

ECOLE DOCTORALE DES SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'EAU
DEA SEEC : SCIENCES DE L'EAU DANS L'ENVIRONNEMENT CONTINENTAL



*Glacier du Zongo
(Base de Données GREAT - ICE)*

MEMOIRE DEA

**REPOSE DES GLACIERS BOLIVIENS A LA VARIABILITE CLIMATIQUE
RECENTE ET AUX EVENEMENTS ENSO – INFLUENCE DU TAUX
D'ENGLACEMENT ET DE L'ORIENTATION**

Soutenu le 30 juin 2005 à Montpellier devant :

B. POUYAUD (IRD GREAT - ICE) – Maître de Stage
A. COUDRAIN (IRD GREAT - ICE)
M. DESBORDES (UM II)
A. DELACOURT (ENGREF)

Etudiant : Carlos OLMOS
Année 2004 - 2005

REMERCIEMENTS - AGRADECIMIENTOS

Antes que todo deseo disculparme por escribir en español esta parte de la memoria, sin embargo, estoy seguro que todos Uds. mis tutores, amigos, compañeros y quienes confiaron en mi lo entenderán, ya que no hay mejor idioma que el propio, para poder decir con precisión gracias con todo lo que significa y encierra esta palabra...

En primer lugar deseo agradecer la confianza que tuvieron en mi Mme. Anne Coudrain y M. Bernard Pouyau, que desde su estadía en Bolivia me abrieron las puertas de la unidad y permitieron este stage en la MSE bajo su dirección. Gracias por los consejos, la confianza... espero no haberlos defraudado y haber hecho un trabajo aceptable, ya que ganas y entusiasmo no me faltaron, talvez me faltó mucho de francés, pero el espíritu de hacer algo bueno, siempre estuvo conmigo. Muchas gracias por su guía y confianza.

No debo olvidar a M. Bernard Francou que en Bolivia me dio ideas y consejos sobre el trabajo que podría encarar en Montpellier...Aquí sin duda en el transcurso del trabajo debo agradecer a M. Yann L'Hotte que estuvo pendiente de mi trabajo, con sus consejos, análisis y su experiencia de mi lado todo el tiempo. Jean Emmanuel Sicart, que varias veces vi en Bolivia en el IHH cuando él hacía su tesis y yo terminaba mi especialidad en hidráulica, pero que recién conocí en Montpellier, siempre tuvo la puerta abierta para mis dudas... gracias.

Para Edson Ramírez, todo mi afecto y agradecimiento, ya que con él structure todo este plan y mi tiempo en Francia, su apoyo, su confianza, su amistad y todo lo grande que es, hicieron posible que yo este escribiendo estas líneas... Gracias hermano, un abrazo y como alguna vez lo comentamos luego será mi turno en la cadena...

A Pierre Yves, Violaine, Agathe y su familia, una Navidad muy especial en Angers, Cheff y Jumelles (La Loire). Grandes amigos, gracias mil...

A Paulina una chilena de lujo, que fue mi guía en el DEA y una buena amiga sobre todo. A Wilson otro cuate excelente que también me dio un fuerte jalón con sus consejos.

Debo hablar de mis compañeros de la promo, en especial del flaco, Mathieu Rescan, con quien además compartimos el mismo ambiente de trabajo durante el stage, gracias por tu amistad. A los amigos Julien, Pauline, Thibault, Laurant, Dennis, Marouan, Thierry, Arthur, Sebastián, Michael, Julie... por hacer hecho de este tiempo una buena experiencia no solo en el ámbito académico, sino a nivel personal. Gracias amigos. No olvido al sector africano de la 121, Gastón (Fuerza Camerún), Bamory y Pierre y las chicas Stephanie y Chloe por su buen humor.

No olvido a la tropa, la peña, los españoles, parte esencial de mi vida cotidiana en Montpellier, muy especialmente a Inma, Nora y Nicolás, grandes amigos que se pueden encontrar un día cualquiera por sencillez y su sinceridad, pero que sin embargo se quedan muy adentro y por siempre... Pablo, Peludo, Joaquín, Ricardo, la Comunidad, los Pablos, Miguel, Diego, Valentina, Sofía, Katrin, Francisca, Bárbara, Alberto y una lista interminable...Un punto a parte para Caroline...

A mi familia, mis amigos a todo mi bagaje boliviano, que creyó siempre en mi y que me apoyo en esta partida al otro lado del Atlántico... A Nino, Ale, Dani, Fabri, Manolo, Cachi..., todos y muchos más. Un punto especial para Uds. No me extiendo más ya que todavía nos esperan largas charlas al son de guitarras, recuerdos y todo lo habitual en nuestra tierra (Incluyo a los que encontré en Montpellier Chesco, Pache, José y Matilde) . Gracias mis hermanos...

A Ignacio (mi chango) y Carmencha (mi vieja), ya que este tiempo fue por Uds. y para Uds...Su ausencia fue la que me costo mas asimilar, sin poderla superar, Uds. fueron lo que más me faltó...a pesar de que siempre los lleve conmigo, a cada momento, a cada instante de toda esta aventura.

En fin gracias a todos los cómplices de este trabajo...Uds, los que están allá arriba mencionados...y a los que me falta mencionar (talvez por un poco de falta de memoria, pero no de cariño).

Gracias a Dios y a la vida que me ha dado tanto, mi hijo, mi madre, amigos por todo el mundo, amaneceres en el oriente, tardes en el amazonas, noches en el lago, relámpagos en el sud, nieve en la cumbre, sol en el Chaco, lluvia en el Madidi, mañanas en el Pacífico, días en el Mediterráneo, atardeceres en el Atlántico... y por todo, todo lo que falta por venir...

Vaya!...es difícil agradecer a todos en una sola página, es fácil reducir el tamaño de la letra... sin embargo aun así no entraría todo lo que debería decir sobre todos Uds. GRACIAS...

Carlos Olmos, Montpellier Francia, Junio de 2005...

Avant - propos

Le présent rapport a été réalisé dans le cadre d'un stage de d'étude pour le DEA – SEEC « Sciences de l'eau dans l'environnement Continental » enseigné à l'Université Montpellier II de Montpellier. D'une durée de 6 mois, ce stage a été effectué à la Maison de Sciences de l'eau (MSE) dans l'axe de l'unité mixte de recherche (IRD – UMII – CNRS) Hydrosciences. Il a été encadré par Mr. Bernard Pouyaud, membre permanent IRD de cette unité. Ce stage a été supporté financièrement par l'unité GREAT ICE de l'IRD

La Maison de Sciences de l'Eau regroupe des équipes dont les tutelles sont l'Université Montpellier II (UMII), le Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) et l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD ex ORSTOM).

Une autre structure rassemblant des unités de recherche est l'IFR (Institut Fédératif de Recherche), regroupant 12 unités dont Hydrosciences Montpellier (HSM) et GREAT ICE. Un des 6 défis relevés par l'IFR est l'étude de l'impact de la variabilité climatique sur les hydrosystèmes, défi dans lequel sont particulièrement actives ces deux unités : HSM essentiellement en différentes régions du continent africain, GREAT ICE dans des bassins d'altitude.

L'Unité Mixte de Recherche Hydrosciences est une des composants de la MSE. Ces travaux développés portent essentiellement sur l'étude des impacts climatiques et anthropiques sur la ressource en eau en milieu méditerranéenne et tropicale. La finalité des ces travaux passe à la fois par l'analyse et la modélisation des processus mis en jeu et par la caractérisation de phénomènes régionaux et de modélisation conceptuelle.

Ces recherches s'organisent autour de quatre axes comprenant chacun plusieurs thèmes :

Axe 1 : Processus biogéochimiques, risque écologique et remédiation.

Axe 2 : Karsts et milieux fissurés.

Axe 3 : Variabilité hydrologique : Analyse, mécanismes et impacts sur les ressources en eau.

Axe 4 : Risques hydrologiques liés aux aléas extrêmes

L'axe 3, en particulier, poursuit ses travaux dans le cadre de l'étude des changements hydrologiques, d'origine climatique et/ou anthropique, dans les zones tropicales et semi arides. La notion de ressource est omniprésente dans les thématiques retenues dans cet Axe qui est également centré sur des problématiques faisant intervenir la modélisation, qu'elle soit de processus ou de fonctionnement des bassins versants.

**REPONSE DES GLACIERS BOLIVIENS A LA VARIABILITE CLIMATIQUE
RECENTE ET AUX EVENEMENTS ENSO – INFLUENCE DU TAUX
D'ENGLACEMENT ET DE L'ORIENTATION**

SOMMAIRE

SOMMAIRE.....	1
LISTE DE FIGURES.....	3
LISTE DE TABLEAUX.....	4
RESUME	5
1. INTRODUCTION.....	6
1.1 L'INTERET DE L'ETUDE DES GLACIERS TROPICAUX.....	6
1.2 PRESENCE DE L'IRD DANS LA ZONE D'ETUDE.....	7
1.3 ETUDES DEJA FAITES DANS LA ZONE DE TRAVAIL.....	8
2. HYDROLOGIE DE HAUTE MONTAGNE	10
2.1 ASPECTS GENERAUX	10
2.2 INFLUENCE DE LA LATITUDE ET DE L'ALTITUDE.....	10
2.3 LES EVENEMENTS NIÑO ET NIÑA.....	11
2.3.1 Oscillations Thermiques du Pacifique Sud.....	11
2.3.2 El Niño	11
2.3.3 La Niña.....	12
2.3.4 Conséquences Climatiques des Episodes ENSO.....	12
3. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE	13
3.1 ZONGO, CHACALTAYA ET TUNI DANS LE CONTEXTE BOLIVIEN	13
3.2 PRESENTATION DES BASSINS ETUDIES.....	14
4. PRESENTATION DES STATIONS ET ANALYSE DE LA BASE DE DONNEES	16
4.1 PRESENTATION DES STATIONS ET SOURCES DE DONNEES	16
4.1.1 Données qui appartiennent à la Zone d'étude	16
4.1.1.1 Mesures de Pluie, Débits et Bilan de Masse.....	16
4.1.1.2 Températures de Réanalyse.....	17
4.1.2 Données qui n'appartiennent pas à la Zone d'étude.....	18
4.1.2.1 Stations Pluviométriques	18
4.1.2.2 Indicateurs Niño et Niña.....	18
SOI (Southern Oscillation Index).....	18
ENSO (El Niño Southern Oscillation).....	18
El Niño Index.....	18
4.2 ANALYSE DE LA BASE DE DONNEES	21
4.2.1 Stationnarité des Données.....	21
4.3 ANALYSE DES PARAMETRES.....	22
4.3.1 Analyse de la Précipitation.....	22
4.3.2 Analyse des Débits	24
4.3.2.1 Reconstitutions des Débits de la Station Alpaca.....	25
4.3.3 Comparaison des bilans de masse	27
4.3.4 Températures de Réanalyse.....	28
4.3.5 Indicateurs El Niño et La Niña.....	28
5. IMPORTANCE DU TAUX D'ENGLACEMENT ET DE L'ORIENTATION GEOGRAPHIQUE D'UN GLACIER DANS SA REPONSE COMPORTEMENTALE.....	30
5.1 LE TAUX D'ENGLACEMENT D'UN BASSIN ET SES VARIABLES REPRESENTATIVES.....	30
5.1.1 Relation entre les paramètres climatiques (Précipitation et Température), la lame écoulée et la fonte glaciaire	30
5.1.2 Variables représentatives du comportement d'un bassin avec couverture glaciaire	30
5.2 DISSEMBLANCE COMPORTEMENTALE ENTRE BASSINS VERSANTS A TAUX D'ENGLACEMENT FORTS ET FAIBLES DANS LE MEME MACRO BASSIN	32

5.3	COMPARAISON AVEC LES VALEURS DE LA CORDILLERE BLANCHE (PEROU).....	34
5.4	SIMILITUDES ET DISSEMBLANCES DE COMPORTEMENT ENTRE SOUS BASSINS VERSANTS DES DIFFERENTS MACRO BASSINS QUI ONT DES TAUX D'ENGLACEMENT SIMILAIRES.....	34
5.5	INFLUENCE DE L'ORIENTATION DU BASSIN ET DE SA POSITION GEOGRAFIQUE DANS SON COMPORTEMENT.....	36
6.	PARAMETRES CLIMATIQUES ET LEUR INFLUENCE SUR LE BILAN DE MASSE ET LA LAME ECOULEE.....	38
6.1	RELATION DU BILAN DE MASSE AVEC LA TEMPERATURE ET LA PRECIPITATION.....	38
6.1.1	Glacier du Zongo (Tubo, Cgl= 74%).....	38
6.1.2	Glacier de Chacaltaya (Chacaltaya, Cgl= 9%).....	40
6.2	RELATION DES ECOULEMENTS AVEC LA TEMPERATURE ET LA PRECIPITATION, TUBO, ALPACA ET PRADO.....	41
6.3	TENTATIVE DE QUANTIFICATION DE L'ECOULEMENT NET DU GLACIER, A PARTIR DE LA DIFFERENCE DE DEBITS, APRES SEPARATION DE LA FONTE GLACIAIRE DE PRADO.....	41
6.4	LE COMPORTEMENT ANNUEL DE LA FONTE GLACIAIRE.....	45
7.	PRESENCE ET INFLUENCE DES EVENEMENTS NIÑO ET NIÑA DANS LE COMPORTEMENT DES BASSINS ENGLACEES.....	47
7.1	INTENSITE RELATIVE DES EVENEMENTS NIÑO ET NIÑA SELON LES DONNEES DES STATIONS EMPLOYEES POUR L'ANALYSE.....	47
7.2	COMPARAISON DES EVENEMENTS NIÑO ET NIÑA.....	49
7.3	EFFETS DU NIÑO POUR LES BASSINS AVEC FORTE ET FAIBLE COUVERTURE GLACIAIRE.....	51
7.4	EL NIÑO ET LA NIÑA, LEUR CHANGEMENTS AU COURS DU TEMPS.....	52
8.	CONCLUSIONS.....	54
8.1	IMPORTANCE DU TAUX D'ENGLACEMENT D'UN GLACIER SUR SON COMPORTEMENT.....	54
8.2	IMPORTANCE DES PARAMETRES CLIMATIQUES (PRECIPITATION ET TEMPERATURE) SUR LE COMPORTEMENT D'UN GLACIER.....	54
8.3	PRADO, UN BASSIN GLACIAIRE DIFFERENT.....	55
8.4	INFLUENCE DE L'ORIENTATION ET LA POSITION GEOGRAPHIQUE D'UN BASSIN SUR SON COMPORTEMENT.....	55
8.5	ESSAI DE QUANTIFICATION DE LA FONTE NETTE DU GLACIER POUR SUPERPOSER LES REPNSES HYDROLOGIQUES DE DEUX VERSANTS.....	56
8.6	EVENEMENTS EL NIÑO ET LA NIÑA, LEUR INFLUENCE SUR LE COMPORTEMENT DES GLACIERS.....	56
8.7	COMMENTAIRE FINAL.....	57
9.	BIBLIOGRAPHIE.....	58
	Thèse de Doctorat.....	58
	Stages Recherche DEA.....	58
	Livres de Consultation.....	58
	Memoires d' Ingénieur.....	59
	Consultation des Articles.....	59
	Report Annuel de Mesures Météorologiques, Hydrologiques et Glaciologiques en Bolivie.....	60
	Base de données.....	61
	Autres.....	61

LISTE DE FIGURES

FIGURE 1.1-1: Distribution des surfaces glaciaires dans la zone intertropicale, selon les différentes régions	6
FIGURE 1.2-1: Localisation des glaciers étudiés par le programme GREAT ICE depuis 1991	7
FIGURE 3.1-1: Localisation de la Zone d'étude	13
FIGURE 3.2-1: Bassins Versants et Stations de Tubo, Prado, Alpaca et Huayna Potosi	15
FIGURE 3.2-2: Bassins Versant et Stations de Condoriri, Jallayco et Paya Huichincha	15
FIGURE 4.1-1: Stations de Mesure, Pluie, Débit et Bilan de Masse	17
FIGURE 4.3-1: Comparaison des Précipitations Moyennes Annuelles	22
FIGURE 4.3-2: Comparaison des Précipitations Moyennes Mensuelles	23
FIGURE 4.3-3: Pluviométrie de Zongo et Tuni (Janvier 1998 – Mars 2004)	23
FIGURE 4.3-4: Rapport Altitude Précipitation, Tuni	24
FIGURE 4.3-5: Comparaison des Lames écoulées moyennes mensuelles, Zongo	24
FIGURE 4.3-6: Lame Ecoulee d'Alpaca	25
FIGURE 4.3-7: Relation Température de Réanalyse et Lame Ecoulee du Tubo	26
FIGURE 4.3-8: Lame Ecoulee Reconstituée pour Alpaca	26
FIGURE 4.3-9: Relation Lame Reconstituée d'Alpaca et Température de Réanalyse	27
FIGURE 4.3-10: Bilan de Masse net Spécifique, Chacaltaya et Zongo	27
FIGURE 4.3-11: Température de Réanalyse Historique depuis 1948, (Valeurs Centrée Réduites)	28
FIGURE 4.3-12: Indicateurs Niño - Niña	28
FIGURE 5.1-1: Rapport entre Taux d'englacement et Lame écoulee	31
FIGURE 5.1-2: Rapport entre Taux d'englacement et les paramètres Kepn et De (Zongo 81-03)	32
FIGURE 5.1-3: Rapport entre Taux d'englacement et les paramètres Kepn et De (Tuni Sept.02-Mars 04)	32
FIGURE 5.2-1: Comparaison des Lames Ecoulee Moyennes Annuelles (Côté Zongo) et Précipitation	33
FIGURE 5.2-2: Cgl vs Le, kep n et De (Zongo 85-85, 97-98)	33
FIGURE 5.3-1: Comparaison de Kepn Cordillère Blanche et Glacier du Zongo	34
FIGURE 5.5-1: Relation entre l'orientation de deux bassins et le Coefficient de détermination du rapport de leurs lames écoulées	36
FIGURE 5.5-2: Comparaison entre les Lames Ecoulee Moyennes Mensuelles de Huayna Potosi et Tubo	37
FIGURE 6.1-1: Paramètres Climatiques et Bilan de Masse, Comparaison en Valeurs Centrée Réduites	38
FIGURE 6.1-2: Bilan de Masse, Précipitation et Déficit de Précipitation, Zongo (Tubo)	39
FIGURE 6.1-3: Sensibilité du Bilan de Masse, avec Précipitation et Température	40
FIGURE 6.1-4: Bilan de Masse, Précipitation et Déficit de Précipitation, Chacaltaya	40
FIGURE 6.2-1: Relation Ecoulement, Température et Précipitation	41
FIGURE 6.3-1: Rapport entre Précipitation et Lame Ecoulee, Courbes des Tendances Originales	44
FIGURE 6.3-2: Précipitation et Lame Ecoulee Courbes des Tendances (Valeurs des Précipitation Plus Hautes Eliminées)	44
FIGURE 6.3-3: Lame Ecoulee Base Bassin Prado	44
FIGURE 6.4-1: Différence d'écoulements et de Comportement de la Fonte Glaciaire pendant l'année	45
FIGURE 7.2-1: Comparaison des Evénements Niño en Valeurs Centrée - Réduites des Stations Analysées	49
FIGURE 7.2-2: Comparaison des Evénements Niña en Valeurs Centrée - Réduites des Stations Analysées	50
FIGURE 7.3-1: Evénements Niño et Rapport Cgl vs Le	51
FIGURE 7.3-2: Evénements Niño et Rapport Cgl vs Kepn	51
FIGURE 7.3-3: Evénements Niño et Rapport Cgl vs De	52
FIGURE 7.4-1: El Niño et son Changement au cours du Temps	52
FIGURE 7.4-2: La Niña et son Changement au cours du Temps	53

LISTE DE TABLEAUX

TABLEAU 3.2-1: Résumé des Caractéristiques des Bassin étudiées	14
TABLEAU 4.1-1: Présentation de Stations et des Sources des Données	19
TABLEAU 4.1-2: Présentation de la Base de Données Employée dans l'étude	20
TABLEAU 4.2-1: Relation des Ruptures Trouvées aux Données des Stations Employées dans l'étude ...	21
TABLEAU 4.3-1: Résumé des Evénements Niño et Niña depuis 1896 à nos jours	29
TABLEAU 5.4-1: Corrélation des Lames écoulées et Différences des Taux d'englacement, Côté Zongo .	35
TABLEAU 5.4-2: Corrélation des Lames écoulées et Différences des Taux d'englacement, Côté Tuni	35
TABLEAU 5.4-3: Corrélation des Lames écoulées Côtés Zongo et Tuni	35
TABLEAU 6.3-1: Tentative d'Estimation de l'écoulement de la surface englacée	43
TABLEAU 6.3-2: Moyenne du Bilan de Masse Net Spécifique en valeur Négative (Glacier du Zongo)	45
TABLEAU 7.1-1: Classification des événements Niño et Niña	47
TABLEAU 7.1-2: Les événements Niño et Niña dans les registres des stations employées pour l'analyse.....	48

ANNEXES

ANNEXE 1: BASE DE DONNEES

ANNEXE 2: CLASSEMENT DES DONNEES DES STATIONS

ANNEXE 3: ANALYSES DES RUPTURES

REPONSE DES GLACIERS BOLIVIENS A LA VARIABILITE CLIMATIQUE RECENTE ET AUX EVENEMENTS ENSO – INFLUENCE DU TAUX D'ENGLACEMENT ET DE L'ORIENTATION

RESUME

Cette analyse a eu comme zone de travail les bassins versant de **Zongo** (avec trois sous bassins : Tubo, Alpaca et Prado), de **Chacaltaya** et de **Tuni** (avec quatre sous bassins : Huayna Potosi, Condoriri, Jallayco et Paya Huichincha) ; certains de ces bassins versants ont été suivis par la Compagnie de génération d'énergie électrique bolivienne (COBBE) dès 1971, par l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) depuis 1991 et par Aguas del Illimani S.A (Compagnie responsable de la distribution d'eau potable) depuis 1998.

L'étude des bassins versant de Zongo et Tuní présente un intérêt très fort pour les villes de La Paz et El Alto, étant donné que grâce à ces ressources, est possible la génération d'énergie électrique et la production d'eau potable pour ces deux grands villes boliviennes (approximativement deux millions d'habitants). Cette situation est similaire à celle que présentent des villes sud-américaines importantes comme Lima (Pérou) et Quito (Equateur), qui se servent aussi des ressources glaciaires pour leurs besoins en eau et d'énergie électrique.

L'IRD depuis 1991 étudie les glaciers tropicaux et les mécanismes qui les gouvernent, selon deux points de vue principalement : comme des indicateurs du changement climatique et comme ressource naturelle, en observant d'un côté l'intérêt scientifique et de l'autre l'intérêt de gestion et de recherche d'alternatives à ces ressources qui malheureusement sont en train de disparaître à cause des effets du réchauffement global.

La base de donnée employée dans ce travail provient des institutions mentionnées ci-dessus, en ajoutant des données de stations voisines, qui ont des séries plus longues. Les données de réanalyse des températures de l'air ont été obtenues de la NCEP (National Center for Environmental Prediction), l'intérêt principal des ces séries étant qu'elles gardent une forte relation avec les écoulements glaciaires.

Ce mémoire présente un travail principalement de type comparatif entre les différents versants de la Cordillère Royale, avec l'objectif d'étudier les paramètres qui influencent le comportement des bassins glaciaires. Des paramètres tels que la relation du taux d'englacement et des paramètres climatiques, ainsi que et des indicateurs hydrologiques du comportement glaciaire (Lame écoulée, Coefficient d'écoulement, déficit de précipitation), ont été mis en rapport, pour analyser l'importance de la masse glaciaire du bassin dans sa réponse hydrologique.

L'influence directe et indirecte des paramètres climatiques comme la précipitation et la température sur le bilan de masse et les écoulements a été analysée, ainsi que leur sensibilité par rapport à l'augmentation ou la diminution des pluies et de la température.

On a observé aussi l'influence de l'orientation et de la position géographique sur le comportement d'un bassin versant de haute montagne, qui, même si ce n'est pas l'aspect qui conditionne le plus la réponse hydrologique d'un glacier, comme le fait le taux d'englacement ou le régime climatique, joue quand même, un rôle intéressant sur la réponse du bassin. On a retrouvé des similarités intéressantes entre sous bassins versants (du même macro bassin et de macro bassins différents) avec des orientations similaires.

Un autre aspect analysé était un essai de quantification de la fonte glaciaire à partir de la superposition des réponses hydrologiques d'un bassin fortement englacé (Tubo et Alpaca) avec celle d'une autre qui a un taux d'englacement faible (Prado). La valeur de la fonte glaciaire calculée pour le Zongo montre une similarité intéressante avec la valeur moyenne du bilan net spécifique de masse du glacier en valeur négative.

L'influence spécifique des événements El Niño et La Niña sur le fonctionnement des glaciers a été particulièrement étudiée dans le cadre de ce travail, ainsi que le changement de leur comportement au cours du temps et par conséquent du changement de leur influence sur les glaciers.

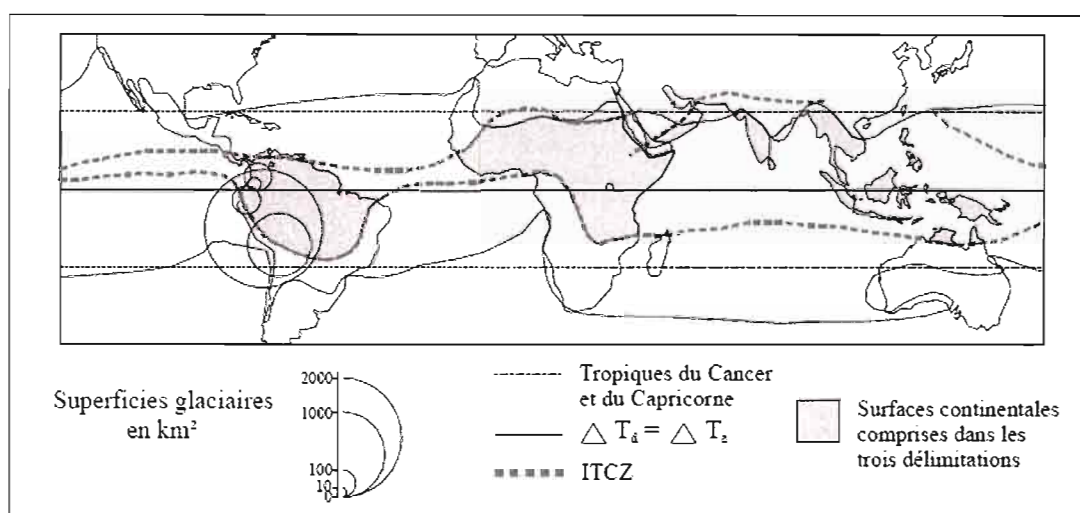
1. INTRODUCTION

1.1 L'INTERET DE L'ETUDE DES GLACIERS TROPICAUX

Les bassins étudiés dans le cadre de ce travail sont classifiés comme des glaciers tropicaux à cause de l'influence qu'ont sur le climat régional les températures chaudes caractéristiques des régions proches de la ligne de l'Equateur,.

« Des glaciers tropicaux existent dans trois régions du monde: essentiellement dans les Andes sud-américaines (plus de 99 % des 2500 km² de l'ensemble des glaciers tropicaux), mais aussi en Nouvelle Guinée et en Afrique de l'Est. » (Sicart, 2002).

FIGURE 1.1-1: Distribution des surfaces glaciaires dans la zone intertropicale, selon les différentes régions



(Kaser 1996) in (Sicart 2002)

« Le climat des tropiques « internes » est constamment humide (8.5 % des glaciers en Equateur, Venezuela et Colombie, 0.5 % en Afrique de l'est et en Nouvelle Guinée), alors que le climat des tropiques « externes » est caractérisé par une saisonnalité marquée des précipitations avec une unique saison des pluies en été et une saison sèche prononcée en hiver (71 % des glaciers au Pérou, 20 % en Bolivie) (Schwerdtfeger, 1976) » in (Sicart, 2002).

« Les glaciers tropicaux ont été peu étudiés malgré des intérêts appliqués de ressource en eau et de risque glaciaire, et un intérêt scientifique en tant qu'indicateurs climatiques. Ils jouent un rôle régulateur des cours d'eau en soutenant le débit d'étiage les quatre à six mois que dure la saison sèche. L'alimentation en eau et en hydroélectricité des capitales Lima, La Paz et Quito dépend en grande partie des eaux glaciaires (Francou et al., 1997) » in (Sicart, 2002).

Du point de vue des ressources, dans le cas spécifique de La Paz et El Alto, deux des plus grandes villes de la Bolivie qui forment ensemble la plus grande agglomération de population bolivienne, les écoulements qui proviennent des bassins glaciaires servent pour la génération d'énergie électrique et pour la dotation en eau potable de plus de deux millions de personnes qui habitent dans les deux villes ci avant mentionnées.

Le dernier paragraphe souligne l'importance de l'étude des glaciers en tant que ressource et surtout pour la prédiction, la quantification et la prédiction de leur disponibilité et durabilité pour les villes qui se servent des glaciers pour ces besoins en eau et énergie électrique.

Du point de vue scientifique, les glaciers tropicaux, grâce à leur réponse rapide aux changements climatiques, peuvent être étudiés à des échelles de temps plus courtes que les glaciers des Alpes par rapport à l'influence du climat et de ses changements. « Les glaciers tropicaux sont considérés comme des indicateurs des fluctuations climatiques à haute résolution temporelle » (Hastenrath, 1984) in (Sicart, 2002).

Le recul des glaciers et leur disparition est un fait qu'on peut vérifier soi-même. Le meilleur exemple qui se trouve dans la zone d'étude, c'est le glacier de Chacaltaya dont la piste de ski la plus haute du monde a fonctionné entre les années 50 et 80 et qui de nos jours, a une surface 7 fois plus petite que celle qu'il avait dans les années 60 ; en plus, on est témoin de ses dernières années de vie, parce que son recul s'accélère chaque année qui passe. (Ramirez et al. 2001), (Mendoza, 2005).

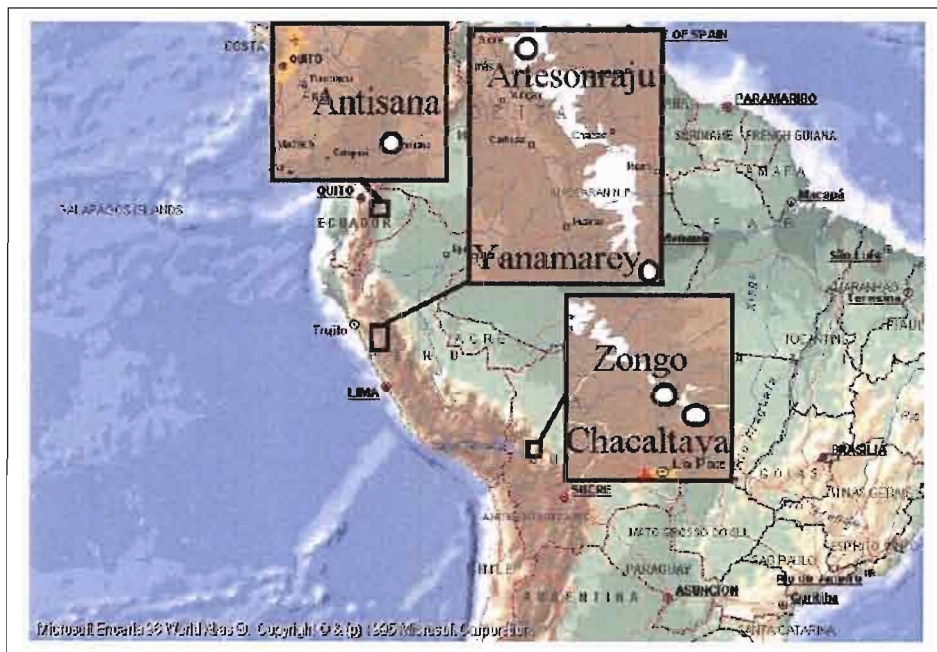
1.2 PRESENCE DE L'IRD DANS LA ZONE D'ETUDE

La base de données qu'on a employée dans ce travail provient des mesures faites par la Compañía Boliviana de Energía Eléctrica (COBBE), responsable de la production d'énergie électrique pour les villes de La Paz et El Alto, Aguas del Illimani S.A. (AISA) responsable de la distribution d'eau potable à les mêmes villes et de l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD), Institut français qui étudie les glaciers tropicaux depuis 1991.

« Pierre Ribstein et Bernard Francou (rejoins par Bernard Pouyaud et Pierre Chevallier) de l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) ont lancé en 1991 le programme de recherche « Neiges et Glaciers Tropicaux », devenu « GREAT ICE » en 2000 (Glaciers et Ressources en Eau dans les Andes Tropicales : Indicateurs Climatiques et Environnementaux) » (Pouyaud et al., 1995) in (Sicart, 2002).

« Initié en Bolivie, le programme a progressivement développé un réseau de mesures des glaciers de la zone humide à la zone externe des Andes tropicales ». (Sicart, 2002).

FIGURE 1.2-1: Localisation des glaciers étudiés par le programme GREAT ICE depuis 1991



(d'après B. Pouyaud) in (Sicart, 2002).

En Bolivie le programme a débuté en 1991 avec l'étude de deux glaciers : Zongo et Chacaltaya. En 1997 après un accord avec Aguas del Illimani S.A. les mesures se sont étendues vers le bassin de Tuní. Le travail qu'on présente dans ce mémoire fait une analyse des trois bassins versants et de leurs sous bassins.

1.3 ETUDES DEJA FAITES DANS LA ZONE DE TRAVAIL

Le programme GREAT ICE de l'IRD, analyse les glaciers tropicaux de différents points de vue, ces études prennent en compte les aspects hydrologiques, glaciologiques, climatologiques et de bilan énergie des glaciers, entre autres. Les études faites dans tous ces domaines ont donné lieu à différents types de travail, tels que des articles scientifiques, des thèses de Doctorat et des publications périodiques.

Spécifiquement, sur notre zone d'analyse, on trouve les thèses de Wagnon (1999), Caballero (2001) et Sicart (2002) :

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

Alvaro Soruco, qui est en train de commencer sa thèse, fera un travail au niveau glaciologique et de photogrammétrie sur la reconstitution des bilans de masse des glaciers des bassins versants qui se trouvent entre les montagnes Mururata et Condoriri.

Soruco vient de présenter une communication au congrès de Foz de Iguazu :

- Soruco A., Mendoza J., Machaca A., Francou B., Berger T., Valdivieso H., *Fluctuations of the Front of the Zongo Glacier over the last five decades.*

De nombreux articles ont été écrits sur le comportement du glacier de Zongo et son fonctionnement : parmi eux on retrouve des thèmes qui font partie des thèses et d'autres qui décrivent les processus de fonctionnement du glacier :

- Wagnon, P., P. Ribstein, T. Schuler, B. Francou, *Flow separation on Zongo glacier, Cordillera Real, Bolivia, Hydrological Processes*, 12, 1911-1926, 1998.
- Wagnon, P., P. Ribstein, B. Francou, B. Pouyaud, *Annual cycle of energy balance of Zongo Glacier, Cordillera Real, Bolivia*, Journal of Geophysical Research, Vol. 104, No D4, 3907-3923, 1999.
- Ribstein, P., E. Tiriau, B. Francou, R. Saravia, *Tropical climate and glacier hydrology: A case study in Bolivia*, Journal of Hydrology, 165, 221-234, 1995.
- Sicart J. E., Ribstein P., Francou B., Pouyaud B., Condom T., *Glacier mass Balance of Tropical Zongo Glacier, Bolivia, comparing hydrological and glaciological methods*, Soumis.

On retrouve aussi des articles sur des événements extraordinaires comme ceux des épisodes ENSO, ou sur la disparition lente des glaciers sur notre zone d'études.

- Wagnon, P., P. Ribstein, B. Francou, J. E. Sicart, *Anomalous heat and mass budget of Zongo Glacier, Bolivia, during the 1997-98 El Nino year*, Journal of Glaciology, Vol. 47 No 156, 21-28, 2001..
- Ramirez, E., B. Francou, P. Ribstein, M. Descloîtres, R. Guérin, J. Mendoza, R. Gallaire, B. Pouyaud, E. Jordan, *Small glaciers disappearing in the Tropical Andes: a case study in Bolivia : The Chacaltaya Glacier (16°S)*, Journal of Glaciology, Vol. 47, No 157, 187 – 194, 2001.

Il faut mentionner que l'IRD fait un rapport annuel sur les mesures du glacier Zongo pendant une période d'observation (une année hydrologique). Pour les deux dernières années hydrologiques 2002-03 et 2003-04, l'IRD a ajouté à ses publications les données des Glaciers de Chacaltaya et Charquini.

Dans le cadre des études de type comparatif, on peut mentionner l'analyse faite par Tamayo en 1996 du bassin de Prado et l'étude comparative de J.C. Poirier en 2004 qui a commencé les analyses comparatives entre les bassins du Zongo et les bassins de Tuni.

Le travail présenté dans ce mémoire a approfondi les analyses de Tamayo sur Prado et les analyses de Poirier sur les bassins de Tuni, en ajoutant les données du bassin de Chacaltaya pour faire une étude plus approfondie et synthétique de l'influence du taux d'englacement, des paramètres climatiques (précipitation et température), de l'orientation géographique et des événements extraordinaires comme les Niño et Niña sur le comportement des glaciers. Dans ce travail on a utilisé les valeurs de température de réanalyse pour caractériser la variabilité climatique et déterminer son influence sur le fonctionnement glaciaire.

2. HYDROLOGIE DE HAUTE MONTAGNE

2.1 ASPECTS GENERAUX

Les bassins de haute montagne se caractérisent par une réponse instantanée aux variables climatiques d'entrée comme la précipitation, ce qui est dû à ses pentes très fortes et aussi en quelques cas à sa faible couverture végétale.

Dans les cas des bassins glaciaires, il faut ajouter la composante de la partie englacée, celle-ci joue un rôle d'accumulation des ressources et de régulation des sorties des écoulements.

Les principales caractéristiques du milieu de haute montagne au regard de l'Hydrologie sont :

- La topographie qui exerce une influence sur les écoulements, la dynamique climatique, les états de surface.
- L'altitude, qui influe plutôt sur les intensités des variables climatiques comme la pression atmosphérique, la température de l'air, le rayonnement.
- La position géographique (Latitude et continentalité). (Caballero, 2001).

2.2 INFLUENCE DE LA LATITUDE ET DE L'ALTITUDE

En Amérique du Sud, dans les zones proches de la ligne de l'Equateur, la variation des températures moyennes journalières pendant l'année est inférieure à 10°C (Vuille, 1999).

Le rayonnement intense donne lieu à des précipitations d'origine convective, alors qu'au sud des tropiques, elles sont plutôt provoquées par la rencontre frontale de masses atmosphériques de températures différentes. (Aceituno, 1995 ; Garreaud et Wallace, 1997) in (Caballero, 2001)

Dans les cas de nos bassins qui appartiennent au côté amazonien, leur climat est influencé directement par les vents et les changements de pression qui viennent de l'océan Atlantique ; par contre du côté Altiplanique apparaît davantage le rôle des changements climatiques locaux dans le bassin fermé de l'Altiplano (Lac Titicaca) et les courants de pression d'origine Pacifique.

La saisonnalité des précipitations est gouvernée par les oscillations saisonnières de la Zone de Convergence Inter Tropicale (ITCZ) et des fronts froids en provenance du Sud (Aceituno, 1988 ; Roche et al., 1990 ; Ronchail, 1995 ; Vuille et al., 2000) in (Caballero, 2001), (Aceituno, 1995).

L'ITCZ est une zone de convergence des alizés, ainsi qu'une zone d'ascension et de condensation des masses d'air chaud par convection verticale. Elle correspond à une zone de basses pressions atmosphériques, localisée là où les radiations solaires sont les plus intenses sur le pourtour du globe.

Elle se matérialise en outre par une bande de nuages, constituée par les apports Atlantique et Amazonien, qui donne de fortes précipitations. Cette zone oscille en amplitude de part et d'autre de l'Equateur au cours de l'année, et le climat de la Bolivie connaît des modifications sensibles selon que celle-ci se situe dans l'ITCZ (lors de l'été austral) ou en dehors (hiver austral). Ainsi, l'hiver austral, qui correspond à la position la plus nordique de l'ITCZ, est associé à un épisode de sécheresse, dans la mesure où la zone nuageuse ne couvre pas le territoire. Au contraire, l'été austral, qui correspond à une position plus australe de l'ITCZ, est marqué par des précipitations abondantes sur les Andes boliviennes, et plus généralement sur l'ensemble du territoire bolivien. (Poirier, 2004).

Les alizés de nord-est poussent les masses d'air chaud et humide de l'amazone et de l'Atlantique vers la Cordillère Orientale qui coupe sa marche, en provoquant des pluies dans les vallées et les Yungas. Pendant l'hiver austral, quand les précipitations sont plus faibles, cette même Cordillère les affaiblit encore plus, avant d'arriver à la zone des glaciers (Montes de Oca, 1997).

Il est nécessaire d'observer que les saisons dans l'Hémisphère Sud sont différentes à celles de l'Europe. Spécifiquement dans notre zone d'étude, on a deux saisons fortement différenciées l'époque humide (mois de décembre, janvier, février et mars) et l'époque sèche (mois de juin, juillet, mai et août). On trouve aussi deux époques de transition au mois d'avril et au mois de novembre qui sont marquées respectivement par la fin des pluies, puis après la saison sèche par le retour des temps humides.

La saisonnalité a aussi une influence sur les gradients de température avec l'altitude qui varient d'une saison à l'autre : au Chili par exemple, en saison de pluies le gradient est de $0.53^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ et de $0.89^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ en période sèche. (Libouty, 1999) in (Caballero, 2001).

2.3 LES EVENEMENTS NIÑO ET NIÑA

En général les épisodes el Niño ou la Niña produisent des réponses intéressantes sur le comportement des bassins glaciaires, comme celui de 1997-98 qui a provoqué des fontes extraordinaires au glacier du Zongo (Wagnon et al. 2001) et le plus fort bilan de masse négatif mesuré pendant tout le temps du programme GREAT ICE en Bolivie.

Les événements ENSO (El Niño Southern Oscillation) sont le résultat de mouvements oscillatoires de la pression et de la température au niveau de l'océan Pacifique à la hauteur de l'Equateur. Extrait du travail de Poirier de 2004, une explication qui résume les causes et conséquences de ces épisodes est présentée en continuation.

2.3.1 Oscillations Thermiques du Pacifique Sud

...« La variabilité climatique inter annuelle du climat, notamment sous les Tropiques, est liée au phénomène d'oscillation thermique d'une part, et de la pression atmosphérique d'autre part au niveau du Pacifique Sud. Ce phénomène s'exprime essentiellement par l'arrivée épisodique d'eaux anormalement chaudes en provenance de l'ouest du Pacifique sur les côtes latino-américaines. Deux événements, dont les répercussions climatiques vont se révéler très différentes les unes des autres, vont naître de cette oscillation : El Niño Southern Oscillation (ENSO), et La Niña Southern Oscillation (LNSO). »... (Poirier, 2004).

2.3.2 El Niño

...« Durant El Niño, le bord oriental du réservoir d'eaux chaudes, positionné à 180° de longitude au niveau de l'Equateur, avance de 3000 km environ vers l'est. Ce déplacement, impulsé par des variations de vents et de courants dans le Pacifique, est d'autant plus aisé que ces eaux chaudes et peu salées, donc de faible densité, flottent au dessus d'eaux sous-jacentes, froides et salées, donc plus denses (en relation avec la Circulation thermo haline).

Le déplacement de ce réservoir d'ouest en est aurait pour origine l'affaiblissement des alizés et l'apparition de vents violents d'ouest dans le Pacifique Ouest, engendrant la formation de courants marins de surface, et entraînant alors le bord oriental du réservoir vers l'est. La progression de ce réservoir d'eaux chaudes vers l'est serait à son tour responsable du renforcement des vents d'ouest, et donc de l'intensification des courants de surface. D'où la poursuite de la progression de ce réservoir d'eaux chaudes vers l'est.

En parallèle, un train d'ondes est créé par les vents d'ouest à l'interface entre les eaux chaudes de surface et les eaux froides profondes (50 à 150m de profondeur). Celui-ci se propagerait vers l'est (avec une vitesse de 250 km/jour) jusqu'à approcher les côtes occidentales d'Amérique du Sud (au terme de deux à trois mois) où il interrompt l'upwelling en cours (remontée d'eaux froides profondes), habituellement responsable du refroidissement de ces régions côtières et de la remontée de nutriments indispensables au développement de la vie dans ces eaux de surface, donc aux activités piscicoles. Il s'amorce ainsi une période de réchauffement de la côte Est du Pacifique (Phase de plein développement du phénomène El Niño). »... (Poirier, 2004).

2.3.3 La Niña

...« L'arrivée des ondes équatoriales sur les côtes latino-américaines contribue ensuite à arrêter la progression du bord oriental du réservoir d'eaux chaudes vers l'est. En effet, après s'être heurtées à la côte occidentale, ces ondes repartent vers le centre du bassin pacifique (à la vitesse de 100 km/jour) jusqu'à repousser progressivement le bord est du réservoir d'eaux chaudes jusqu'à sa position initiale (180° de longitude), et même finalement plus à l'ouest. La remontée d'eaux froides profondes le long des côtes péruviennes et équatoriennes redevient alors possible, et les températures de la partie est du bassin est du Pacifique sont quant à elles de nouveau froides. C'est ainsi que un à deux ans après son départ, El Niño a laissé place à La Niña, phase froide d'ENSO. »... (Poirier, 2004).

« Pendant celle-ci, le système vents/courants/ondes équatoriales et leurs réflexions sur la côte se poursuit, mais avec des variations de vents (renforcement des alizés, vents d'ouest faibles ou inexistantes) et des courants d'un sens opposé à celui observé pendant El Niño. »... (Poirier, 2004).

2.3.4 Conséquences Climatiques des Episodes ENSO

...« La circulation atmosphérique au-dessus du Pacifique est affectée dans son ensemble par les changements de la répartition des eaux chaudes de surface. Pendant un événement El Niño, la zone dépressionnaire centrée normalement à l'ouest du Pacifique se déplace vers l'est, engendrant la sécheresse sur l'Indonésie et le nord de l'Australie.

En revanche, la convection atmosphérique devient très active au-dessus des eaux réchauffées du Pacifique oriental et des excès de précipitations s'abattent sur les côtes d'Amérique du Sud.

Au niveau des Andes boliviennes, il est désormais reconnu que les événements El Niño provoquent des déficits pluviométriques en altitude et sur l'Altiplano, couplés à une atténuation des alizés de nord-est et à une augmentation des températures. En année La Niña, les précipitations, les alizés et les températures semblent au contraire être plus élevés. En effet, lors d'un événement El Niño, la zone dépressionnaire pacifique, se déplaçant vers l'est, va empêcher les masses d'air atlantiques de pénétrer profondément en Amérique du Sud. Ainsi, la cordillère orientale, ainsi que l'Altiplano, vont connaître un déficit pluviométrique important.

Au contraire, lors d'un événement La Niña, la zone dépressionnaire pacifique retrouvant sa position initiale, à l'ouest du pacifique, les masses d'air d'origines atlantiques, ainsi que les condensations amazoniennes induites, vont pouvoir s'avancer d'avantage à l'intérieur du continent. La Bolivie connaîtra alors une pluviométrie plus intense sur la Cordillère orientale et sur l'est de l'Altiplano. »... (Poirier, 2004).

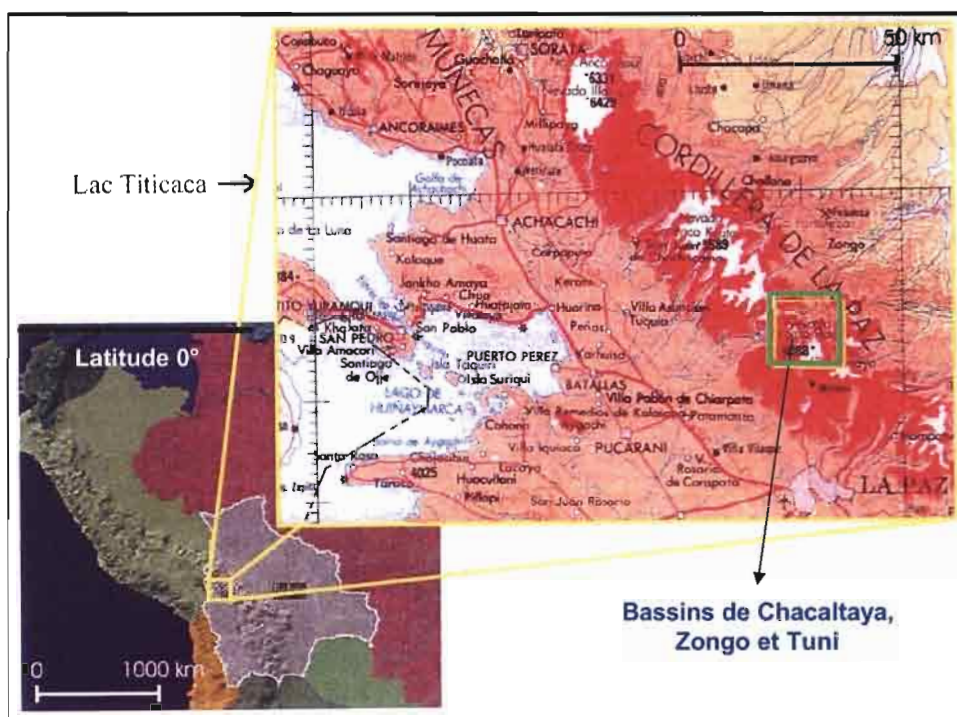
3. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

3.1 ZONGO, CHACALTAYA ET TUNI DANS LE CONTEXTE BOLIVIEN

La Bolivie, pays situé au cœur de l'Amérique du Sud, est une nation qui bien que considérée comme un état Andin au niveau international, est placée dans la zone Tropicale, à des latitudes proches de l'Equateur, de sorte que son climat est influencé par les hautes températures qui ont lieu dans cette région.

La partie Altiplanique de Bolivie, qui est enfermée entre les Cordillères Occidentale et Orientale (Toutes les deux faisant partie de la Cordillères des Andes), donne le qualificatif de Andin à la Bolivie, en dépit du fait que cette partie Altiplanique n'est seulement qu'un tiers de sa surface. Notre zone d'étude se trouve dans cette région, du côté Est, dans la Cordillère Orientale ou Cordillère Royale, juste à la frontière qui sépare l'Altiplano de la pente que nous emmène vers les vallées humides (Vallées de production, Los Yungas) et surtout qui nous emmène vers l'Orient et l'entrée de l'Amazonie.

FIGURE 3.1-1: Localisation de la Zone d'étude



(Caballero, 2001)

Les montagnes Huayna Potosi (6088 m, 16°16'-68°09'), Chacaltaya (5395 m, 16°20'-68°06') et Condoriri (5850 m, 16°03'-68°16') hébergent les bassins de Zongo, Chacaltaya et Tuni, dans lesquels se trouvent les versants qui sont analysés dans ce travail. (Montes de Oca, 1997).

3.2 PRESENTATION DES BASSINS ETUDIES

Les glaciers analysés dans le cadre de ce travail ont été choisis par le programme GREAT ICE pour leur étude, non seulement pour leurs intérêts au niveau des ressources mais aussi, pour leur situation stratégique dans la cordillère Royale.

Les bassins en étude appartiennent à différents versants de la chaîne montagneuse, cela veut dire d'un point de vue géographique qu'ils forment partie de deux entre les trois macro bassins géographiques Boliviens (Le bassin Amazonien et le Bassin Altiplanique)

Les bassins versants de Zongo avec ses trois sous bassins (Tubo, Alpaca et Prado) et de Chacaltaya se trouvent du côté Amazonien. Un peu plus au nord ouest, après les sommets des montagnes Huayna Potosi et Condoriri, on trouve les quatre sous bassins de Tuni (Huayna Potosi, Condoriri, Paya Huichincha, Jallayco) dans le macro bassin Altiplanique.

Au niveau climatique les influences du climat Amazonien et des mouvements de pression de l'Atlantique se retrouvent dans le comportement des bassins du côté Oriental, par contre l'influence du climat altiplanique se retrouve dans celui des bassins du côté Ouest. (Voir Chapitre 2).

En continuation, on présente un tableau dont on résume les caractéristiques les plus importantes de nos bassins du point de vue de notre travail de type comparatif.

TABLEAU 3.2-1: Résumé des Caractéristiques des Bassin étudiées

Table Comparatif Glaciers en Etude							
Macro Bassin	Bassin	Sous B. V.	Superficie Km ²		% Englacée Cgl	Altitude	Orientation
			Totale	Englacée			
Amazonien	Zongo	Tubo	3.340	2.470	74	4830-6000	S-SE
		Prado	3.000	0.270	9	4780	NO
		Alpaca	5.740	2.120	37	4750	NE
	Chacaltaya	Chacaltaya	0.520	0.040	8	4730 - 5395	S
Altiplanique	Tuni	Jallayco	1.620	0.150	9	4500	S
		Paya Huichincha	9.060	1.530	17	4478	S-SO
		Condoriri	12.200	3.240	27	4500	SO
		Huayna Potosi	5.060	4.190	83	4750 - 6000	SO

Les glaciers de Chacaltaya et de Zongo sont les bassins les plus importants pour le programme GREAT ICE au niveau des études faites et aussi des données mesurées. Chacaltaya est un glacier qui disparaîtra dans les prochaines années, on est témoin de ses dernières années de vie ; dans le cas de Zongo on a un bassin qui a encore des réserves glaciaires relativement fortes, mais qui aussi voit reculer fortement sa surface englacée chaque année qui passe.

Pour les deux glaciers, existe un réseau de mesure complet (mesures de pluie, débit et bilan de masse), surtout au Zongo qui est en constante étude.

Dans le cas des bassins du côté Altiplanique, on observe que leur étude a commencé quand Aguas del Illimani S.A. est devenu responsable de la distribution d'eau potable pour les villes de La Paz et de El Alto en 1997, mais des lacunes sur le traitement des données ont occasionné que la base de données soit considérablement réduite, courte et qualifiée de peu fiable dans quelques cas.

FIGURE 3.2-1: Bassins Versants et Stations de Tubo, Prado, Alpaca et Huayna Potosi

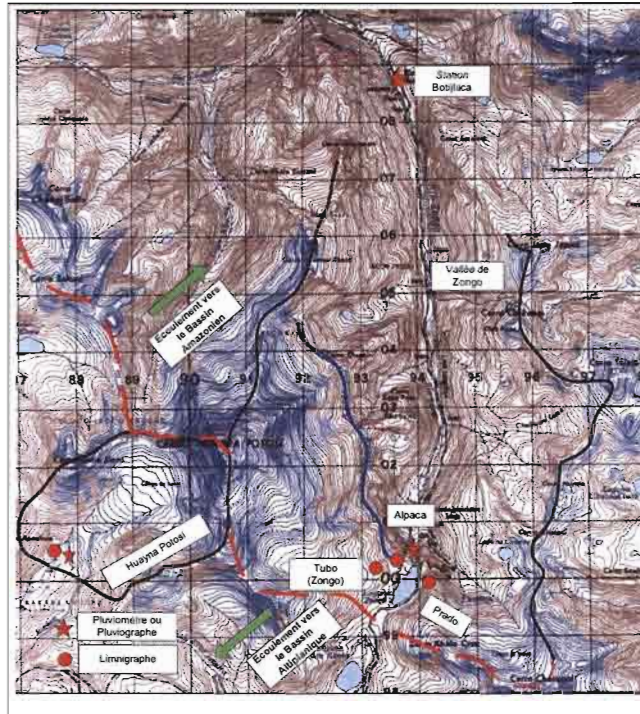
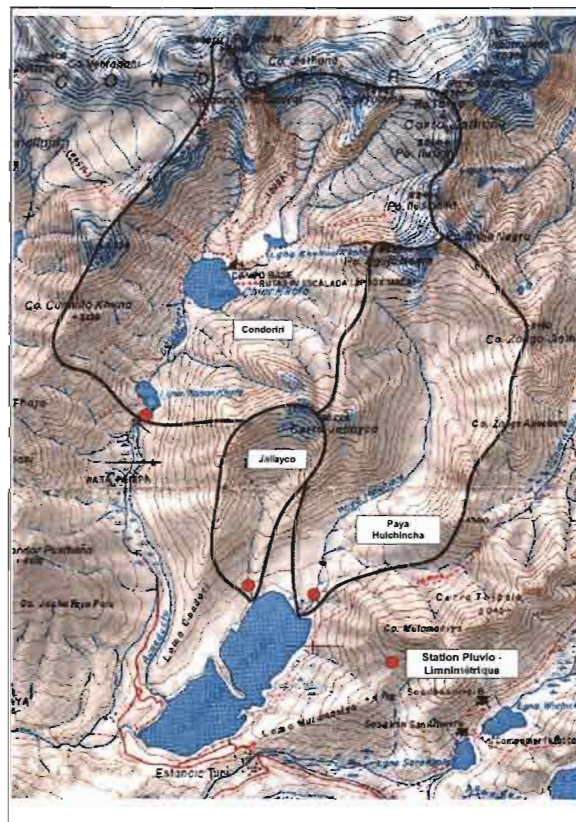


FIGURE 3.2-2: Bassin Versant et Stations de Condoriri, Jallayco et Paya Huichincha



4. PRESENTATION DES STATIONS ET ANALYSE DE LA BASE DE DONNEES

4.1 PRESENTATION DES STATIONS ET SOURCES DE DONNEES

Pour la réalisation de ce travail, on a pris des données de quatre sources:

- Les stations qui appartiennent à la zone en étude, suivies par l'IRD ou par les institutions qui collaborent avec le programme GREAT ICE (COBEE, IHH, AISA), (Figures 3.2-1 et 3.2-2).
- La NCEP (National Centers for Environmental Prediction), pour les données de température de l'air de réanalyse, pour la maille et altitude qui correspond à la zone en analyse (65°W, 15°S, 500hPa).
- Les stations qui n'appartiennent pas à la zone en étude, mais qui se trouvent dans des zones voisines ; ces données nous intéressent dans un objectif de comparaison et de contrôle des séries des stations de la zone d'étude. Les deux stations de El Alto et San Calixto, sont spécialement importantes pour leurs longues séries, qui permettent de faire une analyse des épisodes du Niño et de sa variation au travers des dernières décennies.
- La National Oceanic and Atmospheric Administration's (NOAA) pour les données des indicateurs des événements ENSO, qui montrent la présence historique de ces événements.

En Annexe 1 on présente la base de données qu'on a utilisée pour ce travail.

4.1.1 Données qui appartiennent à la Zone d'étude

4.1.1.1 Mesures de Pluie, Débits et Bilan de Masse

Les données qu'on a utilisées pour les analyses présentées dans ce mémoire ont été mesurées par les équipes dont la liste suit :

- 1 Pluviomètre journalier (surface d'interception : 400 cm²) (Plataforma)
- 2 Stations limnigraphiques automatiques qui contrôlent les débits à la sortie des canaux Prado et Alpaca.
- 5 Stations pluvio-limnigraphiques (Limnigraphes automatique, Pluviographes basculeurs), (Tubo, Huayna Potosi, Condoriri, Paya Huichincha, Jallayco)
(Caballero, 2001 ; Poirier 2004)

Pour la mesure du bilan de masse, l'IRD a installé un réseau de balises sur chaque glacier (Chacaltaya et Zongo (Tubo)). (Rapport IRD, 03-04).

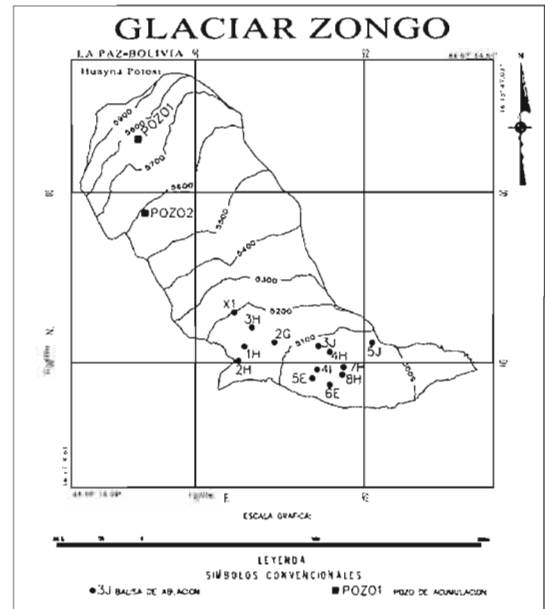
FIGURE 4.1-1: Stations de Mesure, Pluie, Débit et Bilan de Masse



Station de Chacaltaya (Ramirez, 2003)



Station de Jallayco (Garetta, 2004)



Réseau de Balises pour la mesure du Bilan de Masse Zongo (Rapport 03-04)

4.1.1.2 Températures de Réanalyse

« Le NCEP (National Centers for Environmental Prediction) et le NCAR (National Center for Atmospheric Research) propose des réanalyse de 1948 jusqu'à nos jours. Ces deux institutions collaborent depuis 1991 sur le projet de réanalyse afin de produire des analyses globales des champs atmosphériques à différents niveaux de pression depuis le sol, destinées à la recherche. Ces données de qualité intéressent 60 champs atmosphériques et sont disponibles pour une grille de résolution T62 (192 longitudes par 94 latitudes, soit des mailles $1.9^\circ \times 1.9^\circ$)¹, sur 28 niveaux de pression (de 1000 hPa à 10 hPa) » (Kalnay et al., 1996) in (Ardoin, 2004).

Il existe quatre classes de données de réanalyse dont les variables de température de l'air et du vent correspondent à la classe A, laquelle est considérée comme les plus fiables (Ardoin, 2004).

¹ Mailles de $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ selon Pouyaud.

Si le travail avec ce type de données est très intéressant, il est nécessaire de garder beaucoup de prudence pour son utilisation (Francou et Pouyaud, 2004).

« La pratique relativement courte dans l'application des données de réanalyse aux glaciers et rivières des Andes, montre qu'on peut obtenir de bons résultats avec la température de l'air au niveau de pression de 500 hPa (Théoriquement 5572 msnm) et 600 hPa (Théoriquement 4205 msnm). On estime que le niveau de 500 hPa est le plus correct pour la hauteur des zones d'ablation de nos glaciers ». (Francou et Pouyaud, 2004).

Pour notre étude on a pris les données de réanalyse du site Internet : <ftp://ftp.cdc.noaa.gov/pub/Datasets/ncep.reanalysis/pressure>, pour la zone qui correspond à la grille 65°W 15°S (Zongo) au niveau de 500 hPa (données de moyennes mensuelles depuis Janvier 1948 – Mars 2005).

4.1.2 Données qui n'appartiennent pas à la Zone d'étude

4.1.2.1 Stations Pluviométriques

La mesure de la précipitation aux stations de San Calixto, El Alto, Milluni et Botijlaca est faite avec des pluviomètres journaliers similaires à ceux qui sont à la Station Plataforma. Le contrôle de la lame précipitée est fait par le chargé de la station une ou deux fois par jour.

4.1.2.2 Indicateurs Niño et Niña

SOI (Southern Oscillation Index)

On a travaillé avec trois types d'indicateurs Niño et Niña qui proviennent des archives de la National Oceanic and Atmospheric Administration's (NOAA).

Le premier d'entre eux est l'Indice SOI (Southern Oscillation Index) qui est calculé à partir des valeurs standardisées des pressions mesurées au niveau du mer à Tahiti et Darwin.

On a obtenu les données du site Internet www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/index.html, pour la période janvier 1951 – Février 2005.

ENSO (El Niño Southern Oscillation)

On a obtenu les données du site Internet www.cdc.noaa.gov/people/cathy.smith/best/#years, pour la période Janvier 1871 – Août 2004.

El Niño Index

Il s'agit d'un nouvel indicateur qui filtre les mois où les événements Niño et Niña se présentent. Le tableau montre des valeurs 1 pour les mois Niño, des valeurs -1 pour les mois Niña et 0 pour les mois où on n'a pas aucune épisode de ce type.

On a obtenu les valeurs du site internet : www.cdc.noaa.gov/people/cathy.smith/best/table.txt, pour la période Mars 1871 – Juin 2004.

Le tableau 4.1-1 montré en continuation présente un résumé pour les stations, les paramètres mesurés, les périodes de disponibilité des données et leur périodicité. On a également ajouté en dernière colonne les noms des chercheurs qui ont travaillé sur leur correction, révision, et comblement des lacunes des séries employées dans ce travail.

Le tableau 4.1-2 présente la comparaison des disponibilités des données entre les stations, en faisant la différence entre les périodes où on dispose de données reconstituées et celles où on dispose de données mesurées directement.

TABLEAU 4.1-1: Présentation de Stations et des Sources des Données

Stations qui Appartient à la Zone en Etude

Station	Paramètre	Unité de Mesure	Disponibilité de Données	Periodicité	Responsable Station	Calculs, Analyse, Corrections, Comble de Données, Révision
Plataforma	Précipitation	mm	Janv. 1971 - Août 2004	Mensuelle	COBEE - IRD	Macarez. (1997), Garretta P.(2001), L'Hôte Y. (2003).
Chacaltaya	Précipitation	mm	1991 - 2004	Anuelle	IRD - IHH	Mendoza J. Ramirez E. (Permanent)
	Bilan de Masse net Spécifique	mm	1991 - 2004	Anuelle		Mendoza J. Ramirez E. IRD (Permanent).
Tubo (Zongo)	Débit	l/s	Janv. 1973 - Août 2004	Mensuelle	COBEE - IRD	Rigaudière P. (1995), Berthier E.(1997), Poirier J.C.(2004).
	Bilan de Masse net Spécifique	mm	1991 - 2004	Anuelle	IRD	IRD, Soruco (2004)
Prado	Débit	l/s	Janv. 1973 - Avril 2004	Mensuelle	COBEE - IRD	Tamayo W. (1996), Berthier E.(1997), Poirier J.C.(2004)
Alpaca	Débit	l/s	Juin 1980 - Avril 2004	Mensuelle	AISA - IRD	Berthier E. (1997), Poirier J.C.(2004).
Condoriri	Précipitation	mm	Sept. 2002 - Mars 2004	Mensuelle		Poirier J.C. (2004)
	Débit	l/s	Sept. 1999 - Mai 2004	Mensuelle		Poirier J.C. (2004)
Huayna Potosi	Précipitation	mm	Janv. 1998 - Mars 2004	Mensuelle		Poirier J.C. (2004)
	Débit	l/s	Déc. 1999 - Mai 2004	Mensuelle		Poirier J.C. (2004)
Paya Huichincha	Précipitation	mm	Sept. 2002 - Mars 2002	Mensuelle		Poirier J.C. (2004)
	Débit	l/s	Déc. 1999 - Sept. 2002	Mensuelle		Poirier J.C. (2004)
Jallayco	Précipitation	mm	Sept. 2002 - Mars 2004	Mensuelle		Poirier J.C. (2004)
	Débit	l/s	Mai 2000 - Mars 2004	Mensuelle		Poirier J.C. (2004)

Données de Réanalyse

Project	Paramètre	Unité de Mesure	Disponibilité de Données	Maille	Periodicité	Source
Project Réanalyse	Température de l'air	°C	Janv. 1948 - Mars 2005	65°W, 15°S, 500 hPa	Mensuelle	ftp://ftp.cdc.noaa.gov/pub/Datasets/ncep_reanalysis/pressure

Stations qui n'Appartient à la Zone en Etude

Station	Paramètre	Unité de Mesure	Disponibilité de Données	Periodicité	Responsable Station	Calculs, Analyse, Corrections, Comble de Données, Révision
Botijlaca	Précipitation	mm	Mars 1971 - Mai 1999	Mensuelle	COBEE	Macarez F. (1997)
Milluni	Précipitation	mm	Mars 1971 - Mai 1999	Mensuelle	COBEE	Macarez F. (1997)
El Alto (Aéroport)	Précipitation	mm	Janv. 1948 - Déc. 2002	Mensuelle	AASANA - SENAMHI	Gallaire (2001 et 2003)
San Calixto	Précipitation	mm	Janv. 1891 - Fév. 2001	Mensuelle	SENAMHI	Gioda (1999) L'Hôte (1999)

Indicateurs Niño

Indice	Disponibilité de Données	Source
SOI (Southern Oscillation Index)	Janv. 1951 - Février 2005	www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/index.html
ENSO (El Niño Southern Oscillation Index Niño Niña)	Janv. 1871 - Août 2004	www.cdc.noaa.gov/people/cathy.smith/best/#years
	Mars 1871 - Juin 2004	www.cdc.noaa.gov/people/cathy.smith/best/table.txt

TABLEAU 4.1-2: Présentation de la Base de Données Employée dans l'étude

Paramètre	Unité	Périodicité	Station ou Indice	1871-91	1891-1948	48-51	51-71	71-73	73-80	80-91	91-96	96-98	98-99	99-00	00-01	01-02	02-04	04-05	
Indice Niño		Mensuelle	Indice ENSO	[Observed]															
			Indice Niño et Niña	[Observed]															
			Indice SOI	[Observed]															
Température	°C	Mensuelle	D. Réanalyse	[Observed]															
Précipitation	mm	Mensuelle	San Calixto	[Observed]															
			El Alto	[Observed]															
			Milluni	[Observed]															
			Botijlaca	[Observed]															
			Plataforma	[Observed]															
		Anuelle	Chacaltaya	[Observed]															
Débit	l/s	Mensuelle	Tubo								[Reconstituted]	[Observed]	[Observed]	[Observed]	[Observed]	[Observed]	[Observed]	[Observed]	
			Prado									[Reconstituted]	[Observed]	[Observed]	[Observed]	[Observed]	[Observed]	[Observed]	[Observed]
			Alpaca									[Reconstituted]	[Observed]	[Observed]	[Observed]	[Observed]	[Observed]	[Observed]	[Observed]

Paramètre	Unité	Périodicité	Station ou Indice	1871-91	1891-1948	48-51	51-71	71-73	73-80	80-91	91-96	96-98	98-99	99-00	00-01	01-02	02-04	04-05			
Bilan de Masse	mm	Anuelle	Zongo (Tubo)									[Observed]	[Observed]	[Observed]	[Observed]	[Observed]	[Observed]	[Observed]			
			Chacaltaya										[Observed]	[Observed]	[Observed]	[Observed]	[Observed]	[Observed]	[Observed]		
Précipitation	mm	Mensuelle	Condoriri															[Observed]	[Observed]		
			Huayna Potosi																[Observed]	[Observed]	
			Paya Huichincha																	[Observed]	[Observed]
			Jallayco																	[Observed]	[Observed]
Débit	l/s	Mensuelle	Condoriri																[Observed]	[Observed]	
			Huayna Potosi																	[Observed]	[Observed]
			Paya Huichincha																	[Observed]	[Observed]
			Jallayco																	[Observed]	[Observed]

Référence

[Grey]	Période des Données observées
[Yellow]	Période des Données reconstituées
[Green]	Période dont on a données observées et Reconstituées

4.2 ANALYSE DE LA BASE DE DONNEES

4.2.1 Stationnarité des Données

Pour l'analyse de la stationnarité des données de nos stations, on a employé le logiciel KhronoStat pour déterminer les ruptures qui pourraient exister. A propos de ce logiciel et des test employés, on transcrit un texte qui décrit en peu de lignes son fonctionnement :

« La stationnarité d'une série est caractérisée par la stabilité dans le temps de la loi de distribution la représentant et particulièrement de la moyenne et de l'écart type. En hydrométéorologie, « un modèle d'évolution continue n'est pas recevable compte tenu de la brutalité de certains comportements observés. On est donc amené à s'intéresser à des modèles fondées sur une évolution discontinue » selon Hubert et al 1989, 1898.

Aussi, il est cherché une ou 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, le plus souvent inconnu. Le logiciel KhronoStat permet la mise en œuvre de cinq test spécifiques :

-Le test de Pettitt, la statistique U de Buishand et les ellipses de contrôle font apparaître pour chaque test que l'hypothèse nulle (absence de rupture) est acceptée aux trois seuils de confiance retenues de 90, 95 et 99% ;

-La procédure bayésienne de Lee et Heghinian, dont l'objectif est de repérer la position la plus probable d'une seule rupture en recherchant sa densité de probabilité a posteriori, ne met en évidence aucune rupture.

-Enfin, la procédure de segmentation de Hubert, avec un niveau de signification du test de Scheffe a 1%, permet de conclure que la série est stationnaire sans segmentation » (Gioda et al., 2004).

L'analyse fut réalisée au niveau des années hydrologiques, le résumé des résultats obtenus est présenté dans le tableau 4.2-1. (Annexe 3).

TABLEAU 4.2-1: Relation des Ruptures Trouvées aux Données des Stations Employées dans l'étude

Station	Precipitation [mm]						Temperature [°C]	Lame Ecoulée [mm]		
	San Calixto	San Calixto	El Alto	Milluni	Botijlaca	Plataforma 4750	Reanalyse	Tubo	Prado	Alpaca
Periode	1898 - 2000	1948 - 2000	1948 - 2002	1971 - 1998	1971 - 1998	1971 - 2002	1949 - 2004	1973 - 2003	1973 - 2002	1980 - 2002
Rupture Année Hydrologique	----	----	71-72	----	75-76	----	77-78	----	----	96-97 97-98

4.3 ANALYSE DES PARAMETRES

4.3.1 Analyse de la Précipitation

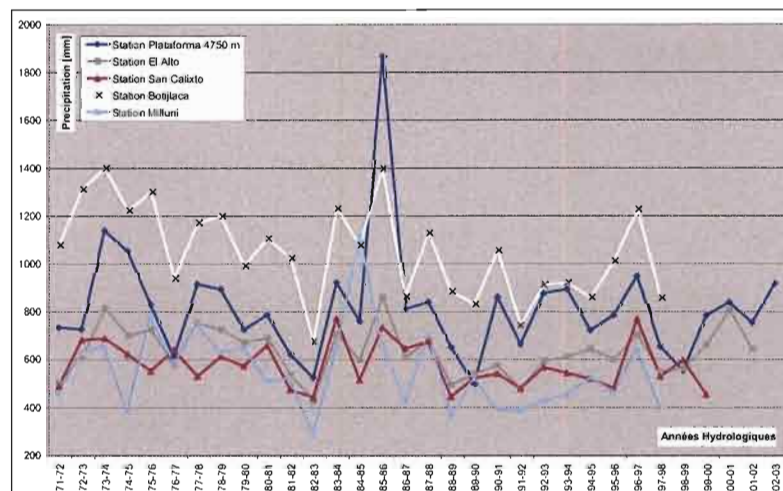
En faisant une comparaison entre les pluies annuelle des séries pluviométriques du bassin de Zongo aux stations qui présentent des comportements similaires, il est possible d'observer que toutes les séries montrent une tendance vers la diminution.

Au niveau du contrôle de la série de Plataforma, on peut apercevoir que pour l'année 1985-86, il y a une augmentation démesurée de la valeur de la précipitation ; or, si les stations de Botijlaca, El Alto et San Calixto signalent aussi une année avec une forte lame précipité, la valeur de Plataforma beaucoup plus importante indique probablement une erreur dans la mesure des données de cette station pour cette année.

D'autre part, la valeur de Plataforma pour l'année 1989-90 présente une situation similaire à celle dont on vient de parler, mais du côté d'une diminution erronée.

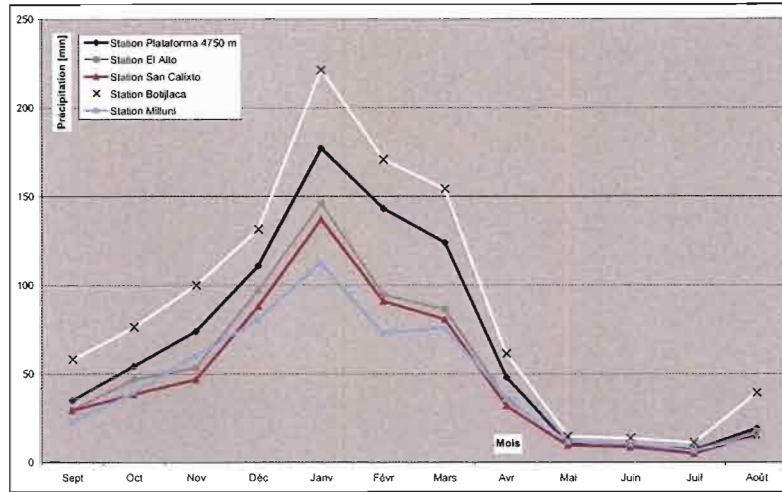
Comme on n'avait pas les moyennes pour confirmer s'il s'agissait d'une erreur ou non, on st resté avec les valeurs qu'on avait, néanmoins il sera fait une spéciale attention au moment de faire les analyses qui prendront en compte ces valeurs.

FIGURE 4.3-1: Comparaison des Précipitations Moyennes Annuelles



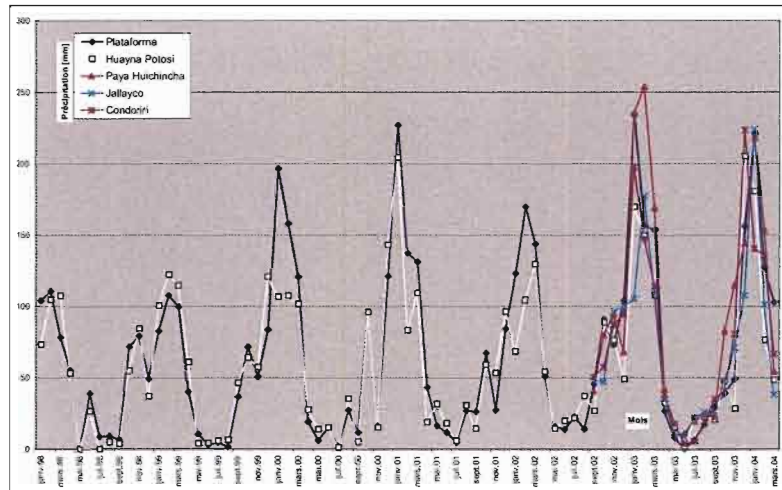
Le comportement au niveau mensuel pendant l'année de la précipitation est similaire aux stations analysées, il présente les pluies les plus importantes entre les mois de décembre et mars, dont janvier est le mois le plus fort au niveau des valeurs de précipitation.

FIGURE 4.3-2: Comparaison des Précipitations Moyennes Mensuelles



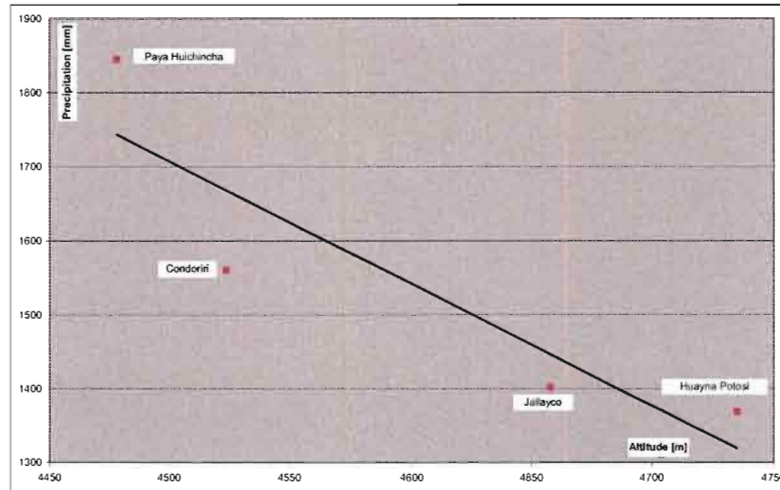
En faisant une comparaison des lames précipités entre les bassins versants de Zongo et Tuni (Huayna Potosi, Condoriri, Paya Huichincha et Jallayco), il est possible d'apercevoir que le régime de pluies (pendant la période où on dispose de données pour Tuni) est similaire des deux côtes. Cependant il faut signaler qu'on ne peut parler d'une tendance puisque la période des séries dont on dispose pour les bassins de Tuni est réduite et courte.

FIGURE 4.3-3: Pluviométrie de Zongo et Tuni (Janvier 1998 – Mars 2004)



Au niveau local du bassin de Tubo (Glacier de Zongo), si on analyse le gradient de précipitation par rapport à l'altitude on observe qu'il est positif (Rapport IRD, 03-04), mais si on fait une analyse au niveau régional du côté Tuni avec les précipitations des quatre bassins versants on observe que le gradient est négatif.

FIGURE 4.3-4: Rapport Altitude Précipitation, Tuni

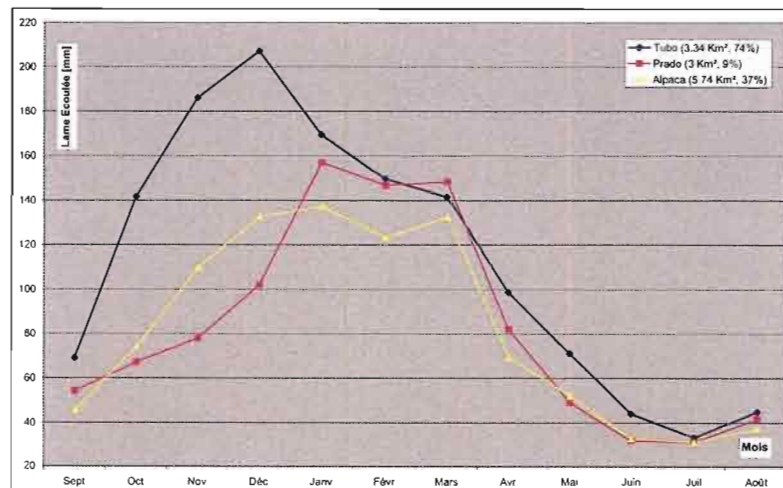


Il faut faire attention, avec cet aspect, parce qu'on doit remarquer que l'analyse faite au Zongo, prend en compte les pluies de cinq pluviographes qui se trouvent dans une même zone homogène et relativement petite sur la moraine du glacier ; par contre l'analyse de Tuni inclut les données de quatre stations étalées à l'intérieur du bassin, en conditions et positions très hétérogènes.

4.3.2 Analyse des Débits

Un aspect intéressant à voir est que les débits de Tubo présentent leur valeur la plus forte au mois de décembre ; la situation pour Alpaca est presque pareille parce que ses débits plus forts ont lieu les mois de janvier (plus fort) et de décembre avec des magnitudes similaires.

FIGURE 4.3-5: Comparaison des Lames écoulées moyennes mensuelles, Zongo



Si on prend en compte que la figure 4.3-2, nous montre que les pluies les fortes ont lieu au mois de décembre en même temps que les plus forts débits de Prado et Alpaca, on peut entrevoir que pendant le mois de décembre on a les fontes les plus fortes de ces glaciers. Cet aspect se confirme avec l'analyse du chapitre 6 (Figure 6.4-1).

D'autre côté, il faut remarquer aussi que ce comportement est spécifique du côté Zongo (Tubo), parce que le bassin de Huayna Potosi qui est son voisin très proche présente sa plus forte valeur d'écoulement au mois de janvier, en coïncidence avec les plus fortes pluies. (Figure 5.5-2)

L'analyse de débits nous a conduit aussi à entreprendre la reconstruction des valeurs de Alpaca, aspect qu'on montre au chapitre suivant.

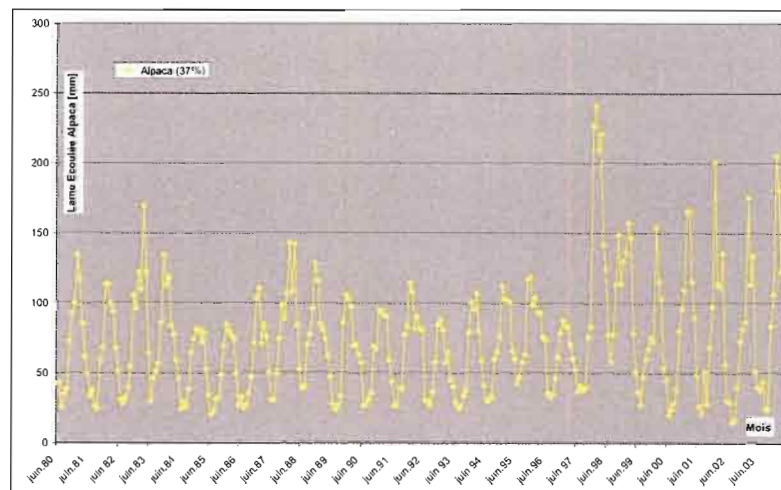
Le comportement des débits (lames écoulées) des bassins versants a été développé dans ce travail, puisqu'il représente la réponse hydrologique des glaciers, pour cette raison on n'a fait pas une analyse plus longue en cette section du mémoire.

4.3.2.1 Reconstitutions des Débits de la Station Alpaca

La station Alpaca a été analysée particulièrement parce qu'elle montre des ruptures successives d'une façon inhabituelle.

Les débits de la station Alpaca montrent une différence notable entre les valeurs présentées après 1997 et celles d'avant cette date.

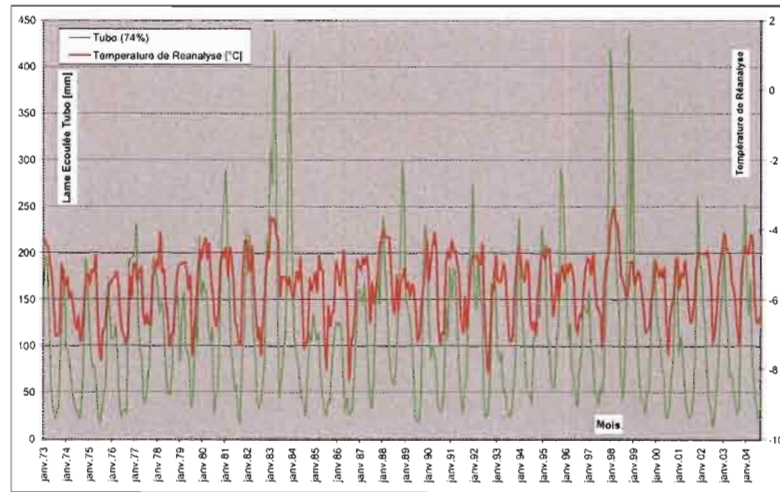
FIGURE 4.3-6: Lame Ecoulee d'Alpaca



Après une consultation des chercheurs de GREAT ICE à Montpellier et en Bolivie, on a appris que le canal d'Alpaca n'avait pas la capacité pour capter tout le débit, et pour cette raison la COBEE en l'année 1997 avait construit un mur pour améliorer la captation des débits.

D'après les aspects commentées auparavant, il fallait reconstruire le débit de Alpaca pour l'utiliser dans l'étude, pour cette raison et en prenant en compte la relation qui existe entre les températures de réanalyse et la lame écoulee (Pouyaud, soumis) et en considérant que celle-ci s'applique aussi pour les cas de nos glaciers (Voir Figure 4.3-7 Relation Température de Réanalyse vs lame Ecoulee Tubo), on a reconstruit les débits d'Alpaca.

FIGURE 4.3-7: Relation Température de Réanalyse et Lamé Ecoulé du Tubo



La reconstruction des débits de la station Alpaca ne fut pas totale, seulement on a pris les débits du mois de novembre, décembre, janvier, février et mars des années 1997 à 2004 pour reconstruire les données des mêmes mois du période 1980 – 1996, à partir de la corrélation des données de Alpaca avec la température de réanalyse pour les mois mentionnés.

Le résultat graphique de la reconstruction des données se montre dans les deux graphiques présentés en continuation.

FIGURE 4.3-8: Lamé Ecoulé Reconstituée pour Alpaca

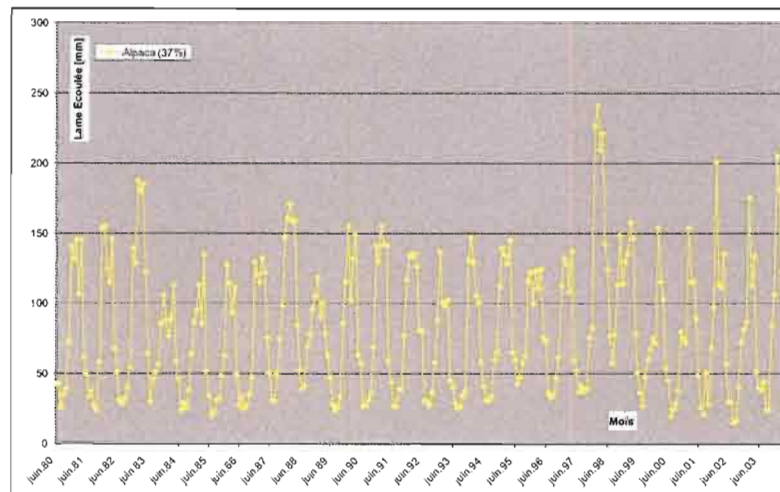
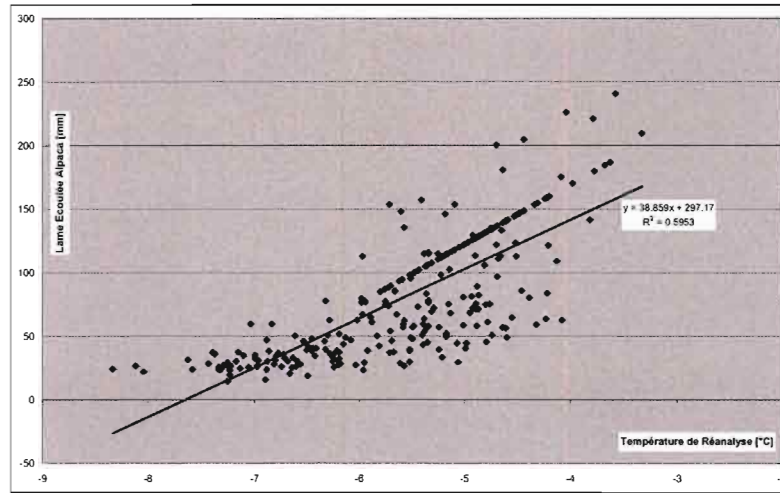


FIGURE 4.3-9: Relation Lamé Reconstituée d'Alpaca et Température de Réanalyse

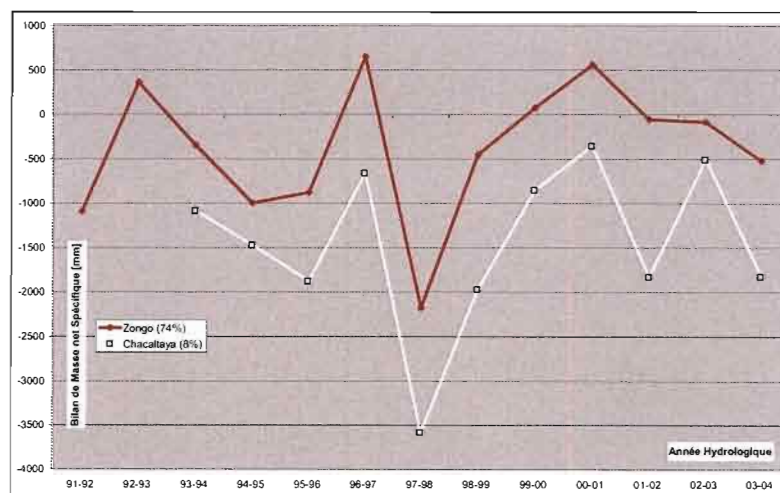


4.3.3 Comparaison des bilans de masse

Chacaltaya et Zongo sont les deux seuls bassins qui ont un contrôle de leur bilan de masse, la comparaison qu'on fait à la figure suivante nous montre un comportement similaire sauf pour l'année 2001-02 qui a été plus négative pour Chacaltaya que pour Zongo, à moins qu'il s'agisse d'une erreur de calcul. Mais un aspect qui sort rapidement est le bilan de Chacaltaya qui est beaucoup plus négatif que ceux de Zongo ; il faut signaler que pendant toute la période de comparaison on observe qu'il n'y avait pas une seule année où le bilan de Chacaltaya ait été positif.

Il se peut apercevoir aussi que les pertes de masse glaciaires sont indépendantes du taux d'englacement (Chacaltaya 8% ; Zongo 74%).

FIGURE 4.3-10: Bilan de Masse net Spécifique, Chacaltaya et Zongo

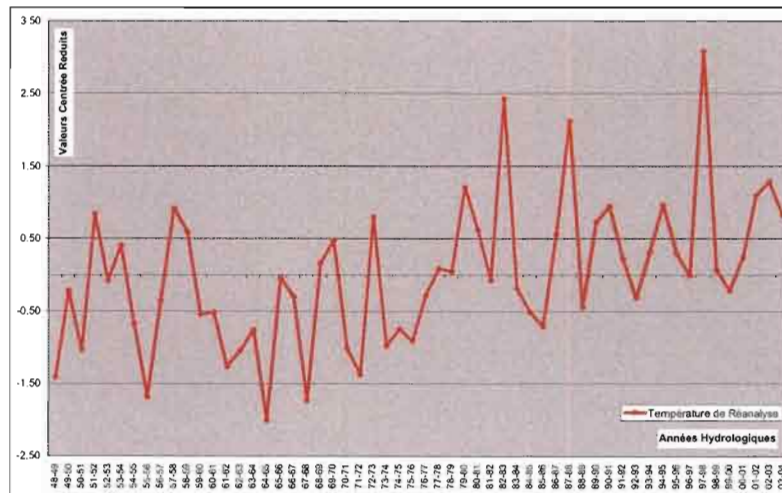


4.3.4 Températures de Réanalyse

Comme on peut apercevoir (figure 4.3-7), la relation qui existe entre la température et le ruissellement des glaciers nous emmène à utiliser ce paramètre comme un instrument de contrôle et d'analyse pour les écoulements et la fonte de la partie glaciaire des bassins versants.

La figure 4.3-11 présente une tendance à l'augmentation de la température, aspect qui n'est pas étonnant étant donné la problématique de réchauffement à l'échelle planétaire.

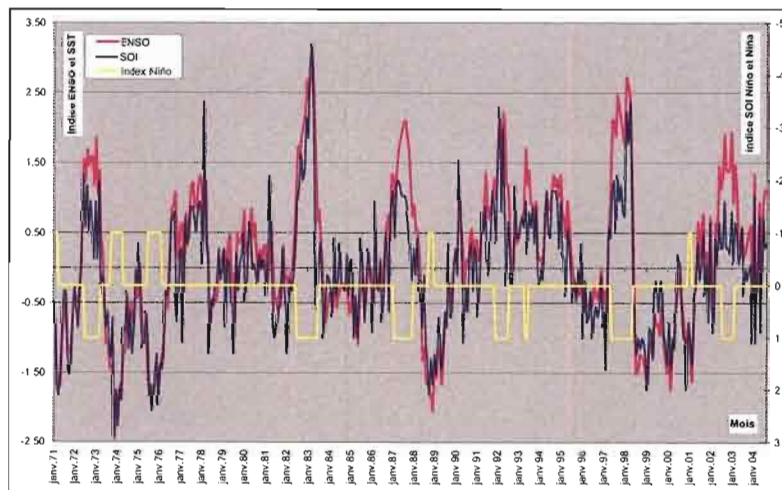
FIGURE 4.3-11: Température de Réanalyse Historique depuis 1948, (Valeurs Centrée Réduits)



4.3.5 Indicateurs El Niño et La Niña

Si on a travaillé avec trois types d'indicateurs Niño o Niña pour définir les périodes d'analyses de chaque évènement, on a pris ici l' Index Niño – Niña.

FIGURE 4.3-12: Indicateurs Niño - Niña



Les périodes d'analyse définies pour les événements ENSO d'après l'index Niño Niña sont présentées au tableau qui se montre en continuation :

TABLEAU 4.3-1: Résumé des Evénements Niño et Niña depuis 1896 à nos jours

Episode Niño	Période du Evénement	Années Hydrol.	Durée [Mois]
a	09/1896 - 01/97	1896-97	5
b	11/1899 - 07/00	1899-1900	9
c	06/1902 - 01/03	1901-02 / 1902-03	8
d	04/1905 - 11/05	1904-05 / 1905-06	8
e	11/18 - 05/19	18-19	7
f	10/25 - 06/26	25-26	9
g	08/30 - 05/31	29-30 / 30-31	10
h	02/40 - 04/40	39-40	3
i	01/41 - 10/41	40-41 / 41-42	10
A	12/57 - 03/58	57-58	4
B	08/65 - 01/66	64-65 / 65-66	6
0	06/72 - 02/73	71-72 / 72-73	9
1	06/82 - 05/83	81-82 / 82-83	12
2	01/87 - 11/87	86-87 / 87-88	11
3	11/91 - 06/92	91-92	8
4	04/93 - 05/93	92-93	2
5	05/97-04/98	96-97 / 97-98	12
6	07/2002 - 01/03	2002-03	7

Episode Niña	Période du Evénement	Années Hydrol.	Durée [Mois]
a	05/93 - 07/93	1892-93	3
b	02/04 - 03/04	1903-04	2
c	08/10 - 10/10	1909-10 / 1910-11	3
d	07/15 - 08/15	14-15	2
e	03/17 - 01/18	16-17 / 17-18	11
A	04/50-12/50	49-50 / 50-51	9
B	08/55-10/55	54-55 / 55-56	3
C	01/71-02/71	70-71	3
1	09/73-03/74	73-74	7
2	6/75-01/76	74-75 / 75-76	8
3	09/88 - 11/88	88-89	3
4	12/00-01/01	2000-01	2

5. IMPORTANCE DU TAUX D'ENGLACEMENT ET DE L'ORIENTATION GEOGRAPHIQUE D'UN GLACIER DANS SA REPONSE COMPORTEMENTALE

5.1 LE TAUX D'ENGLACEMENT D'UN BASSIN ET SES VARIABLES REPRESENTATIVES

5.1.1 Relation entre les paramètres climatiques (Précipitation et Température), la lame écoulée et la fonte glaciaire

Les glaciers sont des éléments qui ont un fonctionnement similaire aux barrages, c'est à dire principalement de stockage d'eau, mais contrairement à ces ouvrages hydrauliques, le débit qui sort de la masse glaciaire, ne peut pas être régulé, parce qu'il est gouverné par sa relation avec divers paramètres climatiques et physiques : parmi eux, la précipitation et la température de l'air.

La **précipitation** dans tous les domaines hydrologiques est la variable d'entrée, pour les études des glaciers elle joue le même rôle en apportant de l'eau (devenue solide ou comme neige) pour l'augmentation de la masse glaciaire et aussi pour l'écoulement du bassin.

Le rôle de la **température** est très important au niveau de l'ablation de la couverture glaciaire, soit pour sa sublimation, soit pour sa fonte. Dans le cadre de cette étude, on analyse principalement l'influence de la température sur la fonte du glacier.

Certainement l'explication présentée ci-dessus, décrit d'une manière simpliste quelques mécanismes seulement qui gouvernent le comportement compliqué des glaciers qui dépendent d'autres variables telles que l'albédo, le vent, ou les processus d'échange d'énergie, qui ne sont pas pris en compte dans ce travail pour raisons de temps et d'amplitude.

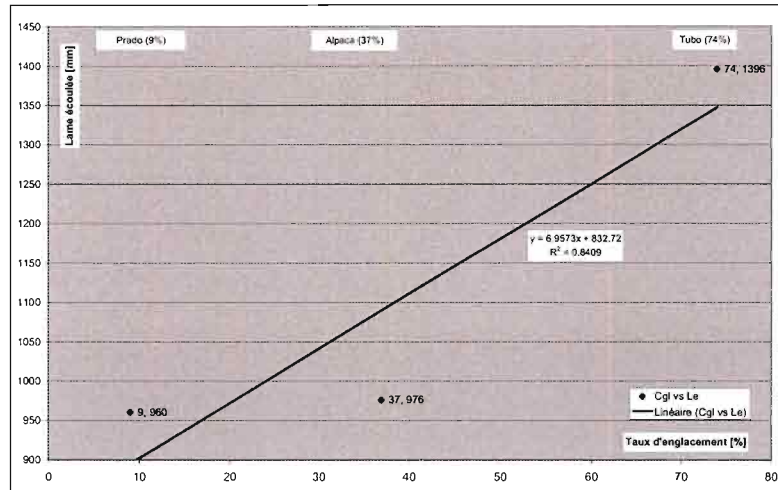
5.1.2 Variables représentatives du comportement d'un bassin avec couverture glaciaire

Pour analyser les bassins englacés on a utilisé deux variables qui sont représentatives de son comportement:

- Le taux d'englacement (C_g , [%]) qui est le rapport entre la surface couverte de glaciers et la surface totale du bassin versant.
- La lame écoulée (L_e [mm]), qui est l'écoulement d'un bassin, mesuré à un point de contrôle à la sortie du versant. L'écoulement mesuré inclut aussi bien les eaux de la fonte glaciaire que les eaux de ruissellement direct.

La lame écoulée et la fonte glaciaire sont fonction du taux d'englacement d'un glacier et de la température de l'air (Pouyaud et al., soumis).

FIGURE 5.1-1: Rapport entre Taux d'englacement et lame écoulée



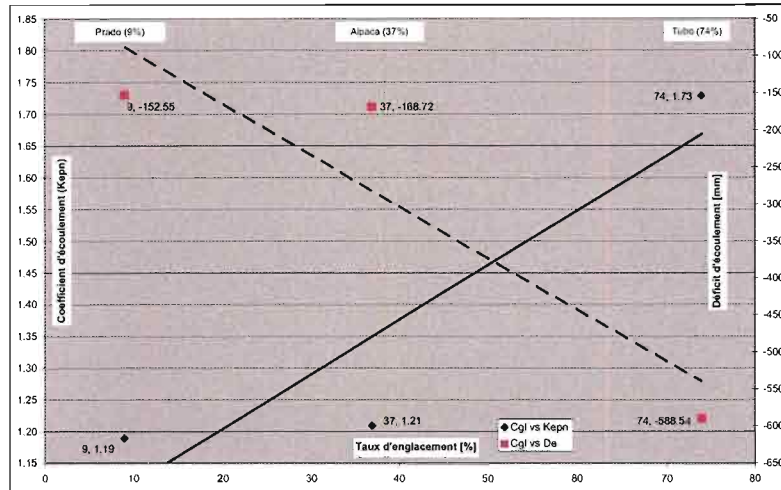
La figure montrée ci-dessus, présente la relation entre la lame écoulée et le taux d'englacement des trois bassins versants du Zongo (côté Amazonien), dont la lame écoulée est plus forte aux bassins le plus englacées Tubo (Cgl: 74%, Le= 1396) et Alpaca (Cgl: 37%, Le=976), par rapport à celle de Prado (Cgl: 9%, Le=960)

Pour analyser la relation entre la précipitation et la lame écoulée on prend deux paramètres utilisés dans l'étude de prévision à moyen et long terme de la ressource en eau glaciaire pour la Cordillère Blanche du Pérou (Pouyaud et al., Soumis) : le coefficient d'écoulement (k_{epn}) et le déficit d'écoulement (De) ; le premier est le rapport entre la lame écoulée et la précipitation et le deuxième est la différence entre la précipitation et la lame écoulée.

$$k_{epn} = \frac{Le}{P} \quad De = P - Le$$

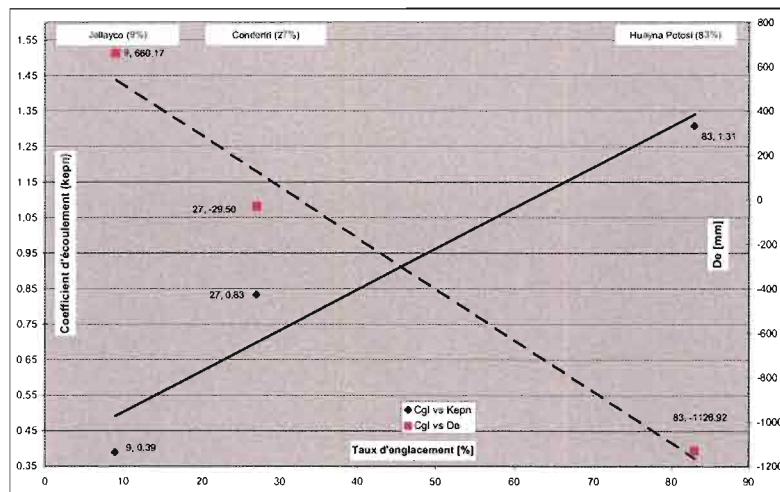
Si on mis ces deux paramètres en rapport avec le taux d'englacement, on observe que de façon similaire à la relation entre Le et Cgl, ils sont en relation directe avec le taux de couverture glaciaire (Croissante pour le coefficient d'écoulement et décroissante pour le déficit d'écoulement). (Figure 5.1-2).

FIGURE 5.1-2: Rapport entre Taux d'englacement et les paramètres Kepn et De (Zongo 81-03)



Egalement, on peut apercevoir pour les bassins de Tuni, une situation similaire pour le période Sept 2002 – Mars 2004. (Figure 5.1-3).

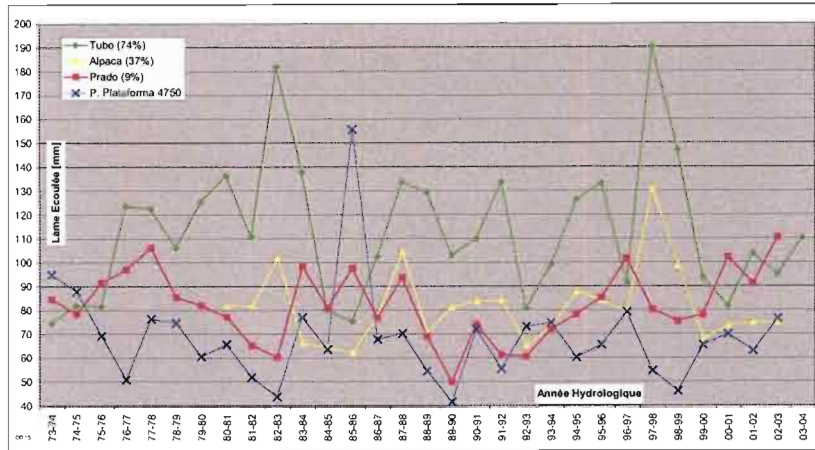
FIGURE 5.1-3: Rapport entre Taux d'englacement et le paramètres Kepn et De (Tuni Sept.02-Mars 04)



5.2 DISSEMBLANCE COMPORTEMENTALE ENTRE BASSINS VERSANTS A TAUX D'ENGLACEMENT FORTS ET FAIBLES DANS LE MEME MACRO BASSIN

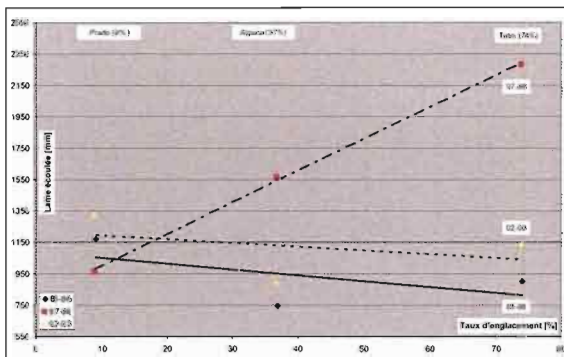
A la figure 5.2-1, on peut voir les comportements de la lame écoulee totale annuelle des trois bassins de Zongo. Les versant de Tubo (74%) et Alpaca (37%) ont une ressemblance au niveau des tendances (d'augmentation ou diminution selon l'année), par contre le bassin de Prado (9%), montre un comportement différent de ses voisins, parfois tout à fait contraire.

FIGURE 5.2-1: Comparaison des Lames Ecoulées Moyennes Annuelles (Côté Zongo) et Précipitation

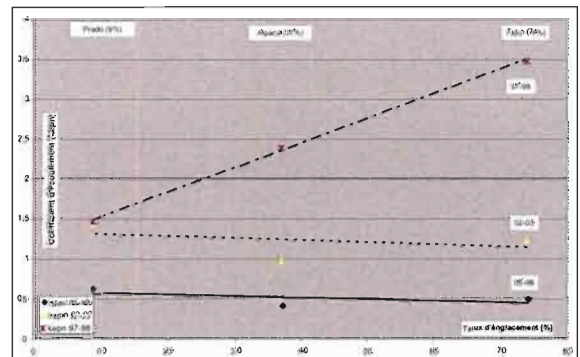


Sur les figures montrées ci-dessous, il est possible d'observer la sensibilité des écoulements des bassins à la variabilité climatique, puisque pour les années hydrologiques caractérisées par un volume de précipitation supérieur à la moyenne (comme 1985-86) les pentes des courbes de tendance de Cgl vs Le, De et Kepn changent de sens traces par rapport aux figures 5.1-1 t 5.1-2 .,Au contraire, pour les années avec une grande augmentation de température comme 1997-98, les pentes par rapport à celles des graphiques des figures avant mentionnées augmentent de valeur.

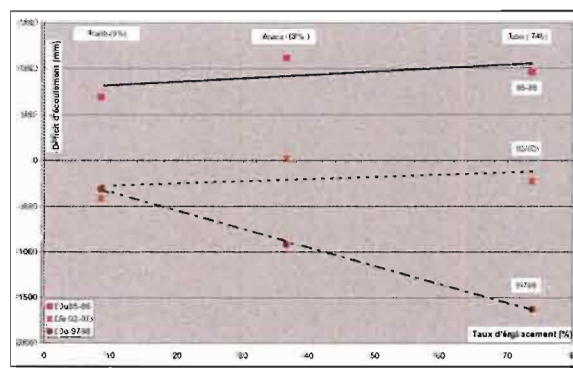
FIGURE 5.2-2: Cgl vs Le, kep n et De (Zongo 85-85, 97-98)



a)



b)



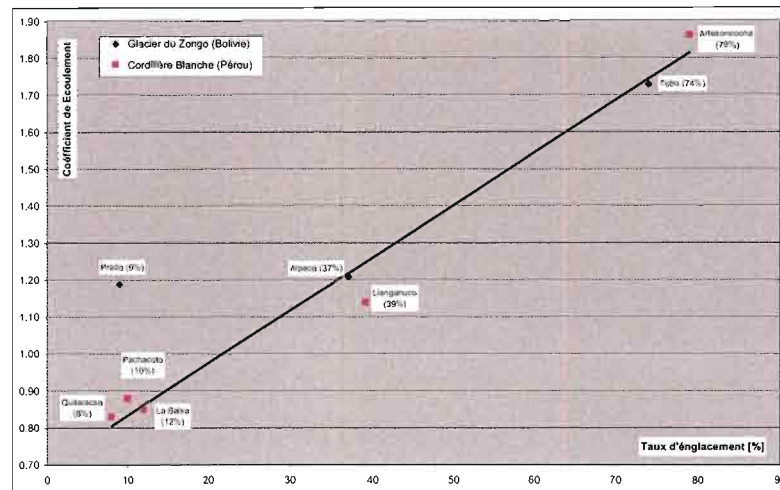
c)

Les aspects commentés dans les derniers paragraphes suggèrent que la tendance moyenne dans nos bassins se trouve vers le déficit de précipitation et l'augmentation de température.

5.3 COMPARAISON AVEC LES VALEURS DE LA CORDILLERE BLANCHE (PEROU)

Avec les valeurs disponibles des paramètres indicateurs Le, Kpen et De, des glaciers de la Cordillère Blanche au Pérou (Pouyaud, soumis), on a fait une comparaison avec celles qu'on a calculées pour le Glacier du Zongo.

FIGURE 5.3-1: Comparaison de Kepn Cordillère Blanche et Glacier du Zongo



On peut observer une similitude intéressante, bien que la valeur de Prado soit hors de la courbe de tendance.

Dans le cas du bassin de Prado, il faut signaler que pendant tout notre processus d'analyse, on a observé des aspects très particuliers, comme ceux en relation avec sa lame écoulee (Que signifient les valeurs très fortes de la lame écoulee par rapport à son taux d'englacement), ou les différences de comportement avec les bassins voisins, ou comme il se peut apercevoir à la figure présentée ci-dessus les valeurs de ses paramètres kpen et De qui ne suivent pas les tendances des autres glaciers qui ont des taux d'englacement similaires. Tous ces aspects pourtant ont donné lieu à plusieurs des analyses présentées dans le développement de ce mémoire.

5.4 SIMILITUDES ET DISSEMBLANCES DE COMPORTEMENT ENTRE SOUS BASSINS VERSANTS DES DIFFERENTS MACRO BASSINS QUI ONT DES TAUX D'ENGLACEMENT SIMILAIRES

Pour continuer l'analyse de l'influence du taux d'englacement dans le comportement des bassins englacés, on a fait un travail de mise en rapport des lames écoulees de chaque bassin avec celles des autres bassins versants étudiés. Initialement on a mis en rapport les lames écoulees des bassins du même côté (soit Amazonien, soit Altiplanique) et postérieurement le rapport s'est étendu aux bassins du côté voisin.

Les critères de comparaison pour la mise en rapport des débits (lames écoulees) des différents bassins étaient donnés par la différence de leurs taux d'englacement et la valeur du coefficient

de détermination (R^2). Il faut observer que tant les valeurs des taux d'englacement, que celles des lames écoulées, étaient choisis pour faire cette analyse puisque ils sont de bons indicateurs du comportement des bassins glaciaires, comme on a montré au chapitre antérieur.

TABLEAU 5.4-1: Corrélation des Lames écoulées et Différences des Taux d'englacement, Côté Zongo

Bassins en Rapport		Cgl : % Englagement		Différence	R ²
Alpaca (37%)	Prado (9%)	37	9		
Tubo (74%)	Alpaca (37%)	74	37	37	0.6116
Tubo (74%)	Prado (9%)	74	9	65	0.1238

TABLEAU 5.4-2: Corrélation des Lames écoulées et Différences des Taux d'englacement, Côté Tuni

Bassins en Rapport		Cgl : % Englagement		Différence	R ²
Paya Huych. (17%)	Jallayco (9%)	17	9		
Condoriri (27%)	Paya Huych. (17%)	27	17	10	0.8762
Condoriri (27%)	Jallayco (9%)	27	9	17	0.8076
Huayna Potosi (83%)	Condoriri (27%)	83	27	56	0.5908
Huayna Potosi (83%)	Paya Huych. (17%)	83	17	66	0.6671
Huayna Potosi (83%)	Jallayco (9%)	83	9	74	0.4193

TABLEAU 5.4-3: Corrélation des Lames écoulées Côtés Zongo et Tuni

Bassins en Rapport		Cgl : % Englagement		Différence	R ²
Tubo (74%)	Jallayco (9%)	74	9		
Tubo (74%)	Condoriri (27%)	74	27	47	0.1937
Tubo (74%)	Paya Huych. (17%)	74	17	57	0.2994
Alpaca (37%)	Jallayco (9%)	37	9	28	0.3935
Jallayco (9%)	Prado (9%)	9	9	0	0.4835
Huayna Potosi (83%)	Prado (9%)	83	9	74	0.4997
Paya Huych. (17%)	Prado (9%)	17	9	8	0.5841
Condoriri (27%)	Prado (9%)	27	9	18	0.6013
Alpaca (37%)	Condoriri (27%)	37	27	10	0.599
Alpaca (37%)	Paya Huych. (17%)	37	17	20	0.6543
Huayna Potosi (83%)	Tubo (74%)	83	74	9	0.7118
Huayna Potosi (83%)	Alpaca (37%)	83	37	46	0.7473

Dans les deux premiers tableaux on peut apercevoir que les coefficients de déterminations du côté Tuni sont plus hauts que ceux qu'on a du côté Zongo, aspect qui suggère une meilleure homogénéité dans le comportements des bassins du côté altiplanique.

Egalement il faut remarquer, qu'on retrouve les plus faibles corrélations de chaque côté (Zongo et Tuni) entre les bassins qui ont les plus petits taux d'englacement en comparaison avec ceux qui ont les taux les plus hauts (Zongo : Tubo et Prado *versus* Tuni : Huayna Potosí et Jallayco) ; en cela, on observe encore la différence de comportement entre les bassins peu englacés avec ceux qui ont une couverture glaciaire beaucoup plus importante.

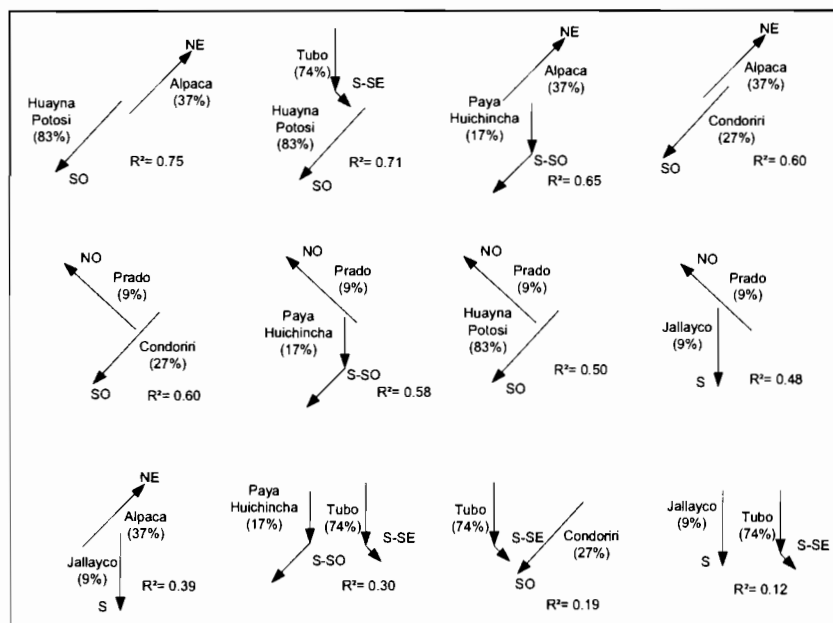
D'un autre côté, quand on fait la corrélation des débits des bassins de Zongo et Tuni, il est possible d'observer qu'on retrouve en général, les meilleurs coefficients de détermination R^2 , pour les différences de taux d'englacement compris entre 8 et 20%, comme il se peut apercevoir également avec la corrélation des bassins du côté Altiplanique (Tuni). Cet aspect confirme aussi que les comportements d'un bassins glaciaire sont gouvernés par son extension glaciaire.

Si on compare des bassins avec des taux d'englacement similaires comment les paires [Huayna Potosí (83%) – Tubo (74%), $R^2= 0.712$], [Alpaca (37%) – Condoriri (27%), $R^2=0.600$] et [Prado (9%) – Jallayco (9%), $R^2=0.484$], on peut remarquer que pour les plus grandes couvertures glaciaires on trouve le coefficient R^2 le plus grand, et que pour les plus faibles c'est le contraire. Cet aspect peut s'expliquer en observant que pour les bassins englacés le pourcentage de couverture glaciaire joue un rôle très important dans son comportement et que par contre pour les couvertures mineures, d'autres paramètres tels que la morphologie du bassin et autres concepts qui appartient à l'hydrologie classique, gouvernent principalement son fonctionnement.

5.5 INFLUENCE DE L'ORIENTATION DU BASSIN ET DE SA POSITION GEOGRAFIQUE DANS SON COMPORTEMENT

Un autre aspect analysé dans le cadre de ce travail, était l'orientation des bassins et les coefficients de détermination (R^2) obtenus quand on compare par paires toutes les lames écoulées des bassins en étude. L'analyse de l'influence de l'orientation dans le comportement glaciaire a été faite avec l'aide du graphique présenté en continuation :

FIGURE 5.5-1: Relation entre l'orientation de deux bassins et le Coefficient de détermination du rapport de leurs lames écoulées



Dans la figure, on distingue que les plus hauts coefficients de détermination correspondent aux comparaisons entre bassins qui ont une symétrie dans l'axe SE-NO, ensuite on trouve les valeurs des coefficients de ceux qui ont une orientation vers l'axe E-O et finalement ceux qui s'orientent vers le Sud.

Avec cette analyse on ne peut pas arriver à des conclusions définitives, mais on peut apercevoir que l'orientation du bassin versant ainsi que d'autres aspects prennent leur part des relations compliquées qui interviennent dans le comportement d'un bassin englacé.

FIGURE 5.5-2: Comparaison entre les Lames Ecouées Moyennes Mensuelles de Huayna Potosi et Tubo



Un aspect qu'il est intéressant de mentionner, est le rôle de la position géographique du versant sur son comportement pendant l'année, puisque deux bassins qui ont des taux d'englacements similaires, comme Tubo (74%) et Huayna Potosi (83%), qui partagent la même montagne, mais sont placés sur différents côtés de celle-ci, en plus avec un corrélation qui peut s'est considéré haute ($R^2=0.71$), présentent leurs débits d'écouement les plus forts pour des mois consécutifs et non dans les mêmes mois, comment on pourrait le supposer à l'avance.

6. PARAMETRES CLIMATIQUES ET LEUR INFLUENCE SUR LE BILAN DE MASSE ET LA LAME ECOULEE

6.1 RELATION DU BILAN DE MASSE AVEC LA TEMPERATURE ET LA PRECIPITATION

6.1.1 Glacier du Zongo (Tubo, Cgl= 74%)

Depuis 1991, les processus qui interviennent dans les mécanismes qui gèrent le comportement des bassins de Zongo et Chacaltaya, ont été suivis attentivement par l'IRD (ORSTOM, quand le programme d'étude des glaciers tropicaux fut mis en marche), ainsi que leur développement et le bilan de masse annuel de la partie glacée des bassins.

A partir de la période hydrologique 2003-2004, l'IRD fit une révision des valeurs du bilan de masse de Zongo, en travaillant avec des courbes hypsométriques différentes, recalculées à partir de la nouvelle restitution du glacier fait par l'Institut Géographique Bolivien (IGM). Le résultat de ce travail a été très intéressant, parce a été calculé un bilan de masse net spécifique de -4435 mm jusqu'à l'année hydrologique 2002-03, au lieu des -2755 mm estimés avec l'ancienne restitution, qui considérait une hypsométrie constante dans le temps. (Rapport Annuel IRD, 2003-04), (Soruco, 2005)

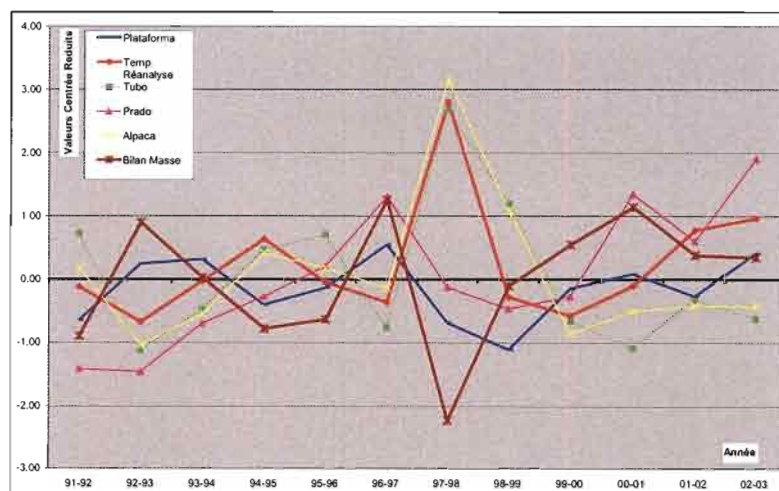
Pour l'analyse de l'influence des paramètres climatiques, comme la température et la précipitation, sur le bilan de masse glaciaire du bassin de Zongo, on a comparé leurs valeurs centrées réduites en rapport (Période 1991-2003) (Figure 6.1-1).

Lorsque l'on veut comparer facilement sur un même graphique deux grandeurs aux dimensions différentes, comme la lame ruisselée d'un bassin et la température de l'atmosphère, il est convenable d'utiliser les valeurs standardisées (ou « centrées – réduites ») de ces variables (Pouyaud, soumis).

On calcule la valeur Centrée – Réduite de chaque échantillon selon l'expression suivant :

$$Val. CR = \frac{Val. Observée - Val. Moyenne}{Ecart Type}$$

FIGURE 6.1-1: Paramètres Climatiques et Bilan de Masse, Comparaison en Valeurs Centrée Réduites



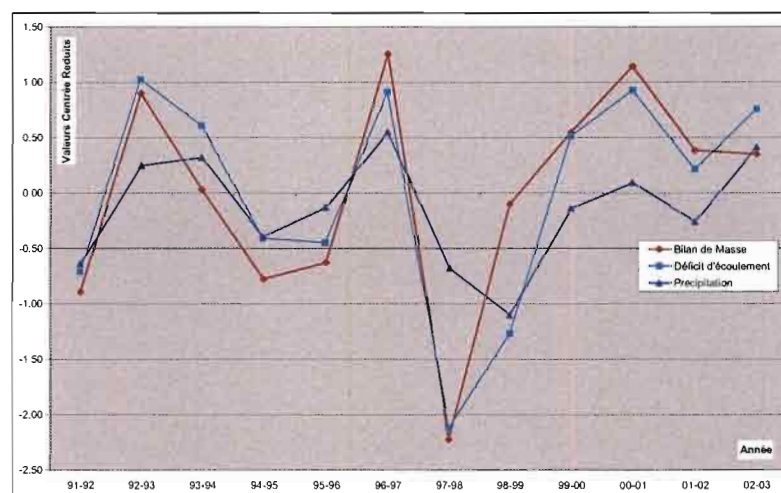
Si l'on analyse les valeurs qui appartiennent aux années avec les plus fortes pertes de masse du glacier (1991-92, 1994-95 et 1995-96, en excluant l'épisode 1997-98 Niño) on observe qu'elles ont des valeurs centrées réduites similaires à celle du niveau de précipitation (on remarque un déficit de pluie, dans les trois cas), mais au niveau de températures elles présentent des situations différentes ; l'année 1994-95 a une température supérieure à la moyenne, c'est l'opposé de 1991-92, tandis que 1995-96 a une situation moyenne de celle des deux années dont on vient de parler.

S'on analyse les années de bilan de masse positif, on peut observer que l'année 1996-97 présente une précipitation plus forte et que la température est plus bas que la moyenne, tandis que l'année 2001-02 qui eut des pluies de valeur moyenne, et bien qu'elle présente la deuxième température la plus haute après celle du Niño 1997-98, montre une valeur de Bilan de masse positive elle aussi.

Dans les commentaires des derniers paragraphes, on observe qu'il existe une bonne relation entre la précipitation et le bilan de masse même. Au niveau de graphique de la Figure 6.1-1 on peut apercevoir d'un côté la similitude entre les courbes de précipitation et le bilan de masse et de l'autre la ressemblance des courbes de température et lame écoulée.

Si on ne prend que les valeurs de bilan de masse de Tubo et qu'on les mette en rapport avec la précipitation et le déficit de précipitation, on s'aperçoit qu'il y a une ressemblance encore meilleure avec ce dernier paramètre (De) (Figure 6.1-2).

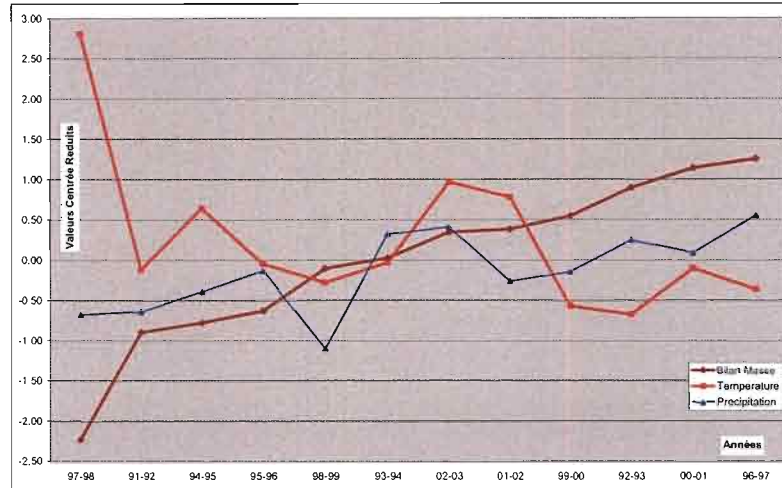
FIGURE 6.1-2: Bilan de Masse, Précipitation et Déficit de Précipitation, Zongo (Tubo)



Selon les aspects qu'on vient d'analyser, on peut apercevoir aussi, que le bilan de masse est beaucoup plus sensible aux changements de petite ou moyenne magnitude de la précipitation qu'aux changements de magnitude similaires de température ; par contre si on se retrouve avec des épisodes d'augmentation forte de température comme ceux du Niño, la sensibilité du bilan de masse devient la même que celle de la température.

Pour argumenter l'aspect qu'on vient de commenter, on présente le graphique suivant qui expose une analyse de sensibilité du bilan de masse en relation avec la précipitation ou la température. Les données dans le graphique sont rangées en ordre croissant par rapport au bilan de masse.

FIGURE 6.1-3: Sensibilité du Bilan de Masse, avec Précipitation et Température

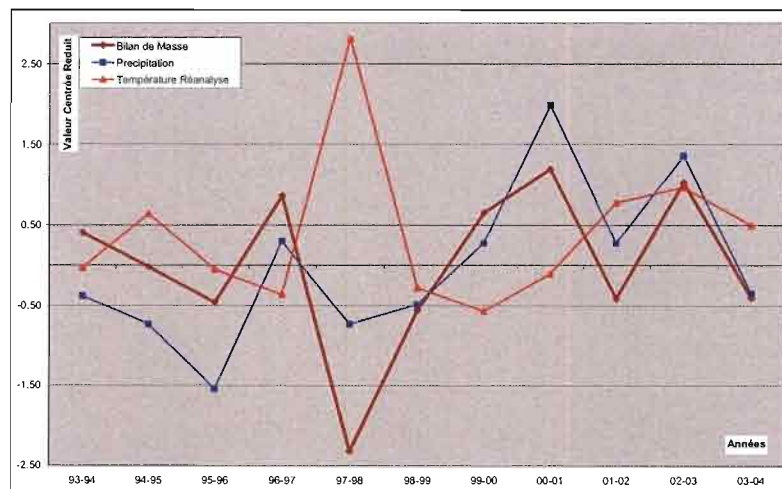


On peut observer dans le graphique que l'année 1997-98 (Niño classé comme très fort au niveau de la température, Tableau 7.1-2), est caractérisée par une augmentation exceptionnelle de la température, donc le bilan de masse fut conditionné par ce paramètre, mais pour les autres événements d'accroissement de la température on n'avait pas une telle influence sur le bilan de masse, sauf l'année 1998-99, quand la précipitation a été si faible que le comportement du bilan a été influencé par la température à nouveau. En général, on peut apercevoir une influence forte de la précipitation sur le comportement du bilan de masse, malgré que certaines années il y avait des augmentations fortes de la température comme 2002-03 (Evénement Niño classé comme forte au niveau de température Tableau 7.1-2) et 01-02.

6.1.2 Glacier de Chacaltaya (Chacaltaya, Cgl= 9%)

En faisant la même analyse faite pour Zongo à Chacaltaya, qui est un glacier qui présente un bilan de masse négatif presque toutes les années et dont on s'attend à sa complète disparition (Mendoza, 2005), on observe que si sa masse glaciaire n'est pas importante, comme celle de Zongo, sa courbe de bilan de masse ressemble plus à la courbe de précipitation. (Figure 6.1-4).

FIGURE 6.1-4 : Bilan de Masse, Précipitation et Déficit de Précipitation, Chacaltaya

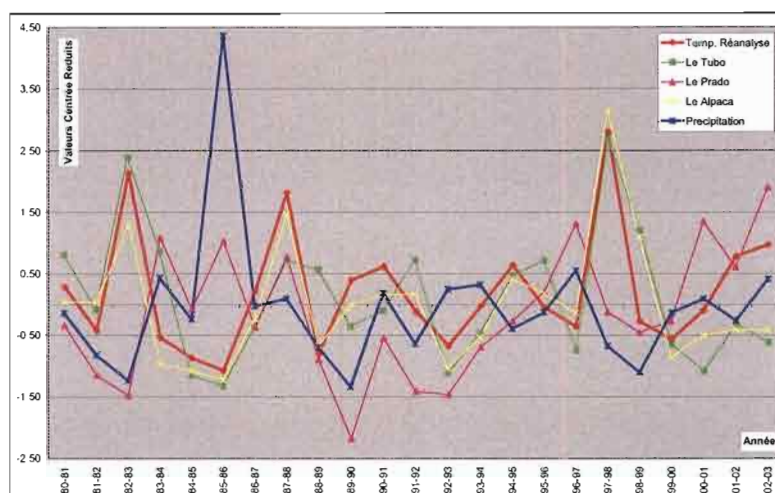


On peut remarquer que les glaciers de Zongo et Chacaltaya, malgré leurs taux d'englacement opposés (Cgl=74%, Cgl=9%), montrent tous les deux, que leur bilan de masse a une relation forte avec la précipitation et le déficit d'écoulement.

6.2 RELATION DES ECOULEMENTS AVEC LA TEMPERATURE ET LA PRECIPITATION, TUBO, ALPACA ET PRADO

Si on ne prend en compte que la comparaison entre les écoulements et les températures atmosphériques fournies par les réanalyses, qui conduit à une corrélation bonne pour les glaciers de la Cordillère Blanche en Pérou (Pouyaud, soumis), on en trouve une aussi bonne pour le glacier de Tubo (Zongo), selon ce qu'on a présenté au chapitre 4. On peut apercevoir sur la figure suivante que si le comportement de la lame écoulée des glaciers de Tubo et Alpaca reste mieux liée à la température, l'écoulement de Prado est corrélé davantage à la précipitation.

FIGURE 6.2-1: Relation Ecoulement, Température et Précipitation



6.3 TENTATIVE DE QUANTIFICATION DE L'ECOULEMENT NET DU GLACIER, A PARTIR DE LA DIFFERENCE DE DEBITS, APRES SEPARATION DE LA FONTE GLACIAIRE DE PRADO

Si on considère que l'écoulement du bassin de Prado n'a pas un apport de fonte glaciaire important, que sa topographie et ses sols peu perméables ne permettent ni le stockage ni un fort débit par suite de l'écoulement sous superficiel, comment Tamayo l'a fait dans son analyse de comportement en 1996, la différence des débits spécifiques des bassins de Tubo et Prado correspond à l'écoulement net du glacier de Zongo (Tubo). (Tamayo, 1996).

En appliquant les concepts précédents, on peut observer que pour la différence des écoulements de Alpaca et Prado, on obtient des valeurs négatives pour Alpaca (Voir Tableau 6.3-1, Al-Pr), ce qui nous emmène à réfléchir à ce que l'apport glaciaire de Prado n'est pas négligeable si l'on veut faire une analyse quantitative.

Il faut signaler que Tamayo a fait aussi la remarque que le choix de négliger les apports glaciaires du Prado n'est pas réaliste, parce qu'il existe des petites masses glaciaires encore au bassin de Prado, mais qu'elles sont négligeables pour son analyse de type qualitatif et en plus si on ne les prend pas en compte, on fait que l'analyse reste du côté de la sécurité.

Afin d'essayer une analyse de type quantitatif et par conséquent d'enlever l'apport glaciaire de Prado on fait l'analyse suivante :

- Pour Tubo et Alpaca: $Le(p, T)$ et $BM(P, t)$ ²
 - Le bilan de masse et la lame écoulée sont deux paramètres dont les variables climatiques qui influencent le plus leur comportement sont différentes. (Voir Figure 6.1-1)
- Pour Prado $Le(P, t)$ et $BM(P, t)$ (Figure 6.1-1 et si on accepte une situation similaire à Chacaltaya voir Figure 6.1-4)
 - Pour Prado le bilan de masse et la lame écoulée sont régulés principalement par la Précipitation (Figure 6.2-1), et on peut supposer que Le et BM sont liés.
- Si on cherche la valeur de Le_{PRADO} pour $P=0$, on aura un $Le_{PRADO}(t)$.
- Et si on fait la soustraction de $Le_{PRADO}(P, t) - Le_{PRADO}(t)$,
 - On aura une valeur de $Le_{PRADO}(P)$ qui représentera, la lame écoulée qui a comme paramètre climatique déterminant le plus important la Précipitation, donc :
 $Le_{PRADO}(P)$ associé au $BM_{PRADO}(P, t)$.
- Si on fait : $Le_{TUBO} - (Le_{PRADO}(P, t) - Le_{PRADO}(t))$, on aura une valeur proche de la fonte nette de la partie englacée de Tubo, parce que on aura enlevé de son écoulement la partie qui se comporte comme un bassin sans couverture glaciaire et l'influence de la partie glaciaire de Prado

Pour déterminer la lame écoulée de Prado pour une précipitation égale à zéro, on a mis en rapport ses valeurs de P et de Le ; après on a mis trois courbes de tendance (Une linéaire et deux polynomiales d'ordre 2 et 3) (Figure 6.3-1); pour trouver la valeur de Le pour $P=0$ plus probable, on a commencé à éliminer les paires de données (P, Le) qui correspondent aux précipitations les plus fortes, jusqu'à ce que les ordonnées à l'origine des trois équations aient convergées (Critère de convergence) (Figure 6.3-2). Pour l'analyse, on a pris la moyenne des trois ordonnées en origine, qui représente la valeur de la lame écoulée moyenne mensuelle qui ruisselle à Prado, quand la précipitation est nulle. On peut faire la comparaison de cette valeur avec celle du débit de base (Figure 6.3-3).

² Note pour l'analyse : Le =Lame Ecoulee; BM = Bilan de Masse ; P ou p =Précipitation ; T ou t =Température. On a mis en majuscules le paramètre climatique le plus important pour la variable analysée.

TABLEAU 6.3-1: Tentative d'Estimation de l'écoulement de la surface englacée

Tentative de Séparation Ecoulement de Surface Non Glacier

Moyennes Mensuelles 80-03

Unité: [mm]

Mois	Tubo (74%) Tu	Alpaca (37%) Al	Prado (9%) Pr	Tu-Pr	Al-Pr
Sept	73	47	57	16	-10
Oct	148	74	69	78	5
Nov	188	110	79	109	31
Déc	217	130	97	120	33
Janv	180	135	150	30	-14
Févr	152	123	134	18	-11
Mars	144	134	139	5	-5
Avr	99	70	81	17	-11
Mai	72	52	47	24	5
Juin	42	32	31	11	1
Juil	35	31	32	3	0
Août	48	37	44	4	-7
Somme	1396	976	960	436	16
Somme-Prto0			564.01		

Fonte Glacier	835.00	412.17
----------------------	---------------	---------------

Tentative de Séparation Ecoulement de Surface Non Glacier

Moyennes Mensuelles 91-03

Unité: [mm]

Mois	Tubo (74%) Tu	Alpaca (37%) Al	Prado (9%) Pr	Tu-Pr	Al-Pr
Sept	77	49	72	5	-22
Oct	162	77	67	95	10
Nov	186	100	75	111	26
Déc	230	131	98	132	33
Janv	176	143	148	28	-5
Févr	143	126	139	4	-14
Mars	124	132	148	-24	-16
Avr	83	71	84	-1	-13
Mai	69	57	50	19	7
Juin	42	36	29	13	7
Juil	33	33	34	-1	-2
Août	51	38	53	-1	-15
Somme	1377	994	997	380	-3
Somme-Prto0			600.98		

Fonte Glacier	775.81	393.14
----------------------	---------------	---------------

Le moyenne Mensuelle Prado, pour P=0	Pr0=33.0 mm
Le moyenne Annuelle Prado, pour P=0	Prto0=396.0 mm

FIGURE 6.3-1 : Rapport entre Précipitation et Lamé Eoulée, Courbes des Tendances Originales

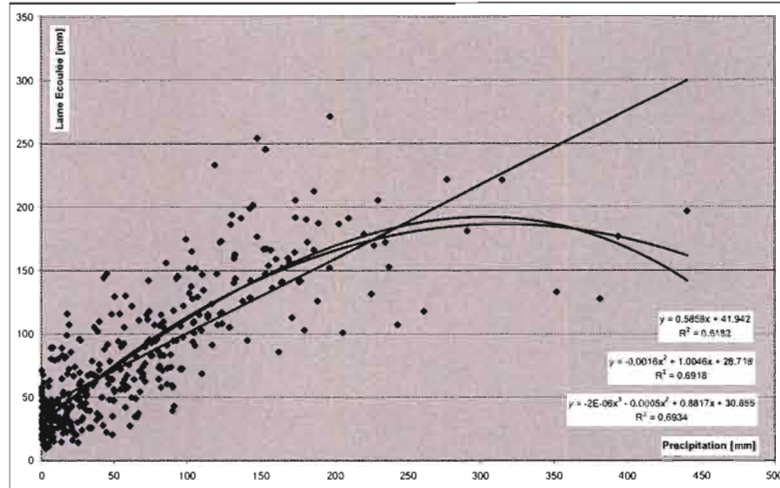


FIGURE 6.3-2: Précipitation et Lamé Eoulée Courbes des Tendances (Valeurs des Précipitation Plus Hautes Eliminées)

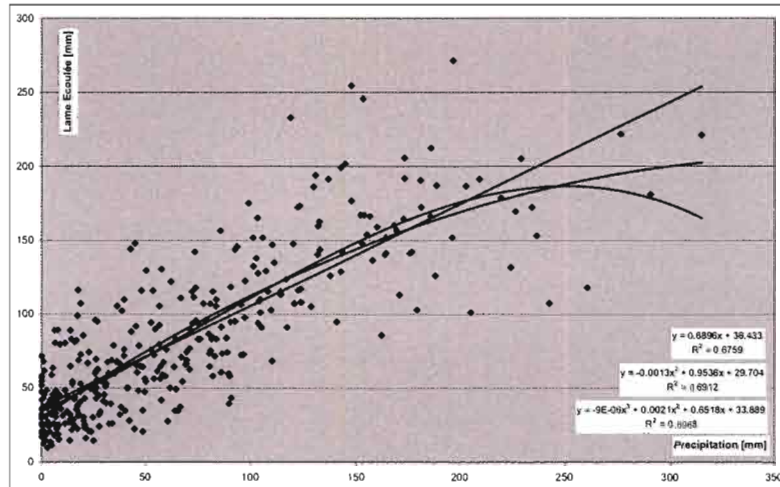
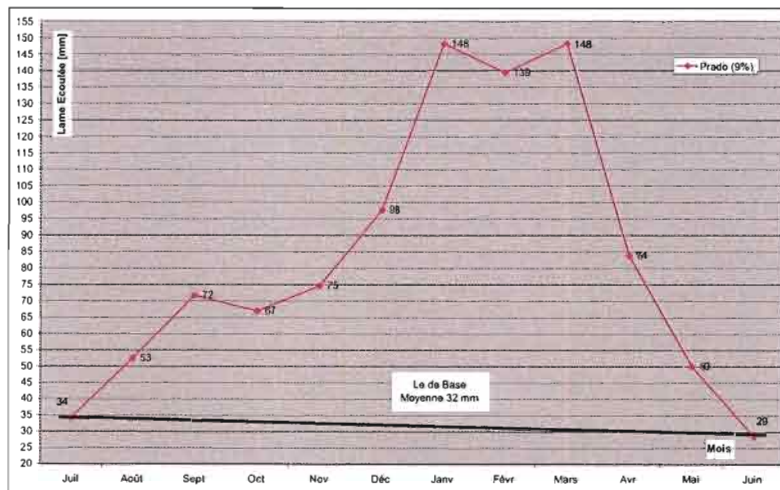


FIGURE 6.3-3: Lamé Eoulée Base Bassin Prado



La ressemblance entre la lame écoulée de base avec l'écoulement pour une précipitation nulle, peut s'expliquer par le fait que tous les apports qui composent le débit de Prado proviennent de la pluie et de la fonte glaciaire, puisque sa topographie (Hypsométrie) et ses sols peu profonds imperméables ne permettent pas le stockage d'un ruissellement sous superficiel important (Tamayo, 1996). Quand la précipitation est nulle, la lame qui s'écoulera, viendra de la fonte glaciaire seulement.

Un aspect intéressant à comparer, sont les résultats calculés pour la tentative d'estimation d'écoulement de la surface englacée faite pour le glacier du Zongo (Période 91-03) (Tableau 6.3-1) et la moyenne des valeurs du bilan de masse net spécifique en valeur négative (Même période) (Tableau 6.3-2). On observe qu'ils sont assez similaires (Tentative d'estimation : 776 mm, Moyenne Bilan Négatif : 760 mm). Néanmoins, en plus des valeurs obtenues, il faudra faire encore plus d'analyse pour assurer la fiabilité de ces résultats.

TABLEAU 6.3-2: Moyenne du Bilan de Masse Net Spécifique en valeur Négative (Glacier du Zongo)

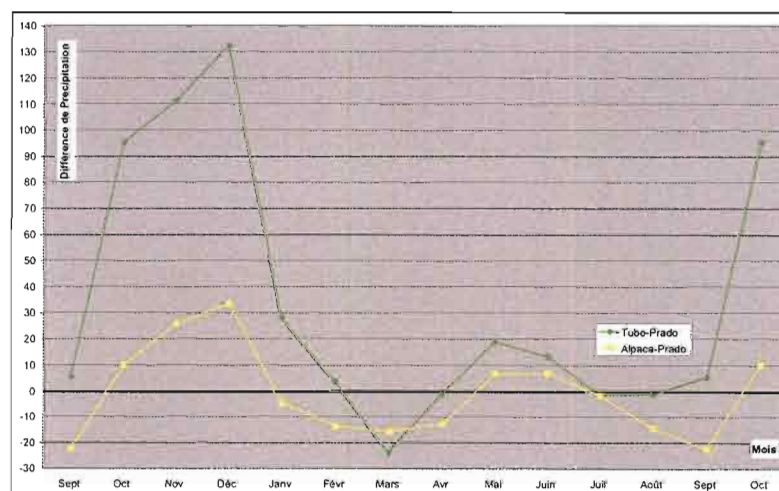
Année	Bilan [mm]
91-92	-1092
93-94	-344
94-95	-998
95-96	-878
97-98	-2173
98-99	-450
01-02	-58
02-03	-85
Moyenne	-759.75

(Rapport Annuelle IRD, 03-04)

6.4 LE COMPORTEMENT ANNUEL DE LA FONTE GLACIAIRE

Si on considère la dernière analyse du point de vue qualitatif, on peut observer que les différences trouvées montrent le comportement de la fonte glaciaire pendant l'année (Tamayo, 1996).

FIGURE 6.4-1: Différence d'écoulements et de Comportement de la Fonte Glaciaire pendant l'année



Si on analyse la figure ci-dessous on peut retrouver les concepts présentés par Tamayo en 1996 : Pendant les mois de janvier, février et mars le glacier n'apporte pas de fonte, parce la précipitation qui tombe de forme solide fait une « protection » pour le glacier, en augmentant l'albédo. La lame écoulee vient alors majoritairement de la précipitation.

Pendant les mois de mai et juin la fonte du glacier va en augmentation, les précipitations diminuent, du point de vue d'écoulement, la lame écoulee provient pour la plus grande part de la fonte glaciaire.

Pendant les mois de août et septembre, on se retrouve dans une période moyenne, dans laquelle on a une diminution de l'albédo, et les débits montent.

Finalement quand on arrive aux mois de octobre, novembre et décembre, le glacier est ouvert de glace sale, aspect qui contribue à l'accumulation de chaleur et donc à l'augmentation de la fonte. (Tamayo, 1996).

7. PRESENCE ET INFLUENCE DES EVENEMENTS NIÑO ET NIÑA DANS LE COMPORTEMENT DES BASSINS ENGLACEES

7.1 INTENSITE RELATIVE DES EVENEMENTS NIÑO ET NIÑA SELON LES DONNEES DES STATIONS EMPLOYEES POUR L'ANALYSE

Avec l'objectif de déterminer l'intensité d'un événement Niño ou Niña, on a trié les données de toutes les stations employées dans notre étude en ordre de magnitude (même les données de réanalyse), en classant ensuite, chaque donnée en cinq classes selon ses valeurs caractéristiques, cela veut dire à partir des valeurs moyenne, maximale et minimale (On a obtenu des classes asymétriques dans tous les cas) pour finalement donner un rang d'intensité à l'événement qu'on classe. (Voir Annexe 2).

Pour les registres de pluie on a trié les données en ordre croissant, au contraire des données de température et débit (Lame écoulée). A chaque classe on a assigné une intensité, selon les critères présentés dans le tableau suivant :

TABLEAU 7.1-1: Classification des événements Niño et Niña

Numéro de Classe	Intensité Attribuée
1	F+ (Plus Forte)
2	F (Forte)
3	M (Moyennes)
4	D (Faible)
5	D+ (Plus faible)

Par exemple un événement Niño qui est classé comme Plus Forte (F+), correspond à une année qui a eu des hautes températures, ou des hautes écoulements ou de pluies très faibles (selon la station qu'on a prise pour classer l'événement). Cette classification a été établie selon les caractéristiques d'un épisode Niño classique, qui d'après la bibliographie est un événement chaud (accroissement de la température) avec forts impacts sur la précipitation (déficit de pluie) et avec un fort volume d'écoulement. (Aceituno, 1995), (Wagnon et al., 2001).

Dans le tableau 7.1-2 on peut trouver les résultats de la classification qui est décrite ci-dessus, en ajoutant aussi un résumé des années des événements les plus fortes et les plus faibles de chaque station (événements extrêmes).

Il faut signaler que pour les stations San Calixto, El Alto et pour les données de Températures de réanalyse, on a travaillé avec des données de différents périodes de temps parce que entre elles, existent des différences entre les moyennes qui font changer parfois le classement d'intensité. (Exemple : San Calixto 100 : données depuis 1891, San Calixto 48 : données depuis 1948 et San Calixto 71 : données depuis 1971). C'est fréquent de trouver des différences entre les valeurs représentatives quand il existe une « rupture », dans la série des données comme c'est le cas pour la station El Alto et les Températures de réanalyse.

Pour les Niño il est possible de distinguer deux événements dont l'intensité est classifiée comme très fortes, on se réfère aux épisodes de 1982-83 et 1997-98. Pour le premier, on peut observer que presque toutes les stations suivies le classifient comme très fort, sauf les stations de Alpaca (F) et Prado (D+) ; le classement de Prado confirme une année avec une forte sécheresse, dont il y avait un écoulement très faible pour les bassins qui n'ont pas de capacité de stockage (ni de couverture glaciaire dans le cas de notre analyse).

Il faut observer aussi que le Niño 1982-83, est toujours présent entre les quatre événements les plus forts de chaque station (Événement extrême).

Cette classification d'intensité coïncide avec les évaluations antérieures de cet événement qui le classifient comme très fort (Francou et Pizarro, 1985), (Quinn, ...).

TABLEAU 7.1-2: Les événements Niño et Niña dans les registres des stations employées pour l'analyse

ANALYSE NIÑO																										
INTENSITÉ DES ÉVÉNEMENTS NIÑO PAR RAPPORT A LA																										
PRECIPITATION, TEMPÉRATURE ET LAME ECOULEE																										
Niño	Période du Événement	Années Hydrol.	Précipitation [mm]								Temp [°C]		Débit (Lame Écoulée) [mm]													
			S Calixto 100	S Calixto 48	S Calixto 71	El Alto 48	El Alto 71	Milluni	Botljiaca	Plataforma	Réanalyse 48	Réanalyse 71	Tubo	Prado	Alpaca	Alpaca Rec										
Période 1896 - 1948																										
a	09/1896 - 01/97	1896-97																								
b	11/1899 - 07/00	1899-1900	M																							
c	06/1902 - 01/03	1901-02 / 1902-03	F	D																						
d	04/1905 - 11/05	1904-05 / 1905-06	M	M																						
e	11/18 - 05/19	18-19	D+																							
f	10/25 - 06/26	25-26	M																							
g	08/30 - 05/31	29-30 / 30-31	D+	D																						
h	02/40 - 04/40	39-40	F+																							
i	01/41 - 10/41	40-41 / 41-42	M	M																						
Période 1948 - 1971																										
A	12/57 - 03/58	57-58	M	M			F+					F														
B	08/65 - 01/66	64-65 / 65-66	D	F	D+	F+		D	F			D+														
Période 1971 - 2004																										
0	06/72 - 02/73	71-72 / 72-73	F	D	F	D	F+	D	F	M	F+	M	M	D+	F	F	D+	F	D+	M						
1	05/82 - 05/83	81-82 / 82-83	F	F	F+	F+	F+	F+	F	F+	F	F+	M	F+	M	F+	D	F+	M	F+	D	D+	D	F	M	F
2	01/87 - 11/87	86-87 / 87-88	D	D	D	D	D	M	D	M	D	F	D	M	M	F+	M	F+	D	F	M	F	D	F	M	F
3	11/91 - 06/92	91-92	F		F+	F+	F	F+	F+	F+	F+	F	M	M	F		D+		M							
4	04/93 - 05/93	92-93	M		M		M		F	F		M	M	D		D+		D+								
5	05/97-04/98	96-97 / 97-98	D+	M	D+	F+	D+	F	D	F	D	F+	M	F	M	F	D	F+	D	F+	F+	M	D	F+	M	F+
6	07/2002 - 01/03	2002-03					M		M			M	M	F	F	F	D	D	F+	F+	M	M	D	D+		
ANALYSE NIÑA																										
INTENSITÉ DES ÉVÉNEMENTS NIÑA PAR RAPPORT A LA																										
PRECIPITATION, TEMPÉRATURE ET LAME ECOULEE																										
Niña	Période du Événement	Années Hydrol.	Précipitation [mm]								Temp [°C]		Débit (Lame Écoulée) [mm]													
			S Calixto 100	S Calixto 48	S Calixto 71	El Alto 48	El Alto 71	Milluni	Botljiaca	Plataforma	Réanalyse 48	Réanalyse 71	Tubo	Prado	Alpaca	Alpaca Rec										
Période 1896 - 1948																										
a	05/93 - 07/93	1892-93	D																							
b	02/04 - 03/04	1903-04	M																							
c	05/10 - 10/10	1909-10 / 1910-11	M	D																						
d	07/15 - 08/15	14-15	M																							
e	03/17 - 01/18	15-17 / 17-18	M	M																						
Période 1948 - 1971																										
A	04/50-12/50	49-50 / 50-51	F	F	F+	F+		M	D							M	D									
B	08/55-10/55	54-55 / 55-56	D	F	D	F+		D	F+							D	D+									
C	01/71-02/71	70-71	F		F+			M								D										
Période 1971 - 2004																										
1	09/73-03/74	73-74	D		D+	D	D+	D+	M	D	D+	D	D	D	D+	D+	D+	M	F							
2	4/75-01/78	74-75 / 75-76	M	M	D	M	D	D	D	F+	D	D	O+	D	M	D	D	D	D+	D+	D+	D+	M	F		
3	09/88 - 11/88	88-88	F		M		F+		F	F+	F+	F													D	
4	12/00-01/01	2000-01					D+	D+				F	M	M	M	M	D+	F+	M	D					D	
<p>Rélation de l'intensité de l'événement à l'année Hydrologique de Référence</p> <p>F: Forte M: Moyenne D: Faible +: Plus d'intensité</p> <p>Note: L'intensité est donnée selon les critères classiques d'une année Niño Cela veut dire qu'il n'est pas tenu compte de la température, de la précipitation, de la température haute et une forte écoulement</p>																										
<p>Référence des Stations</p> <p>San Calixto 100: Données de la Station San Calixto depuis 1891 San Calixto 48: Données de la Station San Calixto depuis 1948 San Calixto 71: Données de la Station San Calixto depuis 1971</p>																										
<p>Lecture Exemple:</p> <table border="1"> <tr> <th>Période du Événement</th> <th>Années Hydrol.</th> <th>S Calixto 100</th> </tr> <tr> <td>08/55-10/55</td> <td>54-55 / 55-56</td> <td>D F</td> </tr> </table> <p>Événement Niño de Août 55 à Oct. 55, avec un début faible à l'année Hydrologique 54-55 et une année 55-56 forte au niveau de précipitation par rapport à ses registres hydrologique de San Calixto depuis 1891</p>																Période du Événement	Années Hydrol.	S Calixto 100	08/55-10/55	54-55 / 55-56	D F					
Période du Événement	Années Hydrol.	S Calixto 100																								
08/55-10/55	54-55 / 55-56	D F																								
RESUME DES ÉVÉNEMENTS EXTREMES DE																										
PRECIPITATION, TEMPÉRATURE ET ECOULEMENT																										
Événement	Précipitation [mm]								Temp [°C]		Débit (Lame Écoulée) [mm]															
	S Calixto 100	S Calixto 48	S Calixto 71	El Alto 48	El Alto 71	Milluni	Botljiaca	Plataforma	Réanalyse 48	Réanalyse 71	Tubo	Prado	Alpaca	Alpaca Rec												
Les Plus Fortes	39-40	49-50	82-83	55-56	82-83	82-83	82-83	82-83	82-83	82-83	82-83	82-83	82-83	2002-03												
	35-36	65-66	86-89	82-83	91-92	88-89	91-92	82-83	82-83	82-83	82-83	82-83	82-83	77-78												
	19/00-01	52-53	88-89	56-57	88-89	74-75	88-89	88-89	87-88	87-88	88-89	88-89	2000-01	87-88												
	49-50	88-89	87-88	85-87	71-72	91-92	75-77	75-77	2002-03	2002-03	13-14	96-97	2000-01	98-99												
	18-20	83-84	83-84	55-56	88-89	88-89	88-89	88-89	88-89	88-89	88-89	88-89	88-89	88-89	88-89											
Les Moins Fortes	83-84	06-07	06-07	73-74	73-74	73-74	73-74	73-74	67-68	73-74	65-66	62-83	82-83	84-85												
	86-87	85-86	85-86	2000-01	2000-01	77-78	72-73	74-75	55-56	73-74	82-83	92-93	82-83	92-93												
	29-30	64-65	88-89	77-78	77-78	87-88	75-76	96-97	48-49	74-75	192-93	91-92	83-84	83-84												

Pour le Niño de 1997-98 qui a donné lieu à des comportements atypiques dans les glaciers tropicaux, spécifiquement au glacier du Zongo (Wagnon, 2001), on observe que son intensité est considérée entre forte et plus forte du point de vue du déficit de précipitation, très forte au niveau de la température et des lames ruisselées, mais pour Prado on a enregistré un écoulement moyen. Cet aspect suggère, un épisode Niño très fort au niveau de la température et des lames écoulées, mais avec une sécheresse qui n'était pas aussi forte que celle de 1982-83.

Pour les Niña on peut remarquer l'épisode de 1973-74, qui peut être considéré le plus fort selon la classification faite dans cette analyse, avec abondance de pluie, températures basses et une lame écoulee faible. Mais après cette date on n'a pas d'autres Niña qui ont influencé fortement le comportement des glaciers de notre étude.

L'aspect qui attire l'attention, c'est l'événement 1985-86, qui est enregistré comme une des plus faibles (selon notre classification des épisodes extrêmes), cela veut dire avec des caractéristiques Niña, mais il n'est pas considéré comme tel.

7.2 COMPARAISON DES EVENEMENTES NIÑO ET NIÑA

D'après la transformation des données de pluie, température et lame écoulee de chaque station à valeurs centrée réduits, on a dessiné les graphiques adjoints ci-dessous par rapport aux années Niño et Niña afin de visualiser ses différences et les aspects intéressants.

FIGURE 7.2-1: Comparaison des Evénements Niño en Valeurs Centrée - Réduites des Stations Analysées

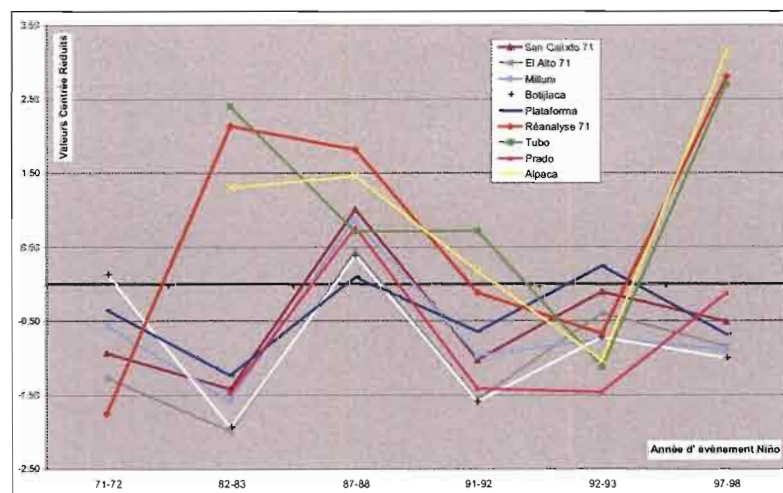
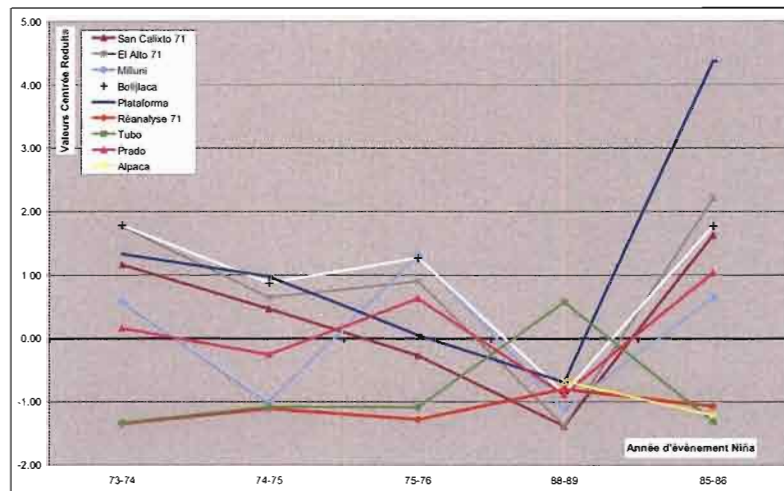


FIGURE 7.2-2: Comparaison des Evénements Niña en Valeurs Centrée - Réduites des Stations Analysées



Pour les épisodes Niño, on peut s'apercevoir que les événements qui présentent les plus hauts déficits de précipitations ne sont pas toujours ceux qui ont les plus forts écoulements (Observer les Niño 1987-88 et 1997-98). Cette perspective nous permet d'attribuer une influence plus forte aux températures qu'au déficit de précipitation sur les bassins glaciaires pendant les Niño.

Dans l'analyse des événements Niña (figure 7.2-2), pour les épisodes 1973-74 et 1975-76, on observe aussi une forte influence des basses températures, plus importante que celle de la précipitation. Au même temps la figure nous montre que l'année 1985-86, incluse dans l'analyse sans être cataloguée comme un événement Niña, exhibe les mêmes caractéristiques qu'un Niña fort.

Pour les épisodes Niño on peut dire que si bien la haute température et le manque de précipitation sont des caractéristiques de ce type d'événement, le premier paramètre est celui qui a l'influence la plus forte par rapport au second, en ce qui concerne les écoulements et donc pour la fonte glaciaire.

On peut observer une situation similaire pour les Niña, où la température influence plus fortement les valeurs de lame écoulée que la précipitation. Dans le cas de l'épisode 1985-86, il faut signaler qu'il est possible qu'il n'ait pas été pris comme un Niña, car la température est plus chaude que la moyenne des températures des événements similaires.

Tandis que les événements Niño deviennent de plus en plus forts ces dernières années par rapport à leur influence sur le comportement glaciaire, en ce qui concerne les Niña on peut percevoir qu'on n'a plus enregistré d'événements forts depuis 1976 et d'ailleurs un épisode avec les caractéristiques d'un Niña forte (1985-86), n'est pas considéré comme tel.

D'un autre côté, la station Prado, soit pour les événements Niño soit pour les épisodes Niña, montre un comportement opposé à ceux de Tubo ou de Alpaca, en montrant les différences de comportement entre les bassins versants peu englacées et les autres avec une couverture glaciaire plus importante, qui s'approfondissent avec les Niño ou Niña (Voir figures 7.2-1 et 7.2-2).

Cette différence de comportement de Prado est aussi visible quand on compare les deux courbes de débits cumulées et aussi les débits caractéristiques (Q Moyenne, maximale et minimale) des stations Tubo et Prado. (Tamayo, 1996).

7.3 EFFETS DU NIÑO POUR LES BASSINS AVEC FORTE ET FAIBLE COUVERTURE GLACIAIRE

Pour la réalisation des graphiques ci-dessous, on a pris trois événements Niño, les deux plus forts enregistrés 1982-83 et 1997-98 et un épisode faible comme celui de 1992-93, représentés par les valeurs de lame écoulee, coefficients d'écoulement et déficit d'écoulement des bassins versants de Zongo (Tubo 74%, Alpaca 37% et Prado 9%) et on les a mis en relation avec les mêmes valeurs des indicateurs moyens de la période 1981-03.

FIGURE 7.3-1: Evénements Niño et Rapport Cgl vs Le

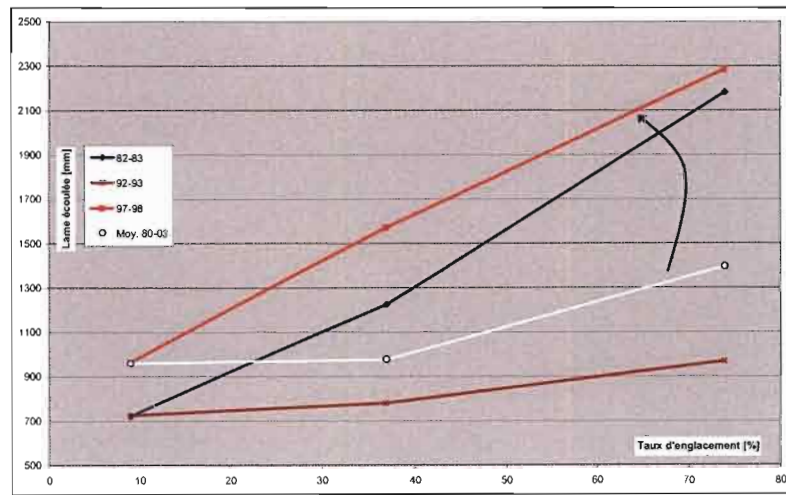


FIGURE 7.3-2: Evénements Niño et Rapport Cgl vs Keppn

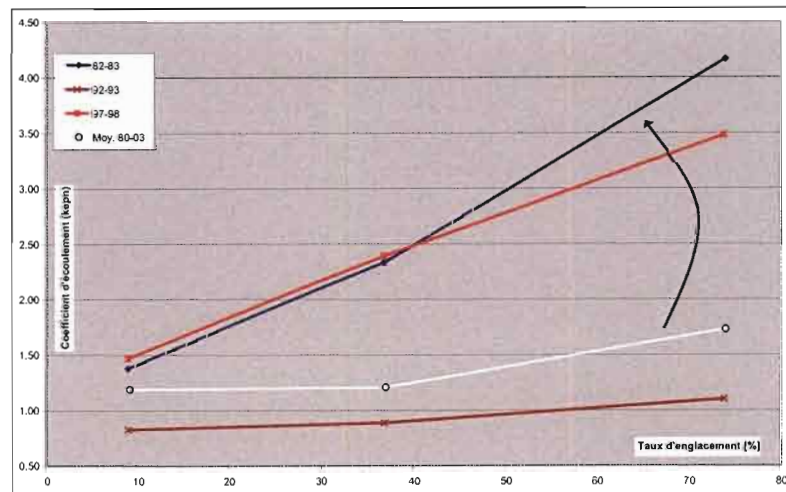
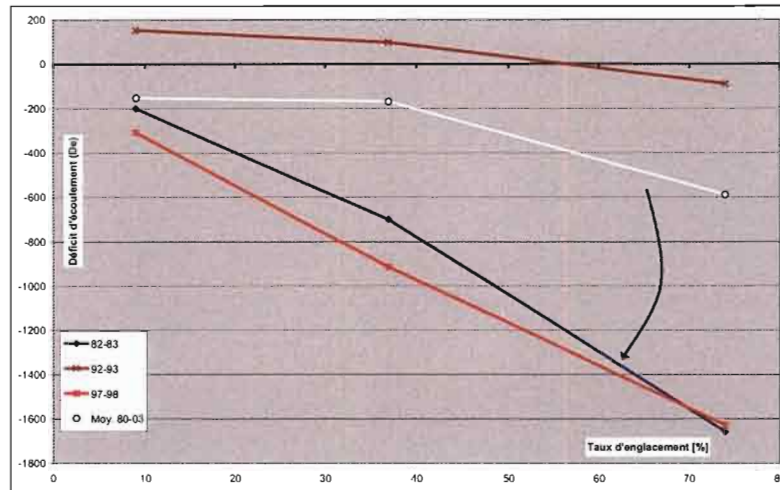


FIGURE 7.3-3: Événements Niño et Rapport Cgl vs De



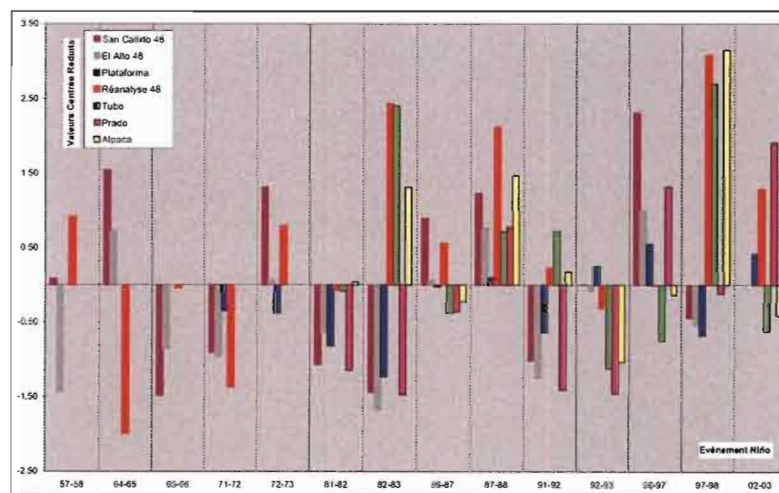
On remarque que l'influence des épisodes Niño les plus forts, pour les bassins avec des taux d'englacements hauts est plus significative que pour des bassins moins englacés.

D'un autre côté on peut observer que un Niño faible peut se retrouver en dessous des valeurs moyennes sans n'exercer aucune influence sur le comportement du glacier ou surtout sans laisser traces de qu'il est arrivé. (Courbe de l'année 1992-93)

7.4 EL NIÑO ET LA NIÑA, LEUR CHANGEMENTS AU COURS DU TEMPS

Les événements Niño et Niña ont changé leur manière de se manifester au cours du temps, puisque les caractéristiques qu'ils avaient il y a 50 ans se sont intensifiées dans quelques cas et se sont affaibli dans d'autres.

FIGURE 7.4-1: El Niño et son Changement au cours du Temps

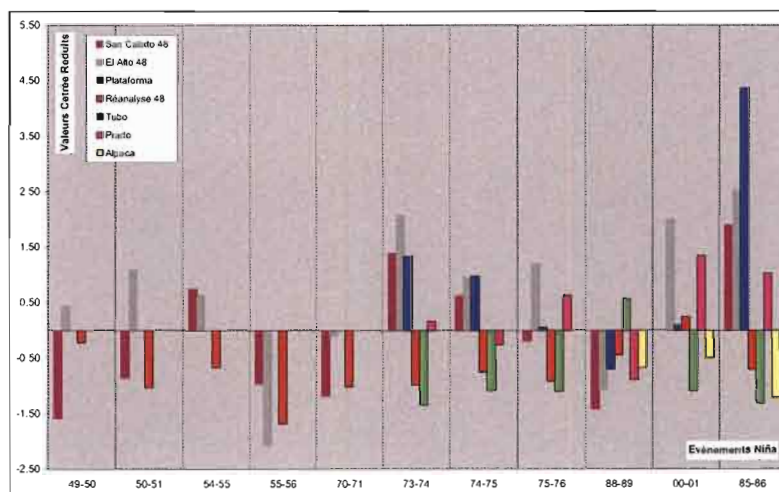


Pour les épisodes Niño il est possible de s'apercevoir que les derniers événements montrent une influence plus forte de la température que celle que les autres Niño avaient avant les années 1982-83 ; d'autre part, pour les mêmes périodes on peut observer, qu'au niveau de la précipitation les Niño contemporains présentent un majeur volume de pluie. Donc on peut

remarquer que les événements Niño actuels ont beaucoup plus d'influence sur les hautes températures et une précipitation plus forte que les Niño anciens.

Il est possible de s'apercevoir aussi que cette importance a commencé à se manifester depuis le début des années 80, période dans laquelle on a vécu deux des épisodes Niño les plus forts enregistrés dans l'histoire (1982-83 et 1997-98).

FIGURE 7.4-2: La Niña et son Changement au cours du Temps



Au niveau des Niña, la température aussi se présente plus forte dans les épisodes modernes par rapport aux anciens. Les événements modernes plus forts enregistrés s'observent au début des années 70, après cela on retrouve des Niña faibles jusqu'à l'épisode 1985-86 (qui ne se considère pas pour les indicateurs comme un événement Niña), où on a la température la plus basse enregistré depuis 1975 (Figure 4.3-11 voir l'analyse des stations), avec des fortes lames de précipitation.

On peut observer que après 1975, (avant la « rupture » des données trouvée dans les registres de température de réanalyse), on ne peut pas trouver des épisodes Niña remarquables.

D'un autre côté on peut noter aussi la sensibilité de l'environnement des Andes à la température, puisque quand il y a une augmentation forte de température (liée surtout aux événements Niño forts) l'environnement répond avec une fonte glaciaire extraordinaire, par contre quand elle descend fortement, l'environnement répond avec de fortes pluies.

8. CONCLUSIONS

8.1 IMPORTANCE DU TAUX D'ENGLACEMENT D'UN GLACIER SUR SON COMPORTEMENT

Dans le cadre de ce travail comparatif entre différents bassins glaciaires, on a utilisé, pour l'analyse de la relation entre la précipitation (P , [mm]) et la lame écoulée (L_e , [mm]), le coefficient d'écoulement ($kepn$, [mm/mm]) et le déficit d'écoulement (De [mm]), comme cela a été fait pour l'étude de prévision à moyen et long terme de la ressource en eau glaciaire de la Cordillère Blanche en Pérou (Pouyaud et al., Soumis).

Ces trois paramètres mis en relation avec le taux d'englacement (Cgl [%]) montrent que la couverture glaciaire d'un bassin influe directement sur la lame qui s'en écoule. Si la Cgl est forte, on aura une lame d'écoulement plus grande que celle d'un bassin qui a un pourcentage de couverture glaciaire inférieur. D'où la conclusion que la couverture glaciaire est le principal paramètre qui détermine la quantité d'eau écoulée d'un bassin versant glaciaire.

On a observé que les rapports entre les paramètres L_e , $Keptn$, De et le taux d'englacement présentent des courbes de tendance linéaires et que ceux-ci sont sensibles aux changements climatiques forts (soit de précipitation, soit de température) : par exemple pour l'épisode de pluie forte de 85-86 (même s'il est certainement entaché d'une erreur de mesure considérable pour la station Plataforma), les pentes de ces droites ont changé de signe, cela veut dire que la tendance si bien a resté linéaire, le sens de la pente de leurs courbes a changé; par contre pour des événements d'augmentations de la température (82-83 et 97-98), la valeur des pentes des droites ont augmenté fortement.

Il est possible remarquer que les paramètres mentionnés dans le dernier paragraphe montrent aussi que les glaciers répondent aux paramètres climatiques de manière proportionnelle à leur taux d'englacement. Dépendant de l'intensité de l'épisode climatique, la réponse du bassin en terme de lame écoulée sera proportionnelle à son pourcentage de surface couverte par les glaciers

De la même façon, on a observé la similitude qui existe entre des bassins qui ont des taux d'englacement similaires, puisqu'on trouve des coefficients de détermination (R^2) plus hauts quand on met en rapport les lames écoulées de bassins dont les différences de Cgl sont inférieures à 20%, au contraire de ceux pour lesquels cette différence est plus forte. Cette conclusion reste aussi valide pour des bassins versants appartenant à des ensembles de bassins différents, parce que quand on met en rapport leurs lames écoulées, on retrouve encore des valeurs R^2 importantes pour les mêmes gammes de taux d'englacement.

8.2 IMPORTANCE DES PARAMETRES CLIMATIQUES (PRECIPITATION ET TEMPERATURE) SUR LE COMPORTEMENT D'UN GLACIER

La forte relation qui existe entre la température de l'atmosphère et la lame écoulée a été étudiée par Pouyaud sur les bassins versants glaciaires les plus englacés de la Cordillère Blanche au Pérou. Pour ce qui est du cas des bassins versants glaciaires de la Cordillère Royale étudiés dans ce mémoire, on observe que la relation est aussi forte dans le cas des bassins de Tubo (Cgl 74%) et Alpaca (Cgl 37%), mais que ne s'applique pas au cas de Prado (Cgl 9%), dont le comportement est fortement lié à la précipitation.

Dans le cas du bilan de masse, il est possible d'observer que sa sensibilité varie plus fortement en fonction de la précipitation que de la température, puisque ce n'est que pour des accroissements très forts de la température (comme celui de 1997-98 : Episode Niño avec température très élevée), ou en présence de précipitations très faibles (comme en 1998-99), que le bilan de masse est influencé par la température, puisque dans les cas contraires le

comportement du bilan de masse reste fortement lié à la précipitation sans pouvoir faire différence selon que le taux d'englacement est fort (Tubo 74%) ou faible (Chacaltaya 9%).

Le scène climatique actuelle joue aussi un rôle important dans les comportement des glaciers, aujourd'hui on peut apercevoir que la tendance de la précipitation est vers la diminution et celle de la température est vers l'augmentation ; si on prend en compte aussi que les deux situations de forme indépendante sont défavorables pour le bilan de masse, l'action conjuguée des deux situations aboutit à une position encore plus désavantageuse pour le développement du bilan de masse glaciaire.

8.3 PRADO, UN BASSIN GLACIAIRE DIFFERENT

Comme on l'a commenté dans les derniers paragraphes, le bassin versant de Prado montre un comportement lié davantage à la précipitation qu'à la température, au contraire des glaciers de Tubo et Alpaca. Cet aspect peut être expliqué par le taux d'englacement très faible du glacier (9%) en observant que l'effet de sa couverture glaciaire est négligeable en comparaison à la partie non glaciaire qui réagit aux précipitations. Par contre, on a calculé un apport moyen annuel de la fonte glaciaire égal à 396 mm, qui représente 40% du volume d'eau écoulée par le bassin versant pendant l'année.

Un autre aspect à signaler est la comparaison qu'on a faite entre les coefficients d'écoulement, les lames écoulées et les déficits de précipitation des bassins de la Cordillère Blanche, avec ceux de Tubo, Alpaca et Prado. On peut s'apercevoir que les deux premiers correspondent à une même ligne de comportement que celle des bassins péruviens, alors que Prado est hors de comparaison. Même si on fait une comparaison avec les paramètres des bassins de la Cordillère Blanche qui ont des taux d'englacement similaires (comme Quitaracsa (8%), Pachacoto (10%) et La Balsa (12%)), ceux-ci montrent des valeurs beaucoup plus faibles des lames écoulées que celle de Prado (9%). Cela provient de la nature très différente des bassins versants (sols beaucoup plus profonds et fortement couverts de végétation en Cordillère Blanche par opposition aux bassins versants plus élevés et plus minéraux de la Cordillère Royale), mais aussi des conditions climatiques différentes, plus clémentes en Cordillère Blanche.

Les aspects présentés auparavant nous permettent de conclure en forme préliminaire que Prado est un bassin avec un comportement exceptionnel au comportement particulièrement sensible à la précipitation. En effet, même si le bilan de masse de sa partie glaciaire se comporte comme pour les autres glacier, le comportement pluvial de la partie non glaciaire du bassin y est prépondérant.

8.4 INFLUENCE DE L'ORIENTATION ET LA POSITION GEOGRAPHIQUE D'UN BASSIN SUR SON COMPORTEMENT

On a analysé l'influence de la position géographique et l'orientation d'un glacier en relation avec sa réponse hydrologique, en mettant en rapport le coefficient de détermination R^2 (obtenues de la relation deux à deux des lames écoulées des différents glaciers) et l'orientation des glaciers. Il a été observé que les bassins orientés selon l'axe SE - NO ont des coefficients de déterminations supérieurs à ceux orientés selon l'axe E-O, et que finalement on trouve les plus bas coefficients avec les glaciers orientés vers le Sud.

Un aspect qu'il est intéressant de mentionner, est le rôle de la position géographique du versant sur son comportement durant l'année, puisque deux bassins qui ont des taux d'englacements similaires, comme Tubo (74%) et Huayna Potosi (83%), et qui partagent la même montagne, mais sont placés sur deux côtés différents de celle-ci, avec de plus une corrélation qui peut s'être considéré comme élevée ($R^2=0.71$), présentent leurs débits

d'écoulement les plus forts en des mois successifs, et non lors du même mois, comme on aurait pu le supposer à l'avance.

8.5 ESSAI DE QUANTIFICATION DE LA FONTE NETTE DU GLACIER POUR SUPERPOSER LES REPONSES HYDROLOGIQUES DE DEUX VERSANTS

En reprenant en compte les analyses faites pour Tamayo en 1996 à partir des comparaisons de réponses hydrologiques de bassins versants différents avec des taux d'englacement opposés, et avec les caractéristiques particulières du bassin de Prado, on a essayé de faire une quantification de la lame écoulée nette de la fonte glaciaire.

Le processus consistait en la superposition des réponses hydrologiques des bassins de Tubo et Alpaca avec celle de Prado (pour les lames écoulées), en enlevant à ce dernier l'influence de sa masse glaciaire (qui n'est pas négligeable quand l'on veut faire une analyse quantitative).

Les résultats qu'on a obtenus, surtout pour le bassin de Tubo, restent intéressants, puisque si on compare la lame annuelle moyenne nette apportée par sa partie glaciaire avec la valeur négative moyenne de son bilan net de masse spécifique, on trouve que ces valeurs sont assez similaires (Tentative d'estimation de la lame écoulée à partir de la partie glaciaire : 776 mm, Moyenne du Bilan de masse en valeur Négative : 760 mm).

Bien que la similitude trouvée soit très forte, il faudra l'approfondir beaucoup plus, si on veut employer cette méthodologie pour la modélisation du comportement glaciaire, en examinant des aspects tels que la morphologie du bassin, les indices de similitude et d'autres aspects qui gouvernent la réponse hydrologique d'un bassin à composante glaciaire.

8.6 EVENEMENTS EL NIÑO ET LA NIÑA, LEUR INFLUENCE SUR LE COMPORTEMENT DES GLACIERS

Les événements Niño et Niña furent analysés du point de vue de leur influence sur le régime climatique et par conséquent dans la réponse hydrologique des bassins en étude, en observant que actuellement l'événement Niño est en train de changer de comportement : l'épisode le plus fort enregistré quant au bilan de masse négatif, le Niño 97-98 (largement commenté dans les articles), si il a bien présenté un fort déficit de précipitation (comme c'est la caractéristique de ces événements), ce déficit de précipitation ne fut pas aussi important que ceux d'autres épisodes similaires. Par contre, il a présenté la température moyenne annuelle la plus forte observée depuis 1948.

Pour les épisodes Niño, il est possible de constater que les dernières événements témoignent d'une influence très forte de la température, en comparaison des autres Niño avant les années 1982-83 ; d'autre part, pour les mêmes périodes, on peut observer qu'au niveau des précipitations les Niño contemporains présentent des pluies supérieures. Donc on peut remarquer que pour les événements Niño actuels ont beaucoup plus d'influence les températures plus hautes et les précipitations plus fortes que pour les Niño anciens.

Au niveau des Niña, la température aussi se présente plus forte dans les épisodes modernes par rapport aux anciens. Les événements modernes plus forts enregistrés s'observent au début des années 70 ; après cela on trouve des Niña faibles jusqu'à l'épisode 1985-86 (qui ne se considère pas pour les indicateurs comme un événement Nina), où on a la température la plus basse enregistrée depuis 1975, accompagnée par des fortes précipitations.

En résumé, on peut dire que les événements Niño et Niña ont changé leur manière de se manifester au cours du temps, puisque les caractéristiques qu'ils avaient il y a 50 ans, se s'ont intensifiées de nos jours dans quelques cas et se s'ont affaiblies en autres. Mais, une chose

est sûre : leurs manifestations sont en train de changer et par conséquence aussi leur influence sur le comportement des glaciers

En prenant en compte les tendances du réchauffement global, il est possible de prédire que les hautes températures des événements Niño auront des effets encore plus forts sur les bilans de masse négatifs. Du point de vue des Niña, on peut remarquer qu'on n'avait pas d'épisodes importants depuis 1975 ; il n'est pas possible de dire si ces événements sont en train de disparaître, mais on ne peut pas non plus leur attribuer une influence significative sur le comportement glaciaire.

D'un autre côté on peut remarquer aussi la sensibilité de l'environnement des Andes à l'augmentation de la température, puisque quand il y a eu une augmentation forte de température (liée surtout aux événements Niño forts) la réponse a été une fonte glaciaire extraordinaire. Par contre, quand les températures s'abaissent fortement, le milieu répond avec de fortes pluies

La sensibilité du bilan de masse est toujours liée à la précipitation, même dans les événements Niño qui présentent une augmentation forte de température comme l'épisode de 2002-03, (deuxième plus forte au niveau d'augmentation de température pendant le période 1991-2004). Seulement dans un épisode comme celui-ci de 1997-98, avec un record historique d'augmentation de température, ce paramètre a influencé plus fortement le bilan de masse que la précipitation.

Il faut signaler que les influences des événements Niño sont plus fortes dans les bassins versants glaciaires qui ont des taux d'englacement supérieurs, par comparaison à ceux qui ont une faible couverture glaciaire. Cet aspect est logique si on observe que c'est la lame écoulée produite par la fonte de la partie glaciaire qui est liée fortement à la température, et que les épisodes Niño sont surtout des événements de réchauffement du milieu.

8.7 COMMENTAIRE FINAL

Pour analyser l'influence de la précipitation et de la température sur le comportement des glaciers, des spécialistes comme Francou (GREAT ICE Bolivie), font une analyse saisonnière appuyées dans le concept que le comportement des glaciers est défini par les quantités de pluie tombées ou par l'augmentation de la température pendant quelques mois seulement de l'année. Au niveau journalier, l'accumulation ou la fonte glaciaire pendant le jour sont conditionnés par le comportement de ces deux paramètres climatiques pendant quelques heures du jour seulement.

Ce travail ne peut faire une analyse à ce niveau pour des raisons de temps, mais il apporte quelques nouveaux concepts, et confirment les autres, qui sont tous nécessaires pour poursuivre des travaux de ce type, afin de contribuer aux tentatives de modélisation hydrologique – glaciaire des bassins de haute montagne avec couverture glaciaire.

9. BIBLIOGRAPHIE

Thèse de Doctorat

TD01.-Wagnon, Patrick, *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, 1999. (Wagnon, 1999)

TD02.- Caballero Yvan, *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., 2001. (Caballero, 2001).

TD03.- Sicart Jean Emmanuel, *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., 2002. (Sicart, 2002).

TD4.- Ardoin-Bardin Sandra, *Variabilité Hydroclimatique et Impacts sur les Ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone Soudano – Sahélienne*, Thèse de Doctorat, Université Montpellier II., 2004. (Ardoin, 2004).

Stages Recherche DEA

SR01.- Poirier Jean-Charles, *Réaction hydrologique de bassins d'altitude de la Cordillère Royale dans le contexte de variabilité climatique actuel*, IRD, 2004. (Poirier, 2004).

Livres de Consultation

LC01.- Francou B. Et Pouyaud B., *Métodos de Observación de Glaciares en los Andes Tropicales*, Versión 1, IRD, 2004. (Francou et Pouyaud, 2004).

LC02.- Singh Pratap and Singh Vijay P., *Snow and Glacier Hydrology*, Vol 37, 1^{ière} ed., Water Science and Technology Library, Kluwer, Dordrecht, 2001. (Pratap et Vijay, 2001).

LC03.- Hastenrath Stefan, *Climate Dynamics of the Tropics*, Vol 8, 1^{ière} ed., Atmospheric Sciences Library, Kluwer, Dordrecht, 1991. (Hastenrath, 1991).

LC04.- Ven Te Chow y Maidment David, Mays Larry, *Hidrología Aplicada*, 1^{era} ed., McGraw Hill, Colombia, 1994.(Ven Te Chow, 1994).

LC05.- Villón Máximo, *Hidrología*, 2^{da} ed., MaxSoft, Perú, 2002. (Villon, 2002).

LC06.- ROSTLAC, *Guía Metodológica para la Elaboración del Balance Hídrico de América del Sur*, 1^{era} ed., UNESCO, Montevideo, 1982. (UNESCO, 1982).

LC07.- Hines Willams y Montgomery Douglas, *Probabilidad y Estadística para Ingeniería*, 2^{da} ed. en español - 6^{ta} reimpresión, Continental, México, 1993, 1998. (Hines et Montgomery, 1998).

LC08.- Moya Rufino, Saravia Gregorio, *Probabilidad e Inferencia Estadística*, 2^{da} ed., San Marcos, Peru, 1998. (Moya et Saravia, 1998).

LC09.- Montes de Oca Ismael, *Geografía y Recursos Naturales de Bolivia*, ed. EDOBOL, La Paz, 1997; (Montes de Oca, 1997).

Memoires d' Ingénieur

MI01.- Tamayo Willam, *Influencia de los Glaciares en el Comportamiento Hidrologico de Cuencas de Alta Montaña, Estudio de Casos en Perú y Bolivia*, Tesis para Optar al grado de Ingeniero Civil (Memoire d' Ingenieur), Universidad Nacional de Ancash "Santiago Antúñez de Mayolo", 1996. (Tamayo, 1996).

Consultation des Articles

AR01.- Francou, B., P. Ribstein, R. Saravia, E. Tiriau, *Monthly balance and water discharge of an intertropical glacier: Zongo Glacier, Cordillera Real, Bolivia, 16°S*, Journal of Glaciology, Vol. 41, No 137,61-67, 1995. (Francou et al., 1995).

AR02.- Wagon, P., P. Ribstein, B. Francou, J. E. Sicart, *Anomalous heat and mass budget of Zongo Glacier, Bolivia, during the 1997-98 El Nino year*, Journal of Glaciology, Vol. 47 No 156, 21-28, 2001. (Wagon et al., 2001).

AR03.- Ramirez, E., B. Francou, P. Ribstein, M. Descloîtres, R. Guérin, J. Mendoza, R. Gallaire, B. Pouyaud, E. Jordan, *Small glaciers disappearing in the Tropical Andes: a case study in Bolivia : The Chacaltaya Glacier (16°S)*, Journal of Glaciology, Vol. 47, No 157, 187 – 194, 2001. (Ramirez et al. 2001).

AR04.- Vuille M., Bradley R., Keimig F., , *Climate Variability in the Andes of Ecuador and its relation to Tropical Pacific and Atlantic Sea Surface Temperature Anomalies*, Journal of Climate – In Press, Pg 1 – 12, 1999.

AR05.- Vuille M., *Atmospheric Circulation over the Bolivian Altiplano During Dry and Wet Periods and Extreme Phases of the Southern Oscillation*, International Journal of Climatology, Vol. 19, 1579 - 1600, 1999. (Vuille, 1999).

AR06.- Quinn W. H. and Neal V. T., *The Historical record of El Niño events*, ----, 623 – 648, ---. (Quinn, ...)

AR07.- Cole Julia, *A Slow Dance for El Niño*, Science's Compass, Vol. 291, 1496 – 1499, 2001.(Cole, 2001).

AR08.- Rodbell D., Seltzer G., Anderson D., Abbott M., Enfield D., Newman J., *An 15000 – Year Record of El Niño – Driven Alluviation in Sothwestern Ecuador*, Science's Compass, Vol. 283, 516 -520, 1999. (Rodbell et al., 1999)

AR09.- Kaser G., *How do Tropical Glaciers Behave ? Some Comparisons between tropical and midlatitude glaciers*, ----, 1995. (Kaser, 1995).

AR10.- Kaser G., *Glacier – Climate interaction at low latitudes*, Journal of Glaciology, Vol. 47, No 157, 195 – 204, 2001. (Kaser, 2001).

AR11.- Aceituno P., Garreaud R., *Impacto de los Fenómenos El Niño y la Niña en Regímenes Fluviométricos Andinos*, Revista de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica, Vol...., Pag. 33 – 43, 1995. (Aceituno, 1995).

AR12.- Ohmura A., Kasser P. Funk M., *Climate at the Equilibrium Line of Glaciers*, Journal of Glaciology, Vol. 38, No 130, 1992. (Ohmura, 1992).

AR13.- Arnaud Y., Muller F., Vuielle M. Ribstein P., *El Niño – Southern Oscillation (ENSO), influence on a Sajama Volcano Glacier (Bolivia) from 1963 to 1998 as seen from Landsat data Aerial Photography*, Journal of Geophysical Research, Vol. 106, No. D16, 17.773 – 17.784, 2001. (Arnaud, 2001).

AR14.- Francou B., Pizarro L., *El Niño y la Sequía en los Altos Andes Centrales (Perú y Bolivia)*, Bull. Inst. Fr. et And., XIV, No 1-2, 1-18, 1985. (Francou et Pizarro, 1985)

AR15.- Wyrтки K., *El Niño*, La Recherche, Vol. 10, No 106, 1212 – 1220, 1979. (Wyrтки, 1979).

AR16.- Wagnon, P., P. Ribstein, B. Francou, B. Pouyaud, *Annual cycle of energy balance of Zongo Glacier, Cordillera Real, Bolivia*, Journal of Geophysical Research, Vol. 104, No D4, 3907-3923, 1999. (Wagnon, 1999).

AR17.- Ribstein, P., E. Tiriau, B. Francou, R. Saravia, *Tropical climate and glacier hydrology: A case study in Bolivia*, Journal of Hydrology, 165, 221-234, 1995. (Ribstein et al., 1995).

AR18.- Wagnon, P., P. Ribstein, T. Schuler, B. Francou, *Flow separation on Zongo glacier, Cordillera Real, Bolivia, Hydrological Processes*, 12, 1911-1926, 1998. (Wagnon et al., 1998).

AR19.- Sicart J. E., Ribstain P., Francou B., Pouyaud B. Condom T., *Glacier mass Balance of Tropical Zongo Glacier, Bolivia, comparing hydrological and glaciological methods*, Soumis. (Sicart et al., Soumis)

AR20.- Pouyaud B., Zapata M., Yerren Jorge, Gomez J., RosasG., Suarez W., Ribstein P., *Devenir des Ressources en eau Glaciaire de la Cordillère Blanche*, Soumis. (Pouyaud et al., Soumis).

AR21.- Soruco A., Mendoza J., Machaca A., Francou B., Berger T., Valdivieso H., *Fluctuations of the Front of the Zongo Glacier over the last five decades*, Seventh IAHS Scientific Assembly at Foz de Iguacu, Brazil, April 2005, Poster, 2005. (Soruco, 2005).

AR22.- Mendoza J., Ramirez E., Francou B., Noriega L., *Expecting a Complet extinction of small glaciers in the tropical Andes*, Seventh IAHS Scientific Assembly at Foz de Iguacu, Brazil, April 2005, Poster, 2005. (Mendoza, 2005).

AR23.- Gioda A., Ronchail J., L'Hôte Y. Pouyaud B., *Analyse et Variabilité temporelle d'une longue série de pluie des Andes en Relation avec l'Oscillation Australe (La Paz, 3658 m, 1891-2000)*, Second International Conference Tropical Climatology, Meteorology and Hydrology, Peoceeding edited by G. Demarée, M. De Dapper, J. Alexandre pp 199-217, 2004. (Gioda et al., 2004).

Report Annuel de Mesures Météorologiques, Hydrologiques et Glaciologiques en Bolivie

RA01.- Mesures Météorologiques, Hydrologiques et Glaciologiques sur le Glacier de Zongo – ORSTOM – Année Hydrologique 1993 – 1994. (IRD, 93-94).

RA02.- Mesures Météorologiques, Hydrologiques et Glaciologiques sur le Glacier de Zongo – ORSTOM – Année Hydrologique 1994 – 1995. (IRD, 94-95).

RA03.- Mesures Météorologiques, Hydrologiques et Glaciologiques sur le Glacier de Zongo – ORSTOM – Année Hydrologique 1995 – 1996. (IRD, 95-96).

RA04.- Mesures Météorologiques, Hydrologiques et Glaciologiques sur le Glacier de Zongo – ORSTOM – Année Hydrologique 1996 – 1997. (IRD, 96-97).

RA05.- Mesures Météorologiques, Hydrologiques et Glaciologiques sur le Glacier de Zongo – IRD– Année Hydrologique 1997 – 1998. (IRD, 97-98).

RA06.- Mesures Météorologiques, Hydrologiques et Glaciologiques sur le Glacier de Zongo – ORSTOM – Année Hydrologique 1998 – 1999. (IRD, 98-99).

RA07.- Mesures Météorologiques, Hydrologiques et Glaciologiques sur le Glacier de Zongo – ORSTOM – Année Hydrologique 1999 – 2000. (IRD, 99-00).

RA08.- Mesures Météorologiques, Hydrologiques et Glaciologiques sur le Glacier de Zongo – ORSTOM – Année Hydrologique 2000 – 2001. (IRD, 00-01).

RA09.- Mesures Météorologiques, Hydrologiques et Glaciologiques sur le Glacier de Zongo – ORSTOM – Année Hydrologique 2001 – 2002. (IRD, 01-02).

RA10.- Glaciares Zongo, Chacaltaya y Charquini Sur (16°S, Bolivia). Mediciones Meteorológicas, Hidrológicas y Glaciológicas, Año Hidrológico 2002 – 2003. (IRD, 02-03).

RA11.- Glaciares Zongo, Chacaltaya y Charquini Sur (Bolivia 16°S). Mediciones Meteorológicas, Hidrológicas y Glaciológicas, Año Hidrológico 2003 – 2004. (IRD, 03-04).

Base de données

BD01.- Base de données IRD GREAT - ICE (Montpellier)

Autres

A-YL.- Analyse M. Yann L'Hôte, Données Tuni, Zongo, 2005.

Base de Données
Précipitation [mm]

Huayna Potosi (4735 m)

	97-98	98-99	99-00	00-01	01-02	02-03	03-04
Sept		3.7	46.1	5.2	14.2	26.4	20.8
Oct		54.9	64.0	95.8	58.9	88.9	47.5
Nov		84.3	57.3	14.8	53.2	76.5	28.2
Déc		36.8	121.0	142.9	96.2	48.9	205.1
Janv	73.1	100.2	106.5	204.1	68.3	169.7	180.7
Févr	104.5	122.1	107.2	83.1	104.3	149.8	76.2
Mars	107.2	114.7	101.4	109.1	129.3	107.7	48.7
Avr	52.9	60.7	27.3	18.8	54.1	32.2	
Mai	0.0	3.9	13.8	31.4	14.2	15.5	
Juin	26.2	4.1	15.0	18.0	19.6	2.3	
Juil	0.0	5.7	1.0	5.7	21.6	21.5	
Août	4.8	6.4	35.1	30.4	37.0	23.0	

Paya Huichicha (Tuni Bajo 4478 m)

	02-03	03-04
Sept	41.0	23.3
Oct	80.3	83.2
Nov	94.5	115.3
Déc	68.4	144.6
Janv	235.3	218.4
Févr	253.9	153.8
Mars	169.4	54.7
Avr	42.2	
Mai	10.3	
Juin	11.5	
Juil	20.1	
Août	24.8	

Jallayco (Tuni Alto 4658 m)

	02-03	03-04
Sept	48.3	26.7
Oct	47.2	47.7
Nov	96.3	71.1
Déc	100.5	107.7
Janv	105.2	224.0
Févr	177.3	101.1
Mars	108.4	38.3
Avr	34.4	
Mai	11.3	
Juin	8.7	
Juil	21.9	
Août	26.1	

Condoriri (4524 m)

	02-03	03-04
Sept	50.8	35.0
Oct	57.9	41.1
Nov	87.3	80.8
Déc	94.8	223.8
Janv	197.8	140.6
Févr	147.6	135.8
Mars	114.0	66.9
Avr	38.5	
Mai	17.9	
Juin	4.2	
Juil	5.7	
Août	19.8	

Base de Données
Température de l'air (°C)

Données de Réanalyse

	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Moy. An
47-48					-5.44	-5.77	-5.35	-5.75	-5.78	-7.54	-7.07	-7.26	
48-49	-7.66	-6.42	-6.54	-6.08	-5.77	-5.79	-5.19	-5.75	-6.10	-6.10	-7.15	-7.10	-6.30
49-50	-6.42	-6.08	-5.39	-5.33	-5.16	-5.31	-5.19	-5.57	-6.10	-6.31	-6.73	-6.56	-5.85
50-51	-6.97	-7.18	-5.73	-5.24	-5.32	-5.53	-4.62	-5.97	-6.26	-6.92	-6.48	-7.68	-6.16
51-52	-6.03	-5.79	-5.10	-5.05	-4.63	-4.23	-4.25	-5.36	-5.27	-6.23	-6.69	-6.65	-5.44
52-53	-6.99	-5.72	-5.93	-4.96	-5.22	-5.04	-5.19	-5.23	-5.30	-5.62	-7.60	-6.69	-5.79
53-54	-5.56	-5.39	-5.26	-5.13	-5.04	-5.27	-5.36	-4.88	-5.20	-6.75	-6.94	-6.50	-5.61
54-55	-6.02	-5.97	-5.70	-5.35	-6.20	-5.43	-5.01	-5.59	-5.98	-6.66	-7.52	-6.78	-6.02
55-56	-6.83	-6.64	-6.25	-5.37	-5.75	-5.70	-5.15	-5.74	-6.82	-7.05	-8.30	-7.30	-6.41
56-57	-6.00	-6.39	-6.16	-5.71	-5.70	-4.82	-4.69	-5.13	-5.68	-7.13	-6.73	-6.67	-5.90
57-58	-7.01	-5.60	-5.49	-4.86	-4.55	-4.18	-4.47	-5.19	-5.57	-4.50	-7.04	-6.46	-5.41
58-59	-5.81	-6.29	-5.77	-4.50	-4.26	-5.59	-5.22	-4.54	-6.13	-5.52	-6.14	-6.63	-5.53
59-60	-6.62	-6.32	-5.99	-5.24	-4.96	-5.53	-5.46	-4.94	-6.43	-6.92	-6.56	-6.66	-5.97
60-61	-6.90	-6.09	-5.27	-5.43	-5.10	-5.58	-5.11	-4.66	-5.51	-6.30	-8.25	-7.33	-5.96
61-62	-6.68	-6.71	-5.80	-5.61	-5.42	-5.65	-5.63	-5.37	-5.55	-7.37	-7.58	-7.30	-6.52
62-63	-6.97	-7.07	-6.18	-5.45	-5.76	-5.74	-5.29	-5.18	-6.11	-7.19	-6.64	-6.37	-6.16
63-64	-6.64	-6.14	-5.34	-5.45	-5.29	-4.87	-5.13	-5.50	-6.22	-6.85	-7.98	-7.22	-6.05
64-65	-7.17	-7.01	-6.84	-6.11	-5.85	-5.71	-6.17	-5.54	-5.90	-6.75	-7.91	-7.40	-6.53
65-66	-6.59	-5.40	-6.03	-5.55	-4.99	-4.62	-4.96	-5.06	-6.15	-6.32	-6.55	-7.12	-5.78
66-67	-6.27	-5.71	-5.48	-5.38	-5.05	-5.34	-5.30	-5.71	-5.18	-6.25	-7.56	-7.29	-5.88
67-68	-6.63	-6.74	-6.13	-5.92	-5.91	-5.46	-5.74	-6.13	-7.08	-7.00	-7.19	-7.20	-6.43
68-69	-7.37	-5.81	-5.47	-5.32	-5.52	-4.63	-4.56	-4.20	-5.22	-5.88	-7.35	-7.07	-5.70
69-70	-6.62	-5.88	-4.66	-5.17	-5.08	-4.98	-4.85	-5.15	-4.62	-6.08	-7.16	-6.72	-5.58
70-71	-7.00	-5.66	-5.26	-5.18	-5.12	-5.99	-5.24	-5.52	-6.45	-7.18	-7.73	-7.47	-6.15
71-72	-6.72	-7.38	-6.26	-5.61	-5.92	-5.60	-5.58	-5.66	-6.32	-7.11	-6.24	-7.07	-6.29
72-73	-6.54	-5.51	-4.61	-4.85	-4.29	-4.45	-4.53	-4.97	-5.35	-6.23	-7.09	-7.05	-5.46
73-74	-7.02	-4.99	-5.45	-5.65	-5.38	-6.01	-5.79	-6.11	-6.63	-6.89	-6.50	-7.23	-6.14
74-75	-6.91	-6.18	-5.29	-5.27	-5.60	-5.17	-5.24	-4.70	-6.21	-7.37	-7.76	-6.88	-6.05
75-76	-6.85	-6.19	-5.58	-5.57	-5.41	-5.38	-5.21	-5.50	-6.44	-6.93	-7.03	-7.26	-6.11
76-77	-7.14	-5.33	-6.00	-5.00	-4.96	-5.49	-5.20	-5.09	-6.32	-6.75	-6.44	-6.72	-5.87
77-78	-6.74	-5.42	-5.05	-4.89	-5.10	-4.09	-5.24	-5.14	-6.10	-6.60	-7.38	-7.01	-5.73
78-79	-6.95	-6.08	-5.23	-5.00	-4.98	-4.97	-4.94	-5.16	-5.74	-5.31	-7.64	-6.94	-5.75
79-80	-6.19	-5.27	-4.59	-4.86	-4.44	-4.27	-4.86	-4.40	-5.46	-5.81	-6.64	-6.79	-5.30
80-81	-6.45	-4.92	-4.62	-4.81	-4.52	-5.35	-4.52	-4.78	-5.51	-6.71	-6.77	-7.33	-5.52
81-82	-7.32	-5.34	-4.34	-4.31	-4.96	-5.17	-4.50	-5.64	-6.30	-7.17	-6.81	-7.62	-5.79
82-83	-6.50	-5.70	-4.64	-4.88	-3.63	-3.78	-3.68	-4.21	-4.23	-5.95	-5.35	-5.40	-4.83
83-84	-5.36	-5.66	-5.36	-5.75	-5.98	-5.72	-5.21	-5.48	-4.79	-5.96	-7.43	-7.30	-5.83
84-85	-7.15	-5.38	-5.76	-5.59	-5.21	-5.80	-4.75	-5.17	-5.21	-7.23	-8.04	-6.20	-5.96
85-86	-6.80	-6.45	-6.28	-4.90	-5.19	-5.62	-5.25	-4.60	-5.57	-6.19	-8.33	-7.22	-6.03
86-87	-7.10	-6.33	-4.86	-5.05	-5.17	-4.80	-5.01	-4.76	-5.17	-6.68	-5.52	-6.13	-5.55
87-88	-5.72	-5.22	-4.48	-4.20	-3.98	-4.24	-4.22	-4.22	-5.17	-6.21	-6.41	-5.31	-4.95
88-89	-6.32	-5.51	-5.37	-5.09	-5.70	-5.49	-5.95	-5.57	-5.69	-6.20	-7.23	-7.05	-5.93
89-90	-6.25	-5.66	-5.16	-4.31	-5.44	-4.81	-4.44	-4.08	-4.64	-6.74	-7.29	-6.96	-5.48
90-91	-6.99	-4.95	-4.61	-4.85	-4.31	-4.59	-4.60	-5.01	-5.39	-6.60	-6.97	-5.92	-5.40
91-92	-6.86	-5.94	-5.12	-4.74	-4.78	-4.73	-4.92	-5.01	-4.39	-6.25	-7.25	-8.11	-5.68
92-93	-7.37	-5.58	-5.75	-4.71	-5.47	-5.52	-5.43	-4.98	-5.24	-6.18	-7.13	-7.23	-5.88
93-94	-6.99	-5.71	-4.83	-4.49	-4.87	-5.36	-5.48	-4.88	-4.99	-6.59	-6.87	-6.63	-5.64
94-95	-7.03	-5.89	-5.23	-4.64	-4.74	-4.88	-4.53	-4.55	-5.39	-6.49	-6.08	-5.24	-5.39
95-96	-6.02	-5.34	-5.01	-5.49	-4.99	-5.25	-4.96	-5.15	-5.44	-6.72	-6.99	-6.42	-5.65
96-97	-6.53	-5.88	-5.22	-4.80	-4.88	-5.31	-4.69	-5.58	-6.19	-6.28	-6.44	-7.39	-5.77
97-98	-5.52	-4.89	-4.86	-4.04	-3.58	-3.33	-3.79	-3.82	-4.52	-5.34	-5.49	-5.75	-4.58
98-99	-5.97	-5.60	-4.90	-4.92	-5.57	-5.41	-5.18	-5.34	-5.83	-6.24	-6.97	-6.88	-5.73
99-00	-6.83	-5.97	-5.75	-4.89	-5.09	-5.38	-5.14	-5.38	-5.07	-6.49	-7.58	-6.56	-5.84
00-01	-6.19	-5.98	-4.80	-4.87	-5.71	-5.25	-5.34	-4.88	-5.49	-6.24	-6.66	-6.61	-5.67
01-02	-6.03	-5.13	-4.69	-4.70	-4.66	-4.68	-4.75	-4.61	-5.06	-5.61	-7.25	-6.89	-5.34
02-03	-6.32	-5.29	-4.93	-4.46	-4.09	-4.51	-4.65	-4.74	-5.52	-5.67	-6.15	-6.88	-5.27
03-04	-7.33	-5.36	-4.81	-4.44	-4.64	-4.70	-4.13	-4.32	-5.83	-6.66	-6.66	-6.45	-5.44
Min	-7.66	-7.38	-6.84	-6.11	-6.20	-6.01	-6.17	-6.13	-7.08	-7.54	-8.33	-8.11	-6.5
Max	-5.36	-4.89	-4.34	-4.04	-3.58	-3.33	-3.68	-3.82	-4.23	-4.50	-5.35	-5.24	-4.6
Moyenne	-6.6	-5.9	-5.4	-5.1	-5.1	-5.1	-5.0	-5.1	-5.6	-6.5	-7.0	-6.8	-5.8
Ecart Type	0.5	0.6	0.6	0.5	0.6	0.6	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.6	0.4
Cv.	-0.08	-0.10	-0.11	-0.09	-0.11	-0.11	-0.10	-0.10	-0.11	-0.09	-0.09	-0.08	-0.07

ANNEXE 2 CLASSEMENT DES DONNEES DES STATIONS

Classement des données selon la Moyenne Annuel

Bassin de Tubo (Zongo)

Lame Ecoulée [mm]

Intervalles	Années	Moy. An	OBS Niño
75-90 D+	73-74	75	Niña1 09/73-03/74
	85-86	75	
	84-85	80	
	92-93	81	Niño4 04/93 - 05/93
	00 - 01	82	Niña4 12/00-01/01
	74-75	82	Niña2 06/75-01/76
90-105 D	75-76	82	Niña2 06/75-01/76
	96 - 97	91	Niño 5 05/97-04/98
	99 - 00	94	
	02 - 03	95	Niño 6 07/02 - 01/03
	93-94	99	
	86-87	102	Niño2 01/87 - 11/87
	89-90	103	
	01 - 02	104	Niño 6 07/02 - 01/03
105-128 M	78-79	106	
	90-91	110	
	03 - 04	110	
	81-82	111	Niño1 06/82 - 05/83
	77-78	122	
	76-77	124	
	79-80	125	
	94-95	126	
128-159 F	88-89	129	Niña3 09/88 - 11/88
	95-96	133	
	87-88	133	Niño2 01/87 - 11/87
	91-92	134	Niño3 11/91 - 06/92
	80-81	136	
	83-84	138	
159-190 F+	98 - 99	147	
	82-83	182	Niño1 06/82 - 05/83
	97 - 98	190	Niño 5 05/97-04/98

Bassin de Prado

Lame Ecoulée [mm]

Intervalles	Années	Moy. An	OBS Niño
50-63 D+	89-90	50	
	82-83	60	Niño1 06/82 - 05/83
	92-93	61	Niño4 04/93 - 05/93
	91-92	61	Niño3 11/91 - 06/92
63-76 D	81-82	65	Niño1 06/82 - 05/83
	88-89	69	Niña3 09/88 - 11/88
	93-94	72	
	90-91	74	
76-88 M	98 - 99	75	
	86-87	77	Niño2 01/87 - 11/87
	80-81	77	
	94-95	78	
	99 - 00	78	
	74-75	78	Niña2 06/75-01/76
	97 - 98	80	Niño 5 05/97-04/98
	84-85	81	
88-99 F	79-80	82	
	95-96	85	
	78-79	85	
	73-74	85	Niña1 09/73-03/74
	01 - 02	91	Niño 6 07/02 - 01/03
	75-76	92	Niña2 06/75-01/76
	87-88	94	Niño2 01/87 - 11/87
	76-77	97	
99-111 F+	83-84	98	
	85-86	98	
	96 - 97	102	Niño 5 05/97-04/98
	00 - 01	102	Niña4 12/00-01/01
	77-78	106	
111-131 F+	02 - 03	111	Niño 6 07/02 - 01/03

Bassin de Alpaca

Lame Ecoulée [mm]

Intervalles	Années	Moy. An	OBS Niño
62-70 D+	85-86	62	
	84-85	64	
	92-93	65	Niño4 04/93 - 05/93
	83-84	66	
70-78 D	99 - 00	68	
	88-89	71	Niña3 09/88 - 11/88
	93-94	73	
	00 - 01	74	Niña4 12/00-01/01
78-91 M	01 - 02	75	Niño 6 07/02 - 01/03
	02 - 03	75	Niño 6 07/02 - 01/03
	86-87	78	Niño2 01/87 - 11/87
	96 - 97	79	Niño 5 05/97-04/98
	89-90	81	
	80-81	82	
	81-82	82	Niño1 06/82 - 05/83
	90-91	84	
91-111 F	91-92	84	Niño3 11/91 - 06/92
	95-96	84	
	94-95	88	
	98 - 99	99	
	82-83	102	Niño1 06/82 - 05/83
111-131 F+	87-88	104	Niño2 01/87 - 11/87
	97 - 98	131	Niño 5 05/97-04/98

Classement des données selon la Moyenne Annuel

Station Plataforma			
Précipitation [mm]			
Intervalles	Années	Moy. An	OBS Niño
41.6-52.3 F+	89-90	41.6	
	82-83	43.7	Niño1 06/82 - 05/83
	98-99	46.3	
	76-77	51.0	
	81-82	51.9	Niño1 06/82 - 05/83
52.3-62.9 F	88-89	54.4	Niño3 09/88 - 11/88
	97-98	54.7	Niño 5 05/97-04/98
	91-92	55.5	Niño3 11/91 - 06/92
	72-73	60.7	Niño0 06/72 - 02/73
	79-80	60.5	
	94-95	60.4	
	71-72	61.3	Niño0 06/72 - 02/73
	01-02	63.0	Niño 6 07/02 - 01/03
62.9-85.7 M	84-85	63.5	
	99-00	65.5	
	80-81	65.6	
	95-96	65.7	
	86-87	67.8	Niño2 01/87 - 11/87
	75-76	69.3	Niño2 06/75-01/76
	00-01	70.1	Niño4 12/00-01/01
	87-88	70.2	Niño2 01/87 - 11/87
	90-91	71.9	
	92-93	73.2	Niño4 04/93 - 05/93
	78-79	74.6	
	93-94	74.7	
	77-78	76.4	
	02-03	76.5	Niño 6 07/02 - 01/03
	83-84	76.9	
96-97	79.3	Niño 5 05/97-04/98	
85.7-120.6 D	74-75	87.8	Niño2 06/75-01/76
	73-74	94.9	Niño1 09/73-03/74
120.6-155.3 D+	85-86	155.5	

Station El Alto (48)			
Précipitation [mm]			
Intervalles	Années	Moy. An	OBS Niño
32.6-39.6 F+	55-56	32.6	Niño B 08/55-10/55
	82-83	36.0	Niño1 06/82 - 05/83
	56-57	36.0	
	66-67	38.0	
	57-58	38.0	Niño A 12/57 - 03/58
	69-70	39.4	
	91-92	39.7	Niño3 11/91 - 06/92
	48-49	39.9	
	88-89	41.2	Niño3 09/88 - 11/88
	71-72	42.1	Niño0 06/72 - 02/73
39.6-46.7 F	68-69	42.8	
	65-66	42.9	Niño B 08/65 - 01/66
	52-53	43.4	
	81-82	44.8	Niño1 06/82 - 05/83
	89-90	45.0	
	97-98	45.7	Niño 5 05/97-04/98
	61-62	45.9	
	67-68	46.9	
	98-99	47.0	
	51-52	47.1	
46.7-54.6 M	58-59	47.5	
	90-91	48.0	
	76-77	48.3	
	63-64	49.4	
	70-71	49.5	Niño C 01/71-02/71
	60-61	49.5	
	92-93	49.6	Niño4 04/93 - 05/93
	84-85	50.0	
	95-96	50.1	
	86-87	50.8	Niño2 01/87 - 11/87
54.6-63.2 D	72-73	50.875	Niño0 06/72 - 02/73
	93-94	51.0	
	59-60	51.5	
	53-54	52.6	
	01-02	53.8	Niño 6 07/02 - 01/03
	94-95	53.8	
	49-50	54.0	Niño A 04/50-12/50
	99-00	55.3	
	62-63	55.4	
	54-55	55.7	Niño B 08/55-10/55
63.2-71.8 D+	79-80	56.1	
	64-65	56.5	Niño B 08/65 - 01/66
	87-88	56.8	Niño2 01/87 - 11/87
	80-81	57.6	
	74-75	58.4	Niño2 06/75-01/76
	96-97	58.8	Niño 5 05/97-04/98
	83-84	59.0	
	50-51	59.6	Niño A 04/50-12/50
	78-79	60.4	
	75-76	60.6	Niño2 06/75-01/76
77-78	62.9		
00-01	67.4	Niño4 12/00-01/01	
73-74	68.0	Niño1 09/73-03/74	
85-86	71.8		

Station El Alto (71)			
Précipitation [mm]			
Intervalles	Années	Moy. An	OBS Niño
36-42.7 F+	82-83	36.0	Niño1 06/82 - 05/83
	91-92	39.7	Niño3 11/91 - 06/92
	88-89	41.2	Niño3 09/88 - 11/88
	71-72	42.1	Niño0 06/72 - 02/73
	81-82	44.8	Niño1 06/82 - 05/83
42.7-49.5 F	89-90	45.0	
	97-98	45.7	Niño 5 05/97-04/98
	98-99	47.0	
	90-91	48.0	
	76-77	48.3	
49.5-56.7 M	92-93	49.6	Niño4 04/93 - 05/93
	84-85	50.0	
	95-96	50.1	
	86-87	50.8	Niño2 01/87 - 11/87
	72-73	50.9	Niño0 06/72 - 02/73
	93-94	51.0	
	01-02	53.8	Niño 6 07/02 - 01/03
	94-95	53.8	
	99-00	55.3	
	79-80	56.1	
56.7-64.2 D	87-88	56.8	Niño2 01/87 - 11/87
	80-81	57.6	
	74-75	58.4	Niño2 06/75-01/76
	96-97	58.8	Niño 5 05/97-04/98
	83-84	59.0	
64.2-71.8 D+	78-79	60.4	
	75-76	60.6	Niño2 06/75-01/76
	77-78	62.9	
	00-01	67.4	Niño4 12/00-01/01
	73-74	68.0	Niño1 09/73-03/74
85-86	71.8		

Station San Calixto (48)			
Précipitation [mm]			
Intervalles	Années	Moy. An	OBS Niño
36-40.6 F+	49-50	36.0	Niño A 04/50-12/50
	65-66	36.6	Niño B 08/65 - 01/66
	82-83	37.0	Niño1 06/82 - 05/83
	88-89	37.2	
	99-00	38.0	
	70-71	38.9	Niño C 01/71-02/71
	66-67	39.6	
	81-82	39.7	Niño1 06/82 - 05/83
	91-92	40.1	Niño3 11/91 - 06/92
	95-96	40.2	
40.6-45.2 F	55-56	40.5	Niño B 08/55-10/55
	71-72	40.9	Niño0 06/72 - 02/73
	50-51	41.3	Niño A 04/50-12/50
	84-85	43.0	
	68-69	43.0	
	94-95	43.5	
	89-90	43.6	
	61-62	44.0	
	97-98	44.2	Niño 5 05/97-04/98
	77-78	44.3	
45.2-50.8 M	69-70	44.5	
	56-57	45.2	
	90-91	45.2	
	93-94	45.4	
	58-59	45.6	
	75-76	46.1	Niño2 06/75-01/76
	52-53	46.4	
	51-52	46.5	
	63-64	47.2	
	92-93	47.5	Niño4 04/93 - 05/93
50.8-57.6 D	79-80	47.9	
	57-58	48.1	Niño A 12/57 - 03/58
	67-68	48.4	
	59-60	48.6	
	62-63	49.5	
	98-99	49.9	Niño3 09/88 - 11/88
	48-49	50.7	
	78-79	51.2	
	74-75	52.0	Niño2 06/75-01/76
	54-55	52.9	Niño B 08/55-10/55
57.6-64.4 D+	76-77	53.5	
	86-87	54.0	Niño2 01/87 - 11/87
	80-81	55.1	
	87-88	56.4	Niño2 01/87 - 11/87
	72-73	57.0	Niño0 06/72 - 02/73
	60-61	57.1	
	73-74	57.6	Niño1 09/73-03/74
	53-54	57.9	
	64-65	58.7	Niño B 08/65 - 01/66
	85-86	61.3	
96-97	64.2	Niño 5 05/97-04/98	
83-84	64.4		

Classement des données selon la Moyenne Annuel

Station San Calixto (71)

Précipitation [mm]			
Intervalles	Années	Moy. An	OBS Niño
37-41.5 F+	82-83	37.0	Niño1 06/82 - 05/83
	88-89	37.2	Niña3 09/88 - 11/88
	99-00	38.0	
	81-82	39.7	Niño1 06/82 - 05/83
	91-92	40.1	Niño3 11/91 - 06/92
41.5-46 F	95-96	40.2	
	71-72	40.9	Niño0 06/72 - 02/73
	84-85	43.0	
	94-95	43.5	
	89-90	43.6	
	97-98	44.2	Niño 5 05/97-04/98
	77-78	44.3	
	90-91	45.2	
	93-94	45.4	
	46-51.5 M	75-76	46.1
92-93		47.5	Niño4 04/93 - 05/93
79-80		47.9	
98-99		49.9	
51.5-56 D	78-79	51.2	
	74-75	52.0	Niña2 06/75-01/76
	76-77	53.5	
	86-87	54.0	Niño2 01/87 - 11/87
	80-81	55.1	
	87-88	56.4	Niño2 01/87 - 11/87
	72-73	57.0	Niño0 06/72 - 02/73
	73-74	57.6	Niña1 09/73-03/74
58-64.4 D+	85-86	61.3	
	96-97	64.2	Niño 5 05/97-04/98
	83-84	64.4	

Station Botijlaca

Précipitation [mm]				
Intervalles	Années	Moy. An	OBS Niño	
56.4-60 F+	82-83	56.4	Niño1 06/82 - 05/83	
	91-92	62.1	Niño3 11/91 - 06/92	
69-81.5 F	89-90	69.4		
	97 - 98	71.5	Niño 5 05/97-04/98	
	94-95	71.7		
	86-87	72.0	Niño2 01/87 - 11/87	
	88-89	73.8	Niña3 09/88 - 11/88	
	92-93	76.1	Niño4 04/93 - 05/93	
	93-94	76.9		
	76-77	78.3		
	81.5-93.6 M	79-80	82.7	
		95-96	84.4	
81-82		85.3	Niño1 06/82 - 05/83	
90-91		87.9		
84-85		89.9		
93.6-105.1 D	71-72	89.9	Niño0 06/72 - 02/73	
	80-81	92.2		
	87-88	94.1	Niño2 01/87 - 11/87	
	77-78	97.7		
105.1-116.7 D+	78-79	100.0		
	74-75	101.9	Niña2 06/75-01/76	
	96 - 97	102.3	Niño 5 05/97-04/98	
	83-84	102.6		
	75-76	108.4	Niña2 06/75-01/76	
	72-73	109.4	Niño0 06/72 - 02/73	
	85-86	116.5		
73-74	116.7	Niña1 09/73-03/74		

Données de Réanalyse (48)

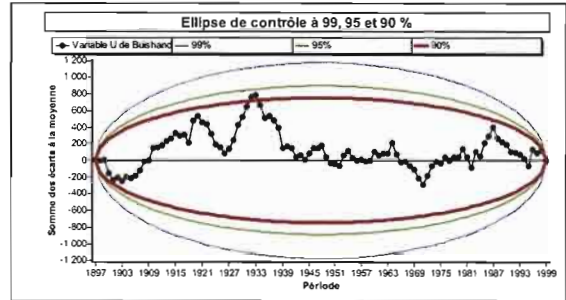
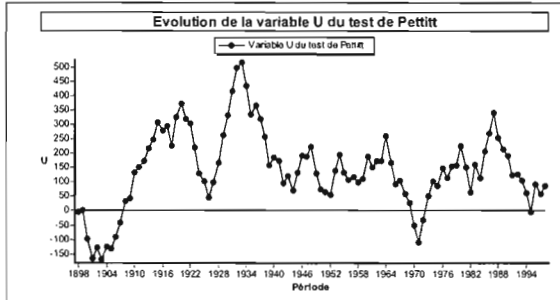
Température de l'air [°C]				
Intervalles	Années	Moy. An	OBS Niño	
-6.53 , -6.22 F+	64-65	-6.53	Niño B 08/65 - 01/66	
	67-68	-6.43		
	55-56	-6.41	Niña B 08/55-10/55	
	48-49	-6.30		
	71-72	-6.29	Niño0 06/72 - 02/73	
	61-62	-6.25		
	62-63	-6.16		
	-6.22 , -5.92 F	50-51	-6.16	Niña A 04/50-12/50
		70-71	-6.15	Niña C 01/71-02/71
		73-74	-6.14	Niña1 09/73-03/74
75-76		-6.11	Niña2 06/75-01/76	
63-64		-6.05		
74-75		-6.05	Niña2 06/75-01/76	
85-86		-6.03		
54-55		-6.02	Niña B 08/55-10/55	
59-60		-5.97		
60-61		-5.96		
-5.92 , -5.53 M	84-85	-5.96		
	86-89	-5.91	Niña3 09/88 - 11/88	
	56-57	-5.90		
	92-93	-5.88	Niño4 04/93 - 05/93	
	66-67	-5.88		
	76-77	-5.87		
	49-50	-5.85	Niña A 04/50-12/50	
	99-00	-5.84		
	83-84	-5.83		
	52-53	-5.79		
-5.53 , -5.05 D	81-82	-5.79	Niño1 06/82 - 05/83	
	65-66	-5.78	Niño B 08/65 - 01/66	
	96-97	-5.77	Niño 5 05/97-04/98	
	78-79	-5.75		
	98-99	-5.73		
	77-78	-5.73		
	68-69	-5.70		
	91-92	-5.68	Niño3 11/91 - 06/92	
	00-01	-5.67	Niña4 12/00-01/01	
	95-96	-5.65		
-5.05 , -4.58 D+	93-94	-5.64		
	53-54	-5.61		
	69-70	-5.58		
	86-87	-5.55	Niño2 01/87 - 11/87	
	58-59	-5.53		
	80-81	-5.52		
	89-90	-5.46		
	72-73	-5.46	Niño0 06/72 - 02/73	
	03-04	-5.44		
	51-52	-5.44		
57-58	-5.41	Niño A 12/57 - 03/58		
90-91	-5.40			
94-95	-5.39			
01-02	-5.34	Niño 6 07/02 - 01/03		
79-80	-5.30			
02-03	-5.27	Niño 6 07/02 - 01/03		
87-88	-4.95	Niño2 01/87 - 11/87		
82-83	-4.83	Niño1 06/82 - 05/83		
97-98	-4.58	Niño 5 05/97-04/98		

Données de Réanalyse (71)

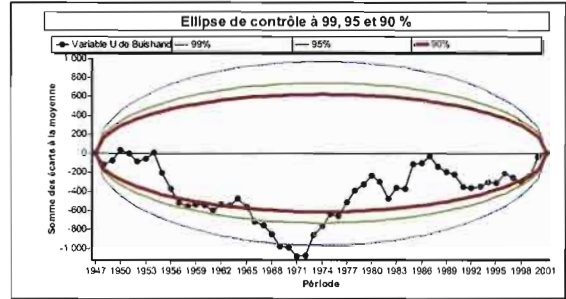
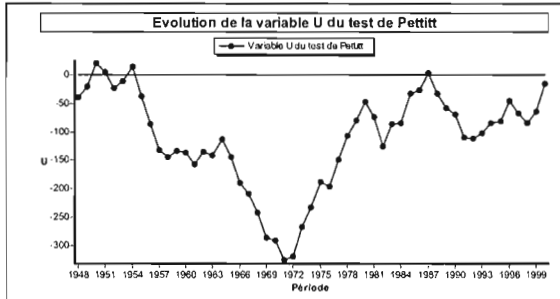
Température de l'air [°C]			
Intervalles	Années	Moy. An	OBS Niño
-6.29 , -6.03 F+	71-72	-6.29	Niño0 06/72 - 02/73
	73-74	-6.14	Niña1 09/73-03/74
	75-76	-6.11	Niña2 06/75-01/76
	74-75	-6.05	Niña2 06/75-01/76
	85-86	-6.03	
-6.03 , -5.76 F	84-85	-5.96	
	88-89	-5.93	Niña3 09/88 - 11/88
	92-93	-5.88	Niño4 04/93 - 05/93
	76-77	-5.87	
	99 - 00	-5.84	
	83-84	-5.83	
	81-82	-5.79	Niño1 06/82 - 05/83
	96 - 97	-5.77	Niño 5 05/97-04/98
	78-79	-5.75	
	98 - 99	-5.73	
-5.76 , -5.42 M	98 - 99	-5.73	
	77-78	-5.73	
	91-92	-5.68	Niño3 11/91 - 06/92
	00 - 01	-5.67	Niña4 12/00-01/01
	95-96	-5.65	
	93-94	-5.64	
	86-87	-5.55	Niño2 01/87 - 11/87
	80-81	-5.52	
	89-90	-5.46	
	72-73	-5.46	Niño0 06/72 - 02/73
-5.42 , -5 D	03 - 04	-5.44	
	90-91	-5.40	
	94-95	-5.39	
	01 - 02	-5.34	Niño 6 07/02 - 01/03
	79-80	-5.30	
	02-03	-5.27	Niño 6 07/02 - 01/03
	87-88	-4.95	Niño2 01/87 - 11/87
	82-83	-4.83	Niño1 06/82 - 05/83
	97 - 98	-4.58	Niño 5 05/97-04/98

ANNEXE 3 TESTS DE RUPTURE

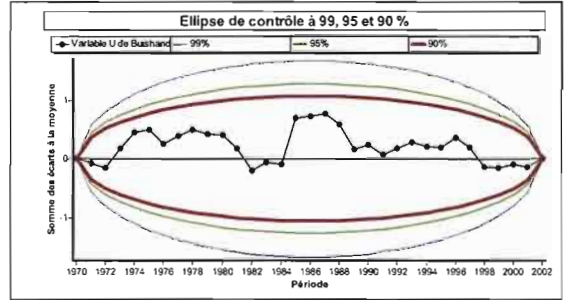
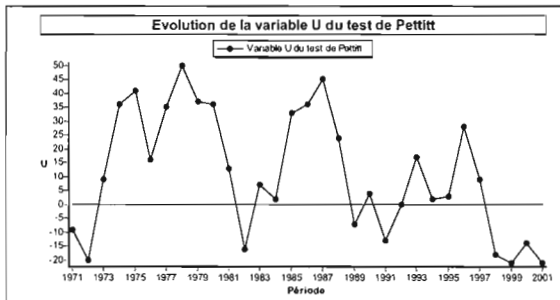
Station San Calixto P[mm]



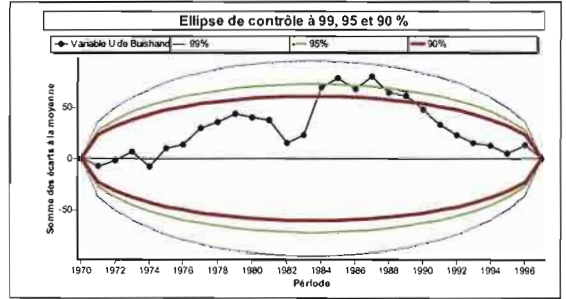
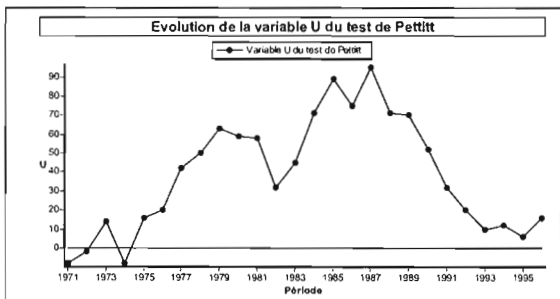
Station El Alto P[mm]



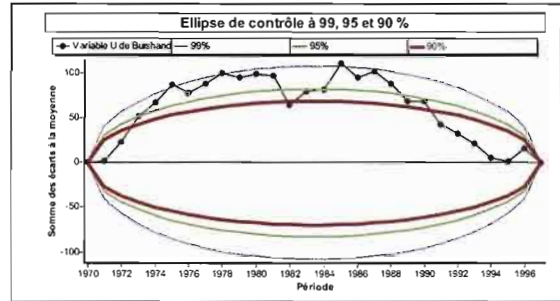
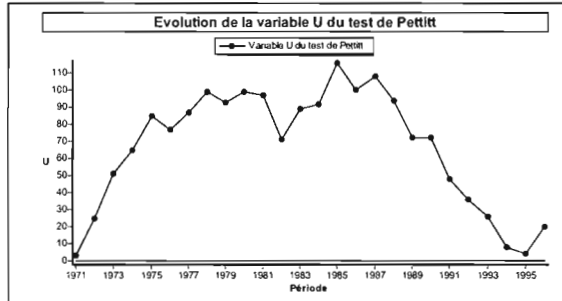
Station Plataforma P[mm]



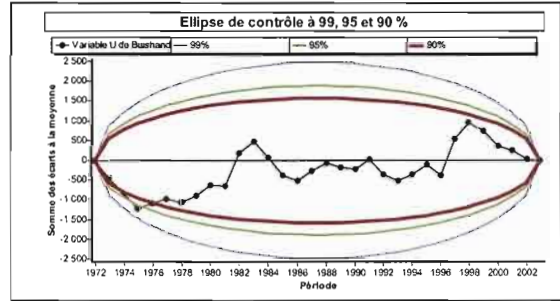
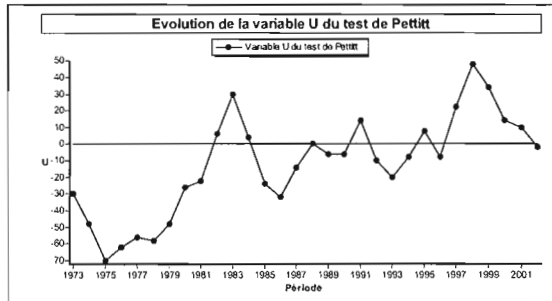
Station Milluni P [mm]



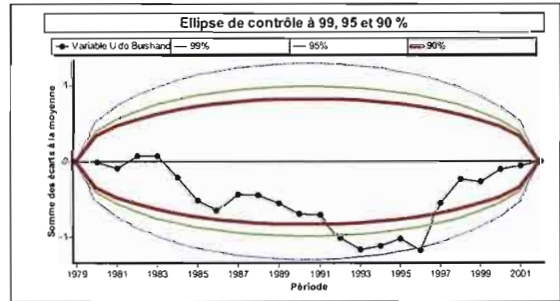
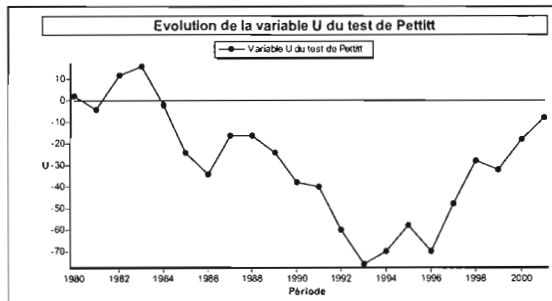
Station Botijlaca P [mm]



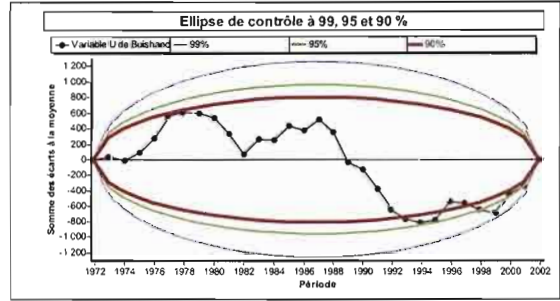
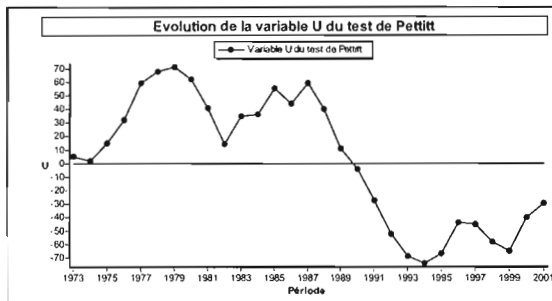
Station Tubo Le [mm]



Station Alpaca Le [mm]



Station Prado Le [mm]



Température de l'air [°C] Données de Réanalyse

