI (Ligne Bleu) entre 1991 et 2006. La ligne rouge montre la limite de SOI entre les événements El Niño et La Niña

Variation saisonnière

On a fait une analyse interannuelle des débits de la partie non englacée depuis l'année 1993, entre la saison humide et sèche, calculés par la formule suivante :

$$Dq = S_{\text{non englacé}} * Ce * P$$

Dq : Deficit de neige (m3/s)

S_{non englacé} : Superficie en dessous de l'isotherme

Ce : Coefficient de Ruissellement

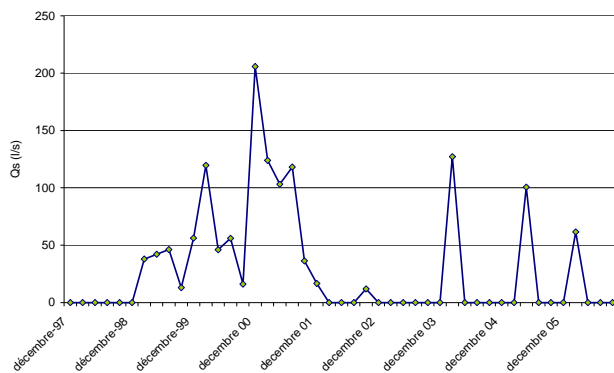
P : Précipitation (m)

On a supposé qu'il puisse y avoir des précipitations liquides lorsque la température est supérieure à 0°C.

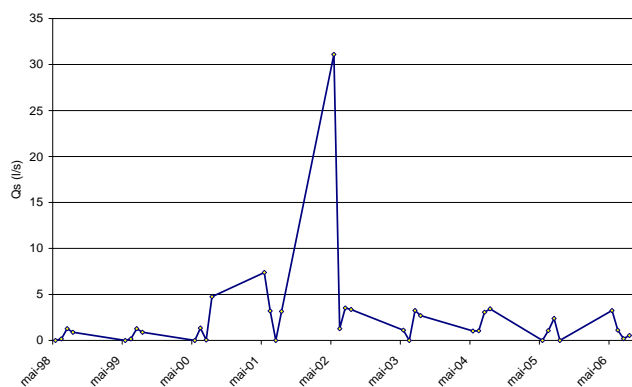
On considère que les mois de décembre, janvier, février, mars et avril appartiennent à la saison humide et que les mois de mai, juin, juillet et août appartiennent à la saison sèche.

Sur la Fig.5-5 on voit qu'il existe un stockage de neige à partir du mois de décembre 1999 jusqu'au mois de Février 2002 (Phénomène La Niña). La couverture neigeuse a protégé le glacier par un fort albédo, ce qui a entraîné des débits faibles (Gallaire et al., 2007).

Par contre depuis l'année 2002, le stockage de neige sur le glacier est faible pendant la saison humide. Pendant la saison sèche on peut voir que le plus important stockage de neige se fait pendant le mois de juillet. L'année 2002 montre une augmentation importante du débit pendant le mois de juillet (31.06 l/s). A partir de l'année 2002 le stockage est faible, et les débits en dehors de la partie englacée ne montrent pas d'augmentation.



a)



b)

Fig. 5-5 : a) Déficit de débits associé a un stockage potentiel de neige pendant la saison de pluie (décembre, janvier, février et mars)

b) Variation de stockage de neige pendant la saison sèche (avril, mai, juin et Juillet)

Pour valider ce résultat on s'est appuyé sur des photographies prises pendant les saisons humides des années hydrologiques 2000-2001, 2001-2002 et 2002-2003. On peut voir que pendant l'année 2000-01 il y a de la neige qui reste sur le glacier. Pendant l'année 2001-02 la couverture neigeuse est plus faible et finalement pendant l'année 2002-03, cette couverture est plus faible.



Variation interannuelle des surfaces du glacier

Variation annuelle de la surface du glacier

L'évolution de la surface du glacier est contrôlée grâce aux mesures topographiques des balises et du front effectuées en fin d'année hydrologique (septembre). Ce travail est réalisé pour l'entreprise « Cari Silva », à la demande de la Cobee, depuis 1992.

Les résultats antérieurs ont été estimés à partir de restitutions photogramétriques qui ont été menées grâce aux photographies aériennes.

A partir de l'année 1992 la perte en surface du glacier est en moyenne de 0.003 Km² par année. Le pallier de l'année 2003-04 (0.0012 km²), montre que la réduction de surface a été beaucoup moins élevée cette année là (Fig. 5.6), comme en 1992-93, et que ces années ont clairement été des années de meilleure rétention de la précipitation par le glacier et donc de débits d'origine glaciaire moindres.

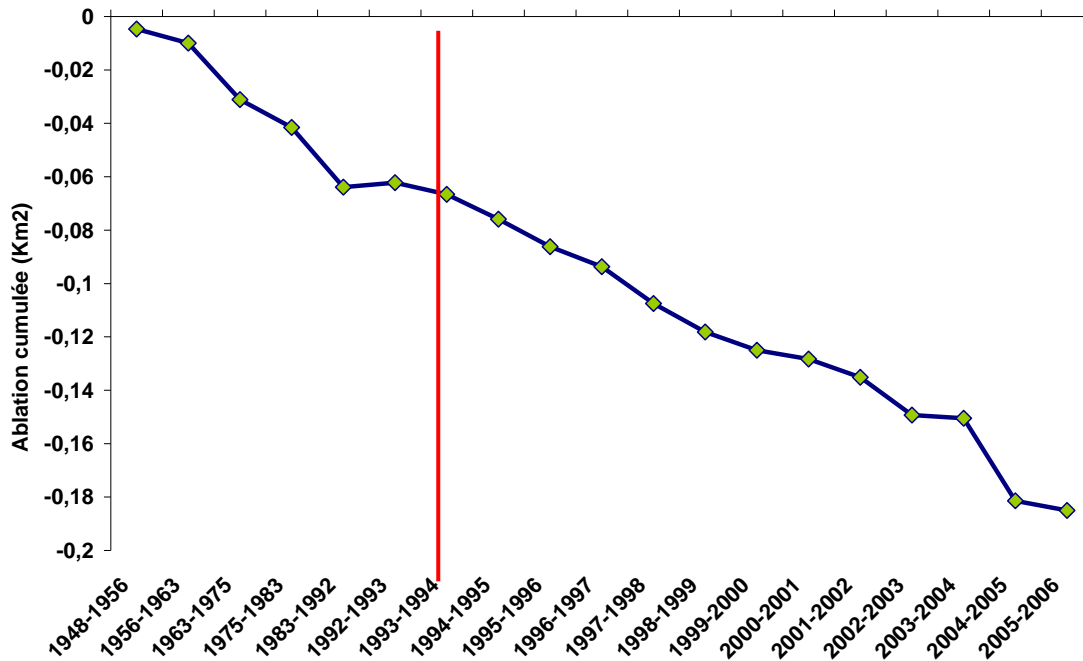


Fig. 5-6. Evolution cumulée du glacier à partir de 1948 jusque l'année 2006. Entre l'année 1948 – 1956 la surface du glacier a été calculé a partir de Photos Aeriennes. Depuis 1992 cette surface est mesurée à partir de la topographie terrestre.

L'analyse de différentes séries des données, montrent une modification géométrique importante sur le glacier de Zongo et chacaltaya à cause du son retrait au cours de l'année 1997-98. (Gallaire et.al, 2007 ; Ramirez, 1998)

Le glacier du Chacaltaya montre une diminution notable sur la surface depuis l'année 1997-98 (Ramirez, 1998), en revanche le glacier du Zongo après la perte remarquable, pour lui aussi, liée au Niño 1997-98 ne montre pas de diminution notable de son bilan net jusqu'en 2004 (Fig.5.7). Depuis l'année 1999-00 jusque le 2001 -02 le Bilan Net est même en légère augmentation suite au phénomène La Niña. (2000-01).

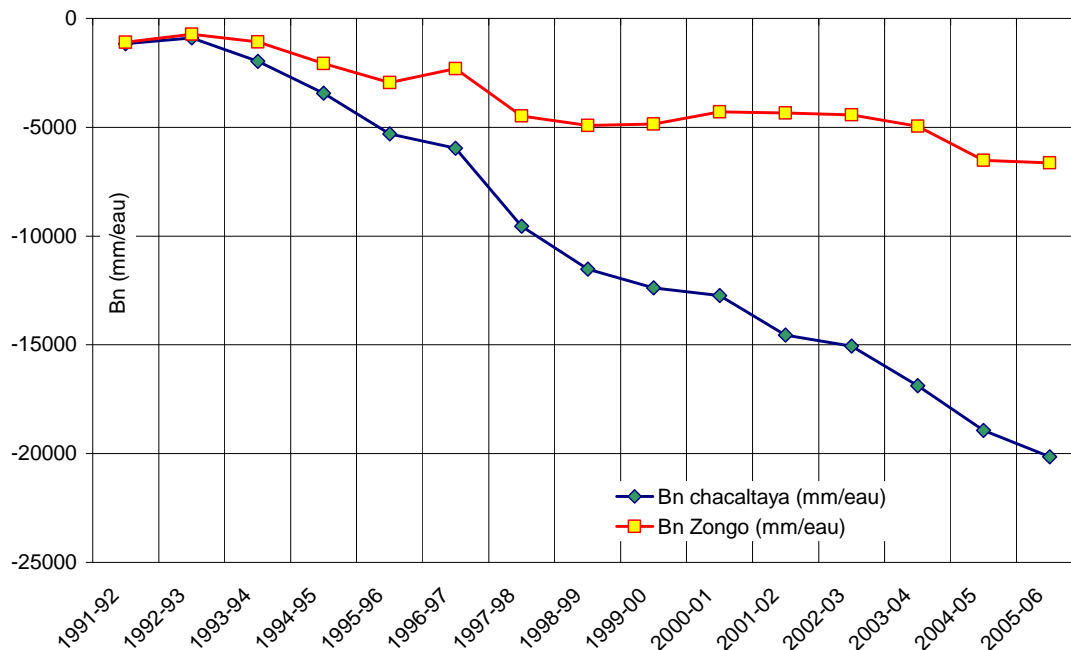


Fig. 5.7 : Evolution du bilan de masse du glacier Chacaltaya et du Zongo

Variation de la zone d'ablation

La superficie de la zone d'ablation a été obtenue en calculant la somme de la surface de 6 tranches altitudinales déterminées préalablement en dessous de la ligne d'équilibre (Equilibrium Ligne Altitude). On a estimé ainsi la superficie totale de la zone d'ablation pour chaque année entre 1991 et 2006.

On observe (Fig. 5-8) qu'en présence d'un phénomène « El Niño », la zone d'ablation se verra exposée à une augmentation de sa surface. A titre d'exemple, lors de l'événement « El Niño » du 1997- 1998, la zone d'ablation a augmentée 1400 m². Contrairement, au cours d'un phénomène « La Niña », la zone d'ablation se verra exposée à une diminution de sa surface. Par exemple, lors des événements « La Niña » du 1996 et du 2001, la zone d'ablation a diminuée 300 m² et 700 m², respectivement.

Ces variations de la surface d'ablation peuvent avoir une influence sur les variations du débit d'origine glaciaire. Dans la Fig. 5-8 on observe qu'à partir de l'année hydrologique 1991-92 et jusqu'à 2002-03, les fluctuations interannuelles de la superficie d'ablation ont suivi une évolution similaire aux fluctuations interannuelles du débit.

Néanmoins, cette relation n'est pas observée entre les années hydrologique 2002-03 et 2005-06 car les fluctuations interannuelles de la surface d'ablation et du débit ont suivi des évolutions très différentes

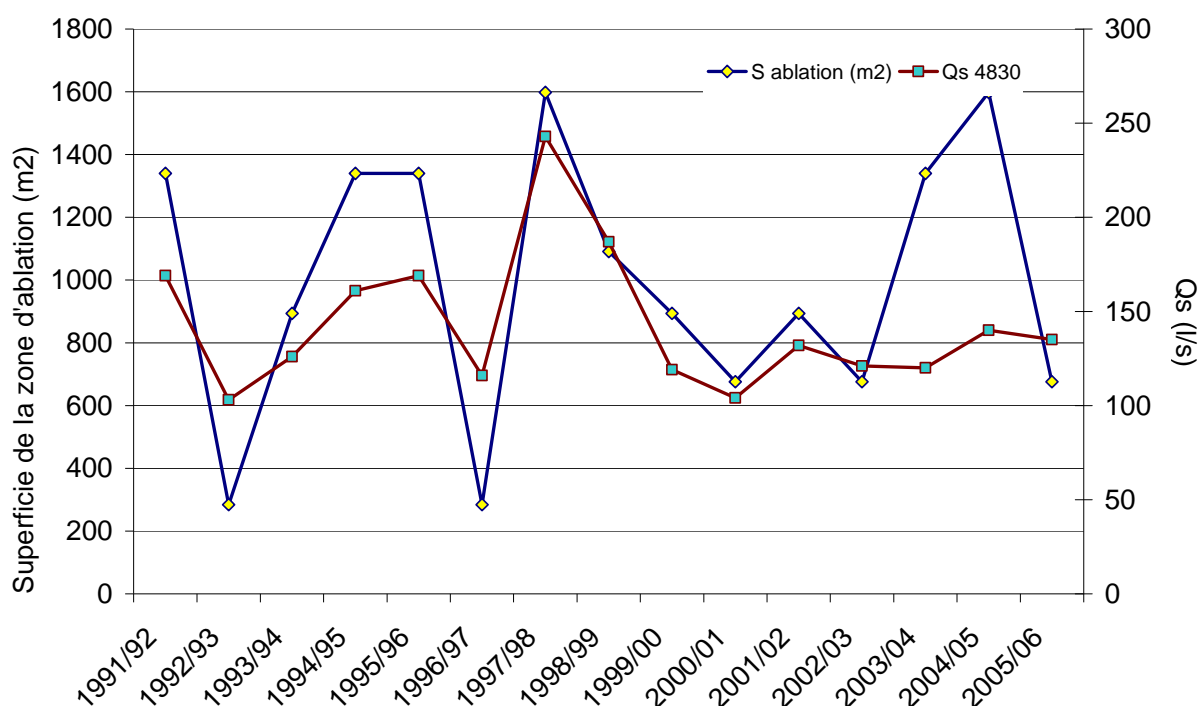


Fig. 5-8 : Variation annuelle de la superficie de la zone d'ablation (Bleu) et les débits (rouge) entre 1991 et 2006.

Conclusion

Ce chapitre permet d'arriver aux conclusions suivantes :

- L'isotherme 0°C a tendance à s'élever en altitude, depuis 1971 (400 m environ) surtout pendant la saison humide, alors qu'à la saison sèche la tendance est inverse.
- Pendant les années 1999 et 2001 le stockage de neige sur le glacier est évident car les débits sont plus faibles. Après l'année 2001 le stockage de neige sur le bassin a été faible surtout pendant la saison humide ce qui nous indique que la neige n'est pas restée longtemps sur le bassin et qu'elle n'a pas protégé le glacier de la fusion (albédo faible).). A partir de l'année 2002 le stockage est faible, et les débits en dehors de la partie englacée ne montrent pas d'augmentation
- L'ELA, l'isotherme 0°C et le bilan de masse du glacier montre une modification après l'année 1997-98 (*Gallaire et al, 2007*), mais sa relation avec les débits et la SOI montre une cohérence, ce qui nous indique que le changement de taille n'a pas produit une diminution des débits.
- L'évolution similaire entre 1991 et 2003 des débits et la surface de la zone d'ablation montre une bonne correspondance. Cependant, cette similitude d'évolution est perdue depuis 2003.

6. CHANGEMENT DE REGIME DE PRECIPITATION

Ce chapitre présente l'analyse de l'évolution des précipitations de 1971 à 2006 à pas de temps annuel et mensuel.

Valeurs annuelles

La précipitation sur cette zone d'altitude des Andes est influencée par la partie haute de la troposphère pendant l'été austral qui est associée à la mousson d'Amérique du sud. (Garreaud et al, 2007).

Dans la Fig.6-1 on peut voir que les précipitations pendant les 35 années (1971 – 2006) ne montrent pas une tendance d'augmentation ou de diminution significative. (Francou et al., 2003). La station Plataforma est la station la plus à l'Est et est plus directement influencée par les flux atmosphériques du bassin versant amazonien. Les stations Milluni et El alto, plus à l'Ouest, sont situées dans la zone plus sèche du plateau de l'Altiplano. Cette situation géographique est en bon accord avec les quantités de précipitations en décroissance de Plataforma, Milluni et El alto. Il existe un certain synchronisme dans la variation interannuelle entre ces stations qui sont toutes alimentées essentiellement par la même source : les masses d'air humide provenant du bassin amazonien.

La valeur de précipitation à Plataforma de l'année 1985-86 est beaucoup plus importante que les autres et indique probablement une erreur dans la mesure des données de cette station. (Olmos, 2005).

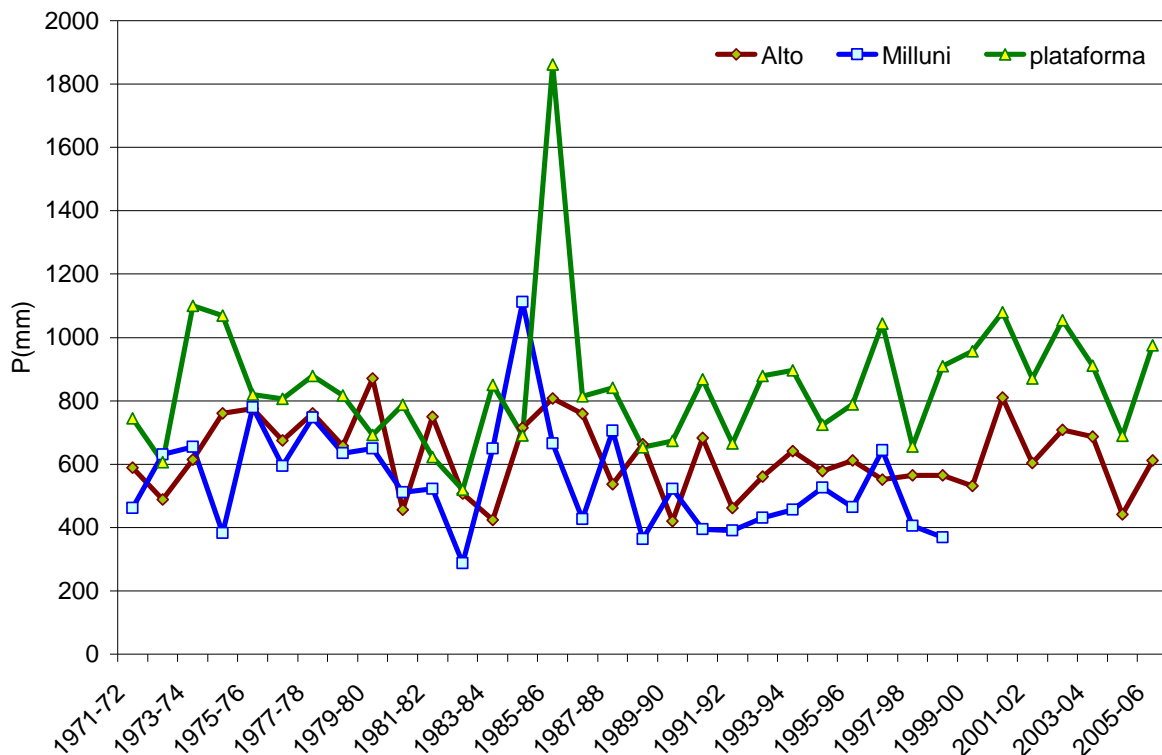


Fig. 6-1 : Précipitation annuelle depuis 1971 des stations El Alto, Milluni et Plataforma.

Pluies mensuelles

La précipitation est une variable essentielle des débits de la partie non englacée. Elle est la variable principale de la variabilité des débits ayant pour origine la fonte de la glace. En effet, la précipitation contrôle l'albédo de la surface du glacier et par conséquent les débits de fonte (Francou et al., 2003).

Dans le Fig.6.2 on peut voir que pour les pluies mensuelles (sept. 1971 – sept. 05) il existe une tendance à la diminution à la station de Plataforma et Milluni (plus faible à Plataforma qu'à la station Milluni)

Les précipitations à la station Plataforma montrent des valeurs plus fortes qu'à la station de Milluni (max. 440 et 259 mm respectivement). Cette variation est due à la localisation géographique et à la variation saisonnière de chaque station.

L'analyse des tendances mois à mois sera étudiée dans le paragraphe 6.2.1.

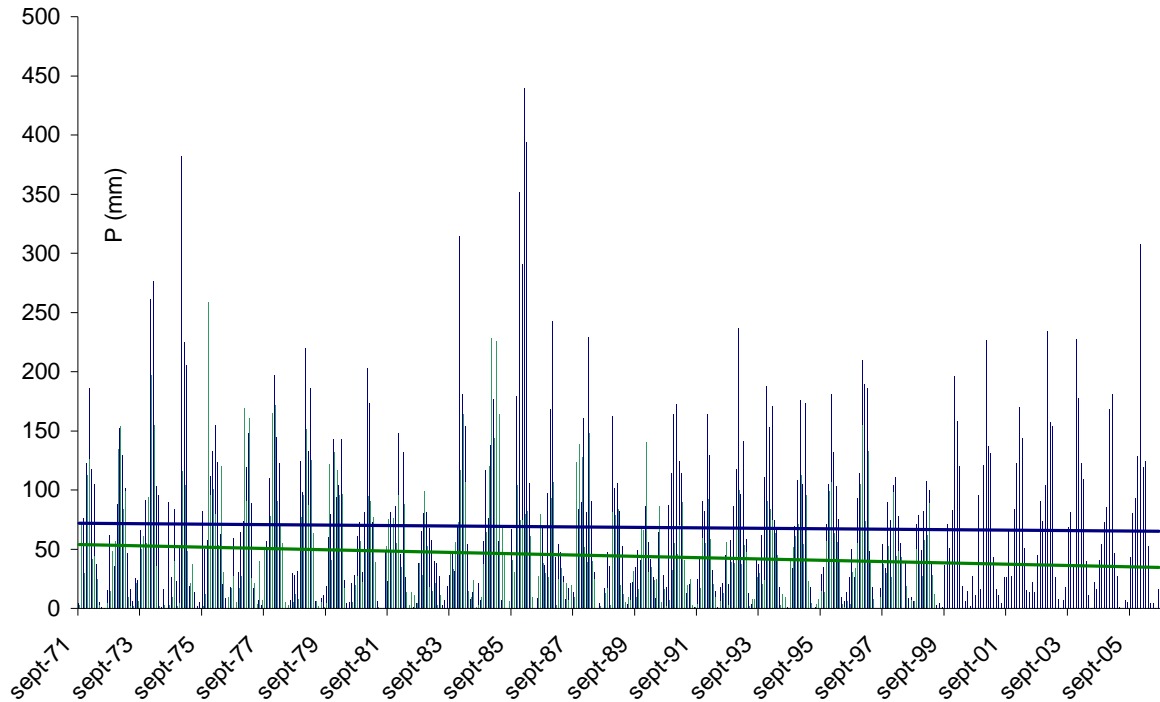


Fig. 6-2 : Pluies mensuelles depuis 1971 des stations Milluni (en vert) et Plataforma (en bleu).

En faisant une analyse saisonnière interannuelle de 1971 à 2006 on a vérifié que la plus grande quantité des précipitations qui tombe sur la zone d'étude est celle des mois de décembre, janvier, février et mars (14%, 22%, 17% et 15% respectivement). Les mois de décembre et mars montrent un pourcentage similaire. Pendant cette saison, que concentre environ 68 % des précipitations annuelles il neige en moyenne 2 jours sur 3, (Sicart et al., 2003).

Les mois avec les plus faibles quantités de pluie sont mai, juin et juillet (1.4%, 1.31%, 1.02 % respectivement) concentrant à peine 3.4% des précipitations annuelles (Fig. 6-3).

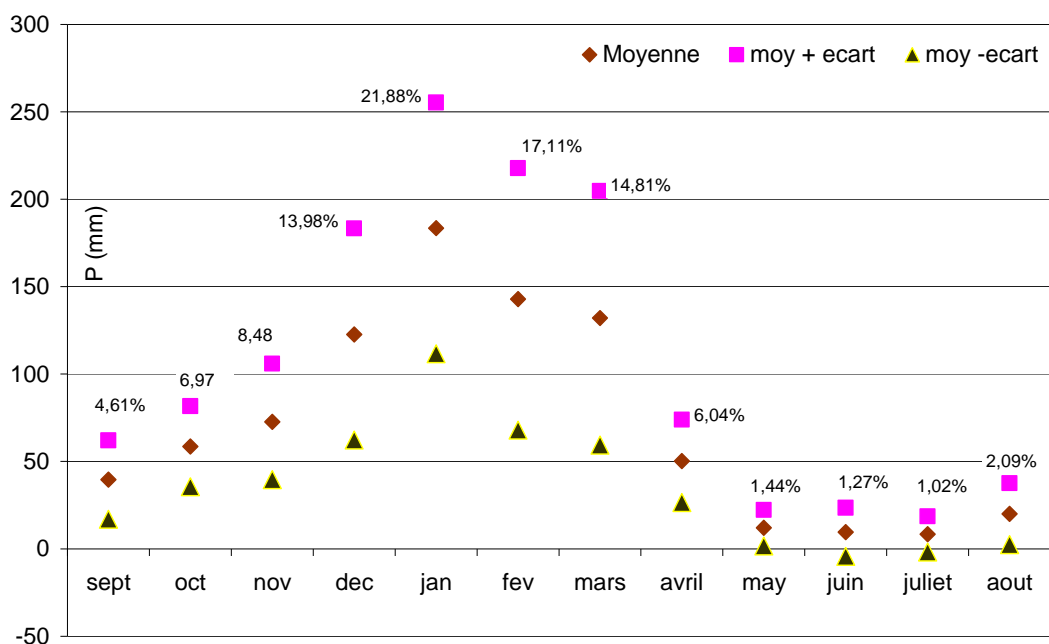


Fig. 6 - 3 Moyennes mensuelles (1971-2006) des pluies des stations qui se trouvent sur le bassin versant. Les précipitations les plus importantes ont lieu pendant les mois de décembre, janvier, février et mars.

Variation durant la saison humide : mois de décembre, janvier, février et mars

On a étudié la variabilité interannuelle de la pluie de la station Plataforma et des débits de la station 4830 m pour chaque mois de la saison des pluies, de décembre à mars. Dans la Fig. 6-4. Pour le mois de décembre les précipitations et les débits montrent une tendance à l'augmentation. Par contre pour les mois de janvier, février et mars ni les précipitation ni les débits ne montrent une tendance significative à l'augmentation. La corrélation entre les deux variables étant plus forte pour les mois de décembre et mars, cela signifie que le débit répond plutôt à la précipitation qu'à la fonte ($R = 0.0264$ et 0.031 respectivement).

En plus, on peut marquer que les mois de décembre, janvier, février et mars sont sensibles aux événements comme « El Niño » de 1983 – 1998- 2004 (précipitations plus faibles et débits plus forts), et « La Niña » de 1988 -2001 (Précipitation plus fortes et débits plus

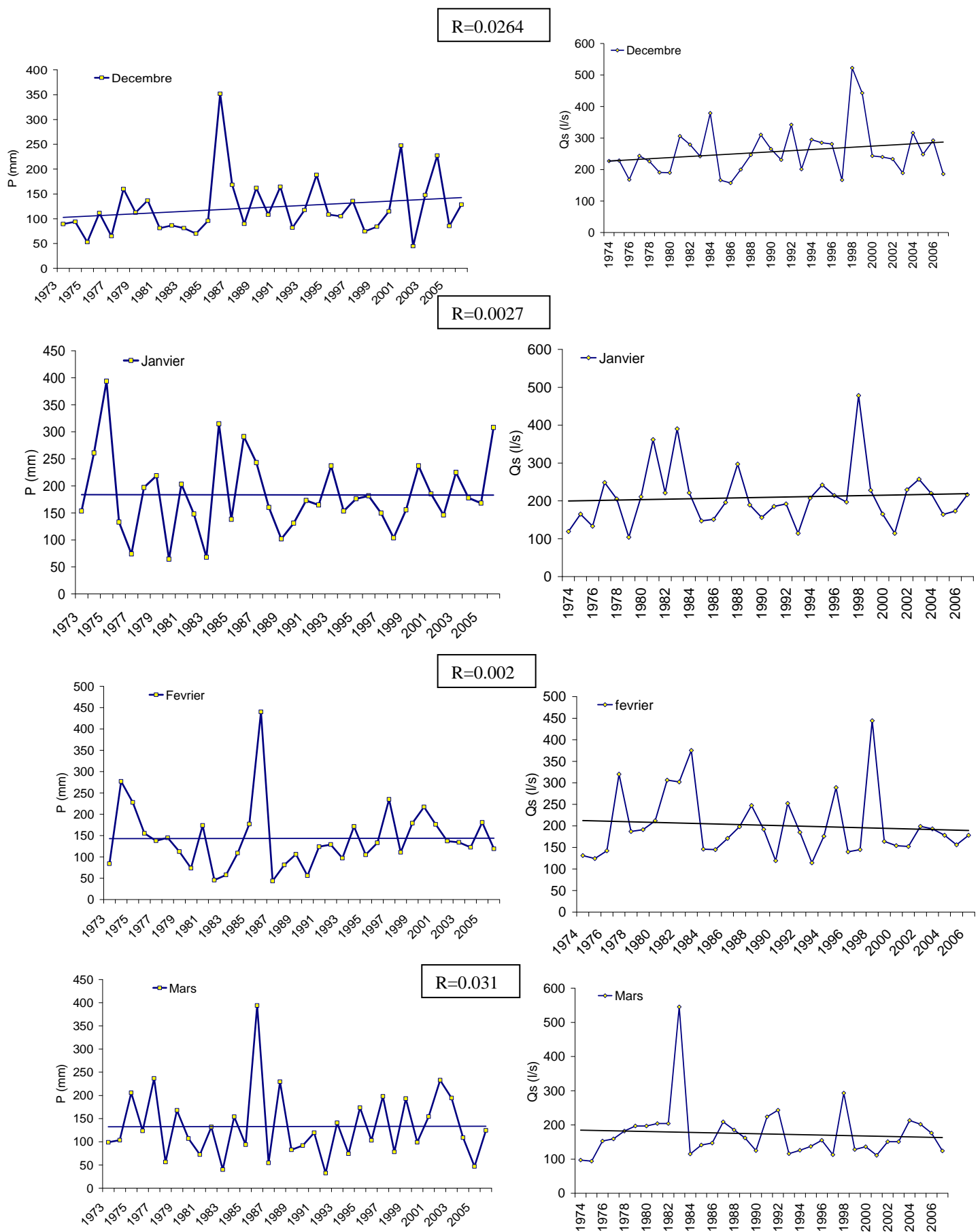


Fig. 6 - 4 : Tendances de précipitation et des débits (1973-2006) pendant les mois de décembre, janvier, février et mars (mois de plus forts écoulements)

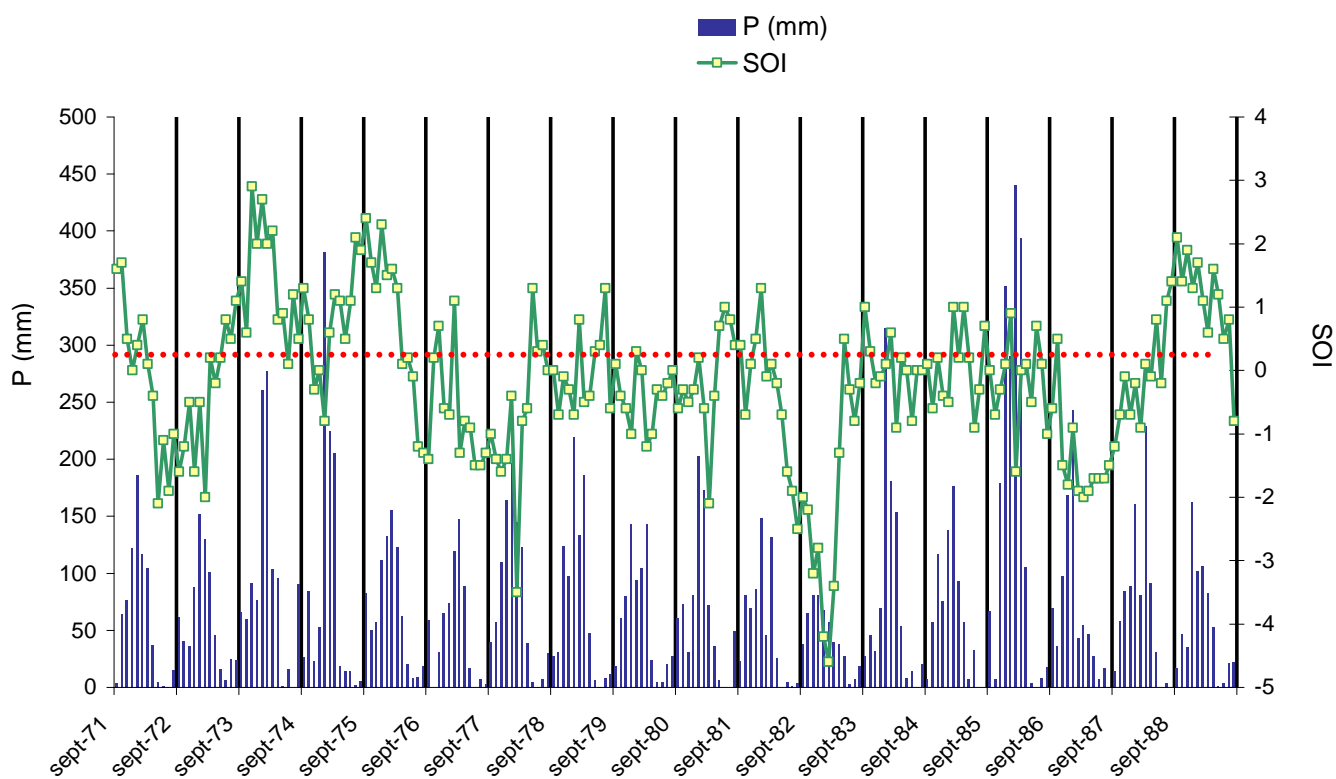
Relation entre la précipitation, les débits et les phénomènes EL Niño et La Niña

L'altiplano reçoit de fortes précipitations, en particulier durant la saison de pluies, qui montrent une forte variabilité interannuelle liée au phénomène « El Niño » (Francou et al, 2003).

Pendant un phénomène « El Niño » la saison des pluies est décalée, les fortes pluies sont en retard, ce qui provoque une plus forte fusion entre novembre et décembre car il n'y a pas de couverture neigeuse qui protège le glacier de la fonte. Au contraire pendant le phénomène « La Niña », les précipitations sont plus fortes et la saison des pluies commence plus tôt. La couverture de neige protège alors plus tôt le glacier de la fusion par effet de fort albédo (Sicart et al. 2003).

Si on compare les débits, la précipitation et le SOI entre 1971 et 2006 (Fig.6-5) on peut voir que les années 1973- 75 ont été influencées par le phénomène La Niña : précipitations plutôt fortes et faibles débits entre le mois de janvier et février.

L'année 1982-83 a été influencée par un fort « El Niño ». La saison des pluies présente une forte diminution des précipitations entre les mois de décembre et mars ce qui a provoqué une faible couverture neigeuse (albédo faible) insuffisante pour protéger le glacier.



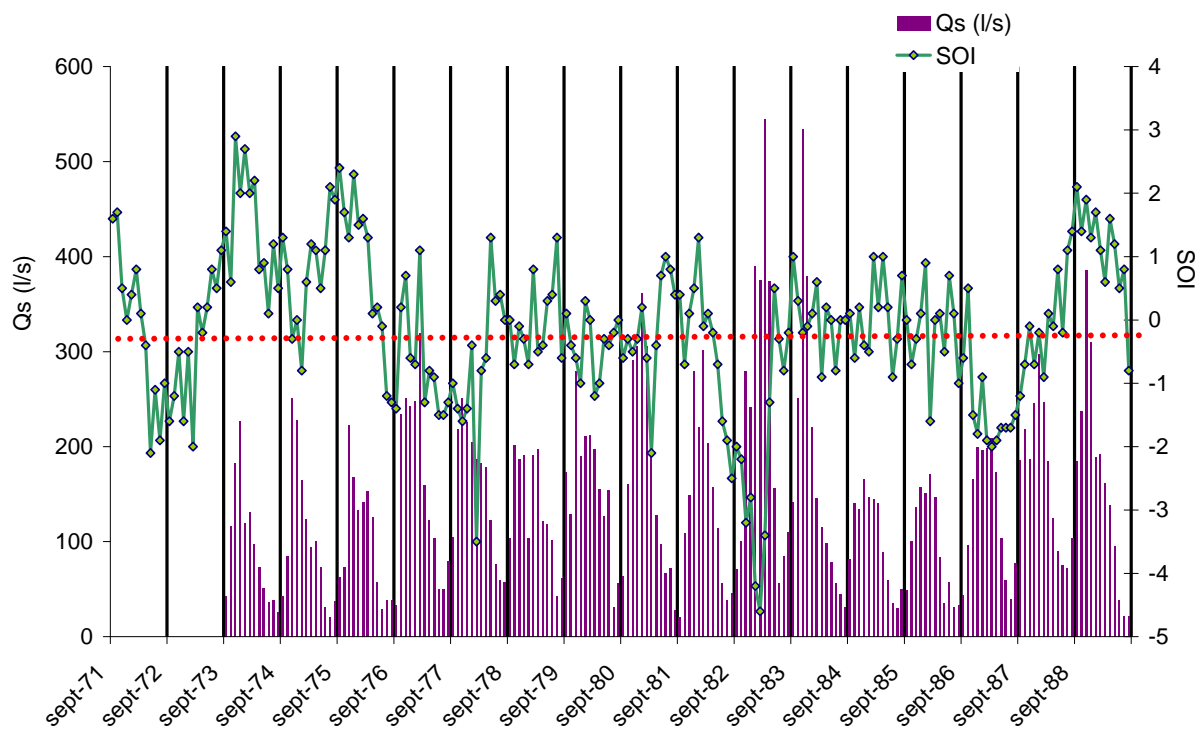


Fig. 6-5.- - Comparaison entre la précipitation, les débits et le SOI entre le période 1971-1989. Le SOI positif montre une phénomène El Niño et le SOI négative montre un Phénomène de La NIÑA.

Les années 1999 - 00 et 2005 ont été influencées plutôt par le phénomène « La Niña » en montrant les plus fortes précipitations entre les mois de décembre et janvier et les plus forts débits entre les mois de novembre et décembre (saison d'accumulation).

De plus, on peut dire que le phénomène EL Niño de 1991-92 a été mis en place entre les mois de janvier et février 1992 (précipitations plus fortes), mais les débits ne montrent pas une forte augmentation. Par contre pendant l'année 1997-98 et 2003-2004 l'influence de l'événement El Niño sur les débits est critique, comme en 1982-83, et bien que les plus fortes précipitations de l'année aient été enregistrées entre le mois de janvier et mars, elle ont été insuffisantes pour protéger le glacier de la fusion.

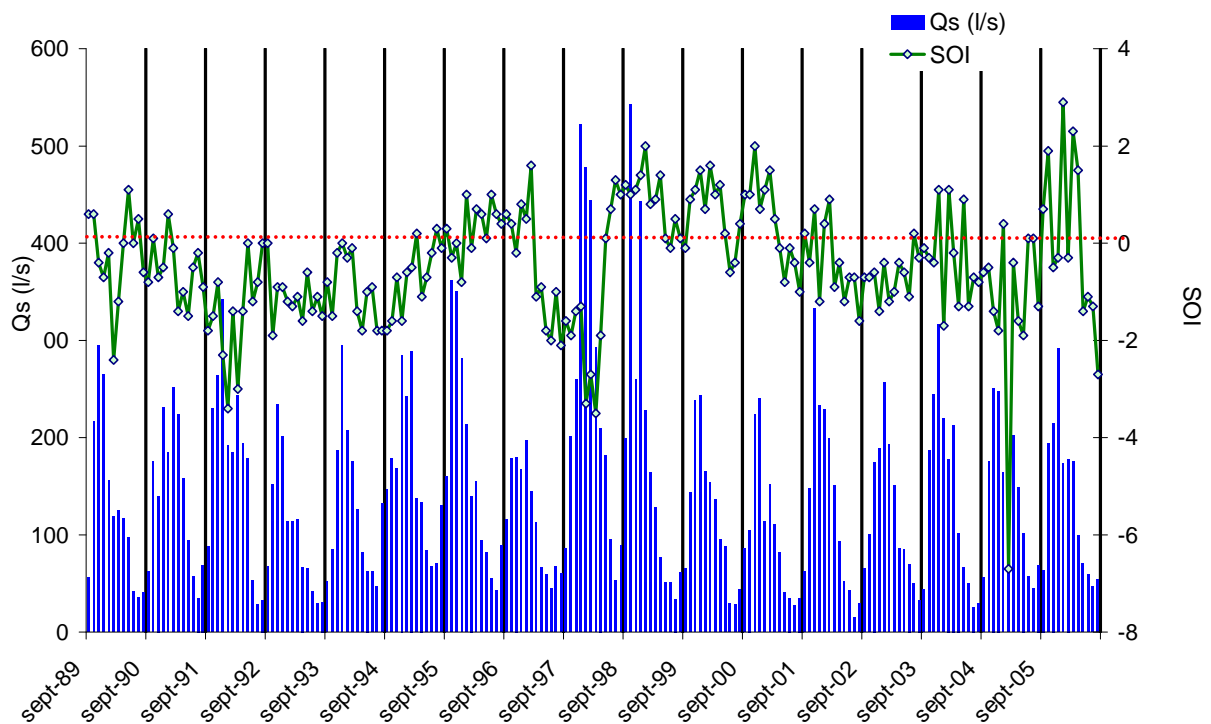
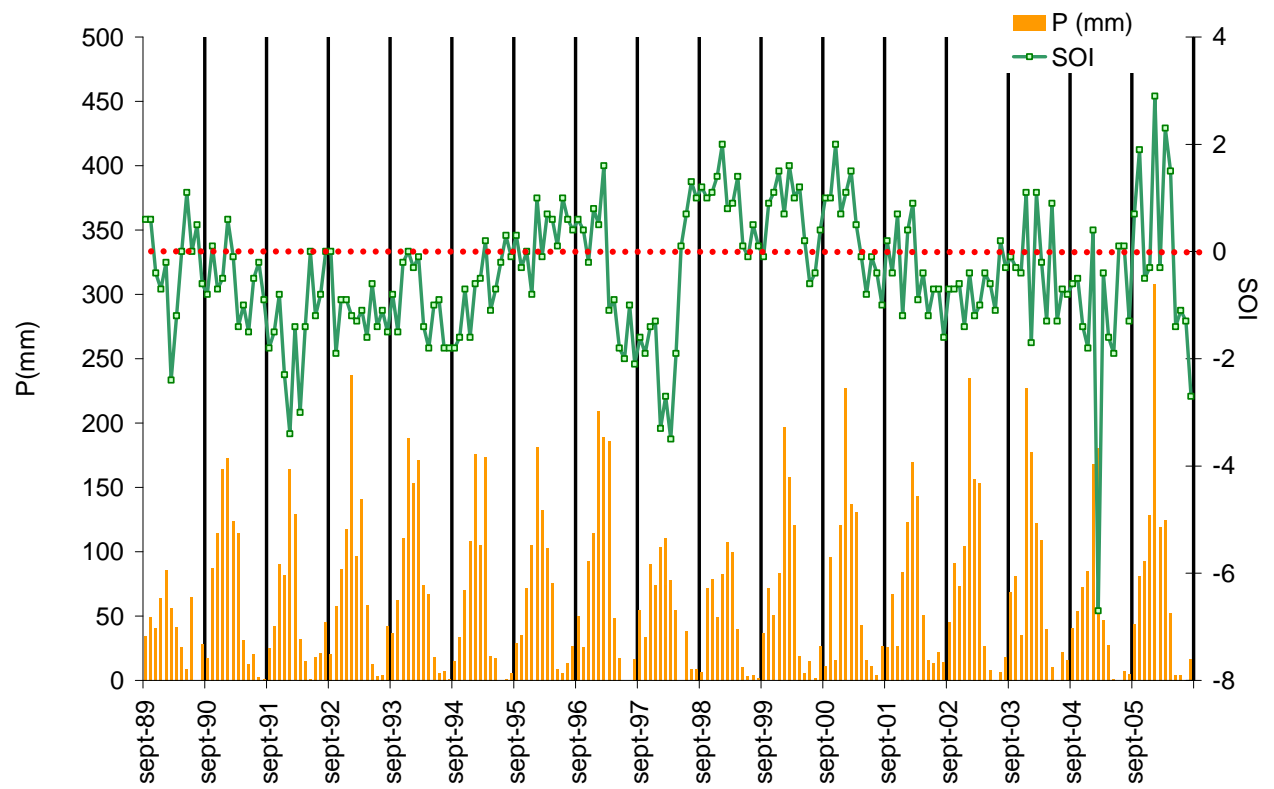


Fig. 6-6.- Comparaison entre la précipitation, les débits et le SOI entre le période 1990-2006

Conclusion

- A partir de l'analyse des précipitations on peut dire que pendant la période d'étude l'alternance des phénomènes el Niño et la Niña contrôle en grande partie les variations des débits à l'aval du glacier. Les années à plus fort débit annuel sont les années « El Niño », et les années avec le plus faible débit sont les années « La Niña »
- L'analyse de tendances des précipitations et des débits ne montrent pas une tendance significative d'augmentation ou de diminution pendant la saison humide. Les mois de décembre et mars présentent la meilleure corrélation entre les débits à la station 4830 et la précipitation. En effet pendant ces deux mois la précipitation est principalement liquide. Par contre pendant les mois de janvier et février la précipitation est plutôt neigeuse, laquelle reste sur le glacier.

CONCLUSIONS GENERALES

Grâce à l'analyse des données on a pu arriver à certaines conclusions pour répondre à la question de décrochage entre la température de ré analyse à 500 hPa et les débits que nous souhaitons présenter :

a) La relation entre données de température de ré-analyse et les débits

A partir de la comparaison de données de moyennes mobiles que l'on a fait entre les températures de réanalyses (500hPa et 600hPa), les températures au sol et les débits à 4830 m on peut dire que les températures de ré analyse sont représentatives pour des études sur le glacier du Zongo jusqu'à l'année 1998. A partir de 1998 elles présentent une forte augmentation. Malgré ce phénomène la température à 600 Hpa semble être la plus représentative pour les études hydrologiques.

L'analyse de température de réanalyses à différentes pressions montre que cette augmentation depuis 1998 peut être attribuée à un phénomène local et non à un phénomène global.

b) Stockage de neige sur la partie non englacée

Le calcul de la quantité de neige ayant pu être stockée dans la zone non englacée a permis de mettre en évidence que de décembre 1998 à décembre 2001 il y a eu un stockage de neige qui a eu pour effet de diminuer l'écoulement et que l'on ne retrouve pas les années suivantes.

c) La géométrie du glacier a changé pendant des années.

A partir de l'analyse des données on ne retrouve pas de diminution significative du débit à partir de 2001. La diminution de la taille du glacier n'affecte donc pas le débit.

d) Le changement du régime de précipitation

Pendant la période 1971-2006 la tendance à l'augmentation ou à la diminution interannuelle de la précipitation et des débits pendant les mois de décembre à mars n'est pas évidente. L'alternance des phénomènes el Niño et la Niña contrôle en grande partie les variations des débits à l'aval du glacier. Les années à plus forts débits annuel sont les années « El Niño », et les années avec le plus faible débit sont les années « La Niña ».

La plus forte relation entre les débits et la précipitation durant la saison humide sont le mois de décembre et mars.

BIBLIOGRAPHIE

- Aceituno, P. (1988). On the functioning of the Southern Oscillation in the South America sector. *Montly Weather Rev.* 116: 505-524.
- Bradley, R. S., M. Vuille, H. F. Diaz, and W. Vergara (2006), Threats to water supplies in the tropical Andes. *Science.* 312(5781), 1755-1756.
- Caballero Y. (2002). Modélisation des Écoulements d'origine PLuvio – Nivo – Glacière en Contexte de Haute Montagne Tropicale – Application à la haute vallée du Zongo (Bolivie). *Thèse de doctorat*, Université Montpellier II – Sciences et Techniques du Languedoc.
- Carrasco J., Casassa G., Quintana J. (2005). Changes of the 0°C isotherm and the equilibrium line altitude in central Chile during the last quarter of the 20th century. *Hydrological Sciences–Journal–des Sciences Hydrologiques.* 50(6)
- Condom T, Coudrain A, Sicart J.E, They S. (2007). Computation of the space and time evolution of equilibrium – line altitudes on Andean glaciers (10°N-55°S), *Global and planetary change* 59: 189 -202
- Coudrain A, Francou B, Kundzewicz Z. (2005), Glacier shrinkage in the Andes and conséquences for water ressources. *Hydrological Sciences – Journal– des Sciences Hydrologiques.* 50 (6). 925-932
- Francou, B., Ribstein, P., (1995) Glaciares y evolucion climatica en los Andes Bolivianos Glaciar de Zongo y glaciar de Chacaltaya, Cordillera Real. *Bull.Inst.Fr.Etudes Andines.* 24(1): 23-36
- Francou B., Vuille M., Wagnon P., Mendoza J., Sicart J.E. (2003). Tropical climate change recorded by a glacier in the central Andes during the last decades of the twentieth century: Chacaltaya, bolivia, 16°S. *Journal of Geophysical research.* 108: ACL X-1
- Francou B, Vuille M, Favier V, Caceres B. (2004). New evidence for an ENSO impact on low-latitude glaciers: Antizana 15, Andes of Ecuador 0°28S. *Journal of geophysical research.* 109: D18106.
- Francou, B., 2007. Vincent C., (2007). *Les glaciers à l'épreuve du climat.* IRD. 274 p.
- Gallaire R. (2007). Variabilité récente des paramètres Cryo-climatiques et des isotopes des précipitations dans les Andes boliviennes: La Paz et Glacier du Zongo, *en soumis.*
- Garreaud, R.D., Vuille, M., Compagnucci, R.H., Marengo, J. (2007). *Present-day South American climate. Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, (in press).
- Glaciares Zongo, Chacaltaya y Charquini Sur (16°S, Bolivia). *Mediciones Meteorológicas, Hidrológicas y Glaciológicas*, Año Hidrológico 2002 – 2006.
- Hoffer M. (2007). Statistical downscaling of NCEP/NCAR reanalysis data to air

temperature and specific humidity above an outer tropical glacier surface Artesonraju (Peru). *Master of natural sciences*. University of Innsbruck - Department of Meteorology and Geophysics

- Jaffrain J. (2007). Les extrêmes de migration de la Zone de Convergence Intertropicale en Amérique du Sud. *Mémoire Master 2*. Université Montpellier II – Sciences et Techniques du Languedoc.
- Kaser, G. (1999): A review of the modern fluctuations of tropical glaciers. *Global and Planetary Change*. 22, 93 – 103.
- L'hote Y., Chevallier P. (2004). Pluie ou neige? Dispositif de mesures pluviographiques dans les Andes de Bolivie et interprétation des enregistrements. *Hydological Sciences – Journal- des Sciences Hydrologiques*. 49(2) : 10p
- Mesures Météorologiques, Hydrologiques et Glaciologiques sur le Glacier de Zongo-ORSTOM – Année Hydrologique 1991 – 2001.
- Montes De Oca I. (1995). Geografia y Clima De Bolivia. *Bull.Inst.Fr.Etudes Andines*. (24): 3-14
- Olmos C. (2005). *Réponse des glaciers Boliviens a la variabilité climatique récente et aux événements ENSO – influence du taux d'englacement et de l'orientation*. Mémoire DAA. Université Montpellier II – Sciences et Techniques du Languedoc.
- Poirier J.Ch. (2004). *Réaction hydrologique de bassins d'altitude de la Cordillère Royale dans le contexte de variabilité climatique actuel*. Mémoire DAA. 52P.
- Pouyand B, Zapata M, Yerre J, Gomez J, Rosas G, Suarez W, Ribstein P. (2005), Avenir des ressources en eau glaciaire de la Cordillère Blanche. *Hydrological Sciences – Journal – des Sciences Hydrologiques*. 50 (6). 999 – 1022
- Ramallo C. (2006), Aplicación de la imagen satelital ASTER y modelos hidrológicos para la cuantificación de recursos hidricos de una cuenca de alta montaña: Caso Llaullini. Travail final d'école d'ingenieur. *Universidad Mayor de San Andres - Bolivia*. 92p.
- Ramirez E, Francou B, Ribstein P, et al. (2001). Small glaciers disappearing in the tropical Andes: a case-study in Bolivia: Glaciar Chacaltaya (16 degrees S). *Journal of glaciology*. (47): 187-194
- Ribstein P, Pouyand B, Wagnon P, Ramirez. E. (1999). Variabilité climatique et fonctionnement hydrologique d'un glacier tropical. Rapport quadriennal 1995-1998. *XXIIème assemblée général de l'union Géodésique et Geophysique internationale*. 279-287.
- Ronchail C, Gallaire R, (2006), Enso and rainfall along the Zongo Valley (Bolivia) from the altiplano to the Amazon Basin. *International Journal of climatology* 26: 1223 -1236

- Sicart J.E. (2002) *Contribution a l'étude des flux d'énergie du bilan de masse et du débit de fonte d'un glacier tropical : Le Zongo, Bolivie. Thèse de doctorat.* Université Pierre et Marie Curie, Paris IV.
- Sicart J.E., Ribstein P., Francou B., Gallaire. (2003). Etude des précipitations et de la fonte sur un glacier tropical: le glacier du Zongo, Bolivie, 16°S. *Hydrological Sciences–Journal–des Sciences Hydrologiques.* 48(5)
- Sicart J.E., Ribstein P., Pouyaud B., Condom T. (2007). Glacier mass balance of tropical Zongo glacier, Bolivia, comparing hydrological and glaciological methods. *Global and Planetary Change* (59): 27–36.
- Singh.P, and Vijay.P. (2001). *Snow and glacier hydrology*, Advisory Board. 712p
- Trenberth, K., (1997). The definition of El Niño, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78, p 2771-2777.
- Villon M. (2002). *Hidrologia estadística. Editorial Villon.* 357p.
- Villacis M. (2008). Ressources en eau glaciaire dans les Andes d'Equateur en relation avec les variations du climat : Le cas du volcan Antisana. *Thèse de doctorat.* Université Montpellier II. Sciences et techniques du Languedoc
- Vimeux, F., Gallaire, R., Bony, S., Hoffmann, G., and Chiang, J. (2005). What are the climate controls on isotopic composition (dD) of precipitation in Zongo Valley (Bolivia)? Implications for the Illimani ice core interpretation. *Earth Planetary Sciences Letters.* (240): 205-220.
- Vuille M., Raymond S., Bradley Y., Werner M., Keimig M. (2003). 20th century climate change in the tropical Andes: Observations and model results. *Climatic Change* 59: 75–99
- Vuille M., Kaser G., Juen I. (2007). Glacier mass balance variability in the Cordillera Blanca, Peru and its relationship with climate and the large – scale circulation. *Global and planetary change.* Accepted manuscript
- Wagnon, Patrick, (1999) 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.