ULB UNIVERSITÉ LIBRE DE BRUXELLES

DI·fusion

Dépôt Institutionnel de l'Université libre de Bruxelles /
Université libre de Bruxelles Institutional Repository
Thèse de doctorat/ PhD Thesis

Citation APA:

Olmos Garcia Agreda, C. (2011). *Gestion des ressources hydriques des villes de La Paz et d'El Alto (Bolivie): modélisation, apports glaciaires et analyse des variables* (Unpublished doctoral dissertation). Université libre de Bruxelles, Faculté des Sciences – Sciences de la Terre et de l'Environnement, Bruxelles.

Disponible à / Available at permalink : https://dipot.ulb.ac.be/dspace/bitstream/2013/209959/15/12815653-3f38-4c92-830b-b1df2a6a1ee6.txt

(English version below)

Cette thèse de doctorat a été numérisée par l'Université libre de Bruxelles. L'auteur qui s'opposerait à sa mise en ligne dans DI-fusion est invité à prendre contact avec l'Université (di-fusion@ulb.be).

Dans le cas où une version électronique native de la thèse existe, l'Université ne peut garantir que la présente version numérisée soit identique à la version électronique native, ni qu'elle soit la version officielle définitive de la thèse.

DI-fusion, le Dépôt Institutionnel de l'Université libre de Bruxelles, recueille la production scientifique de l'Université, mise à disposition en libre accès autant que possible. Les œuvres accessibles dans DI-fusion sont protégées par la législation belge relative aux droits d'auteur et aux droits voisins. Toute personne peut, sans avoir à demander l'autorisation de l'auteur ou de l'ayant-droit, à des fins d'usage privé ou à des fins d'illustration de l'enseignement ou de recherche scientifique, dans la mesure justifiée par le but non lucratif poursuivi, lire, télécharger ou reproduire sur papier ou sur tout autre support, les articles ou des fragments d'autres œuvres, disponibles dans DI-fusion, pour autant que :

- Le nom des auteurs, le titre et la référence bibliographique complète soient cités;
- L'identifiant unique attribué aux métadonnées dans DI-fusion (permalink) soit indiqué;
- Le contenu ne soit pas modifié.

L'œuvre ne peut être stockée dans une autre base de données dans le but d'y donner accès ; l'identifiant unique (permalink) indiqué ci-dessus doit toujours être utilisé pour donner accès à l'œuvre. Toute autre utilisation non mentionnée ci-dessus nécessite l'autorisation de l'auteur de l'œuvre ou de l'ayant droit.

---------- **English Version** ----------

This Ph.D. thesis has been digitized by Université libre de Bruxelles. The author who would disagree on its online availability in DI-fusion is invited to contact the University (di-fusion@ulb.be).

If a native electronic version of the thesis exists, the University can guarantee neither that the present digitized version is identical to the native electronic version, nor that it is the definitive official version of the thesis.

DI-fusion is the Institutional Repository of Université libre de Bruxelles; it collects the research output of the University, available on open access as much as possible. The works included in DI-fusion are protected by the Belgian legislation relating to authors' rights and neighbouring rights. Any user may, without prior permission from the authors or copyright owners, for private usage or for educational or scientific research purposes, to the extent justified by the non-profit activity, read, download or reproduce on paper or on any other media, the articles or fragments of other works, available in DI-fusion, provided:

- The authors, title and full bibliographic details are credited in any copy;
- The unique identifier (permalink) for the original metadata page in DI-fusion is indicated;
- The content is not changed in any way.

It is not permitted to store the work in another database in order to provide access to it; the unique identifier (permalink) indicated above must always be used to provide access to the work. Any other use not mentioned above requires the authors' or copyright owners' permission.

D 03802

E LIBRE DE BRUXELLES
.TE DES SCIENCES
LABORATOIRE DE GLACIOLOGIE

ULB

Gestion des ressources hydriques des villes de La Paz et d'El Alto (Bolivie) : modélisation, apports glaciaires et analyse des variables



Thèse de doctorat présentée par

Carlos A.A. OLMOS G.A.

en vue de l'obtention du grade académique de Docteur en Sciences

Février 2011
Sous la direction du Prof. Frank Pattyn

Universite Libre de Bruxelles
003482341

UNIVERSITE LIBRE DE BRUXELLES
FACULTE DES SCIENCES
LABORATOIRE DE GLACIOLOGIE

Gestion des ressources hydriques des villes de La Paz et d'El Alto (Bolivie) : modélisation, apports glaciaires et analyse des variables

Thèse de doctorat présentée par

Carlos A.A. OLMOS G.A.

en vue de l'obtention du grade académique de Docteur en Sciences

Février 2011
Sous la direction du Prof. Frank Pattyn

Remerciements...Agradecimientos:

Merci, Muchas gracias

Deseo agraceder a la gente de mi laboratorio en la ULB, al equipo IRD- IHH- IAI, a EPSAS, a SENAMHI quienes confiaron e hicieron posible esta tesis.

***Frank**, muchas gracias por guiarme, confiar en mi, ayudarme en todo sentido, luego de esta etapa, será un gusto llamarte mi amigo. Por estar, por apoyarme, encontrar e inventar soluciones y dar vuelta de cabeza las cosas, para ayudarme, como profe y en lo humano.*

***Jean Louis**, gracias por tu confianza desde esa primera llamada que hice desde La Paz. Ártica sigue tocando en Bolivia, no olvidaré jamás ese regalo y tu simpatía.*

***Edson**, tu me guiaste e hiciste posible Montpellier y Bruselas, gracias de veras.*

***Patrick,** gracias por la confianza y el estar allí con tu apoyo.*

***Claire y Francis:** Un gracias muy aparte, por sostenerme y ayudarme por lo ánimos, por esta compañía incondicional, no solo en la línea final sino siempre y con todo, gracias. Querida Claire gracias por preocuparte, por cada detalle, tanto de mi tesis como míos, muy parecido a una mamá belga.*

***Fred, Thierry**, gracias por sacar e inventar tiempo, gracias por los consejos y la amistad y estar siempre listos y prestos a todo.*

***Marie, Saida, Charlotte** y **Dennys 1 y 2, Jiayun, DD:** Que buen laboratorio, gracias amigos, uds. hacen el labo muchachos. Gracias por su ayuda, y por impedirme maltratar aún más a la legua francesa.*

***Henry, Annette y Mau:** Son mi base y mi fuerza, gracias por su amistad. Uds. representan los dos lados del charco y mi vida en ambos lados. Gracias amigos.*

***Silvia y Ricardo:** que locura el encontrarlos aquí y ser parte de este mi mundo, la amistad con uds. es más fuerte es increíble pensar que son ya dos aventuras que tuvimos juntos, gracias por eso y por su amistad.*

***Lucia y Valentina:** Son más grandes que las distancias, son increíbles amigas. Dos veces en Bruselas y organizar la quedada con todos; fue increíble verlas gracias de veras eso me llenó de energías. Tiempo y distancia no son nada con una gran amistad.*

***Inma, Juanito, Bea, Macarena:** Se trajeron la magia de Montpy a Bruselas... que grande decirme su amigo, gracias. **Nora**... siempre presente desde Bilbo... gracias.*

***Reto, Ayat, Cyprien:** Que grandes son!!! Especies en vía de extinción, únicos y raros...grandes amigos, combinaciones que se ríen del estereotipo y lo combinan siendo ciudadanos del mundo...gracias por la simpatía y el cariño. Al igual que uds. yo también soy uno más de esos extranjeros, con sabor a cerveza belga y con mañas de todos lados.*

***Clau, Fabri, Mau, Dani:** Gracias por ser mi fuerza y ser mis amigos. Gracias por esos vasos vacíos al amanecer y el aliento. Las despedidas y los encuentros, por ser mi hogar donde quiera que este.*

***Ivette, Tomás,** gracias por su confianza, su ayuda y su amistad sincera y creer en mi.*

***Negrita:** Entraste recién a mi vida, pero me apoyaste mucho... gracias por tu amor, tu paciencia, el hecho de ser y estar... por ser quien me espera en la página subsiguiente de este sueño.*

A toda la gente que estuvo detrás mío, perdón por la omisión si no están arriba mencionados y que talvez olvidé al escribir esto...ustedes, saben que aprecié muchísimo su ayuda.

Queridos amigos en las páginas siguientes encontraran algo sobre uds. y muchas gracias.

Remerciements...Agradecimientos:

Bruselas, un día cualquiera entre el 2010 y el 2011

Queridos Ignacio y Sergio:

Antes que todo comentarles que todo va bien, ¿Sergio recuerdas que buscaba mi piedra en Bruselas?, bueno la encontré y se que ahora está allí y allí se queda, en el 50 de la calle Roosevelt. No volví, a verla luego de haberla encontrado, ya que fue ese el momento cuando la necesitaba, recuerdas?, allí se queda para que otro la descubra. Y no se si quiero volver a verla, creo que rompería un poco la mística de ese asunto, ¿no lo crees?

Deseaba contarles un sueño y como todo sueño es extraño, sé que sin embargo sé que lo entenderán muy bien:

Recuerdo una sensación: el sentir haber tocado una de mis mejores canciones, talvez no la mejor y en el camino de vuelta (antes de volver a casa), sentía que sin que muchos lo sepan fue una de las mejores notas que pude sacarle a algún instrumento. En el camino me encontré un ser blanco y extraño y lo seguí. Si, creo que ya lo saben, era el conejo de Alicia que me decía que debía buscar algo. No recuerdo bien que.

Al seguirlo, estoy feliz de haber conocido a alguien llamado ***Frank*** quien me guió en esta búsqueda, sin embargo conocí primero a su socio ***JLT*** que me dijo que era bienvenido en mi búsqueda (luego tuve el gusto de llamarlos amigos). Ahora que recuerdo, esta lejos ese día que ***Edson*** me dijo que esto pasaría, si yo lo intentaba y si yo la buscaba... que podía pasar por el espejo; también ***Patrick*** me dijo eso.

Era diciembre, en invierno de esta parte del mundo, hacía frío y en el camino en un lugar más frío aún, nunca pensé que ***Claire*** (una gran amiga), junto con ***Francis*** su compañero, iban a estar allí, sobre todo para apoyarme en una larga línea final hacia lo que debía ser mi objetivo. (Ahora que estoy despierto ya no recuerdo ese objetivo, curioso no?). Junto a ellos estaban ***Fred*** que me regaló un reloj valioso, ***Thierry*** que siempre reía como el gato del sueño de alguna otra noche; igual estaban ***Marie, Saida, Charlotte, JT, DD, DC*** y ***Dennys***, ***"los béigicos"...***curiosos y simpáticos seres del lugar:

Seguí caminando y encontré a ***Ivette*** a ***Tomás***, junto a la fuente de agua (cerca del inicio de un camino que lleva hacia el país de los bueno recuerdos y mis raíces en los yungas), allí descubrí que el agua es mi elemento y que a partir de ella sale una dualidad que apenas empiezo a conocer. Pero creo que esa es otra historia. Todos ellos me ayudaron a buscar este objetivo y me dieron pistas. (Cada vez que lo pienso se vuelve más vago aún, ya comenzaba a olvidar lo que buscaba).

Contarles, que llegué a una ciudad extraña, un niño es su símbolo y echando aguas por la calle... gracioso no? Alli conocí a ***Henry, Annette*** *la belle..ge!*, ***Mauricio*** ... y además me encontré a otros personajes que juntos a la oruga y al gato risueño estaban en el sueño de la noche anterior en un lugar cerca al mediterráneo: ***Silvia y Ricardo*** ellos fueron la razón para quedarme y sentirme bien en este lugar.

El sueño se torno extraño y bonito a la vez ya que baile con ***Lucía y Valentina*** bajo la nieve, es cierto, lo juro, los personajes del sueño de la noche anterior venían donde yo ahora vivía (***Juanito, Macarena, Bea e Inma***) a ***Nora*** la escuchaba, pero no vino. Escuchaba algo así: La gente nos mira y dice, estos si que son felices no?... jajaja ahora que lo recuerdo es gracioso.

Es extraño lo sé, pero es un sueño no? y todo puede pasar...

Todo cambió, el conejo ya no estaba, sin embargo yo ya me había vuelto un personaje más de la ciudad. Había ratos que no me sentía muy bien pero, los *vasos vacíos* se llenaban, cuando en la madrugada de un día largo, recibía un llamado, ya sabia que eran ellos...***Clau y Fabri***. Eran vísperas de navidad y mi casa se llenó cuando llegó ***Daniel*** acompañado de *caracoles y fideos.*

Al establecerme comencé a preguntarme que hacía allí, ya había olvidado mi búsqueda, solo vivía en el lugar y comencé a pensar en muchas cosas te las comentó según vienen a mi cabeza ahora, por favor no se alarmen si no tiene sentido, creo que es esa confusión del segundo después de despertarse.

> ...y cuando ya había decidido ser solo una gaviota, Juan cansado y adolorido se dio cuenta que volaba en el oscuro cielo y pensó: las gaviotas no vuelan en la noche...
>
> *Desde mi casa entre Obrajes y Heger y con Lola mi bicicleta me* encontré *un Oso de peluche en la calle, descubrí algo nuevo, nuevo en mi y* allí supe que *nada es azar,* yo ya lo sabía, *soy quien guía mi camino*, ya que todo son *Ilusiones* con *color esperanza*, todo se trata de *vasos vacíos* y llenos para brindar mi entrada de nuevo *a una casa, aún con muchos espíritus, por haberme* encontrado a mi mismo y a *Isabel*, bailando sobre las meses con el cuervo. Entré y salí de *Macondo*, alguien también *llegó un día en invierno en un lugar de mi chaco y se fue con las aguas del río Magdalena,* la reencontré *en Copacabana,* sin embargo fue para decirle *adiós, que es el tiempo quien dirá que fue todo esto..*

Descubrí luego que tenía *mas de cocinero y de poeta callejero* que de ingeniero en las venas, y *bailé bajo la nieve*, toqué la historia en *Mons, en las Ardenas, en Waterloo, en París y en Londres*, allí encontré a ***Paco*** y recordé que *Europa que fue realidad, que no había sido un sueño de verano entre trenes, con mochila, cruzando el Adriático en barco*, sin embargo también encontré *marfil* en el *cementerio de los elefantes* en un *atajo* que descubrí entre *las cumbres de los glaciares de aquí y de allá. Junto con Joaquin y un elefante rosado* tomé *un mate* en *la Grand Place*, diciéndome varias veces, *no sos vos soy yo*, que *mi moneda estaba echada al aire y daba vueltas* y lo mejor de todo, es que, esta fiesta acababa de empezar, esta poesía venía de comenzar y que la suerte no estaba echada aún.

¿Que les puedo decir? desperté creyendo que la anarquía es posible y creo que todo es posible y que espero que el día en que no lo crea, vuelva esta hoja a mis manos, esta misma, que les envío ahora. Solo una certeza tengo, que esta hoja fue escrita en la mitad de mi vida. Solo tengo esa certeza, ¿cómo? no lo sé, solo la tengo, hoy termina la primera mitad de mi vida.

Nicolás decía que sería bueno guardar los olores en algo, tengo tantos aromas dentro de mi, que me hacen pensar que este sueño fue realidad. También él decía, que cuando tienes algo más de lo que puedes cargar en la espalda ya comienzas a echar raíces... creo que es mi tiempo para de eso. Sé que ahora, al volver, sucederá algo que le pasó al alquimista, que en casa me espera mi tesoro y creo que ya estoy preparado para encontrarlo. Ahora me pregunto si el objetivo y el algo del conejo no era esto??? No lo sé, cuando les de un abrazo en persona te lo comentaré.

Como en todo sueño hay algunos personajes borrosos que fueron importantes y ahora al despertar no los recuerdo, es una pena, se que eran también importantes. Disculpa, ya dejo de escribir ya que me debo ir a tomar una ducha en ***Héger***, a lavar mi ropa en ***Solbosch*** y a comprar mis víveres cerca del cementerio de ***Ixelles***, esta noche cocinaré algo y tomaré una cerveza para festejar mi sueño. Reciban un abrazo. Ah! esperen hay algo más...

Ahora que estoy despierto pienso ***que Dios siempre estuvo allí***, haciendo llamar a los amigos cuando precisaba de ellos, haciendo que se retrasen vuelos o que la compu no marche cuando iba a hacer alguna tontería o cuando sopló ese viento entre el laboratorio y mi casa, para recordarme mi camino y algún otoño de 2004 con las hojas secas en Montpellier, o cuando recibí la paz en el ultimo banco en Flagey, La duda no es si yo creo en Él, la duda es como Él sigue creyendo en mi después de todo. Tengo grandes sospechas que fue Él, quien mando al conejo...

Carlos Olmos

PD. Ah! me olvidaba...solo algo más... Bélgica, de donde les escribo es increíble, amo las cervezas de aquí, el chocolate e incluso confieso haber caminado alguna vez, una hora, solo para comer unas frites. Adoro sentarme en la Grand Place y bajarme dos paradas antes en el bus solo para poder cruzarla caminado, me encantan los estanques de ***Flagey***. Se volvió algo parecido al camino entre Triolet, la Comedie y la place de l'Europe en Montpellier. En ambos lugares he dejado algo de mi que todavía sigue haciendo esos caminos y lo seguirá haciendo por mucho tiempo más.

GRACIAS A LOS PERSONAJES FANTASTICOS DE ESTE SUEÑO

DEDICATORIA

A mi hijo, mi cachorro, mi principio y fin, mi mundo. Para recordarte siempre, que todos los sueños son posibles, el único requisito es atreverse a hacerlos realidad y decirte que tanto el camino como el fin son importantes. Esto es lo que aprendí haciendo esta tesis y deseo transmitírtelo.

Gracias por existir: "Mi hijo, tu libro y nuestro árbol"

A mi madre, una gran mujer que me enseño a volar como Juan Salvador Gaviota, alguien a quien admiro mucho y a quien quiero parecerme. Gracias por tu fortaleza, tus sacrificios, tu amor, cariño y la mucha paciencia.

Esta, es tu tesis y tu doctorado, para mi quedan, el valioso camino recorrido, tus enseñanzas y tu cariño, además de la maravillosa gente que conocí a lo largo de esta etapa y en esta increíble experiencia que se llama vida.

Résumé

L'entité formée par les villes de La Paz et El Alto est l'agglomération urbaine la plus importante de la Bolivie. Comme dans toutes les grandes villes, la gestion des ressources en eau représente un défi de taille à relever. Les décisions stratégiques concernant la gestion de l'eau revêtent une importance capitale du fait de l'importance de ces deux villes sur le plan national. De telles décisions doivent être prises en tenant compte d'interactions complexes entre facteurs environnementaux, légaux et sociétaux. Citons notamment, les conditions particulières du milieu telles que la géographie, la dynamique des ressources en eau, l'infrastructure existante et à prévoir, les lois sur la propriété des ressources et surtout l'état des connaissances actuelles et de la recherche sur l'ensemble des variables et des enjeux de la gestion de l'eau.

Dans cette thèse, nous présentons une analyse des variables et des enjeux de la gestion de l'eau comme un outil utile pour déterminer les bases de l'application de la GIRE (Gestion Intégrée des Ressources en Eau). Cette analyse nous permet à la fois de diminuer les incertitudes qui existent sur chacune de ces variables mais aussi d'établir les relations de dépendance entre elles et de conclure à l'importance relative de chacune de ces variables dans le bilan de l'offre et de la demande en eau. Cette analyse représente également un outil de diagnostic des systèmes en eau existants pouvant être utilisé pour la planification future de la gestion de l'eau.

En suivant cette démarche, les décisions à prendre sur la gestion de l'eau tant dans le cadre de la planification stratégique que dans l'utilisation quotidienne de l'eau se baseront sur des connaissances approfondies, permettant de diminuer les risques d'erreur.

Nous présentons comme résultats de cette recherche, plusieurs conclusions concernant les variables tels que les précipitations, la dynamique de l'apport du bassin versant, le rôle des glaciers dans cet apport, la démographie, la consommation en eau, les pertes dans les systèmes ainsi que l'analyse réalisée sur les contraintes qui pèsent sur les futures sources en eau des villes de La Paz et d'El Alto.

La prise en compte de l'ensemble de ces aspects dans le cadre du bilan de l'offre et de la demande en eau nous apporte comme résultats : les temps, l'influence relative de chaque variable, l'analyse de la gestion de l'eau et une proposition sur sa mise en oeuvre. Par l'application des modèles utilisés et des nouvelles méthodes suggérées dans ce travail, nous proposons de nouveaux outils pour la gestion quotidienne de l'eau.

TABLE DES MATIÉRES

1 INTRODUCTION 1
1.1 De l'eau 1
1.2 Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE) 2
1.3 L'application de la GIRE dans cette thèse 5
1.4 La Bolivie, La Paz et El Alto, contexte de la recherche 7
1.4.1 Situation géographique 7
1.4.2 La gestion de l'eau à La Paz et El Alto 10
1.4.2.1 Situation actuelle 10
1.4.2.2 Sources potentielles 13
1.4.3 Vulnérabilité géographique et menaces potentielles 17
1.4.4 Sensibilité sociale par rapport aux ressources naturelles 17
1.4.5 Situation actuelle de la planification 18
1.5 L'analyse des variables, processus et aspects particuliers de la gestion, une voie pour chercher les bases de la GIRE 20
1.6 Objectifs de la thèse, hypothèses et méthodologie de travail 20
1.6.1 Objectifs 20
1.6.2 Méthodologie 21

2 GIRE, GESTION DE L'EAU POTABLE ET SES VARIABLES 23
2.1 Antécédents de la GIRE 23
2.2 La GIRE en Bolivie 24
2.3 La GIRE, privatisation versus une gestion équitable de l'eau en Bolivie 25
2.4 Concepts guides pour l'application de la GIRE 26
2.5 Analyse des variables en jeu : formulation du modèle descriptif 28

3 PRECIPITATIONS 36
3.1 Introduction 36
3.2 Base de données 39
3.3 Bassins Sources 41
3.4 Analyse des précipitations 42
3.4.1 Questions pour la gestion des ressources en eau 44
3.4.2 Variation de la quantité des précipitations annuelles 45
3.4.3 Concentration et retardement des précipitations 48
3.4.3.1 Recherche d'une méthodologie pour déterminer la concentration des précipitations, leur retard et leur effet pour la gestion de l'eau 48
3.4.3.2 Prévision des précipitations annuelles 59
3.5 Conclusions 64

4 BILAN HYDROLOGIQUE DU BASSIN VERSANT 67
4.1 Introduction 67
4.2 Questions- clés pour l'analyse 69
4.3 Rapport précipitation et écoulement 69
4.3.1 « Architecture » des bassins versants 69
4.3.2 Régime des débits 70
4.3.3 Rapport écoulement - précipitation 72
4.4 Application du bilan Hydrologique 74
4.4.1 Méthode et algorithmes du bilan Hydrologique 74
4.4.2 Simulations 88
4.5 Analyse et discussion des résultats 92
4.6 Conclusions 95

5 GLACIERS 98
5.1 Introduction 98
5.2 Recherches menées et disponibilité des données 99
5.3 Modélisation des glaciers 100
5.3.1 Formulation physique du modèle 100
5.3.2 Formulation computationnelle du modèle 105
5.3.3 Formulation des bases du modèle 106
5.3.4 Calibration du modèle. Reconstruction du retrait du glacier de Chacaltaya 110
5.3.5 Application du modèle et estimation du stock glaciaire 117
5.4 Conclusions 134

6 CAPACITÉ TECHNIQUE DE MOBILISATION DE L'EAU 135
6.1 Barrages 135
6.2 Usines de traitement des eaux 140
6.3 Réseaux 141
6.4 Pertes totales 144
6.5 Conclusions 144

7 ESTIMATION DE LA POPULATION ET BESOIN EN EAU 146
7.1 La demande en eau 146
7.2 Estimation de la population 147
7.3 Couverture des réseaux 149
7.4 Estimation de la consommation journalière en eau par habitant (CJE) 150
7.5 Estimation des demandes 153
7.6 Conclusions 158

8 BILAN DE L'OFFRE ET DE LA DEMANDE EN EAU – BASES DE LA GIRE 161
8.1 Bilan de l'offre et de la demande en eau 161
8.2 Bases de la GIRE 171
8.2.1 Évaluation des ressources hydriques : Création et suggestions d'instruments de gestion 171
8.2.2 Planification de la GIRE 175
8.2.3 Gestion de la demande 176
8.2.4 Autres concepts pour l'application de la GIRE 177
8.3 Conclusions 178

9 CONCLUSIONS 180

10 BIBLIOGRAPHIE 190

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Définition de la gestion de l'eau comme une voie pour le développement et le bien-être 4
Figure 1.2 : Vulnérabilité entre les ressources en eau douce et leur gestion (Fig. 3.2 Rapport IPCC, 2007) 6
Figure 1.3 : Localisation de la zone d'étude 7
Figure 1.4 : Villes de La Paz et El Alto et systèmes de distribution d'eau potable 9
Figure 1.5 : Organisation politico-sociale de la Bolivie 14
Figure 1.6 : Des conflits liés à l'environnement et aux ressources naturelles jusqu'en 2005 18
Figure 1.7 : Méthodologie de recherche 22

Figure 2.1 : La participation du public dans la gouvernance de l'eau 26
Figure 2.2 : Première approximation pour la construction du modèle descriptif 28
Figure 2.3 : Deuxième approximation pour la construction du modèle descriptif 29
Figure 2.4 : Troisième approximation pour la construction du modèle descriptif 30
Figure 2.5 : Le cycle de l'eau 30
Figure 2.6 : Processus hydrologiques dans le bassin versant 31
Figure 2.7 : Capacité de mobilisation de l'eau et ses composants 31
Figure 2.8 : Demande et ses composants 32
Figure 2.9 : Quatrième approximation pour la construction du modèle descriptif 34
Figure 2.10 : Modèle descriptif 35

Figure 3.1 : Représentation de la zone d'influence de la ZCIT 36
Figure 3.2 : Localisation des glaciers analysés dans l'étude de Ramírez (2003) et du paléo lac Tauca 37
Figure 3.3 : Analyse de la variation des précipitations [mm/jour] (Vimaux, 2005) 38
Figure 3.4 : Diagramme ombrothermique de La Paz 39
Figure 3.5 : Bassins Versants sources et leurs voisins 41
Figure 3.6 : Altitude et Précipitations par station 43
Figure 3.7 : Régime mensuel des précipitations 43
Figure 3.8 : Apport en eau du bassin versant et précipitations par période au total annuel (Ouest) 44
Figure 3.9 : Prévision des Impacts potentiels du Changement climatique dans le monde sur l'eau (à la fin du XXIème siècle) 45
Figure 3.10 : Résultats d'analyses de tendances de l'étude de Jaffrain (2007) 46
Figure 3.11 : Application de l'indice de concentration des précipitations 49
Figure 3.12 : Courbe de décharge moyenne de San Calixto et d'El Alto (AH Septembre-Août) 50
Figure 3.13 : Comparaison des courbes de décharges moyennes de nos stations (AH Septembre-Août) 51
Figure 3.14 : Variabilité de la courbe de décharge entre stations (AH: Septembre-Août) 51
Figure 3.15 : Variabilité de la courbe de décharge entre stations (AH: juillet - juin) 52
Figure 3.16 : Retard de la précipitation par rapport à la période de référence 1961-90. Station San Calixto Si[%]= [5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50] 55
Figure 3.17 : Concentration des précipitations par rapport à la période de référence 1961-90. Station San Calixto Si[%]= [5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50] 56
Figure 3.18 : Tendance de la concentration des précipitations 57
Figure 3.19 : Niveaux de fonctionnement du barrage Hampaturi 1999 - 2007 58
Figure 3.20 : Analyse de l'influence de la concentration de la précipitation sur le fonctionnement du Barrage Hampaturi, Années 2005 et 2006 58
Figure 3.21 : Exemple de Variation interannuelle des précipitations (S. San Calixto) 59
Figure 3.22 : Jours possibles d'occurrence, J_i, $J_i$max, $J_i$min pour S_i(AH : septembre-août) 61
Figure 3.23 : Jours possibles d'occurrence, J_i, $J_i$max, $J_i$min pour S_i(AH : Juillet-juin) 61
Figure 3.24 : Essai de prédiction des précipitations (2003-2007) AH: Juillet-Juin 63
Figure 3.25 : Evaluation de l'erreur de la prédiction de la P totale 63

Figure 4.1 : « Architecture » des bassins versants 69
Figure 4.2 : Régime d'écoulement 70
Figure 4.3 : Régime mensuel de précipitation 71
Figure 4.4 : Rapport P, E et Cesc 73
Figure 4.5 : Rapport E_B, E_{TW} et Précipitation 81
Figure 4.6 : Comparaison : E_B, Précipitation (P) et P+(fo) 84
Figure 4.7 : Comparaison : Valeur fo du forçage pour Hampaturi et les volumes d'eaux envoyés d'Ajuankhota 85
Figure 4.8 : Evolution des valeurs G_N et G_o calculées pour Tuni, comparées au bilan de masse du glacier Zongo (mensuelle 2000-2008) 86
Figure 4.9 : Evolution des valeurs G_N et G_o calculées pour Tuni, comparées au bilan de masse du glacier Zongo (moyenne mobile chaque 4 mois, 2000-2008) 86
Figure 4.10 : Valeurs cumulées de G_N et G_o calculées pour Tuni, comparées au bilan de masse du glacier Zongo (moyenne mobile chaque 4 mois, 2000-2008 87
Figure 4.11 : Evolution des valeurs G_N et G_o calculées pour Tuni, comparées aux bilans de masse des glaciers Chacaltaya, Zongo et Charquini (Annuelle, 2000-2008) 87
Figures 4.12 : Simulations des scénarios de changement de la a) précipitation (P) et de la température (T) b) effets combinés de changement de P et T 89
Figures 4.13 : Simulations des changements de la température 90
Figure 4.14 : Variation pourcentuelle de l'écoulement par rapport aux scénarios simulés 91
*Figure 4.15 : Comparaison des scénarios E3(P*99) et E9 (T+2.5°C)* 92

Figure 5.1 : Axes de référence 101
Figure 5.2 : Contraintes intérieures d'un glacier 102
Figure 5.3 : Formulations du schéma de différences finies 105
Figure 5.4 : Niveaux de références du modèle 106
Figure 5.5 : Modèle Numérique de Terrain Chacaltaya 106
Figure 5.6 : Topographie de Chacaltaya et surfaces glaciaires entre le PAG et 1998 107
Figure 5.7 : Bilan de masse du glacier de Chacaltaya (1991-2004) 109
Figure 5.8 : Bilan de Masse du Glacier de Zongo (1991-2006) 109
Figure 5.9 : Exemple d'estimation de β (Zongo sans valeurs Z>5500m) 109
Figure 5.10 : Résultats Etape I (Exemple d'application pour un β=0.004983) 112
Figure 5.11: Estimation de Surfaces à partir de la variation d'ELA et pour différentes valeurs de β 113
Figure 5.12 : Premiers résultats Etape II. (A) 114
Figure 5.13: Premières résultats, Etape II-1998. (B) 114
Figure 5.14 : Exemples des résultats obtenus avec l'introduction du glissement basal dans le modèle 115
Figure 5.15 : Traitement différencié par zones de la vallée de Chacaltaya en fonction de son exposition 116
Figure 5.16 : Modélisation de l'étape II de Calibration : Reproduction de la géométrie du glacier de Chacaltaya pour 1998 116
Figure 5.17 : Valeurs d'ELA moyennes de Chacaltaya (1700-1998) 117
Figure 5.18 : Modélisation du recul final de Chacaltaya I 118
Figure 5.19 : Comparaison des formes du glacier 119
Figure 5.20 : Modélisation du recul final de Chacaltaya II 119
Figure 5.21 : Exemples des résultats de l'application de la méthode de Farinotti 122
Figure 5.22 : Exemples des résultats de l'application de la méthode de Farinotti 124
Figure 5.23 : Comparaison des épaisseurs estimées pour la méthode Farinotti et des épaisseurs mesurés sur terrains avec radar (Glacier de Charquini Sud) 126
Figure 5.24 : Comparaison des épaisseurs estimées pour la méthode Farinotti et des épaisseurs mesurés sur terrains avec radar (Glacier de Condoriri, Pic Tarija) 127
Figure 5.25 : Comparaison des épaisseurs estimées pour la méthode Farinotti et des épaisseurs mesurés sur terrains avec radar (Glacier de Tuni) 127
Figure 5.26 : Rapport volume – surface de Chacaltaya (1700-2009) 128
Figure 5.27 : Estimation du stock glaciaire (par glacier) 129

Figure 5.28 : Estimation du stock glaciaire (par bassin, système et total pour les villes de La Paz et El Alto) 130
Figure 5.29 : Détermination des possibles valeurs d'ELA pour une modélisation régionale 133
Figure 5.30 : Estimation de la diminution de l'apport glaciaire en eau pour l'année 2026 133

Figure 6.1 : Probabilité associée à la précipitation (Ex. Station Alto Achachicala) 137
Figure 6.2 : Barrages de Tuni, Milluni, Hampaturi et Incachaca, Tres (pr %), Tbes 138
Figure 6.3 : Pertes entre les barrages et les usines 139
Figure 6.4 : Pertes d'eau des usines de traitement 141
Figure 6.5 : Pertes d'eau dans le réseau 142

Figure 7.1 : Estimation de la population entre 2001 et 2026 149
Figure 7.2 : Couverture du service d'eau potable par système, actuelle et prévue pour 2026 150
Figure 7.3 : Comparaison CJE, valeurs calculées et prévues 151
Figure 7.4 : CJE dans le monde 152
Figure 7.5 : Consommation domestique journalière en eau par habitant selon Eurostat 152
Figure 7.6 : Estimation des consommations (2001-2026) El Alto 154
Figure 7.7 : Estimation des consommations (2001-2026) : Pampahasi 154
Figure 7.8 : Estimation des consommations (2001-2026) : Achachicala 154
Figure 7.9 : Analyse de sensibilité selon l'augmentation de la CJE et la diminution des pertes, El Alto 156
Figure 7.10 : Scenarios du besoin de prélèvement d'eau aux sources (El Alto) 157
Figure 7.11 : Besoin de prélèvement d'eau aux sources (El Alto), Ecart type 158
Figure 7.12 : Besoin de prélèvement d'eau aux sources (El Alto), (Max et min) 158

Figure 8.1 : Bilans de l'offre et de la demande en eau pour les différents systèmes pour la période 2001–2026 164
Figure 8.2 : Estimation de l'influence de chaque variable sur le bilan de l'offre et de la demande (Bilan pour l'année 2026) 166
Figure 8.3 : Scenarios de bilan d'offre et demande d'eau d'El Alto en tenant en compte un possible apport de la nappe 167
Figure 8.4 : Proposition de mise en œuvre de la gestion en fonction de l'infrastructure nécessaire 169
Figure 8.5 : GIRE comme une proposition de construction d'une stratégie de planification de l'eau 175

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : « Dates de repère » de la vision stratégique de l'eau 3
Tableau 1.2 : Principales caractéristiques du service des systèmes d'approvisionnement d'eau potable 10
Tableau 1.3 : Bassins versants source fournissant l'eau à La Paz et El Alto 11
Tableau 1.4 : Caractéristiques des barrages de régulation 11
Tableau 1.5 : Pluviosité annuelle, zone d'étude, par bassin versant (2000-08) 12
Tableau 1.6 : Écoulement par bassin versant (2000-08) 12

Tableau 2.1 : Aspects nécessaires pour l'application de la GIRE à une gouvernance de l'eau 28

Tableau 3.1 : Données disponibles pour étudier les précipitations 40
Tableau 3.2 : Surfaces des bassins versants 42
Tableau 3.3 : Prévision du changement actuel des précipitations (Moyenne de 7 modèles IPCC) 46
Tableau 3.4 : Prévisions de l'augmentation des précipitations PNCC-PRAA (2007) 47
Tableau 3.5 : Besoin en précipitation des Bassins versants alimentant La Paz et El Alto [mm/an] 64

Tableau 4.1 : Coefficient d'écoulement moyen 74
Tableau 4.2 : Résultat de l'application de l'algorithme du bilan hydrologique (Valeurs totales 2000-08) 82
Tableau 4.3 : Résultat de forçage de P : Estimation de G_0 88
Tableau 4.4 : Résumé des résultats 93

Tableau 5.1 : Vérification des données et références de Chacaltaya 108
Tableau 5.2 : Valeurs de β 110
Tableau 5.3 : Paramètres employés pour la modélisation 110
Tableau 5.4 : Résultats Etape I 111
Tableau 5.5 : Résultats finaux de la deuxième étape de calibration 116
Tableau 5.6 : Références et résultats de la modélisation du recul du glacier de Chacaltaya 1998-2010 118
Tableau 5.7 : Moyenne en pourcentage des différences des valeurs entre les épaisseurs calculées pour la méthode de Farinotti et les mesurés sur terrain 126
Tableau 5.8 : Valeurs estimées du stock glaciaire dans les bassins et Systèmes d'eau de La Paz et El Alto 129
Tableau 5.9 : Volumes d'eau estimés, stockés sans les glaciers sources des villes de La Paz et El Alto 132

Tableau 6.1 : Capacité des barrages 135
Tableau 6.2 : Disponibilité des ressources pour chaque bassin 137
Tableau 6.3 : Besoin théorique en eau qui devrait être envoyée aux usines de traitement 138
Tableau 6.4 : Pertes dans les adductions 139
Tableaux 6.5 : Bilan d'eau du barrage à l'usine de traitement [Hm^3/an] 140
Tableaux 6.6 : Pertes d'eau des usines de traitement [m^3] 141
Tableaux 6.7 : Pertes d'eau dans le réseau [m^3] 142
Tableau 6.8 : Pertes totales par système 144

Tableau 7.1 : Population et taux de croissance annuelle en fonction du système 147
Tableau 7.2 : Population par système entre 2001 et 2026 149
Tableau 7.3 : Couverture du service d'eau potable par système, actuelle et prévue pour 2026 150
Tableau 7.4 : CJE par systèmes et par activités 151
Tableau 7.5 : El Alto : Valeurs de référence pour l'estimation des demandes (2001-2026) 154
Tableau 7.6 : Pampahasi : Valeurs de référence pour l'estimation des demandes (2001-2026) 154
Tableau 7.7 : Achachicala : Valeurs de référence pour l'estimation des demandes (2001-2026) 154
Tableau 7.8 : Demandes en eau par système 155

Tableau 8.1 : Valeurs de l'offre pour la situation de base (hm^3) 162
Tableau 8.2 : Résumé des paramètres des scénarios de bilan de l'offre et de la demande en eau 163

ACRONYMES

AISA :	*Aguas del Illimani S.A.*
CAF :	*Corporación Andina de Fomento (Corporation Andine de Promotion vers le développement)*
CAMINAR :	*Catchment Management and Mining Impacts in Arid and Semi-Arid South America*
CGIAB :	*Comisión para la Gestión Integral del Agua en Bolivia (Commission pour la Gestion Intégrée de l'Eau en Bolivie)*
DANIDA :	*Danish International Development Agency (L'Agence danoise pour le développement international)*
EISMINT :	*European Ice Sheet Modeling INiTiative*
ELA :	*Equilibrium Line Altitude*
ENC :	*Eaux non comptabilisées. (ANC : Aguas no contabilizadas)*
ENSO :	*El Niño - Southern Oscillation*
EPSAS :	*Empresa Pública y Social del Agua y Saneamiento (Enterprise Publique et sociale de l'eau et de l'assainissement)*
GIRE :	*Gestion Intégrée des Ressources en Eau*
GIRH :	*Gestión Integral de Recursos Hídricos*
GREATICE :	*Programme Glaciers et Ressources en Eau d'Altitude, Indicateurs Climatiques et Environnementaux de l'IRD*
GWP :	*Global Water Partnership*
IGM :	*Institut Géographique Militaire*
IHH :	*Instituto de Hidráulica e Hidrología de l'UMSA (Institut d'Hydraulique et d'Hydrologie de l'Université de San Andrés à La Paz, en Bolivie)*
INE :	*Instituto Nacional de Estadísticas (Institut National des Statistiques)*
IPCC :	*Intergovernmental Panel on Climate Change / GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*
IRD :	*Institut français de Recherche pour le Développement*
IWRM :	*Integrated Water Resources Management*
JICA :	*Japan International Cooperation Agency*
MMAyA :	*Ministerio de Medio Ambiente y del Agua (Ministère de l'Environnement et de l'Eau)*
MNT :	*Modèle Numérique de Terrain*
NCAR :	*National Center for Atmospheric Research*
NCEP :	*National Center for Environemental Prediction*
PAG :	*Petit Age Glaciaire*
PDM :	*Plan de Desarrollo Municipal (Plan de développement de la municipalité)*
PIEB :	*Programa para la Investigación Estratégica en Bolivia (Programme de Recherche Stratégique en Bolivie)*
PMIC :	*Plan de Manejo Integrado de Cuencas (PGIB : Plan de gestion intégrée des bassins versants)*
PNCC :	*Programa Nacional de Cambio Climático (Programme National de Changement Climatique)*
PND :	*Plan Nacional de Desarrollo (Plan National de Développement)*
PNUD :	*Programme des Nations Unies pour le développement*
POT :	*Plan de Ordenamiento Territorial (PAT : Plan d'aménagement du territoire)*
PRAA :	*Programa Regional Andino de Adaptación al Cambio Climático (Programme régional andin d'adaptation au changement climatique)*
PROMIC :	*Programa de Manejo Integral de Cuencas (Programme National de Gestion Intégrée des Bassins Versants)*

SAMAPA :	*Servicio Autónomo Municipal de Agua Potable y Alcantarillado. (Service Autonome Municipal Eau Potable et Égouts)*
SENAMHI :	*Servicio Nacional de Meteorologia e Hidrologia (Service National de Météorologie et Hydrologie de Bolivie)*
SERGEOTECMIN :	*Servicio Nacional Geológico y Técnico de Minas (Service Géologique Technique et des Mines).*
SISAB :	*Superintendencias de Aguas y Saneamiento Básico (Surintendance d'Eaux et d'assainissement → Ancien Institution qui etais l'autorité en matière des eaux en Bolivie)*
SS :	*Etat stationnaire ou steady-state*
TCO :	*Tierra Comunitaria de Origen (Terre Communautaire d'Origine).*
UMSA :	*Universidad Mayor de San Andrés (Université de San Andrés à La Paz, en Bolivie)*
UMSS :	*Universidad Mayor de San Simón (Université de San Simón à Cochabamba, en Bolivie).*
UTM :	*Universal Transverse Mercator*
WGS84 :	*World Geodetic System 1984*
ZCIT :	*Zone de convergence intertropicale*

LISTE DES SYMBOLES

Chapitre 3

$AnJref(i)$:	Anomalie de J(i) par rapport au Jref(i)
ICP :	Indice de concentration des précipitations
$J_{(i)}$:	Jour de l'année hydrologique ($1< i < 365$)
$J_i max_{(S)}$:	Dernier jour de l'année hydrologique où il peut arriver P_i pour une proportion de précipitation Si
$J_i min_{(S)}$:	Premier jour de l'année hydrologique où il peut arriver P_i pour une proportion de précipitation Si
$Jref(i)$:	Jour i de l'année hydrologique de la période de référence, (1961-1990) On peut associer une date qui correspondra au jour de référence Jref(i) pour la proportion S(i)
$Nref$:	Pourcentage de référence de précipitation journalière ou période Jref(i+1)-Jref(i).
$P\ cumulé_1$:	Précipitation cumulée jusqu'au moment $J_i min_{(s)}$ [mm]
$P\ cumulé_2$:	Précipitation cumulée jusqu'au moment $J_i max_{(S)}$ [mm]
P :	Précipitations [mm]
Pi :	Précipitation cumulée jusqu'au jour Ji de l'année hydrologique, ($1< i < 365$) [mm]
P_T :	Précipitation cumulée totale d'une année hydrologique [mm]
$PTotale\_annuelle_{(S)}$:	Prédiction de la précipitation totale annuelle prévue à partir des valeurs associées aux proportions de la précipitation totale (S) [mm]
Q :	Apport en eau du bassin versant [m^3]
r :	Période où a lieu la précipitation S(i+1)-S(i), pour la période de référence.
s :	Période où a lieu la précipitation S(i+1)-S(i), pour l'année d'analyse.
$S(i)$:	Proportion de la précipitation annuelle qui correspond au moment J(i) ($0< Si <1$),
T :	Température [°C]
ΔC :	Augmentation de la précipitation durant la période Jref(i+1)-Jref(i).(Augmentation (+), Diminution (-))
ΔJ :	Différence de jours entre la période de base Jref(i+1)-Jref(i) et la période de l'année en analyse pour J (i+1)-J (i)

Chapitre 4

$Cesc$:	Coefficient d'écoulement
E :	Écoulement (débit) [mm]
E_R :	Débit qui arrive au point de contrôle de la rivière / Écoulement provenant du bassin alimentant le barrage [mm]
ETP_{BV} :	Evapotranspiration au sein du bassin versant (à l'exclusion des eaux d'origine glaciaire [mm]
ETP_L :	Evapotranspiration lac du barrage [mm]
E_{TW} :	Écoulement de Thornwaite [mm]
Ev_L :	Evaporations provenant des surfaces (sol ou de l'eau) (Zone du barrage) [mm]
G :	Apport en eau des glaciers [mm]
G_N :	Apport glaciaire net, qui arrive au point de contrôle de la rivière [mm]
G_O :	Apport glaciaire en amont du bassin, au pied du glacier
Inf_{BV} :	Infiltration de l'eau dans le sol au sein du bassin versant (approvisionnement de la nappe phréatique) [mm]
Inf_L :	Infiltration du lac de barrage [mm]
N :	Echange en eau entre la nappe et le bassin versant [mm]

P :	Précipitations [mm]
R :	Proportion de l'écoulement qui fait partie de l'apport glaciaire
SP :	Surplus du barrage [mm]
Tv_L :	Transpiration végétale (sur lac du barrage) [mm]
U :	Débit envoyé à l'usine de traitement des eaux [mm]
$V_{(t+\Delta t)}$:	Volume d'eau du système moment ($t+\Delta t$) [mm]
Vol_{in} :	Volume qui arrive au système sur la période Δt [mm]
Vol_{out} :	Volume qui sort du système sur la période Δt [mm]
V_t :	Volume d'eau du système moment (t) [mm]
ΔV :	Changement du stock du système sur la période Δt [mm]
$VCR_{i(v)}$:	Valeur centrée –réduite de la variable V, pour l'année i.
μ :	Moyenne des valeurs V_i
σ :	Ecart type des valeurs V_i

Chapitre 5

α :	pente dans le sens de la ligne de flux
β :	Gradient altitudinal du bilan de masse
$\dot{\varepsilon}_{xz}$:	taux de déformation dans le sens x due à la contrainte de direction z
ρ :	densité de la glace [kg m^{-3}]
$\vec{u}$:	champ de vitesse [m a^{-1}]
$A(T)$:	paramètre de la loi de flux dépendant de la température [Pa^{-n} an^{-1}]
B :	Topographie basale
BM :	bilan de masse [m a^{-1}]
g :	accélération gravitationnelle [m s^{-2}]
H :	épaisseur de glace [m]
n :	exposant de la loi de flux de Glen (n=3 ; Paterson, 1994)
S :	Surface [km^2]
t :	temps [an]
$TD_{(i,j)}$:	contrainte directrice au point (i,j) (Driving Stress), [N m^{-2}]
Tii :	contrainte agissant dans la direction i sur le plan perpendiculaire à la direction i [N m^{-2}]
V:	Volume [km^3]

Chapitre 6

E :	Écoulement
Epr :	Écoulement associée à une valeur de probabilité. [mm Km^{-2}]
P :	Précipitation [mm]
Ppr :	Précipitation associée à une valeur de probabilité [mm]
pr :	Valeur de probabilité
Q :	Débit d'apport du bassin [m^3 an^{-1}]
$Qbes$:	Débit à prélever du barrage pour répondre aux besoins en eau de la population [m^3 an^{-1}]
Qpr :	Débit d'apport du bassin associé à une valeur de probabilité [hm^3 an^{-1}]
$Tbes$:	Temps de résidence indispensable pour couvrir les besoins en eau de la population [mois]
$Tres$:	Temps de résidence [mois]
Vef :	Volume effectif du barrage [m^3]

Chapitre 7

CJE :	*consommation journalière en eau par habitant [m^3]*
Cr :	*couverture du réseau*
i :	*Indice ou taux de croissance annuelle*
Pf :	*population future [hab]*
Po :	*population de référence [hab]*
Pop :	*population [hab]*
t :	*temps [an, mois]*

Demande :

$D_{réseau}$:	Consommation en eau de la population du réseau *[m^3]*
$D_{out\ Usine}$:	*Quantité d'eau à la sortie de l'usine de traitement [m^3]*
$D_{in\ Usine}$:	Volume d'eau *entrant de l'usine de traitement ;* volume provenant des barrages *[m^3]*
$D_{sources}$:	Volume d'eau qui doit être prélevé des bassins versants *[m^3]*

Pertes :

Pertes_Réseau :	*au réseau [m^3]*
Pertes_usne_traitement :	*dans l'usine de traitement d'eau [m^3]*
Pertes_aduction :	*dans l'aducction [m^3]*

1 INTRODUCTION

Cette thèse porte sur ***la détermination des bases permettant la gestion de l'eau potable des villes de La Paz et El Alto en Bolivie*** :

Notre objectif est de déterminer les bases permettant l'application de la GIRE (Gestion Intégrée des Ressources en Eau) en tenant compte aussi bien ses concepts guide, que des contextes et des particularités du cas analysé.

Dans le cadre de cette thèse, les bases de l'application de la GIRE ont comme origine l'analyse des enjeux de la gestion de l'eau et des variables dont elle dépend principalement.

On utilise l'analyse des variables qui jouent un rôle dans la gestion de l'eau comme un outil pour arriver à déterminer les bases évoquées ci-dessus. Néanmoins l'étude faite sur ces variables, se limite à un niveau tel qu'elle puisse fournir l'information minimale nécessaire permettant de mettre en route la GIRE pour les villes de La Paz et El Alto.

Une recherche approfondie de chaque variable jouant un rôle dans la gestion de l'eau n'est pas l'objectif de cette thèse.

Cette thèse est une recherche de type appliquée, qui cherche à donner des réponses aux problèmes de pénurie d'eau envisageables à La Paz et El Alto et à fournir quelques recommandations techniques pour la gestion de l'eau.

1.1 De l'eau

La signification de ce mot de 3 lettres en langue française (en espagnol AGUA, en anglais WATER) est très vaste et fondamentale pour la vie de l'être humain et sa subsistance du fait qu'elle conditionne à plusieurs reprises son mode de vie. L'influence de l'eau va au-delà de l'individu, elle agit sur sa société, sa communauté et son pays.

Pour l'être humain, la question de l'eau est, à la fois vitale et commune dans sa vie quotidienne. En effet, l'impact que cet élément a dans son existence se manifeste à travers les activités élémentaires et basiques de subsistance quotidienne, ainsi que dans d'autres domaines à grande échelle tels que les définitions de frontières internationales ou régionales. Le problème de l'eau définit des stratégies d'emplacement des communautés ou des positionnements diplomatiques d'un pays déterminé par rapport aux intérêts stratégiques de sa région.

L'eau peut être synonyme de développement ou de déclin. Elle représente à la fois un bienfait et une misère. Elle peut définir la vision stratégique d'un secteur déterminé de la population, d'une région ou d'un pays. Selon quelques auteurs, l'eau est synonyme de bien-être ou de conflit.***(Lasserre F. 2007;WBGU 2007)***

L'importance de l'eau est indiscutable. Il existe beaucoup de littérature sur ce thème. Il est intéressant de remarquer que l'eau s'avère unanimement reconnue dans toutes les définitions de vision stratégique de développement au niveau mondial. A ce sujet, on peut relever les faits suivants :

En 1977, la conférence de Mar del Plata lance le débat sur les enjeux de l'eau et propose l'organisation d'une décennie de l'eau (1980-1990) ***(Burton J. 2001)****. En 1992 à Dublin, rédaction de la déclaration des principes fondamentaux de l'eau et de son usage durable.*

> *Principe 1 : 'L'eau douce - ressource fragile et non renouvelable - est indispensable à la vie, au développement et à l'environnement'*
> *Principe 2 : 'La gestion et la mise en valeur des ressources en eau doivent associer usagers, planificateurs et décideurs à tous les échelons'*
> *Principe 3 : 'Les femmes jouent un rôle essentiel dans l'approvisionnement, la gestion et la préservation de l'eau'*
> *Principe 4 : 'L'eau, utilisée à de multiples fins, a une valeur économique et devrait donc être reconnue comme bien économique.'*
>
> *Déclaration de Dublin, Principes directeurs, 1992, in****(Burton J. 2001;IRC 2006)***

Pour montrer l'importance que le monde accorde à la thématique de l'eau et à son usage stratégique, nous avons listé, dans le Tableau 1.1, les sommets et les « dates de repère » où ce thème fut abordé. Il faut remarquer que, bien que certaines de ces réunions, forums ou conférences, n'avaient pas l'eau comme sujet central, leurs conclusions et les déclarations stratégiques reconnaissent son importance pour le développement humain. D'une façon similaire, ***elles identifient la gestion de l'eau comme la voie pour atteindre les buts projetés*** dans leurs programmes et leurs rapports.

1.2 Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE)

Pendant les années 70, l'être humain a commencé à prendre conscience de l'importance des ressources naturelles et de leurs préservations[1] (Tableau 1.1). En 1972, à Stockholm, on souligne la nécessité de préserver les ressources naturelles et l'eau est présentée comme une ressource fondamentale.

Quelques années plus tard, la notion de gestion évolue bien que l'on ne détermine pas le moment précis où le concept de nécessité de gestion de l'eau pour le développement est apparu avec une vision de type holistique. On constate que, déjà en 1992, le sujet est traité officiellement dans la Déclaration de Dublin ***(voir Principe No 2)***. A partir de ce moment-là, on commence à suggérer un concept plus élargi, celui de la GIRE (Gestion Intégrée des Ressources en Eau) ***(IRC 2006)*** ou GIRH (Gestión Integral de Recursos Hídricos) ou IWRM (Integrated Water Resources Management)[2].

Ce concept recouvre plusieurs définitions qui sont proches les unes des autres :

> *La GIRE est un processus qui encourage la mise en valeur et la gestion coordonnée de l'eau, des terres et des ressources associées en vue de maximiser le bien-être économique et social qui en résulte d'une manière équitable, sans compromettre la durabilité d'écosystèmes vitaux.* ***(Partenariat Mondial de l'Eau 2000 in IRC 2006)***
>
> *La GIRE est un processus d'attribution de fonctions à des systèmes d'eau, l'établissement de normes, la mise en vigueur (surveillance) et la gestion. Elle comprend la collecte de données, l'analyse de processus physiques et socioéconomiques, la considération des différents intérêts et la prise de décisions par rapport à la disponibilité, l'exploitation et l'usage des ressources en eau.* ***(Hofwegen et Jaspers 1999 in IRC 2006)***
>
> *La GIRE est une question de planification et de gestion coordonnées des terres, de l'eau et d'autres ressources naturelles en vue de leur utilisation équitable, efficace et durable* ***(Calder 1999 in IRC 2006)***
>
> *La GIRE exprime l'idée que les ressources en eau devraient être gérées de façon holistique, en coordonnant et en intégrant tous les aspects et les fonctions du prélèvement de l'eau, de la surveillance de l'eau et de la fourniture des services liés à l'eau, afin que ceux qui dépendent des ressources en profitent durablement et équitablement.* ***(CE 1998 in IRC 2006)***
>
> *La GIRE est un processus permettant de passer d'un état présent à un état meilleur envisageable dans le futur, en appliquant des principes ou des bonnes pratiques de gestion de l'eau convenues en commun, avec la participation de toutes les parties prenantes.* ***(IRC 2006)***

[1] *Les ressources naturelles, du point de vue durable, et pas seulement en tant que bien économique.*
[2] *On insiste sur les traductions correctes de la GIRE, à des fins pratiques de références bibliographiques.*

Tableau 1.1 : « Dates de repère » de la vision stratégique de l'eau

Dates	Évènements	Résultats
1972	**Conférence des Nations Unies sur l'Environnement, Stockholm** Préserver et enrichir l'environnement	Déclaration de la Conférence des Nations Unies sur l'Environnement
1977	**Conférence des Nations Unies sur l'Eau, Mar del Plata** Evaluation et utilisation des ressources en eau	Plan d'action de Mar del Plata
1990	**Consultation mondiale sur l'approvisionnement en eau et l'assainissement pour les années 90, New Delhi** Eau potable, hygiène environnementale	Déclaration de New Delhi : 'Un peu pour tous vaut mieux que beaucoup pour peu de monde.'
	Sommet Mondial pour les enfants, New York Santé, approvisionnement en alimentation	Déclaration mondiale pour la survie, le développement et la protection des enfants.
1992	**Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement (Sommet Planète Terre), Rio de Janeiro** Coopération, économie et eau, participation, eau potable et assainissement, établissements humains, développement durable, production alimentaire, changements climatiques	Déclaration de Rio sur l'environnement et le développement - Action 21
	Conférence internationale sur l'eau et l'environnement, Dublin La valeur économique de l'eau, les femmes, la pauvreté, la résolution de conflits, les désastres naturels, la prise de conscience	Déclaration de Dublin sur l'eau dans la perspective d'un développement durable
1994	**Conférence internationale des Nations Unies sur la population et le développement, Le Caire**	Programme d'action
	Conférence ministérielle sur l'eau potable et l'assainissement, Noordwijk Approvisionnement en eau potable et assainissement	Programme d'action
1995	**4e Conférence mondiale des Nations Unies sur les femmes, Beijing** Les femmes, l'approvisionnement en eau et assainissement	Déclaration de Beijing et plate-forme d'action
	Sommet mondial pour le développement social, Copenhague Pauvreté, approvisionnement en eau et assainissement	Déclaration de Copenhague sur le développement social
1996	**Sommet mondial de l'alimentation, Rome** Alimentation, santé, eau et assainissement	Déclaration de Rome sur la sécurité alimentaire mondiale
	Conférence des Nations Unies sur les établissements humains (Habitat II), Istanbul Développement d'établissement humains durables dans un monde qui s'urbanise	Le programme pour l'Habitat
1997	**1er Forum mondial de l'eau, Marrakech** Eau et assainissement, gestion des eaux partagées, conservation des écosystèmes, égalité des sexes, utilisation efficace de l'eau	Déclaration de Marrakech
2000	**2e Forum mondial de l'eau, La Haye** L'eau pour les hommes, l'eau pour l'alimentation, l'eau et la nature, l'eau dans les rivières, la souveraineté, éducation sur le partage des eaux entre bassins	Vision mondiale de l'eau : l'affaire de tous
2001	**Conférence internationale sur l'eau douce, Bonn** L'eau clef du développement durable, gouvernance, mobilisation des ressources financières, renforcement des capacités, partage des connaissances	Déclaration ministérielle Recommandations concernant les mesures à prendre
2002	**Sommet mondial sur le développement durable, Rio +10, Johannesburg** Élimination de la pauvreté, assainissement, énergie, financement, gestion intégrée des ressources en eau, Afrique	Plan d'application
2003	**3ème Forum mondial de l'eau, Japon** Gouvernance, gestion intégrée des ressources en eau, genre, pauvreté, financements, coopération, développement des capacités, efficacité de l'utilisation de l'eau, prévention de la pollution des eaux, réduction des désastres	Déclaration ministérielle 1ère édition du Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau.
2006	**4ème Forum mondial de l'eau, Mexico**	Déclaration ministérielle L'eau pour la croissance et le développement, implémenter la Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE), l'approvisionnement en eau et l'assainissement pour tous, la gestion de l'eau pour la nourriture et l'environnement, la gestion des risques, la responsabilité des gouvernements, l'augmentation des engagements financiers. 2ème édition du Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau
2009	**Istambul : 5ème Forum mondial de l'eau, Istambul**	Déclaration ministérielle 3ème édition du Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau

(IRC 2006;UNESCO 2009)

En général, on considère que la GIRE peut jouer un rôle fondamental, non seulement dans la planification de l'utilisation de l'eau, mais dans d'autres situations d'intérêt dans les affaires humaines comme la gestion de l'eau souterraine et superficielle, le règlement des conflits, la réduction de la pauvreté, la maîtrise de la pollution, la réduction des risques pour la santé ***(IRC 2006)***.

Par ailleurs, une analyse objective de la problématique de l'eau par rapport à sa gestion intégrée nous conduit à une autre perspective de la problématique de l'eau :

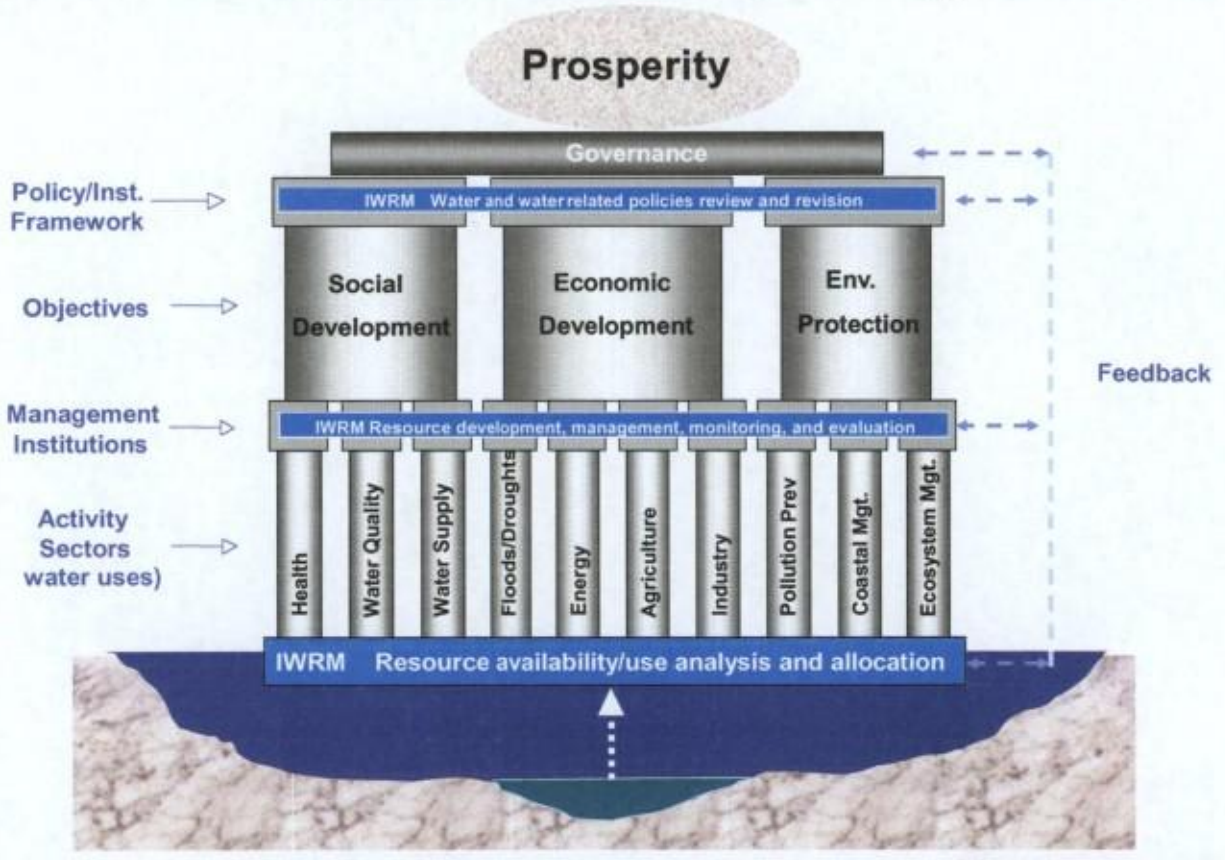
> *«Il existe aujourd'hui une crise de l'eau, mais cette crise n'est pas due à son insuffisance à satisfaire nos besoins ; elle résulte plutôt d'une si mauvaise gestion de cette ressource que des milliards de personnes – et l'environnement – en souffrent grandement.»* ***(GMP 2000 in Burton J. 2001)***.

Cette affirmation est certainement valable de nos jours dans beaucoup de lieux du monde. De plus, on prévoit que la pénurie d'eau potentielle sera aggravée par la croissance de la population et par d'autres aspects comme les effets du changement climatique ***(IPCC 2007)***. Ainsi, on risque d'avoir à l'avenir un double problème de manque d'eau et de manque de planification de la ressource.

En résumé, la vision de la GIRE représente l'unification de critères de développement durable, social et économique, en recommandant de prendre en considération la totalité des acteurs. ***(Duran A. 2009)***

En termes pragmatiques, la gestion peut être définie comme une voie de construction de la prospérité, à travers le bilan de l'utilisation de l'eau pour les différentes activités de la société, qui donne lieu à un développement social et économique équilibré dans un cadre durable, ce qui se traduit à son tour en une voie directe vers la prospérité à travers la gouvernance de la ressource. (Figure 1.1).

Figure 1.1 : Définition de la gestion de l'eau comme une voie pour le développement et le bien-être



(GMP 2006 in Duran A. 2009)

1.3 L'application de la GIRE dans cette thèse

Bien que la théorie de la GIRE se développe dans un cadre qui peut être qualifié de logique simple et concrète dans les actions à effectuer, et que sa mise en œuvre peut paraître facile, la mise en pratique peut être décourageante étant donné son échelle et la complexité des changements qui sont nécessaires pour la mettre en marche totalement. ***(IRC 2006)***. Toutefois, il est nécessaire d'observer aussi que chacun des changements effectués est une avancée dans un domaine et un concept qui est relativement nouveau dans le cadre mondial. ***(UNESCO 2006)***

> *Si la GIRE est la solution pour la stratégie de l'eau, comment peut-on l'utiliser en Bolivie ? Comment l'appliquer dans ses villes et ses communautés ? Quelles sont les bases nécessaires pour son application ?*

Le Global Water Partnership (GWP) offre un "toolbox" pour la mise en œuvre de la GIRE ***(GWP 2007)*** dans lequel, comme dans d'autres publications similaires ou manuels sur le sujet – voir celui de Burton ***(2001)*** – sont consignées comme premier pas de la gestion, l'évaluation des ressources hydriques, la connaissance de ces ressources et les nécessités spécifiques pour son application.

En nous penchant sur le cas de l'eau potable dans les villes de La Paz et d'El Alto, notre attention est attirée par une première question :

> *Connaissons-nous les ressources en eau à notre disposition, leurs projections et leurs vulnérabilités ?*

Malheureusement, nous n'avons pas une connaissance réelle et actualisée du potentiel des ressources de certains bassins avec le détail nécessaire dont la GIRE a besoin, ni une planification stratégique de la ressource eau à une échelle régionale et locale. De même, on ne connaît pas l'influence de plusieurs variables qui influencent tant la disponibilité d'eau dans les bassins que la nécessité en eau de leurs habitants.

Il est nécessaire de rappeler que les échelles locales et régionales sont très importantes dans la pratique de la GIRE, puisque c'est à ce niveau que l'on trouve les véritables défis de la planification et les problèmes pratiques comme ceux qui sont traités dans l'étude de cas, sujet de cette thèse ***(Burton J. 2001;GWP 2007;IRC 2006)***.

Au début de cette étude (2007), le futur de la disponibilité en eau potable dans les villes de La Paz et El Alto était et demeure, de nos jours, un sujet préoccupant. On perçoit, en effet, un problème concernant la possibilité de rendre durable la ressource en eau des bassins de ces deux villes étant donné que les sources superficielles pourraient être affectées par le recul des glaciers dans la Cordillère des Andes.

En structurant cette recherche, nous avons observé que la GIRE pourrait être une bonne option pour déterminer la stratégie à suivre. Une étude des variables de la gestion de l'eau de ces deux villes est toutefois nécessaire pour pouvoir poser les bases de la mise en route de la GIRE.

Dans le cas particulier de cette recherche, la préoccupation concernant la gestion des ressources hydriques est apparue à la suite des conclusions des études de l'Institut français de Recherche pour le Développement (IRD) réalisées en collaboration avec l'Instituto de Hidráulica e Hidrología (IHH) de l'Universidad Mayor de San Andrés (UMSA). Ces investigations révélaient le problème de la disponibilité future des ressources en eau pour les villes de La Paz et El Alto ***(Ramírez E. & C. Olmos 2007)***.

L'IRD et l'IHH travaillent en collaboration depuis 1991 en territoire bolivien sur le recul des glaciers tropicaux dans cette partie du monde. Le programme défini par les chercheurs français et nommé "Glaciers et Ressources en Eau d'Altitude, Indicateurs Climatiques et Environnementaux" (GREATICE) s'étend aux pays voisins, le Pérou, l'Equateur et l'Argentine et constitue le premier apport à caractère scientifique, basé sur une série d'observations continues dans cette partie de la planète ***(Ribstein P. 2003)***.

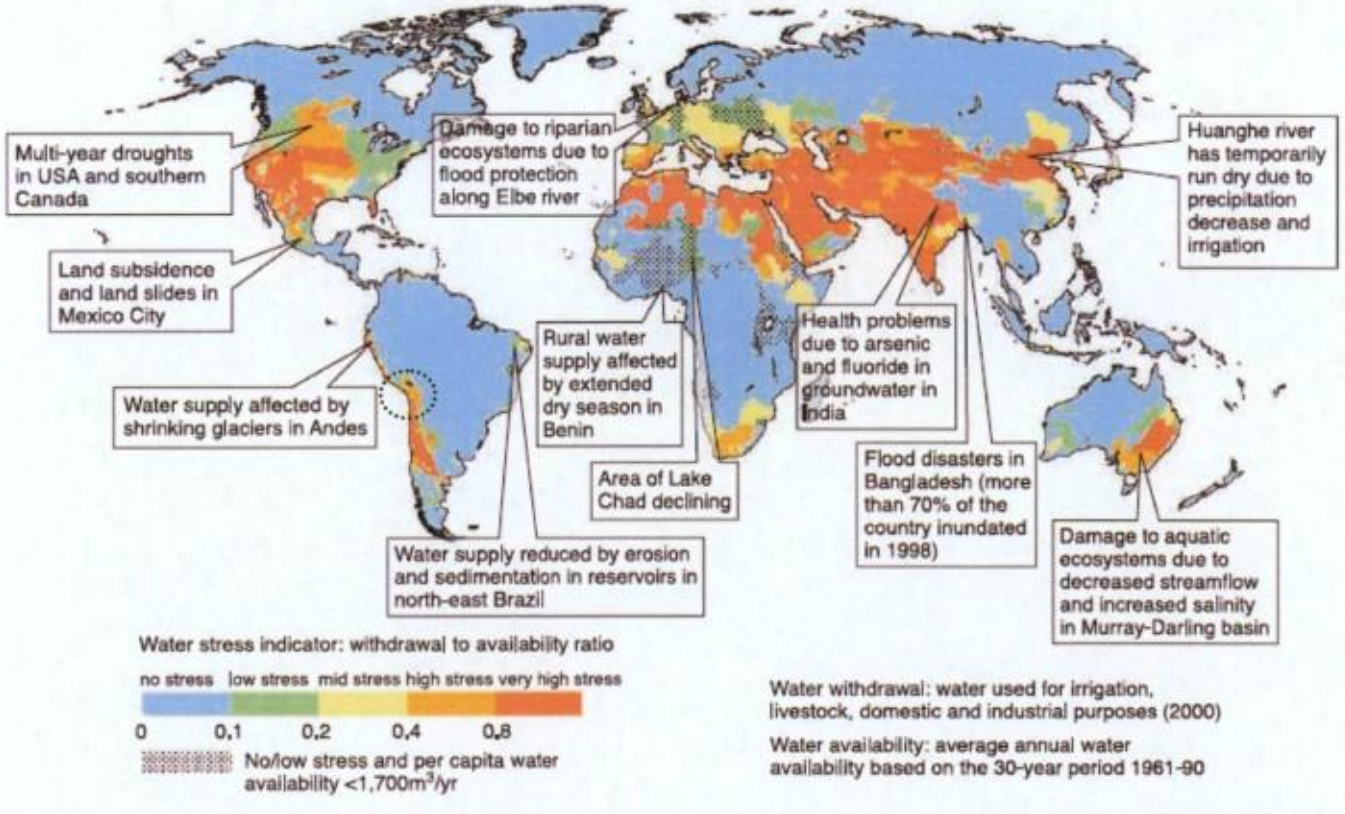
Durant l'année 2006, une équipe appartenant au groupe de travail IRD-IHH a mené une recherche de prospection et de diagnostic sur les bassins de Tuni et Condoriri et sur les ressources hydriques de la ville d'El Alto *(Ramírez E. & C. Olmos 2007)*. Elle en a conclu que, à partir de l'année 2009, il pourrait exister un déséquilibre entre l'offre des bassins sources et la demande en eau potable de la ville d'El Alto. Elle a également estimé la disparition possible des glaciers Tuni et Condoriri, pour les années 2025 et 2045 respectivement.

Dans ce travail, ces deux glaciers ont été les principaux sujets d'analyse par rapport aux apports en eau d'origine glaciaire pour ces bassins, malgré le fait qu'il existe d'autres glaciers sur les mêmes bassins, qui comptent une surface plus importante (voir Tableau 1.3).

Suite à l'hypothèse d'un retrait des glaciers Tuni et Condoriri, une recherche préliminaire a été réalisée pour analyser comment et quand planifier la gestion de l'eau face à un tel scénario. Il est apparu que de nombreuses variables importantes n'avaient pas été prises en considération. Tous ces antécédents et la nécessité de mettre en relief les questions soulevées ont été les bases de recherche de cette thèse doctorale.

Sur un plan plus global, il existe également des mises en garde sur un scénario de stress hydrique qui pourrait se produire dans la région andine et spécialement dans les villes dont les bassins sources comprennent un manteau glacier *(IPCC 2007)*. La Figure 1.2 montre que la zone correspondant à la localisation des villes de La Paz et d'El Alto est classée comme une région avec une forte probabilité de stress hydrique.

Figure 1.2 : Vulnérabilité entre les ressources en eau douce et leur gestion *(Fig. 3.2 Rapport IPCC, 2007)*



(IPCC 2007)

Les glaciers de Chacaltaya, Zongo et Charquini sont les principaux exemples cités dans ce le rapport de l'IPCC, dans son chapitre 13 en associant leur recul à une probable pénurie hydrique. Le glacier de Chacaltaya, qui est un des cas étudiés dans ce rapport, est devenu une icône des impacts du changement climatique aux latitudes proches de l'équateur.

Certaines des photos, prises par des chercheurs de l'équipe de GREATICE-IHH, sont présentées dans les premières pages du rapport pour illustrer le processus de recul des glaciers. ***(IPCC 2007 Cap 1, Box 1.1, pg. 87)***.

Suite à ces avertissements et aux aspects précédemment mentionnés, il est nécessaire d'effectuer une recherche appliquée permettant la vérification et l'estimation de l'ampleur de ce stress hydrique potentiel et de son impact sur les systèmes de provision d'eau potable ainsi que des variables affectant la gestion de la ressource hydrique.

Beaucoup d'aspects sont encore inconnus, comme le rôle des glaciers dans leur apport en eau au bassin versant, le stock glacier existant, le comportement des précipitations, l'apport total et potentiel en eau des bassins versants, les réserves en eau souterraine et l'impact de la démographie.

Considérant la GIRE comme une solution permettant de gérer les ressources en eau disponibles, il apparaît nécessaire de déterminer les bases nécessaires à son application en tenant compte des particularités du contexte du cas étudié.

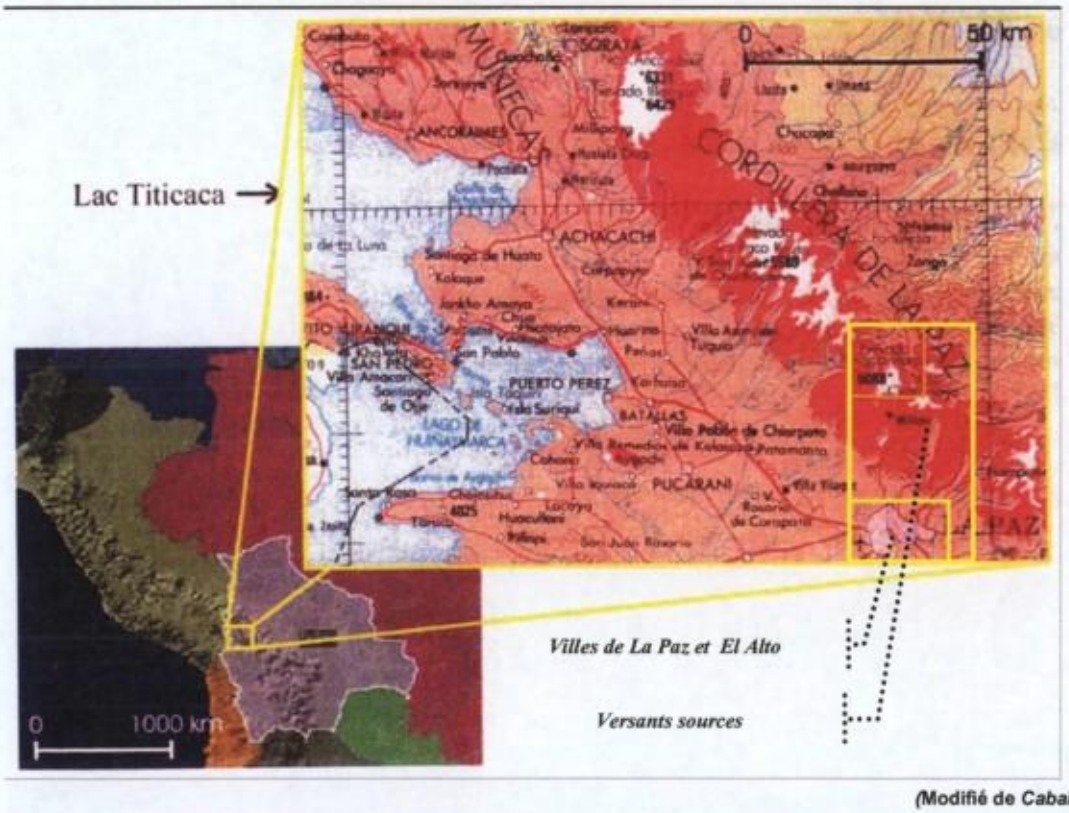
1.4 La Bolivie, La Paz et El Alto, contexte de la recherche

1.4.1 Situation géographique

La Bolivie est un pays situé au centre de l'Amérique du Sud, sa superficie atteint 1.098.000 km^2 (2 fois celle du territoire français et 35 fois celle de la Belgique). Elle présente une grande richesse de ressources et une diversité de climats et d'étages écologiques qui vont de Los Andes, à 6500 mètres d'altitude, à l'Amazonie, à 110 m, en passant par le plateau El Altiplano, à 4000 m ***(Montes de Oca I. 2005)***.

La partie altiplanique de la Bolivie (Figure 1.3), enfermée entre les Cordillères occidentale et orientale des Andes, est responsable du qualificatif d'andin attribué à la Bolivie en dépit du fait que cette partie altiplanique ne représente qu'un tiers de sa surface. Notre zone d'étude se situe dans cette région, du côté ouest, dans la Cordillère orientale aussi appelée Cordillère royale, à la frontière qui sépare l'Altiplano de la pente qui mène vers les vallées humides (vallées de production, Los Yungas) et surtout qui conduit vers l'Orient, vers l'Amazonie ***(Montes de Oca I. 2005)***.

Figure 1.3 : Localisation de la zone d'étude

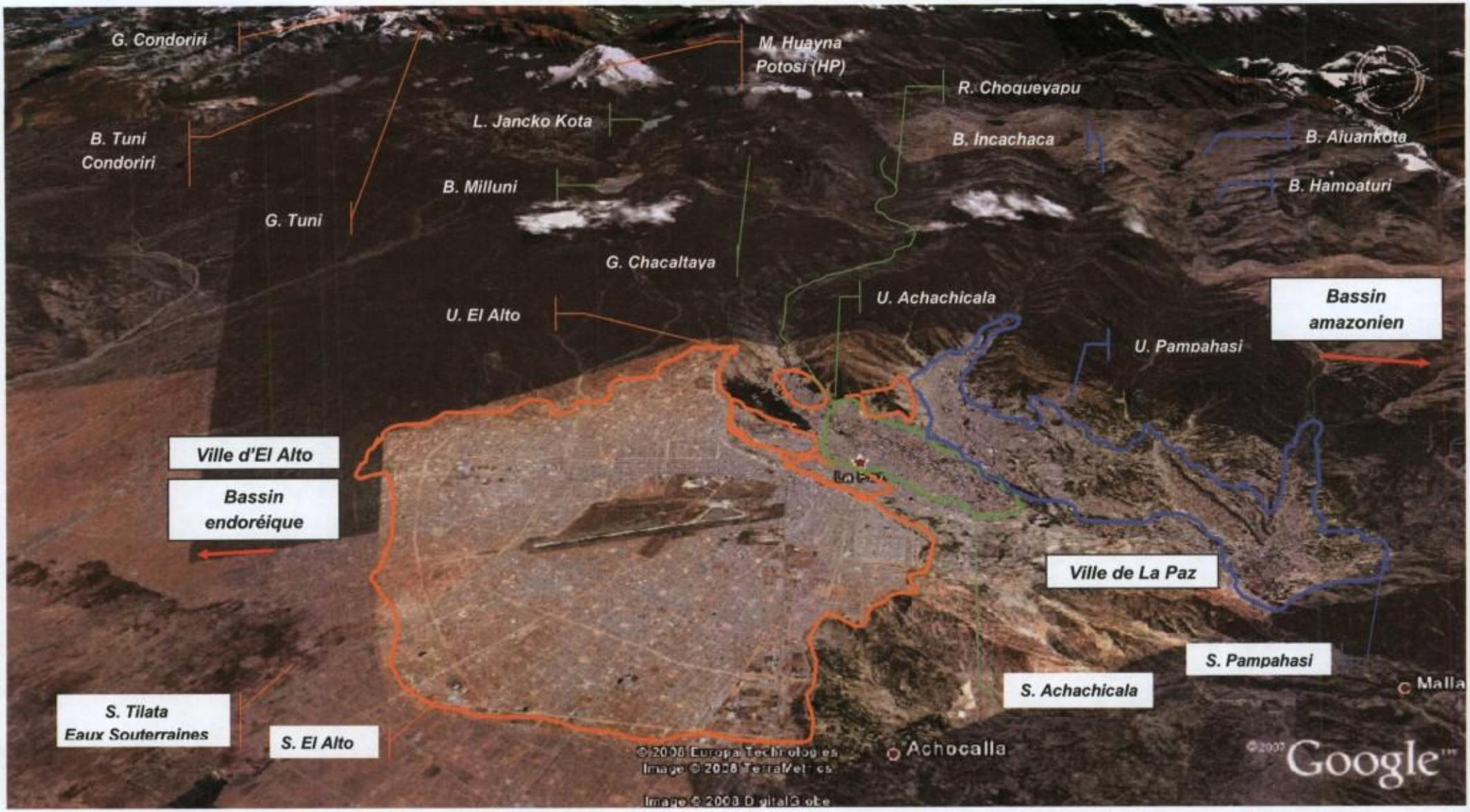


(Modifié de Caballero Y. 2001)

La Bolivie est considérée comme pays dit « en voie de développement », classée au 117ème rang dans l'Indice de Développement Humain du PNUD *(2007)*.

Le contexte spécifique de cette recherche se situe à l'ouest de la Bolivie. Il s'agit de l'agglomération urbaine qui comprend les villes de La Paz et El Alto, à la frontière de deux grands bassins de dimension continentale : d'une part la ville d'El Alto qui est située sur le plateau altiplanique et fait partie du bassin endoréique du Lac Titicaca et, d'autre part, la ville de La Paz construite dans la vallée du Choqueyapu, région appartenant au bassin amazonien. Deux caractéristiques essentielles doivent être soulignées : la latitude (16°S) de la Bolivie, qui lui donne un caractère tropical et la proximité de la cordillère des Andes où naissent la majorité des bassins de drainage, sources de l'eau consommée par ces deux villes.

Figure 1.4 : Villes de La Paz et El Alto et systèmes de distribution d'eau potable



En orange le Système d'El Alto, sa zone de service et ses sources ; en vert le Système Achachicala, et en bleu le système Pampahasi
Ref: G: Glacier; B: Barrage; L: Lac; M: Montagne ; U : Usine de traitement des eaux ; S : Système, réseau de distribution d'eau potable
Source : background: Googlearth

1.4.2 La gestion de l'eau à La Paz et El Alto

1.4.2.1 Situation actuelle

Contexte technique

Les villes de La Paz et El Alto, disposent de trois systèmes de distribution d'eau potable (Figure 1.4).

1° Le Système El Alto approvisionne la ville du même nom. Ses sources sont les barrages de Tuni et de Condoriri. Le sous-système Tilata contribue à une partie de la demande du système El Alto (près de 10 %), à travers *l'exploitation des eaux souterraines.*

2° Le Système Achachicala dessert le centre de la ville de La Paz. Son approvisionnement dépend du barrage Milluni et du captage d'eau de la rivière Choqueyapu.

3° Le Système Pampahasi pourvoit la partie sud de la ville de La Paz. Ses barrages d'approvisionnement sont Incachaca, Hampaturi et Ajuankhota.

Les caractéristiques de ces systèmes, de leurs composants, de leur service et de leurs bassins sources, sont détaillées aux Tableau 1.2, Tableau 1.3, et à la Figure 1.4.

Tableau 1.2 : Principales caractéristiques du service des systèmes d'approvisionnement d'eau potable

					Débits				
Système	*Ville*	*Zone*	*Population desservie (*)*	*Altitude de service (masl) (**)*	*Fourni au réseau [m^3/an]*	*Production en usine [m^3/an]*	*Capacité maximale de service [m^3/an]*	*Pertes [%]*	*Consommation en eau [l/hab/jour]*
Achachicala	La Paz	Centre Nor-Ouest	208,100.00	3780-3430	16,256,735	20,301,300	31,536,000	19.92%	214.03
Pampahasi	La Paz	Sud-Est Est	319,228.00	3840-3280	18,931,455	23,652,000	22,232,880	19.96%	162.48
El Alto	El Alto La Paz	El Alto Pente Ouest	898,115.00	4240-3750	29,895,325	37,370,160	31,536,000	20.00%	91.20
Tilata (***)	El Alto	Sud-Ouest	228,900.00	4,200.00	3,218,935	4,020,840	4,415,040	19.94%	38.53

(*) Les service du reseau d'eau n'atteint pas les 100% de la population des deux villes.
(**): Altitude du niveau d'usine de traitement des eaux - Altitude répresentave du réseau.
(***): Tilata est un sous système de El Alto, le seule qui a pour source des eaux souterraines

(Source : Base des données EPSAS 2008)

Bien qu'il existe une perception généralisée du fait que la production de l'eau dans les bassins versants alimentant les villes de La Paz et d'El Alto dépend des glaciers ***(PNCC-PRAA 2007)***, le Tableau 1.3 montre un rapport faible entre la taille du bassin et la superficie englacée. Ce rapport est proche de 4 % pour les bassins sources du système El Alto et de moins de 1 % dans les bassins sources des autres systèmes, ce qui dans un total pondéré représente moins de 1.5 % de surface englacée sur les bassins sources d'EPSAS.

Cet aspect révèle une éventuelle surestimation de l'importance de l'apport glaciaire dans la gestion de l'eau des villes de La Paz et El Alto ***(PNCC-PRAA 2007)***, en tenant compte des analyses de Pouyaud *(2007;2005)* qui montrent un rapport direct entre le taux d'englacement du bassin versant et l'importance de l'apport en eau provenant des glaciers.

L'importance de l'apport glaciaire dans le débit d'eau disponible dans les bassins versants englacés est un des sujets analysé et développé dans cette thèse. Ce volume reste une inconnue à résoudre pour bien établir les bases de la gestion.

Tableau 1.3 : Bassins versants source fournissant l'eau à La Paz et El Alto

Système	Bassin Versant		Source de Prélèvement	Glaciers		
	Bassin	Surface [Km²]	(Barrage ou Rivière)	Glacier	Surface [Km²]	Taux d'englacement
Achachicala	Milluni	59.58	Milluni (B)	Huayna Potosí Sud 1	0.035	0.87%
				Huayna Potosí Sud 2	0.116	
				Charquini Sud	0.370	
					0.521	
	Choqueyapu	106.35 (a)	Choqueyapu (Ri)	Kuna Tikuta 1	0.074	0.21%
				Kuna Tikuta 2	0.090	
				Wila Mankilisani	0.060	
				Chacaltaya	0.000	
					0.224	
	165.93				***0.745***	***0.45%***
Pampahasi	Hampaturi	58.99	Hampaturi (B), Ajuankhota (B)	Serkhe	0.092	0.16%
				Mikhaya	0.000	
					0.092	
	Incachaca	33.75	Incachaca (B)		***0.000***	0.00%
	92.74				***0.092***	***0.10%***
El Alto	Condoriri	19.57	Condoriri (B)	Condoriri 1 (Lengua de Vaca)	0.450	8.91%
				Condoriri 2	0.068	
				Condoriri 3	0.432	
				Condoriri 4, Pico Tarija, La Ilusión	0.794	
					1.744	
	Tuni	17.15	Tuni-Condoriri (B)	Tuni 1	0.191	4.09%
				Tuni 2	0.245	
				Tuni 3	0.266	
					0.702	
	Huayna Potosí	50.39	Huayna Potosí (Ri)	Huayna Ouest	0.740	2.75%
				Saltuni 1	0.377	
				Saltuni 2	0.056	
				Saltuni 3	0.118	
				Saltuni 4	0.094	
					1.385	
	87.11				***3.831***	***4.40%***
	345.78				***4.668***	***1.35%***

(a): Surface du bassin jusqu'à point de contrôle des débits
(B): Barrage
(Ri): Rivière

Le tableau ci-dessus a été élaboré à partir des mesures effectuées sur le glacier, données de Soruco (2008), topographie et données récentes de GREATICE, cartes 1:50000 de l'Institut Géographique Militaire, Images satellitaires et photographies aériennes récentes.

Tableau 1.4 : Caractéristiques des barrages de régulation

	Barrage				
Description	Tuni	Milluni	Incachaca	Hampaturi	Ajuankhota
Année de construction	1978	1940	1990	1945	1994
Surface du lac de barrage: [km²]	2.45	2.44	0.71	0.41	0.43
Niveau max. [masl]	4435	4532.7	4369.03	4203	4429
Volume effectif [hm³]	21.5	10.8	4.2	3.2	3.5
Volume non profitable [hm³]	9.10	1.39	0.3	0.06	0.1
Longueur niveau de crete [m]	110	132	357	374	332
Hauteur max. [m]	18.5	9.1	23.5	17	22

(Quisbert T, Base des données EPSAS, 2007)

Les données enregistrées de la pluviosité annuelle et de l'écoulement des bassins de la zone d'étude sont présentés aux Tableau 1.5 et Tableau 1.6.

Tableau 1.5 : Pluviosité annuelle, zone d'étude, par bassin versant (2000-08)

Année	Précipitation [mm]			
	Hampaturi	Incachaca	Tuni - Condoriri	Milluni
2000	549.26	763.27	666.44	528.20
2001	692.40	652.30	723.10	814.10
2002	713.36	664.70	658.30	767.70
2003	622.70	593.30	741.40	569.10
2004	513.60	501.40	526.31	304.60
2005	565.10	544.23	511.62	257.10
2006	650.60	641.70	713.00	462.10
2007	524.90	555.80	637.09	673.30
2008	554.00	553.70	536.43	538.10
Moyenne	598.44	607.82	634.85	546.03
Ecart-type	65.92	71.93	79.66	169.39
Min	513.60	501.40	511.62	257.10
Max	713.36	763.27	741.40	814.10

(Elaboration à partir des données SENAMHI, 2000-08)

Tableau 1.6 : Écoulement par bassin versant (2000-08)

Année	Écoulement [m^3]			
	Hampaturi	Incachaca	Tuni - Condoriri	Milluni
2000	19,373,872.21	8,823,757.40	25,009,364.93	16,211,438.07
2001	28,432,270.01	11,780,952.31	34,848,497.14	23,761,002.70
2002	21,983,372.09	8,074,099.58	30,177,402.59	24,158,464.95
2003	26,976,904.64	8,771,792.25	26,441,168.01	21,609,412.26
2004	24,804,286.03	7,083,263.65	28,644,837.54	3,373,273.62
2005	18,791,842.61	5,272,600.97	28,634,122.88	15,303,753.57
2006	28,521,348.10	9,555,676.87	39,837,328.21	20,436,395.72
2007	22,334,527.86	7,482,080.06	30,228,946.45	19,538,079.01
2008	20,301,678.68	9,744,794.43	29,305,525.96	18,088,542.32
Moyenne	23,502,233.58	8,509,890.84	30,347,465.97	18,053,373.58
Ecart-type	3,411,900.18	1,650,673.28	4,012,908.53	5,628,831.45
Min	18,791,842.61	5,272,600.97	25,009,364.93	3,373,273.62
Max	28,521,348.10	11,780,952.31	39,837,328.21	24,158,464.95

(Valeurs calculées à partir des registres de gestion de barrages d'EPSAS, 2000-08)

Des chapitres spécifiques sont consacrés à l'analyse des précipitations, de l'écoulement et à leur bilan. C'est pourquoi nous ne nous étendrons pas plus sur ce sujet dans la présente introduction.

Les données présentées aux Tableau 1.2 à 1.6 sont la base des calculs et des analyses qui sont développés dans les chapitres suivants.

Contexte administratif

En Bolivie, l'administration responsable des questions relatives à l'eau est le Ministère de l'Environnement et de l'Eau ***(MMAyA)***. Il élabore sa politique selon les normes du Plan National de Développement (PND) de 2006 ***(République de Bolivie 2006)***. L'un des principaux principes de ce Plan est dénommé « Bien Vivre », il nécessite une politique concrète et stratégique de l'eau pour devenir réalité.

La compagnie Empresa Pública y Social del Agua y Saneamiento (EPSAS), autonome dans ses décisions, dépend de ce Ministère. Elle est responsable de la gestion de l'eau dans les villes de La Paz et El Alto depuis 2006, année où le gouvernement bolivien a résilié le contrat de concession au consortium privé Aguas del Illimani S.A. (AISA), filiale de La Lyonnaise des Eaux[3], qui rendait ses services dans ces villes depuis 1997. Auparavant, SAMAPA (Servicio Autónomo Municipal de Agua Potable y Alcantarillado) assurait la gestion des ressources depuis 1985 et, antérieurement, la Commune de La Paz était responsable du service d'eau potable.

[3] *Entreprise française qui travaille dans le secteur de l'eau (www.lyonnaise-des-eaux.fr/)*

Notons d'abord que le contexte technique qui est le résultat des rapports publics et de l'information fournie par l'EPSAS, résume ainsi la situation : le Système El Alto rend service à plus d'un million d'habitants (voir chapitre 7), ce qui représente le double du service effectué par les deux autres systèmes de la ville de La Paz. Il est important de souligner que la ville d'El Alto présente la plus grande croissance démographique en Bolivie (3.5 à 4 %) ***(INE 2001)*** et que la production journalière de son usine de traitement est proche de sa production maximale.

Par ailleurs, les pertes réelles sont plus importantes que celles publiquement reconnues par l'EPSAS. Elles ont atteint 50 % à un moment donné dans le système d'El Alto (voir chapitre 6).

EPSAS est actuellement une entreprise de transition entre le modèle d'administration privée (comme AISA) et le nouveau modèle de type social que le gouvernement bolivien souhaite mettre en œuvre dans tout le pays ***(Jaen E. 2004)***. Ce nouveau modèle est supposé répondre à une conscience sociale, protéger ses utilisateurs et, en même temps, être une entreprise autonome et efficace dans son administration qui élabore ses propres nécessités d'opération et d'investissement.

1.4.2.2 **Sources potentielles**

Comme on vient de le mentionner au sous-titre précédent (contexte technique), les villes de La Paz et El Alto sont approvisionnées par deux types de sources d'eau, superficielles et souterraines, et leurs sources potentielles sont de nature similaire. Remarquons que les aspects sociaux jouent un rôle important dans l'utilisation des sources superficielles, et que l'analyse des aspects sociaux s'avère aussi primordiale que la quantification des sources.

En ce qui concerne les eaux souterraines, l'absence d'études sur les dimensions et le régime de l'aquifère de la zone d'El Alto, ne nous permet pas de déduire qu'elles constituent une ressource d'eau pouvant être prise en compte dans la gestion de l'eau d'une façon objective sans spéculation sur sa potentialité.

Eau superficielle

La planification du Plan Maestro a montré qu'il était nécessaire, pour des raisons de coûts, d'exploiter d'abord l'eau superficielle et, après avoir atteint la capacité des bassins versants, l'eau souterraine ***(Lahmeyer International - GITEC - TECNOSAN-SICO 1994)***. Des sources potentielles ont été identifiées dans les bassins de Khullu Cachi, Janchallani, Jachawaquipiña, Chojlla Jipiña, Kellhuani, Palcoma et Chojña Khota (voir plus loin, la Figure 3.5).

La possibilité d'exploiter de nouveaux bassins versants est étroitement liée aux acteurs sociaux, c'est-à-dire aux habitants de ces bassins. Deux aspects jouent un rôle quant à la gestion des sources superficielles de La Paz et El Alto :

A. Les bassins versants qui se trouvent hors de la juridiction des villes de La Paz et El Alto sont occupés par des communautés pauvres qui, selon la loi bolivienne, ont la priorité sur l'exploitation des ressources hydriques des bassins et qui comptent sur ces ressources pour leur développement ***(République de Bolivie, 2009)***.

B. Les processus de concertation avec la population lors la conception d'infrastructure.

A. Bassins hors de la juridiction de La Paz et El Alto

Avant d'entrer dans l'analyse de cette situation, il est nécessaire de présenter brièvement l'organisation politico-sociale de la Bolivie qui nous permettra de comprendre les problèmes liés à l'utilisation de l'eau de nouvelles sources (Figure 1.5).

La compréhension de l'organisation politico-sociale bolivienne est importante puisque, dans le cadre de cette organisation, ce ***sont les communautés*** qui décident de donner les autorisations pour l'accès aux territoires, pour les différents projets et études de terrain et surtout pour l'utilisation des ressources territoriales.

En effet, ce sont les communautés qui occupent les bassins versants qui ont les droits et la priorité d'exploitation des ressources hydriques de ces bassins ***(République de Bolivie 2006)***. Leur droit est encore plus important que celui des sections ou des municipalités pour l'utilisation des ressources hydriques de leurs bassins versants.

Le cas de Huayna Potosi

Pour illustrer les problèmes posés par la juridiction politico-sociale de la source, prenons l'exemple du barrage de Tuni qui approvisionne El Alto (voir Figure 1.4). Ce barrage se trouve dans la municipalité de Pucarani, hors de la juridiction de la municipalité d'El Alto.

Figure 1.5 : Organisation politico-sociale de la Bolivie

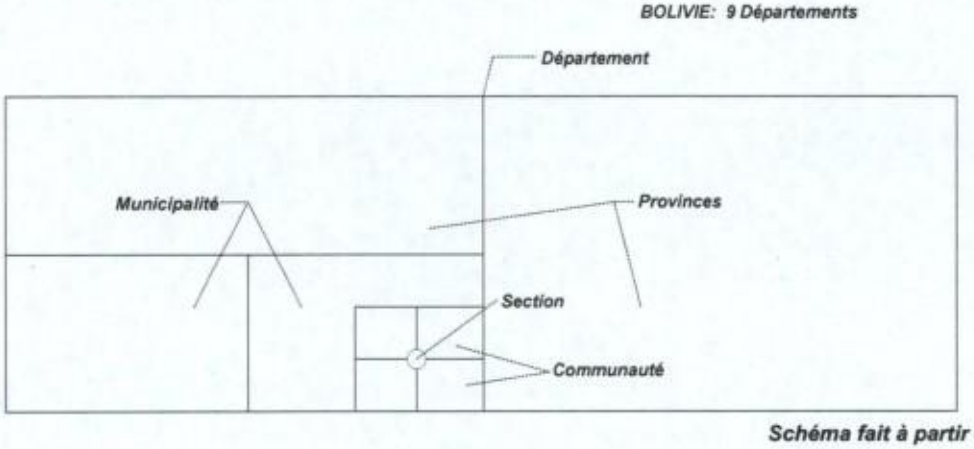


Schéma fait à partir de (PNUD 2005)

Les petites communautés de la municipalité de Pucarani qui se trouvent sur le bassin versant de Tuni, considèrent cette situation comme une intrusion puisque, de leur point de vue, El Alto prélève l'eau qui leur appartient ***et*** *qui pourrait servir à leur développement* ***(Consultora Pirámide 2009)***.

Ces communautés ont déjà proposé des projets de réservoirs afin d'avoir de l'eau potable et de pouvoir arroser leurs cultures ***(GMP 2006)***. Ces projets entreraient en conflit avec ceux de la ville d'El Alto ***(Consultora Pirámide 2009)*** du fait qu'ils comptent tous sur la même ressource : le bassin de Huayna Potosi.

> Il apparaît donc un dilemme quant à savoir à qui revient l'eau ? A la ville d'El Alto, qui constitue l'une des villes les plus peuplées de Bolivie ? Ou aux communautés qui désirent assurer leurs besoins quotidiens et leur bien-être et qui, selon la loi, ont la priorité de l'exploitation ?

De plus comme nous l'avons déjà mentionné, le recul des glaciers a été identifié comme un problème potentiel de cette zone et qui engendrerait une diminution de la capacité d'apport du bassin versant ***(PNCC-PRAA 2007)***.

Les planificateurs ont considéré la possibilité de construire le barrage ***Huayna Potosí*** pour qu'il puisse opérer avec le barrage ***Tuni*** afin de diminuer les impacts du recul des glaciers, couvrir la demande croissante d'El Alto et fournir de l'eau aux communautés environnantes ***(Consultora Pirámide 2009;PNCC-PRAA 2007))***. Ce barrage pourrait offrir une solution afin d'augmenter la disponibilité d'eau dans le bassin et résoudre les conflits.

Un barrage peut augmenter la disponibilité en eau par sa capacité de régulation de la ressource seulement si cette ressource n'est pas exploitée jusqu'à sa limite. Malheureusement, la situation n'est pas celle-là puisque dans le cas d'El Alto, le besoin en eau de la ville est équivalent à la capacité des ressources du bassin versant ce qui pose évidemment un problème (voir chapitres 6 et 7).

Dans ce contexte, le Barrage Huayna Potosi pourrait devenir une source de conflits pour les expectatives aussi bien des communautés que de la ville d'El Alto. Cette situation est également susceptible de provoquer un problème quant à l'usage du barrage Tuni qui est la source la plus importante d'El Alto.

A ce sujet, les communautés ont pris les devants et ont déjà menacé d'accaparer pour leurs besoins le barrage de Tuni ***(Consultora Pirámide 2009)***.

Cette situation se présente dans d'autres bassins voisins et montre l'importance de la participation de la société dans les prises de décisions sur l'usage de l'eau.

B. Processus de concertation pour la conception et la construction d'infrastructures

Depuis 1993, en Bolivie, la loi détermine que la participation de la population dans la formulation, l'acceptation, la conception et le contrôle de projets est obligatoire ***(Loi No 1551: Participación Popular 1993)***. Ce concept a pris de plus en plus d'importance ces dernières années.

La loi a voulu satisfaire la revendication des petites communautés qui, avant sa promulgation, étaient ignorées et devaient accepter la décision du gouvernement central. Les décisions du gouvernement central étaient imposées aux petites communautés, avec des promesses de développement, lesquelles ne se concrétisaient pas dans la majorité des cas. C'est pourquoi il existait une certaine méfiance vis-à-vis de tout ce qui était proposé ou imposé par le gouvernement local, départemental ou national. Actuellement, non seulement ces communautés entrent en jeu dans le processus de décision, mais elles le conditionnent.

Tenant compte de ce contexte et de l'expérience des 3 projets récents sur les bassins de Hampaturi ***(Rivera & Añez 2009)***, Huayna Potosi ***(Consultora Pirámide 2009)*** et Choqueyapu ***(CAF 2010)***, nous devons considérer que deux conditions sont indispensables du point de vue social pour le démarrage d'un projet :

1) ***Demande à la communauté de l'autorisation d'étudier le projet :*** *Cela se fait par la présentation du projet à toute la communauté. Sans cette permission, aucune étude ne peut être entamée, puisque les habitants empêcheront les chercheurs ou les techniciens d'entrer dans la juridiction pour faire leurs études. Lors de la réunion avec les habitants, on leur demande de se prononcer et de faire des suggestions pour optimiser la prise de décision.*

2) ***Compensation au moment de la construction :*** *Pendant ce processus, il est nécessaire de prévoir la compensation aux propriétaires des terrains où l'on construira les infrastructures.*

   Les démarches traînent parfois à cause du manque de précision des limites des propriétés et du fait qu'il peut exister plusieurs propriétaires pour un seul terrain. Par ailleurs, les tarifs de compensation, calculés au moment de l'élaboration du projet, grimpent au moment de la construction puisque les propriétaires en tirent le plus grand profit possible. Dès lors, le coût du projet grimpe aussi.

Ce processus de demande d'autorisation et de compensations, quand il arrive à bon terme, prend un temps précieux qui n'est pas pris en compte dans la planification du projet.

Quand les démarches sont paralysées, il est absolument indispensable de reformuler le projet et de demander l'intervention d'une instance administrative à un niveau supérieur pour essayer d'avoir une autre opportunité de demande d'autorisation aux communautés.

Voici quelques exemples des résultats que les responsables des projets des barrages de Huayna Potosí, Hampaturi et Kaluyo ont obtenus lors des entretiens et enquêtes avec les communautés des bassins versants :

- *Dans le cas de Huayna Potosí, la communauté s'est montrée méfiante, car elle soutient son propre projet. Les membres de la communauté ont menacé de prendre à leur charge et pour leurs besoins le barrage de Tuni* ***(Consultora Pirámide 2009).***
- *Dans le cas de Hampaturi, le processus a été rapide, mais le projet fut remis en question au moment de négocier et d'évaluer les compensations, à cause du nombre important de personnes qui ont réclamé le droit d'être indemnisées pour les terres qui allaient être occupées par le barrage.* ***(Rivera & Añez 2009).***
- *Dans le cas de Kaluyo, la communauté a refusé d'autoriser l'entrée des techniciens dans la zone de projet. On reste dans l'attente d'une seconde décision.*

  Dans ce cas particulier, la zone est déclarée Terre Communautaire d'Origine (TCO), c'est-à-dire qu'elle appartient à une population originaire, qui d'après la loi bolivienne, a encore plus de priorité pour utiliser les ressources de son territoire. Le barrage occuperait une partie des terrains du TCO. La décision de la communauté définira si le barrage se construira ou non en dépit de l'avis des autres habitants des villes de La Paz et d'El Alto qui pourraient bénéficier de ce projet. ***(CAF 2010)***

Dans tous les cas, la participation des communautés voisines de la source exploitable est absolument nécessaire. Il faut également tenir compte du temps que prend ce processus de concertation pour l'usage des nouvelles sources d'eau.

Eau souterraine

Bien qu'on exploite déjà des eaux d'origine souterraine (sous-système Tilata), on ne connaît pas la capacité de l'aquifère duquel on prélève les eaux. En 1990, quand l'entreprise de l'eau a démarré le pompage de l'eau, les études effectuées se limitaient à déterminer la capacité d'extraction et l'abattement superficiel de la nappe. Aucune quantification de l'aquifère n'a été réalisée jusqu'à maintenant. Il est tout à fait paradoxal que le plan stratégique de l'eau ***(Lahmeyer International - GITEC - TECNOSAN-SICO 1994)*** considère les eaux souterraines comme les réserves stratégiques d'El Alto, alors que le potentiel d'exploitation de l'aquifère n'est pas connu.

Actuellement, une équipe du SERGEOTECMIN (Service Géologique Technique et des Mines), en association avec l'EPSAS, poursuit une recherche sur cet aquifère, recherche qui a débuté en 2009 suite à la probabilité de manque d'eau dans la ville d'El Alto. On prévoit des résultats préliminaires de cette quantification, en 2011, et les résultats finaux à la fin de l'année 2013 ***(Cortez R. 2009).***

Les informations suivantes ont été obtenues grâce à la coopération des ingénieurs Rafael Cortez de SERGEOTECMIN et Tomás Quisbert d'EPSAS.

Le Système Tilata dispose de 30 puits, avec une moyenne de production de 42 m^3/heure chacun, bien que leur capacité soit plus grande (50 m^3/heure chacun). Les données actuelles de production, en tenant compte des puits qui ne sont pas en activité, consignent une utilisation de moins de 50 % de leur potentiel. Cela est moins dû à la réduction du niveau phréatique qu'à des problèmes de type technique dans les puits (ex. : filtres usés, manque d'entretien).

Un plan d'urgence (pour augmenter le volume d'eau pour El Alto) prévoit la création de quelque 15 puits additionnels et la réadaptation de 5 puits actuels.

Les premières études estiment que l'aquifère s'étend sur plus de 500 km², avec une profondeur moyenne de 50 m, ce qui susciterait de grands espoirs pour son utilisation. Toutefois, il est trop tôt pour avoir des données sur sa porosité, sa capacité et son potentiel. Par ailleurs, on ne connaît pas son régime.

En résumé, l'exploitation de l'aquifère a été réactivée pour des raisons d'urgence même si l'on ne connaît pas son potentiel, sa dynamique et ses limites (***Communication personnelle Quisbert T. EPSAS, 2009)*** ***(Cortez R. 2009).***

1.4.3 Vulnérabilité géographique et menaces potentielles

Les trois systèmes d'approvisionnement d'eau potable manquent de complémentarité entre eux dû au fait que leur interconnexion est limitée. Cela signifie que si l'un des systèmes a des difficultés, les possibilités que les autres puissent prendre en charge le service sont fortement limitées. ***(Communication personnelle Quisberth T., EPSAS 2007).***

Cette situation est due aux grandes différences d'altitude des systèmes d'approvisionnement (voir Tableau 1.2, Altitude de service), à la topographie de ces villes et à la position relative des usines de traitement d'eau, qui compliquent l'interconnexion de leurs réseaux.

Le manque d'interconnexion dénote une vulnérabilité potentielle dans le cas où l'un des systèmes fonctionne mal. Cette situation s'est déjà présentée durant l'année 2008 quand la canalisation conduisant l'eau du barrage Hampaturi à l'usine de traitement de Pampahasi, s'est rompue. Cet incident a été la cause d'une pénurie d'eau et de son rationnement dans le réseau de ce système ***(La Razón 2008)***. Dans ce cas, c'est le relief qui conditionne l'infrastructure du service et de ses réseaux.

D'autre part, la société bolivienne et surtout celle des villes de La Paz et El Alto, est consciente de la menace du changement climatique qui va influencer la disponibilité de la ressource hydrique dans l'avenir. Le recul des glaciers se retrouve commenté périodiquement dans les médias ***(El Diario - La Prensa - La Razón 2007-2009)*** avec une connotation alarmante. En 2007, à travers le Programme National de Changement Climatique (PNCC), le gouvernement bolivien a élaboré un Projet d'Adaptation au Changement Climatique qui ultérieurement en 2008 s'est transformé en Projet d'Adaptation au Rapide Retrait des glaciers (PRAA) ***(PNCC-PRAA 2007).***

1.4.4 Sensibilité sociale par rapport aux ressources naturelles

Comme on l'a déjà commenté dans les sous-titres précédents, la loi exige en Bolivie que tous les projets soient effectués avec l'approbation des bénéficiaires pour que ceux-ci prennent part à leur mise en œuvre, leur exécution et leur contrôle. ***(Loi No 1551: Participación Popular 1993).***

C'est la raison pour laquelle, on note une grande participation de la population bolivienne dans les décisions relatives à ces projets. De plus, la société bolivienne manifeste une grande sensibilité quant à la disponibilité de ses ressources naturelles. On a pu constater cela en avril 2000 lors de ce qui fut appelé la « Guerre de l'eau à Cochabamba » ***(Poupeau F. 2002)*** où l'entreprise privée « Aguas del Tunari » a été expulsée du pays pour avoir voulu augmenter les tarifs du service d'eau potable, ce qui a déclenché un soulèvement populaire violent de la population de Cochabamba.

Un cas similaire, mais moins violent, a été celui de « Aguas del Illimani S.A (AISA) » où l'état bolivien a résilié son contrat des concessions des ressources d'eau de La Paz et d'El Alto sur demande de la population qui n'était pas d'accord avec le service et les investissements faits par AISA ***(Toussaint E. 2005).*** Comme conséquence, l'entreprise d'eau AISA a été expulsée de Bolivie.

On peut mentionner aussi « La guerre du gaz » *(octobre 2003)* qui s'est produite à La Paz à la suite de l'intention du président bolivien de l'époque d'exporter le gaz naturel vers les Etats-Unis via le Chili.[4], *(Davila R. 2008;Torrico E. & K. Herrera 2007;Webber J. 2005)*. La population n'a pas accepté cette voie d'exportation et a manifesté violemment dans les rues. Comme conséquence, le président Sanchez de Lozada a démissionné.

La population d'El Alto a été le principal protagoniste des manifestations et des soulèvements dans le cas de l'expulsion d'AISA et de la guerre du gaz.

Bien que les guerres dénommées du gaz et de l'eau répondent à des conjonctures beaucoup plus compliquées que la sensibilité du Bolivien à ses ressources (puisqu'il faut prendre en compte la situation politique du moment et les intérêts engendrés par le sujet) *(Webber J. 2005)*, il est indéniable que le moteur principal de la mobilisation populaire a été cette sensibilité ainsi que le sens de participation du citadin dans les décisions concernant les ressources naturelles.

Les problèmes mentionnés, combinés à la perspective d'un futur stress hydrique, font de la Bolivie l'un des pays sujets aux conflits dus aux ressources naturelles comme nous l'indique la carte ci-dessous. Dans le cas bolivien, l'eau a été et est toujours le moteur principal de conflit (Figure 1.6).

Figure 1.6 : Des conflits liés à l'environnement et aux ressources naturelles jusqu'en 2005

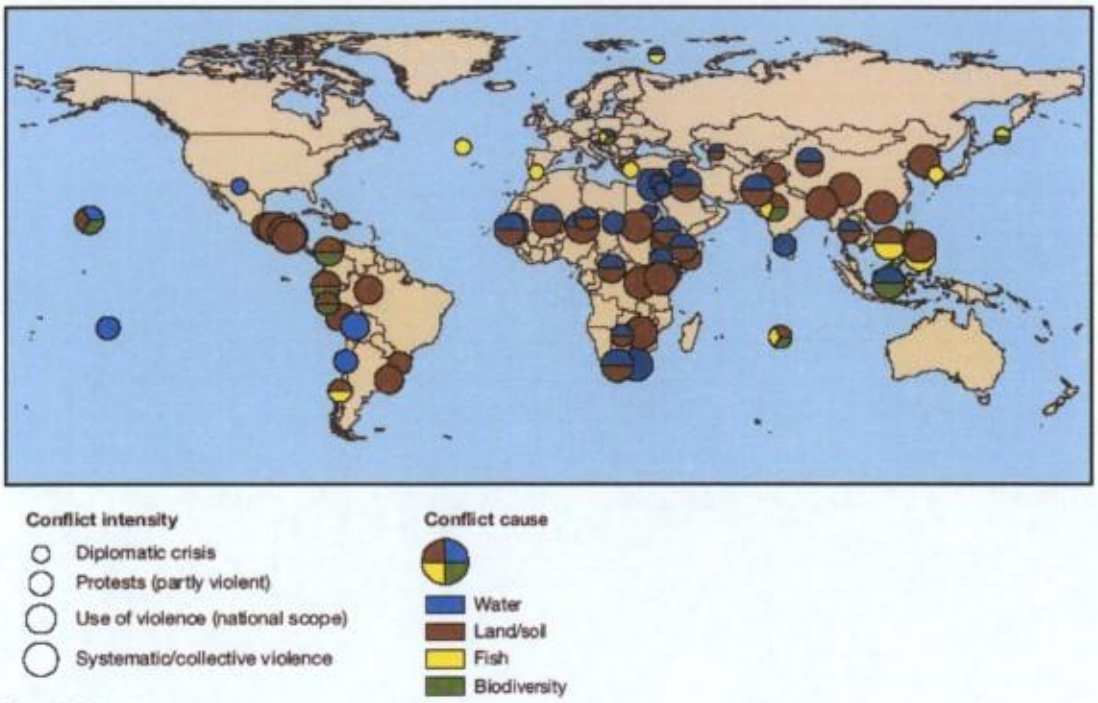


Figure 3.2-1
World map of environmental conflicts (1980–2005): Causes and intensity.
Source: Carius et al., 2006

(WBGU 2007)

1.4.5 Situation actuelle de la planification

Planification de la gestion

Actuellement, la planification de la gestion des ressources hydriques et de leur infrastructure est basée sur un Plan stratégique appelé « Plan Maestro » de l'eau potable de la ville de La Paz *(Lahmeyer International - GITEC - TECNOSAN-SICO 1994)*. Ce plan est périodiquement révisé par l'administrateur de l'eau pour fixer les mesures et les projets à effectuer.

[4] *Depuis 1879, la Bolivie a une relation très conflictuelle avec le Chili suite à la guerre qui a eu lieu entre ces deux pays cette année-là et au cours de laquelle les Boliviens ont perdu leur accès à l'océan Pacifique.*

Toutefois, cette révision répond aux nécessités immédiates de la population et a cessé, depuis longtemps, d'être une planification structurée à long terme. Ce *Plan Maestro* qui devait être un instrument guide pour l'investissement et la gestion de l'eau potable n'a pas été exécutée comme prévu lors de son élaboration. Le concept de planification stratégique a donc été dilué dans le temps. EPSAS est consciente de ce problème et, depuis 2009, la compagnie cherche des fonds afin de rédiger un nouveau Plan Maestro pour les villes de La Paz et El Alto. ***(Communication personnelle Rico V. Directeur général d'EPSAS, 2009).***

Soulignons certains aspects du Plan Maestro et des situations qui se sont présentées ces dernières années concernant la planification de la gestion de l'eau et qui ont influencé la situation actuelle de la gestion de la ressource hydrique :

- Le Plan Maestro proposait initialement l'utilisation des sources d'eau superficielles, afin de laisser en réserve les sources d'eau souterraines puisqu'en terme économique, l'exploitation d'une nappe aquifère représente un coût additionnel. Malheureusement, ce choix a réduit à néant les recherches sur la quantification des réserves souterraines. Elles viennent seulement d'être entamées et sont menées par le Service Géologique et des Mines bolivien (SERGEOTECMIN) avec l'appui économique et technique de l'Agence de Coopération Catalane[5]*.**(Cortez R. 2009).***

*- La croissance de la ville d'El Alto est plus importante que celle prévue initialement dans le Plan Maestro **(INE 2001).***

- Le Plan Maestro n'a pas été exécuté comme prévu, parce qu'il a fallu donner la priorité à des mesures en fonction des nécessités immédiates de la population et de la disponibilité des fonds. Ces priorités n'ont pas été planifiées par le Plan Maestro.

*- La stratégie du Plan a été remise en question, puisque ses auteurs n'ont pas prévu les besoins réels de financement et les priorités dans la gestion de l'eau. Cette situation révèle une caractéristique typique d'un pays en voie de développement, qui bien qu'ayant un document de planification établi, doit donner la priorité à d'autres mesures en fonction des nécessités immédiates **(Communication personnelle Franco A. SISAB 2007).***

*- Le Plan n'est plus à jour parce qu'il ne reflète pas la conjoncture actuelle de sensibilité du citoyen par rapport à la ressource hydrique, pas plus que les menaces potentielles comme le changement climatique **(Communication personnelle Franco A. SISAB 2007).***

- Dans le cadre de la sensibilité du citoyen à l'utilisation de ses ressources, le Plan Maestro ne prend pas en considération la problématique que peut susciter l'utilisation de sources qui se trouvent dans une autre juridiction municipale (ce qui est le cas des futures sources d'eau superficielles) ou l'emplacement de certains ouvrages nécessaires pour améliorer l'exploitation de l'eau. Dans certains cas, ces ouvrages se trouvent en amont de petites communautés qui ont besoin de cette ressource sur laquelle elles comptent comme moyen de développement.
(Communication personnelle Franco A. SISAB 2007).

Bien que le Plan Maestro n'ait pas été exécuté comme prévu depuis sa mise en application et que, dès lors, il a perdu sa mission stratégique, il reste malgré tout un document de référence pour la planification.

[5] *Agence de Coopération pour le développement : (www20.gencat.cat/portal/site/cooperaciocatalana)*

1.5 L'analyse des variables, processus et aspects particuliers de la gestion, une voie pour chercher les bases de la GIRE

Dès les premières enquêtes de cette thèse sur la gestion de l'eau potable à La Paz et El Alto, nous nous sommes rendu compte que plusieurs variables, processus ou aspects de la gestion de l'eau présentent des incertitudes quant à leur influence sur la disponibilité ou le besoin en eau.

Pour analyser les incertitudes de la GIRE, Van der Keur *(2008)* en distingue deux types :

> *Incertitude ontologique : due à la variabilité inhérente du système.*
> *Incertitude épistémique : due à la connaissance imparfaite du système.*
>
> *L'incertitude épistémique peut être réduite grâce à une meilleure connaissance et compréhension du système, ce qui n'est pas le cas de l'incertitude ontologique.*
>
> *Des aspects comme le rôle des glaciers, les changements potentiels de régime pluviométrique (à cause du changement climatique), l'influence des variables démographiques ou de la sensibilité du citoyen par rapport à la ressource dans les décisions à prendre, constituent des incertitudes épistémiques quant à leur influence dans la gestion de l'eau de La Paz et El Alto.*

Ces incertitudes posent de nombreuses interrogations dont on espère obtenir une réponse de la part de l'administrateur de l'eau. Toutefois, EPSAS n'a pas la capacité d'y répondre à cause des limites opérationnelles de l'administrateur et de l'institution technique. Les réponses à ces différentes problématiques doivent dès lors être trouvées par des chercheurs.

Cette situation, mêlée aux aspects liés à la vulnérabilité géographique de notre scénario d'étude et à la sensibilité sociale des Boliviens quant à l'utilisation de leurs ressources, nécessite des notions de guide pour gérer stratégiquement l'eau, non seulement pour arriver à une gestion optimale de cette précieuse ressource, mais aussi pour éviter des conflits de type sociaux à l'avenir.

Nous proposons dès lors d'aborder le sujet de la gestion et des besoins pour la mettre en route, à travers l'analyse de ses variables principales.

1.6 Objectifs de la thèse, hypothèses et méthodologie de travail

1.6.1 Objectifs

Objectif général

L'objectif de cette thèse est de déterminer les bases pour l'application de la GIRE à la Gestion de l'eau potable des villes de La Paz et d'El Alto au moyen de la recherche et de l'analyse des variables qui jouent un rôle dans la gestion de l'eau tant du côté de l'offre que de la demande.

L'analyse des variables de la gestion a comme objectif de mettre en rapport et de comparer l'importance relative de chaque variable étudiée dans le cadre de son rôle dans l'offre et la demande d'eau

L'objectif de la détermination des bases consiste à passer de la théorie à la pratique de la GIRE afin d'offrir des options de solutions au problème réel et vital pour la Bolivie, étant donné que l'on analyse l'avenir de la gestion de l'eau potable de deux de ses villes les plus importantes.

Hypothèses

A. *Approfondir la connaissance et diminuer les incertitudes qui existent sur le comportement des variables les plus importantes jouant un rôle* dans l'approvisionnement en eau potable des villes de La Paz et d'El Alto constitue la première étape réelle et pratique pour l'application de la GIRE.

B. Il est nécessaire de connaître la situation actuelle de la gestion de l'eau de manière à pouvoir fixer un point de départ qui permettra ensuite de déterminer les influences additionnelles de problèmes comme le changement climatique et les changements de régime pluviométrique.

Cette thèse ne prétend pas faire une analyse de toutes les variables qui jouent un rôle dans la gestion de l'eau, ni faire une recherche approfondie sur chacune d'elles.

C'est ainsi que nous avons fixé comme limite de notre travail, l'analyse de chaque variable choisie, jusqu'à ce qu'elle puisse nous fournir les données nécessaires permettant de faire une étude comparative et de contexte qui puisse servir à établir les bases de la gestion.

Objectifs spécifiques

1. Déterminer l'importance relative des quelques variables clés influençant la gestion de l'offre et de la demande en eau

Hypothèses

- En connaissant l'importance relative des quelques variables clés et de leur marge de variation, il sera possible de procéder à l'évaluation des ressources hydriques dont on dispose.

- Il sera possible d'établir leur importance relative pour la mise en route de la GIRE et pour la prise de décision de la planification de l'eau.

- On pourra également connaître la demande en eau de la population et sa variabilité dans le temps.

- Dans les deux cas (offre et demande), il sera possible d'établir ces marges de variation dont la gestion doit tenir compte.

- On pourra faire un diagnostic des systèmes d'eau potable pour établir leurs vulnérabilités.

Le diagnostic des systèmes est la base qui permettra d'estimer les impacts et influences des problèmes additionnels comme le changement climatique.

2. Elaborer des instruments pratiques pour la gestion de l'eau

Hypothèse

L'analyse des variables proposée nous fournira des instruments pour la gestion de l'eau, tant pour la planification de la stratégie de l'eau que pour la prise de décisions relative à la gestion quotidienne de l'eau.

3. Déterminer les temps de la gestion (dates clés de la gestion)

Hypothèse

Lorsque les seuils de variation des variables clés de la gestion de l'offre et la demande seront connus, il sera possible de déterminer les dates critiques pour la prise de décisions de la gestion en faisant un bilan d'offre et demande d'eau dans les limites de variation identifiées.

4. Déterminer le mode de gestion

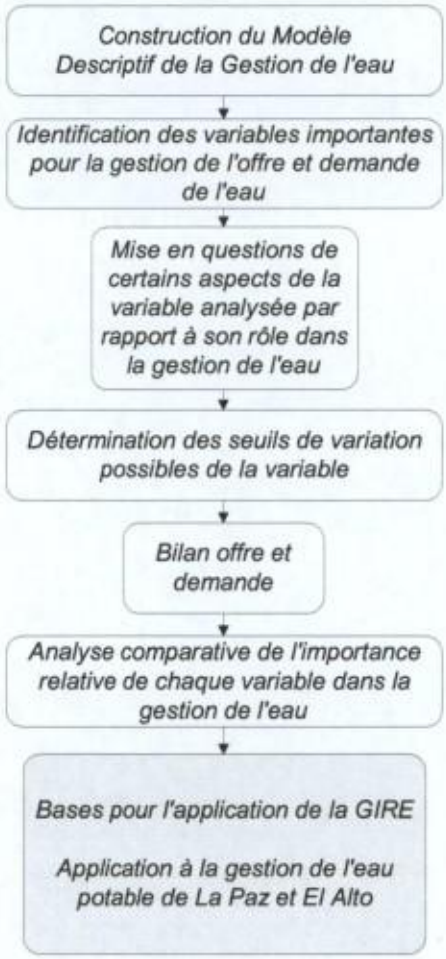
Hypothèse

A partir des éléments antérieurs, les bases de la GIRE pourront être élaborées afin de canaliser la gestion de l'eau.

1.6.2 Méthodologie

Notre recherche se base essentiellement sur l'analyse des aspects, variables et processus qui jouent un rôle dans la gestion de l'eau potable des villes de La Paz et El Alto. Cette analyse nous permet de déterminer les bases pour l'application de la GIRE. La méthodologie employée est résumée à la Figure 1.7.

Figure 1.7 : Méthodologie de recherche



D'abord, nous proposons la construction d'un modèle qui tente de décrire la gestion de l'eau potable à La Paz et El Alto à partir de la mise en rapport des variables qui jouent un rôle tant dans l'offre que dans de la demande en eau. A partir de ce modèle, il est possible d'identifier les variables importantes pour la gestion de l'offre et de la demande en eau.

Pour déterminer les variables qui seront analysées, il a été décidé de donner la priorité à la recherche sur celles que l'on considère comme fondamentales, telles que les glaciers, l'input des systèmes (précipitations), les interactions hydrologiques dans le bassin versant ainsi que les composants de la demande en eau.

Chaque variable ou groupe de variables est analysé grâce à une investigation critique des valeurs de références et de leur rôle et influence dans la gestion de l'eau. A cette fin, au début de l'analyse de chaque variable, on pose des questions qui permettront d'établir son rôle et son influence dans la gestion et de répondre aux objectifs de la thèse.

L'analyse des variables nous sert à les connaître et à identifier les rapports qui existent entre elles. On détermine également les marges de variabilité ou d'incertitude de ces variables. Le bilan de l'offre et de la demande est le mécanisme que nous avons choisi pour les mettre en rapport et déterminer leur importance relative dans la gestion de l'eau.

Comme résultat, nous obtenons le diagnostic des systèmes, leur vulnérabilité ainsi que la détermination de l'importance relative de chaque variable et en conséquence les bases pour l'application de la GIRE.

2 GIRE, GESTION DE L'EAU POTABLE ET SES VARIABLES

2.1 Antécédents de la GIRE

L'étude de cas particuliers est un des principaux modes de recherche de la GIRE. La bibliographie sur le sujet offre des études de cas liées à des pays et régions comme le Cameroun ***(Ako Ako A. et al. 2009)***, l'Afrique du Sud ***(Benito G. et al. 2010)***, le Maroc ***(Khattabi A. 2008)***, le Malawi et la Zambie ***(Simalabwi A. 2007)***, le Kazakhstan (et 4 autres pays de l'ancien bloc soviétique) ***(Muhamedzhanov Sh. 2007)***, le Vietnam ***(Mehtonen K. et al. 2008)***, l'Allemagne ***(van der Keur P. et al. 2008)***, les Emirats Arabes Unis ***(Murad A. et al. 2006)*** et l'Argentine ***(GWP 2009)***.

D'autres antécédents semblables peuvent être trouvés dans l'appendice. Ils sont consacrés à des études de cas du Troisième rapport des Nations Unies sur l'eau ***(2009b)***. Ces cas sont analysés du point de vue de l'application de la GIRE pour l'utilisation partagée des ressources en eau au niveau international, pour la solution de problèmes potentiels de distribution d'eau au niveau régional et national et pour l'étude d'autres problématiques qui peuvent compromettre la géopolitique de la région[6].

Chacune des recherches peut être qualifiée d'étude de cas particulier. En effet, bien qu'elles aient comme dénominateur commun la planification de l'utilisation de l'eau ou des ressources en eau partagées par différents pays ou régions, les analyses sont différentes quant aux objectifs et à l'usage que l'on veut donner à la ressource eau (alimentation, utilisation pour la navigation, eau potable, pollution) et quant aux problématiques de chacune d'entre elles (utilisation partagée, pénurie d'eau, conflits potentiels, droits de l'eau) ***(UNESCO 2009b)***.

D'autre part, il existe des études antérieures qui présentent l'analyse de cas génériques comme la génération d'incertitudes dans la GIRE ***(van der Keur P. et al. 2008)*** ou qui analysent, par exemple, la différence culturelle entre deux populations « comme les Français et les Allemands ». C'est la raison pour laquelle la GIRE et ses concepts sont abordés de différents points de vue ***(Matz M. 2008)***. Toutefois, cette discipline est assez récente et les particularités de chaque cas et des différentes situations suscitent encore beaucoup de recherches et de contributions sur le sujet de la gestion de l'eau.

En conclusion, on peut dire qu'en général l'étude de cas particuliers constitue le mécanisme qui permet de développer la théorie et les postulats soutenant la GIRE. L'Amérique latine ne fait pas exception à la règle. On peut citer, entre autres, deux initiatives de recherche et de travail au niveau régional :

- ⇒ Le projet AguAndes, qui est un programme de recherche pour promouvoir la Gestion Intégrée des Ressources en Eau dans les Andes - Apprendre du Passé pour Préparer le Futur – ***(Legrand C. 2008)***. Dans cette étude, les analyses effectuées sur les défis pour la mise en œuvre de ce concept dans la région de Quito présentent un diagnostic préliminaire et pilote de la zone afin de déterminer l'applicabilité de la GIRE ***(Pouget J. et al. 2008)***. L'objectif consiste à extrapoler les résultats pour la zone andine en incluant le territoire bolivien. Ce programme est réalisé avec la coopération de l'Universidad Mayor de San Andrés de La Paz et de l'Universidad Mayor de San Simón (UMSS).
- ⇒ Le projet CAMINAR (**Ca**tchment Management and **Min**ing Impacts in **Ar**id and Semi-Arid South America) a pour but la gestion intégrée des bassins versants. Il emploie la GIRE comme un outil visant cet objectif. En Bolivie, ce projet est orienté vers la gestion des conflits par la mise en œuvre de la GIRE, en ce qui concerne l'identification de conflits environnementaux dans la gestion des ressources hydriques ***(Quintanilla J. 2009)***

[6] *On compte des études de cas au Cameroun, au Soudan, en Tunisie, en Zambie (Rivière Congo), au Bangladesh, en Chine, au Pakistan, au Sri Lanka, en Ouzbékistan, en Estonie, en Finlande, en Hollande, en Espagne, en Turquie, à Rio de la Plata (Argentine, Brésil, Paraguay et Uruguay). (UNESCO 2009b)*

2.2 La GIRE en Bolivie

En Bolivie, il existe aussi des organismes qui traitent de la Gestion de l'eau, travaillent à la mise en œuvre de la GIRE et réalisent des recherches à ce sujet. On peut citer des institutions comme :

⇒ La Commission pour la Gestion Intégrée de l'Eau en Bolivie (CGIAB) qui est une plate-forme d'institutions publiques et privées ainsi que de centres de recherche universitaires. Elle s'insère dans la thématique de l'eau et travaille, depuis 2002, à promouvoir la conception concertée de politiques publiques dans le cadre de la gestion durable de la ressource eau et de ses services ***(CGIAB 2002)***. Cette institution a récemment publié une étude dans laquelle elle se réfère à la justice environnementale et à la capacité de promouvoir des opérations prolongées « durables » de l'eau. Dans ces études de cas, la GIRE est présentée comme une vision stratégique pour trouver des solutions ***(CGIAB 2009)***. Par ailleurs, cette commission a des activités dans la gestion de l'eau du bassin Taquiña de Cochabamba et soutient la politique de l'eau de l'état bolivien.

⇒ Le Centre Andin pour la Gestion et l'Utilisation de l'Eau, avec son projet GIRH (2008-2010) travaille en coordination avec le Programme de Recherche Stratégique en Bolivie (PIEB) et est financé par la Coopération Danoise (DANIDA).

Ses objectifs consistent à consigner les bases conceptuelles, méthodologiques et opérationnelles pour la mise en œuvre d'une stratégie de Gestion Intégrée des Ressources Hydriques dans des bassins de la Bolivie. Sa base de travail est l'interaction avec les organisations d'utilisateurs et les gouvernements municipaux. Ce centre concentre ses activités sur le bassin de Pucara (Tiraque - Punata, Cochabamba). Son principal apport est l'analyse de l'organisation et de la viabilité de l'application de la GIRE, comme outil opérationnel du Plan National du Bassin Versant ***(Centro Agua 2008)***

Une autre analyse sur l'emploi de la GIRE est l'étude des interventions à Tiquipaya qui révise l'histoire coloniale de la région et les concepts qui y sont associés, comme la petite propriété, la distribution naturelle de l'eau et l'intervention des syndicats agricoles dans la gestion de l'eau. Elle utilise les concepts de modélisation de la distribution de l'eau et recourt aux critères de la GIRE ***(Alurralde J. 2008)***.

Une étude intéressante rattachée à la GIRE est celle effectuée par Calizaya ***(2010)*** qui propose une méthode d'analyse multicritère pour la prise de décisions à travers l'étude de cas du bassin du Lac Poopó à Potosí.

Finalement, on observe que les analyses et initiatives sur le sujet ne sont pas nombreuses en général et encore moins dans le milieu bolivien. On note également qu'une étude spécifique sur la gestion de l'eau potable et de ses variables n'a pas encore été menée ni en Bolivie, ni en Amérique du Sud et encore moins à l'échelle de deux villes principales. C'est justement l'apport que cette thèse souhaite apporter.

Mentionnons également que l'analyse reprise dans cette thèse a servi de base au dépôt d'un projet à plus grande échelle, appelé la *Modélisation des Ressources Hydriques des villes de La Paz et d'El Alto*, qui a été lancé par l'Universidad Mayor de San Andrés avec des ressources de la coopération japonaise (JICA). Les résultats obtenus via cette thèse serviront de base à ce projet qui a démarré début 2010.

Le concept de gestion de l'eau en Bolivie a aussi été abordé du point de vue de la gestion du bassin versant pour des institutions comme le « Programa de Manejo Integral de Cuencas » ou PROMIC (Programme National de Gestion Intégrée des Bassins Versants) ***(http://www.promic-bolivia.org/promic.php)***. Ce programme a pour objectif l'utilisation durable des ressources du bassin (l'eau incluse) pour le développement économique et social. Il se développe depuis 19 ans, principalement dans la vallée de Cochabamba où se trouvent les terres les plus fertiles de la Bolivie.

2.3 La GIRE, privatisation versus une gestion équitable de l'eau en Bolivie

Au début des années 90, la région andine a connu des réformes légales visant à la mise sur pied d'institutions ayant pour objectif une meilleure gestion des ressources hydriques ***(Alurralde J. 2008)***. A propos de ces réformes, Jouravlev ***(2001)*** mentionne que les intentions de fond de ces réformes ne sont rien d'autre qu'une préparation à la privatisation de la gestion de l'eau.

Il faut également signaler que certaines conclusions du 2ème Forum mondial de l'eau à La Haye ***(2000)*** ont été controversées puisqu'elles proposaient des mesures telles que la limitation de l'expansion de l'agriculture, l'utilisation de transgéniques et l'établissement de cultures à l'échelle industrielle pour optimiser l'usage de l'eau.

Autre sujet de controverse, ces conclusions proposaient des mesures encourageant les gouvernements à chercher des capitaux privés pour la gestion de l'eau, en suggérant des réformes de la loi, des taxes sur l'eau et en introduisant le concept de l'eau comme un bien économique et commercial (Conclusions 2ème et 3ème Forum de l'eau) ***(Alurralde J. 2008)***.

La controverse porte sur la vision de la gestion de l'eau comme un bien commercial privé plutôt que comme un bien social. Dans les Forums de l'eau à Kyoto ***(2003)*** et à Mexico DF ***(2006)***, plusieurs participants ont également appuyé cette position (voir conclusions Forums de l'eau 2003 et 2006). Lors de sa participation au Forum de Kyoto, la position bolivienne a clairement été énoncée contre ces concepts économiques ***(Alurralde J. 2008)***.

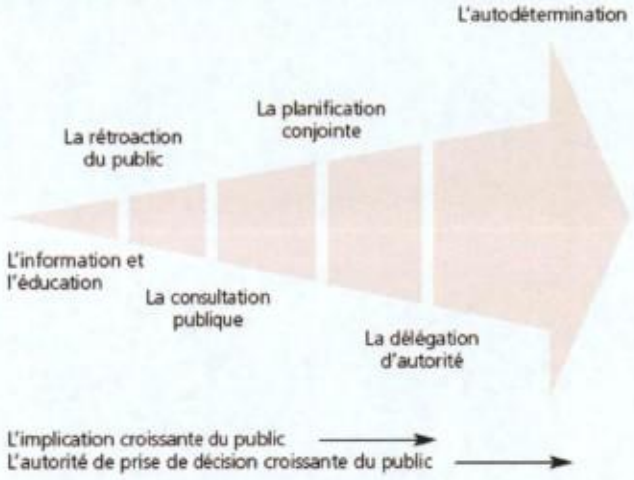
> *Actuellement, la Bolivie encourage la participation de la société dans la gestion de ses ressources naturelles et impose des réformes de loi plutôt sociales* ***(voir Loi de participation populaire et projets de la nouvelle loi de l'eau)***. *En janvier 2006, le Ministère de l'eau a été créé en Bolivie avec cette volonté.*
>
> *La GIRE considère, à la fois l'eau comme un bien économique (ce qui nous fait penser aux concepts relatifs à la privatisation de l'eau), et comme un bien social qui privilégie le bien-être social avant les intérêts économiques. Ce dernier concept est retenu pour son application conceptuelle à cette thèse, en concordance avec la position bolivienne plus participative et sociale.*

Des auteurs comme Jeffrey ***(2006)*** énoncent les défis d'une GIRE à l'échelle humaine et sociale en réclamant plus d'investissements pour la recherche et la connaissance de l'eau pour une gestion efficace de ce bien. Turton ***(2007)*** propose un trialogue entre la société, le gouvernement et la science pour une bonne gestion écosystémique (utilisation durable avec des concepts à caractère sociaux).

Dans ce cadre, on a déjà remarqué l'importance de la participation de la société bolivienne dans la gestion de l'eau (Chapitre 1). On formule dès lors l'hypothèse que la GIRE peut être appliquée à la société bolivienne.

Soutenu par cette participation, il est possible que le trialogue fonctionne pour une gestion de l'eau plutôt sociale qu'économique de la manière dont le propose Burton ***(2001)***, avec information et éducation des usagers et consultations publiques (voir Figure 2.1). Il faut noter que dans la législation de l'environnement en Bolivie ***(Loi N° 1333)***, la consultation publique est nécessaire pour la mise en marche de n'importe quel projet.

Figure 2.1 : La participation du public dans la gouvernance de l'eau



(Burton J. 2001)

Nous considérons donc qu'une vision de la GIRE vers une gestion sociale et juste est possible en Bolivie. Nous proposons dès lors dans cette thèse d'utiliser les concepts de la GIRE vers ce type de gestion.

2.4 Concepts guides pour l'application de la GIRE

Le concept de la GIRE est relativement nouveau et les tentatives d'application sont peu nombreuses malgré l'importance qu'on lui assigne particulièrement dans des pays comme la Bolivie ***(Calizaya A. et al. 2010)*** où l'on commence récemment à appliquer ses concepts.

Ci-dessous nous transcrivons un texte qui nous semble décrire d'une façon complète les concepts qui soutiennent la GIRE.

> *... « La GIRE s'est inspirée des Principes de Dublin. Elle requiert une approche plus holistique vis-à-vis de la gestion en essayant de prendre en compte non seulement les interdépendances avec les systèmes naturels, mais également la façon dont les systèmes économiques et sociaux affectent la pression exercée sur la ressource de base. Elle requiert également une approche plus participative soulignant la nécessité d'une plus grande implication de la part des parties prenantes au niveau de la gestion et du développement de la ressource, y compris la prise en compte du rôle essentiel que jouent les femmes en tant que décideurs et usagers de l'eau. Enfin, elle implique de considérer l'eau comme un bien économique qui ne peut continuer à être disponible gratuitement pour l'ensemble des usagers et usages concurrentiels. Il est inévitable que la demande dépassera la capacité de la ressource de base pour dispenser les services à moins que des mécanismes soient mis en place pour faire prendre conscience aux usagers des coûts induits (y compris les coûts environnementaux) pour l'approvisionnement.*
>
> *La GIRE représente donc un défi majeur pour les décideurs. Elle demande de rompre avec les traditions, de passer d'une gestion sectorielle à une gestion intégrée, du haut vers le bas avec des approches réactives par rapport à la demande et aux parties prenantes, d'une approche basée sur l'offre à une gestion de la demande, d'un système de commande et de contrôle à des systèmes de gouvernance plus coopératifs et délégués, d'organisations de gestion fermées régies par les experts à des entités plus ouvertes, plus transparentes et plus communicatives. La GIRE vise d'abord à changer la nature de la gouvernance de l'eau définie comme étant « l'ensemble des systèmes politiques, sociaux, économiques et administratifs en place pour développer et gérer les ressources en eau, et fournir des services de l'eau, à différents niveaux de la société »...**(Texte transcrit d'près GWP 2007)***

La GIRE tient compte des aspects comme le cycle hydrologique dans sa totalité, les intérêts sectoriels, les nécessités futures, la gestion de l'eau comme une ressource naturelle renouvelable, mais limitée et la bonne gouvernance de l'eau *(FAO 2007;GWP 2007;UNESCO 2006)*.

Passer de la théorie à la pratique de la GIRE n'est pas une tâche simple *(GWP 2009;IRC 2006)*. Il existe des manuels rédigés par plusieurs institutions qui traitent du sujet tant au niveau régional qu'au niveau local. Nous utilisons comme référence la publication de la « Global Water Partnership » *(GWP 2007)* qui présente une perspective pratique d'application de la GIRE au niveau régional ainsi qu'un autre manuel de la même institution *(GWP 2009)* et celui de Burton *(2001)* qui nous offre une perspective plutôt locale au niveau du bassin versant.

Au sujet de l'application de la GIRE, il faut prendre en compte les aspects particuliers de notre région tels que la dimension humaine de la GIRE *(Jeffrey P. 2006)*, les aspects culturels locaux ainsi que les aspects financiers, économiques et légaux *(Jaloobayev A. 2007)*, les besoins de la gouvernance de l'eau *(Simalabwi A. 2007;Turton A. et al. 2007)* et d'institutions solides *(Mehtonen K. et al. 2008)*.

De plus, l'application de la GIRE se trouve en relation avec trois aspects essentiels : l'environnement propice, les rôles institutionnels et les instruments de gestion (Tableau 2.1) *(GWP 2007)*.

Les deux premiers aspects sont liés à la volonté politique du pays et à son organisation, le troisième est un aspect connecté à la pratique quotidienne de la GIRE qui touche l'échelle humaine *(Jeffrey P. 2006)* et aux décisions qui sont en dépendance directe avec les enjeux de la GIRE *(Burton J. 2001;GWP 2009)*.

Dans ce cadre, au moyen de l'analyse des variables, nous cherchons à déterminer les bases d'application de certains énoncés relatifs aux instruments de gestion (Tableau 2.1) :

Evaluation des ressources en eau – Appréciation des ressources et des besoins
Utilisation optimum de l'eau – et de la gestion de la demande et de l'approvisionnement
Garantie du partage de l'eau

On cherche également à réduire les incertitudes de type épistémique de la gestion de l'eau pour l'application de la GIRE.

Tableau 2.1 : Aspects nécessaires pour l'application de la GIRE à une gouvernance de l'eau

L'ENVIRONMENT PROPICE	ROLES INSTITUTIONNELS	INSTRUMENTS DE GESTION
Politiques - Fixer des objectifs pour l'utilisation, la protection et la conservation de l'eau *Cadre législatif - Politiques de l'eau converties en lois* *Structures de financement et d'incitations - Ressources financières*	*Création d'un cadre organisationnel - Formes et fonctions* *Edification des capacités institutionnelles*	*Evaluation des ressources en eau - Appréciation des ressources et des besoins* *Plans pour la GIRE - Combinaisons des options de développement, d'utilisation de la ressource et d'interaction humaine.* *Utilisation optimum de l'eau - et de la gestion de la demande et de l'approvisionnement* *Instruments de changement social - Encourager une société de l'eau* *Résolution de conflits - Gestion des conflits, garantie du partage de l'eau* *Instruments réglementaires - Allocation el limites d'utilisation de l'eau* *Instruments économiques - Utilisation de la valeur et des prix pour l'efficacité et l'équité* *Échange d'information - Partage de la connaissance pour une meilleur gestion de l'eau.*

2.5 Analyse des variables en jeu : formulation du modèle descriptif

Construction du modèle

Selon la méthodologie présentée dans la Figure 1.7, la première étape de notre recherche est la construction du modèle descriptif de la gestion de l'eau potable des villes de La Paz et d'El Alto (appelé dorénavant modèle descriptif) qui, dans notre cas particulier, sert à guider l'analyse des variables en jeu dans la gestion de l'eau.

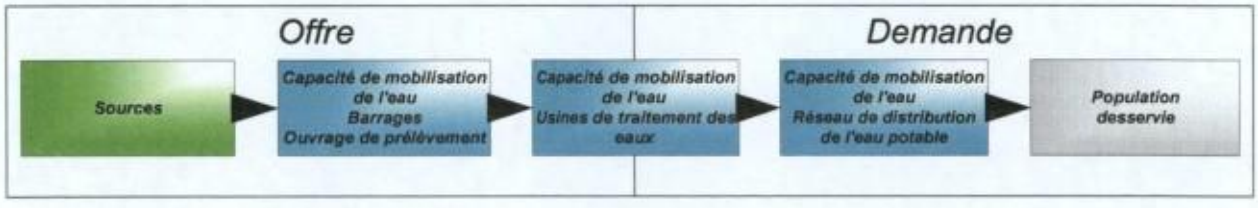
L'approche choisie pour la construction de notre modèle descriptif est celle du bilan de l'offre et de la demande puisque nous considérons que ce bilan définit aussi bien les objectifs que les obstacles potentiels de la gestion. Nous l'appelons modèle descriptif puisqu'il doit représenter l'architecture des systèmes de gestion qu'on souhaite analyser et, en même temps, il doit décrire les rapports entre eux.

Sur base de la structure et de la conception des systèmes d'exploitation d'eau potable, on obtient l'identification des composants primaires :

Sources → Barrages → Usines de traitement → Réseau → Population desservie

A partir de cette conformation primaire de base, il est possible d'obtenir une première approche de la construction du modèle souhaité :

Figure 2.2 : Première approximation pour la construction du modèle descriptif



Cette figure permet de procéder à une description des systèmes qui ont comme point de départ les sources (bassins versants), qui passent par les ouvrages de prélèvement d'eau ou de régulation tels que les barrages, les usines de traitement de l'eau (lieu de mise en rapport de l'offre et de la demande) et qui se terminent au réseau de distribution de l'eau potable vers la population. Ces deux dernières étapes se situent du côté de la demande.

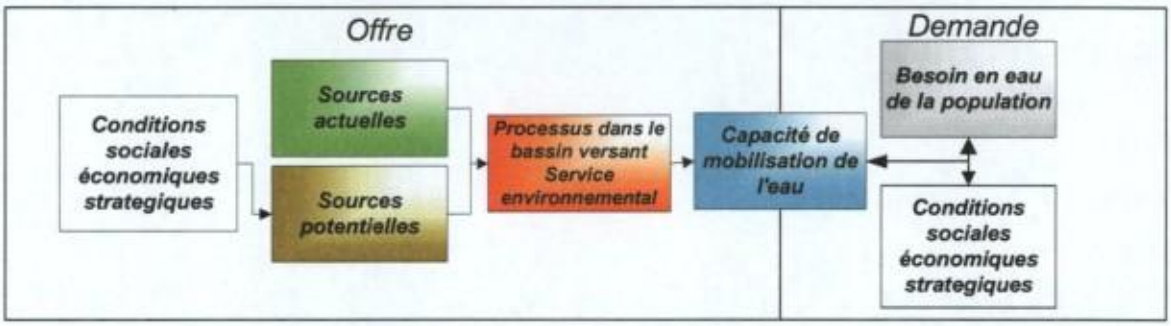
Cette première analyse nous permet d'élaborer un second niveau d'analyse dans lequel nous incluons les éléments de type social, stratégique et économique qui conditionnent la gestion de l'eau ***(Jaloobayev A. 2007;Matz M. 2008)***.

En considérant le cycle hydrologique, il est nécessaire d'ajouter un cadre pour l'analyse des processus hydrologiques dans le bassin versant ***(Burton J. 2001)***. Dans ce cadre, on introduit le concept de service environnemental.

> *Au sein du concept de service environnemental, les précipitations représentent l'input du bassin lequel par ses processus internes livre l'eau douce comme un service environnemental* ***(FAO 2007)***. *De la même manière, les glaciers sont considérés comme l'un des processus permettant de rendre ce service environnemental l'*[7].

Nous faisons également la distinction entre les sources actuelles et les sources potentielles.

Figure 2.3 : Deuxième approximation pour la construction du modèle descriptif



La Figure 2.3 représente un modèle idéal dans lequel les conditions sociales, stratégiques et économiques forment un point de départ pour la planification de la gestion.

En pratique, on constate toutefois que, principalement dans les régions rurales en Bolivie, il existe deux moments d'approche sociale d'un projet et de sa gestion. Premièrement, au moment où naît l'idée du projet qui est communiquée au bénéficiaire (ceci entraîne un accord qui n'est pas forcement définitif) et, deuxièmement, au moment où le projet se concrétise et quand l'intérêt réel de sa mise en œuvre est ressenti. ***(Consultora Pirámide 2009;Rivera & Añez 2009)***.

Il faut remarquer, de même, que la gestion de l'eau nécessite la construction d'infrastructures (capacité de mobilisation de l'eau) et d'ouvrages construits dans les bassins éloignés des centres urbains. Ceux-ci sont dépendant de l'influence ou de l'accord social.***(Loi No 1551: Participación Popular 1993)***.

L'accord social est conditionné à son tour aux droits territoriaux d'exploitation de l'eau des communautés qui habitent sur les bassins versants depuis très longtemps et qui ont la priorité d'exploitation de la ressource hydrique selon la loi bolivienne. On appelle cela le ***« droit territorial et ancestral d'utilisation de l'eau (en espagnol : Usos y costumbres) »*** qui est reconnu comme une priorité selon la nouvelle Constitution de l'État bolivien ***(République de Bolivie, 2009)*** (voir chapitre 1).

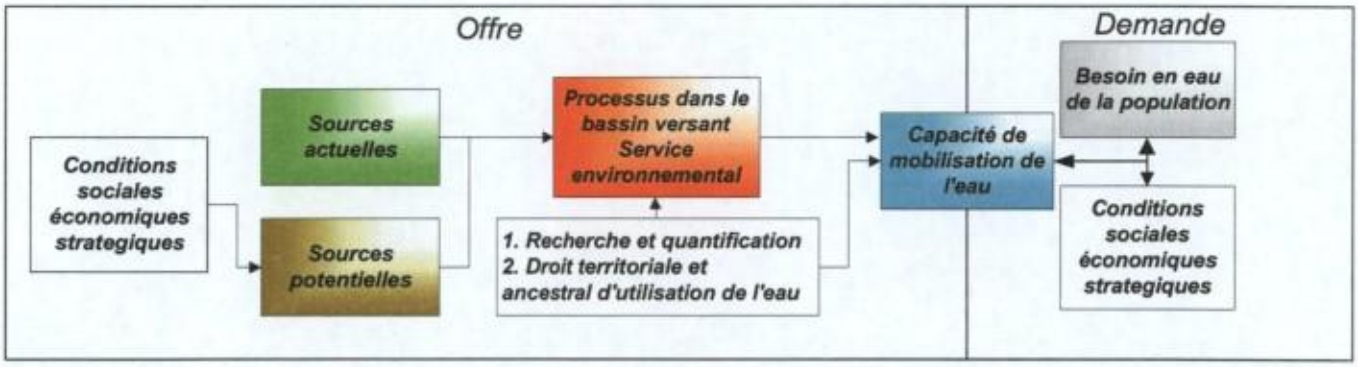
---

[7] *Le service environnemental est un service écosystémique à effets externes ;*
Les services écosystémiques sont les avantages que les individus tirent des écosystèmes (FAO, 2007)

Il faut également prendre en compte des aspects mal connus tels que l'importance de l'apport en eau des glaciers et les impacts possibles du changement climatique sur les ressources en eau. Ces impacts sont bien entendu liés à la quantification de la disponibilité actuelle en eau des bassins versants.

En ajoutant ces dernières remarques, on modifie notre modèle descriptif de la manière suivante :

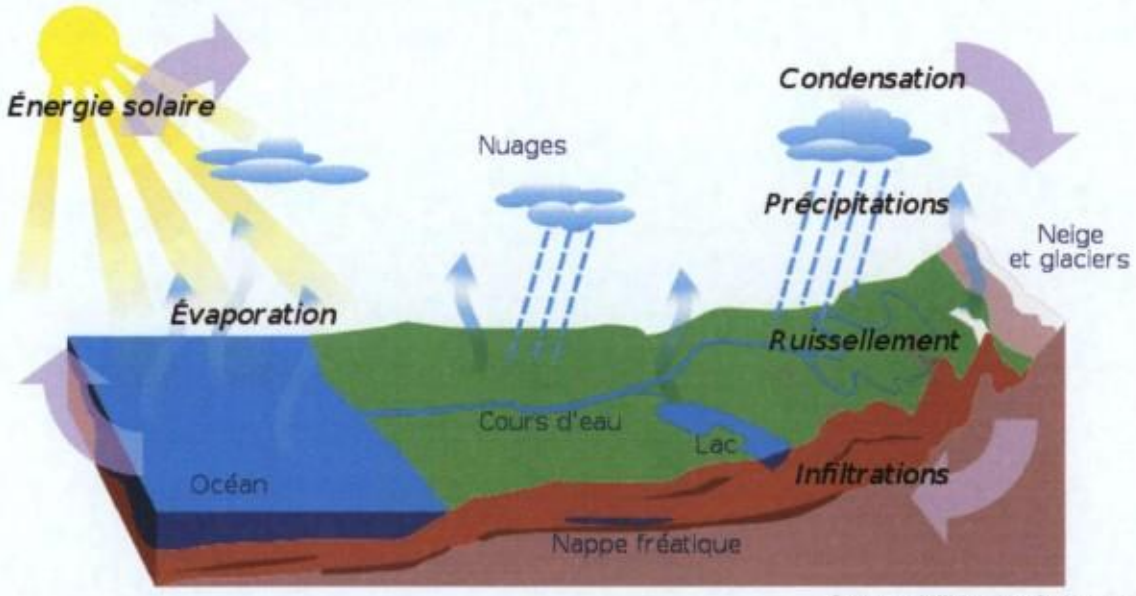
Figure 2.4 : Troisième approximation pour la construction du modèle descriptif



La Figure 2.4 introduit la modification énoncée dans les deux derniers paragraphes. L'exploitation de nouvelles ressources est soumise à sa quantification, à sa disponibilité et à des aspects inconnus cités ci-dessus. Développer chaque partie du modèle constitue la démarche suivante.

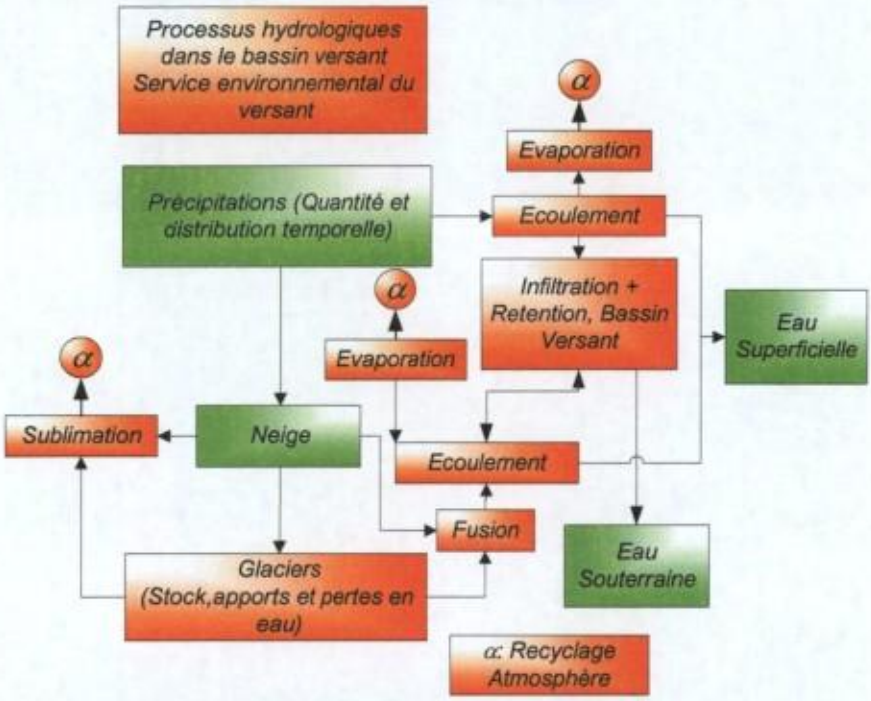
Les processus dans le bassin versant peuvent être décrits à travers le cycle de l'eau (Figure 2.5) et schématisés dans la Figure 2.6 pour la construction de notre modèle.

Figure 2.5 : Le cycle de l'eau



Source : Wikipedia, Cycle de l'eau (2010)

Figure 2.6 : Processus hydrologiques dans le bassin versant

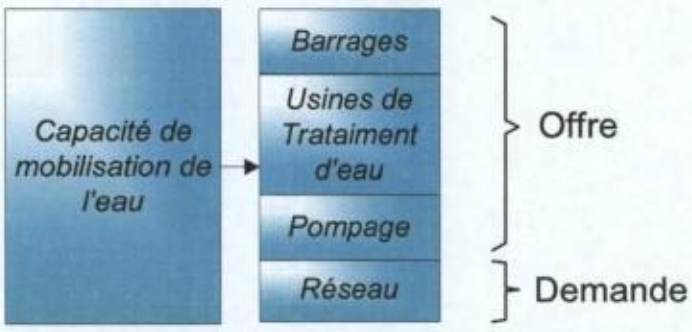


Cette figure montre aussi l'origine des sources actuelles et potentielles des bassins versants : les eaux superficielles et souterraines qui, à leur tour, trouvent leur origine dans les précipitations.

Par rapport à la capacité de mobilisation de l'eau, sur la base de la Figure 2.2, nous pouvons établir qu'une série d'infrastructures sont nécessaires pour l'exploitation de l'eau telle que des barrages (pour la régulation de l'eau superficielle), des usines de traitement de l'eau (pour rendre l'eau potable), des stations de pompage (pour prélever l'eau souterraine). D'autre part, dans le cadre du service à la population, on a besoin d'un réseau de distribution de l'eau potable (il s'agit de toutes les canalisations de distribution et de ses accessoires). (Figure 2.7).

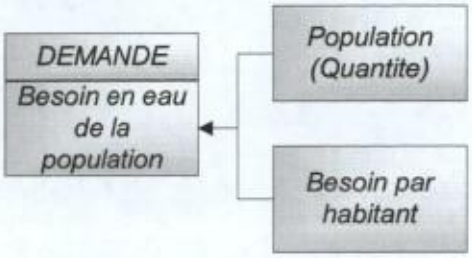
Dans ce cadre, il faut également prendre en compte les pertes qui existent entre chaque étape du processus d'exploitation de l'eau.

Figure 2.7 : Capacité de mobilisation de l'eau et ses composants



En ce qui concerne les besoins en eau de la population, ils sont définis par habitant et pour une période de temps déterminée (jour, mois, année selon l'échelle de temps choisie) ***(Jaen E. 2004)*** (Figure 2.8).

Figure 2.8 : Demande et ses composants



L'eau superficielle et souterraine constitue des ressources possibles pour le futur. Mais, d'une part, il faut tenir compte de la gestion sociale qu'il faut mettre en œuvre pour les utiliser et, d'autre part, il existe un manque de recherche sur le réseau aquifère d'El Alto.

Les points décrits dans les derniers paragraphes ainsi que dans les Figure 2.6, 2.7 et 2.8 ont été ajoutés dans notre troisième approche. De même, à partir des objectifs et des hypothèses formulées à la fin du premier chapitre, nous avons structuré le modèle descriptif présenté à la Figure 2.9.

Avec cette nouvelle approche, il est possible d'analyser plus en détail la structure de la gestion de l'eau de La Paz et d'El Alto, principalement en ce qui concerne la description des variables, des processus et des aspects dont cette gestion dépend.

Faire l'analyse détaillée de toutes les variables qui jouent un rôle dans la gestion et qui sont incluses dans la Figure 2.9 est une tâche ambitieuse, vu le nombre de ces variables. D'autre part, il s'agit d'un travail multidisciplinaire puisqu'il touche aussi le terrain des sciences sociales.

Suite à cette constatation, notre recherche s'est focalisée sur quelques variables clés pour l'offre et la demande d'eau et par conséquent sa gestion durable, selon les critères suivants :

Nous considérons les précipitations comme le principal « input » de notre système, sans oublier l'apport provenant de la fonte des glaciers, qui est un aspect important à déterminer pour la gestion des villes andines comme La Paz et El Alto. La détermination du stock glaciaire est également importante pour définir les réserves en eau stockées dans les glaciers de nos bassins versants.

Pour déterminer les ressources disponibles en eau superficielle, il est nécessaire de connaître et de décrire la dynamique du bassin versant. Le modèle envisagé doit être simple, car il devra être construit sur base du faible nombre de données disponibles et devra permettre de simuler des situations attribuables aux impacts du changement climatique.

Au niveau de l'infrastructure, il faut connaître l'efficacité du réseau de distribution : combien de litres d'eau faut-il prélever des réservoirs pour qu'un litre d'eau soit desservi à la population ?

L'aspect humain est représenté par la demande d'eau de la population et pour cela il faut analyser les deux composantes ci-dessus.

Selon nos hypothèses, à travers l'analyse des variables que l'on vient de mentionner dans les derniers paragraphes, il est possible de faire un diagnostic de la situation actuelle de la gestion de l'eau et de sa disponibilité, et d'envisager également le temps et les données qu'il nous faut pour établir des lignes directrices de la gestion actuelle et future de l'eau.

Approfondir la recherche sur chaque variable jusqu'à ce qu'il soit possible de déterminer des valeurs ou des paramètres qui puissent nous permettre d'aboutir à ce diagnostic constitue aussi une ligne directrice de cette thèse, mais l'objectif est la gestion de l'eau et pas l'analyse approfondie de chaque variable en jeu.

C'est vrai qu'il est discutable de laisser de côté certaines variables telles que l'apport potentiel d'eau souterraine ou l'analyse des aspects plus particuliers liés au bilan hydrologique du bassin versant ou les aspects liés aux acteurs sociaux et aux revendications des droits d'accès à l'eau. Mais, la portée de la thèse devait être limitée en fonction de la disponibilité des informations et de la possibilité de les analyser.

Cependant, bien que nous ne les prenions pas en compte d'une façon directe dans cette thèse, nous les traitons d'une façon implicite dans nos analyses, en donnant aussi l'occasion de pouvoir créer de nouvelles lignes de recherche et d'analyse sur le sujet de la gestion. Ceci constitue un objectif indirect de cette thèse : créer un espace de discussions et de base pour une recherche future qui pourrait démarrer à partir de notre travail.

Tous les aspects mentionnés précédemment nous font aboutir à notre version finale du modèle descriptif qui servira de base pour l'analyse que nous présentons dans cette thèse (Figure 2.10).

Dans ce même cadre, nous avons structuré les chapitres de cette thèse selon le plan suivant :

Chapitre 3 : Sources actuelles : Eau superficielle – Précipitations

Analyse des précipitations, des perspectives futures de modification de leur quantité ou de leur concentration due aux impacts possibles du changement climatique.

Chapitre 4 : Bilan hydrologique – apport du bassin versant et apport glaciaire

Analyse et modélisation de la dynamique hydrologique du bassin versant à l'aide d'un modèle permettant de déterminer l'apport des glaciers ainsi que la disponibilité en eau suite à des changements climatiques potentiels.

Chapitre 5 : Glaciers – Stock et retrait

Analyse et modélisation des glaciers : application d'un modèle physique visant à estimer l'évolution possible des glaciers situés dans les bassins étudiés. La détermination du stock disponible est un autre sujet abordé dans ce chapitre.

Chapitre 6 : Capacité de mobilisation de l'eau

Analyse de l'efficacité de l'infrastructure existante.

Chapitre 7 : Population et besoin en eau

Analyse de la demande en eau de la population de La Paz et d'El Alto.

Chapitre 8 : Bilan de l'offre et de la demande

Utilisation du bilan de l'offre et de la demande pour faire un diagnostic de la gestion actuelle de l'eau, en envisageant aussi ses temps limites et les mesures possibles qui devront être prises pour l'optimiser et donner les lignes directrices recherchées par la GIRE.

Les bases de la GIRE proposées pour la gestion de l'eau potables des villes de La Paz et d'El Alto, sont présentées dans d'un compte rendu des analyses faite au long de la thèse, qui nous conduit aux conclusions du chapitre 9.

Figure 2.9 : Quatrième approximation pour la construction du modèle descriptif

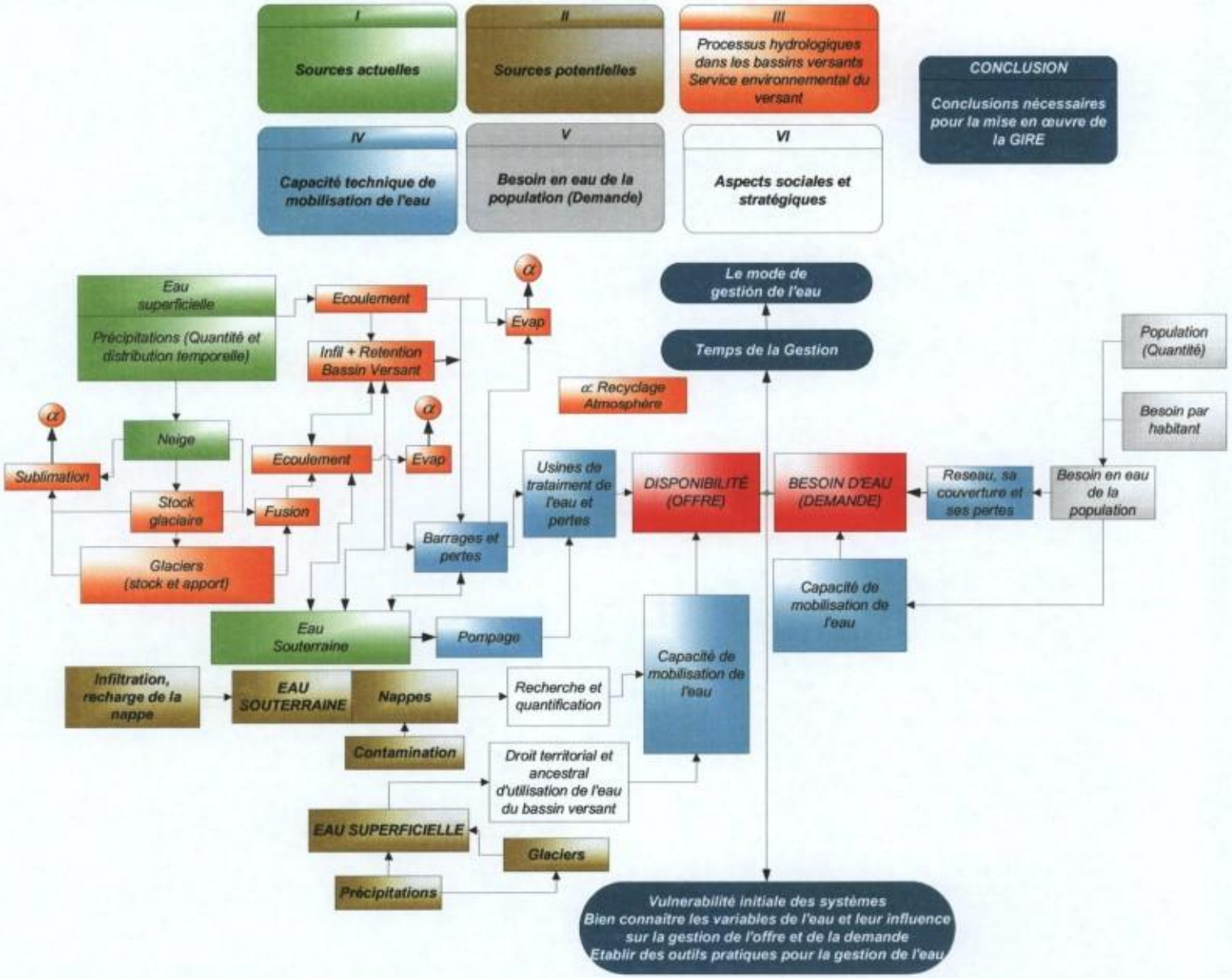
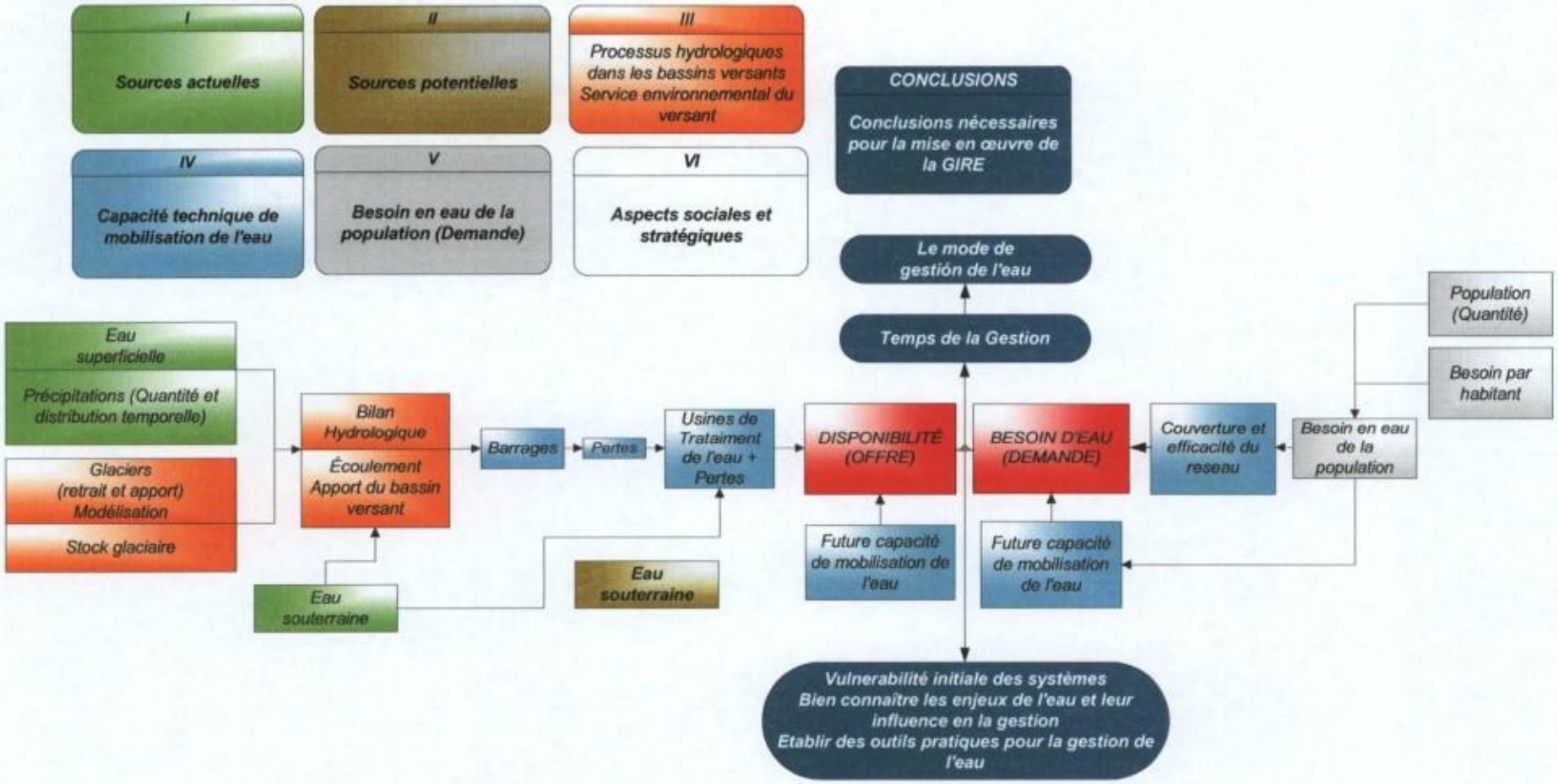


Figure 2.10 : Modèle descriptif



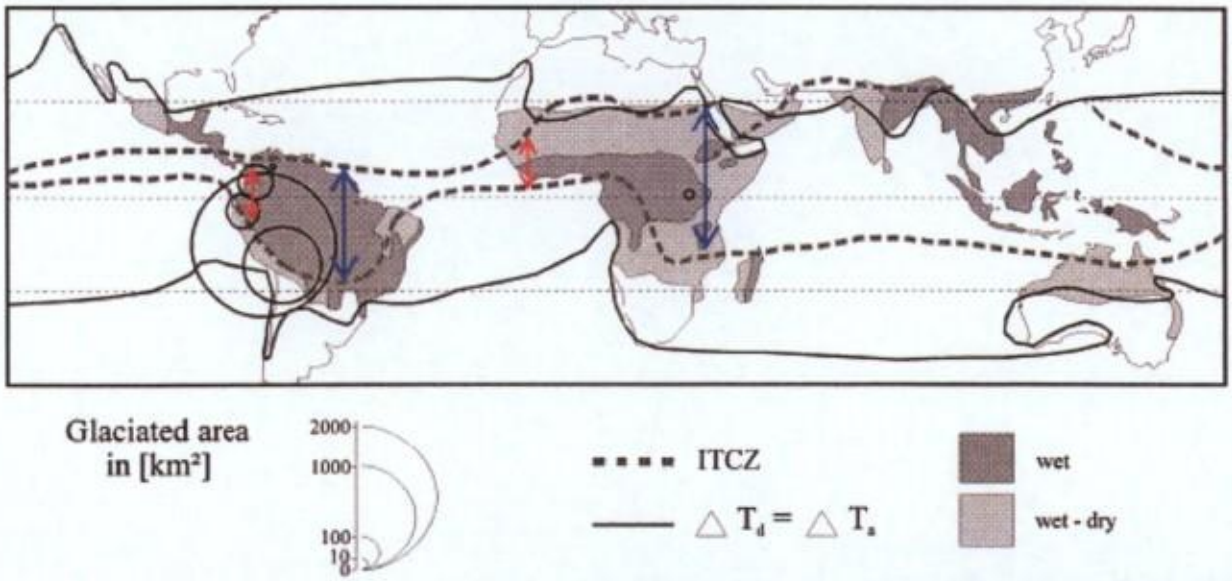
3 PRECIPITATIONS

3.1 Introduction

Les précipitations sur les Andes Centrales sont principalement contrôlées par la zone de convergence intertropicale (ZCIT) et par le front polaire austral. *(Roche A. 1991;Ronchail J. 1988)*

La ZCIT (Figure 3.1) est une zone où les alizés du NE et du SE convergent, ce qui engendre un processus d'ascension des masses d'air chaudes par convection verticale. Cette ascension est accompagnée par une condensation importante *(Hufty A. 2001)*. Ce phénomène provoque une zone de basses pressions atmosphériques dans la région équatoriale où les radiations solaires sont les plus intenses sur le pourtour du globe. Cette zone de basses pressions, renforcée par l'énergie apportée par les rayons solaires verticaux, se déplace en fonction des saisons entre le tropique du Cancer au mois de juillet et le tropique du Capricorne au mois de décembre *(Hufty A. 2001;Thompson & Turk 1995)*.

Figure 3.1 : Représentation de la zone d'influence de la ZCIT



(Kaser G. 2001) modifié par (Jaffrain J. 2007)

Délimitation des tropiques et représentation de la ZCIT comme une bande de convection sur tout le pourtour du globe (Kaser G. 2001).
Les cercles représentent les surfaces couvertes par des glaciers (en km²) et les flèches de couleur soulignent « l'effet continent » de la ZCIT (Jaffrain J. 2007).

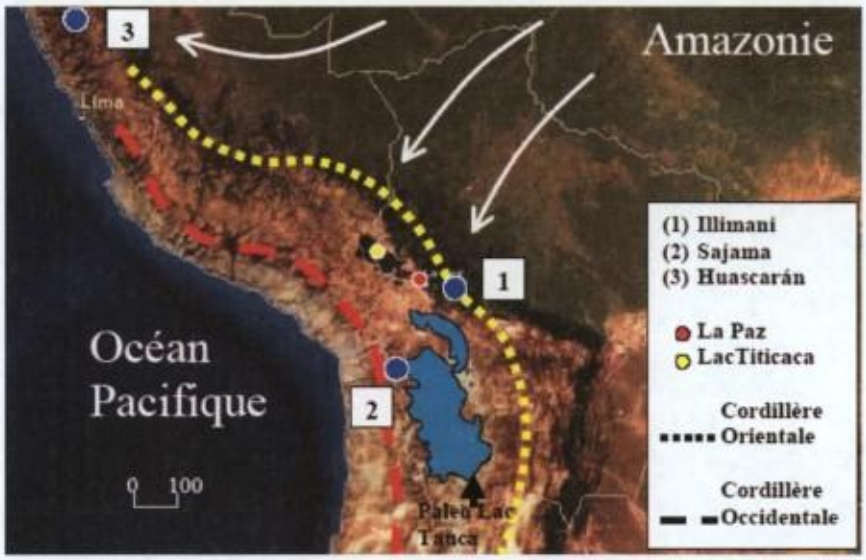
En Amérique du Sud, au cours de l'année, la zone de convergence intertropicale suit une migration saisonnière. Elle se positionne au nord de l'équateur vers 10°N en hiver et atteint sa position la plus au sud pendant l'été austral (approximativement 10°S sur le littoral Pacifique selon Hastenrath *(1990), (Jaffrain J. 2007)*.

La tranche de migration latitudinale de la ZCIT au cours de l'année n'est pas uniforme selon les régions. Dans la partie Est de l'Amérique du Sud *(Vuille M. et al. 1999)* l'amplitude de migration est plus grande que dans la partie Ouest (Figure 3.1) et le déplacement de la ZCIT vers le sud tend à être plus rapide *(Hastenrath S. 1990)*. C'est ce qu'on appelle « l'effet continent » qui s'observe également en Afrique *(Jaffrain J. 2007)*.

La ZCIT se matérialise sur le continent américain, par une bande de nuages, constituée des apports Atlantique et Amazonien. La circulation des alizés pousse les masses d'air chaudes et humides de l'Amazonie et de l'Atlantique vers la Cordillère Orientale. Cette barrière naturelle engendre des précipitations abondantes sur le versant Est de la cordillère dans cette région d'Amérique du Sud. Le climat bolivien connaît des variations de précipitations selon les saisons. Ainsi, l'hiver austral, qui correspond à la position la plus nordique de la ZCIT, est associé à un épisode de sécheresse, dans la mesure où la zone nuageuse ne couvre pas le territoire. Par contre, durant l'été austral, qui correspond à une position plus australe de la ZCIT, le climat est marqué par des précipitations abondantes sur l'ensemble du territoire bolivien ***(Montes de Oca I. 2005;Vuille M. 1999;Vuille M. et al. 1999;Vuille M. et al. 2000)***.

Par rapport au climat de la région altiplanique, Ramírez ***(2003)*** a identifié, à l'aide d'une analyse isotopique de la glace des glaciers Huascarán (Pérou), Sajama, et Illimani (Bolivie) (Figure 3.2), l'influence locale et régionale de la ZCIT. Cette étude a mis en évidence l'influence Nord-Sud du processus mais également l'existence d'une influence Est-Ouest.

Figure 3.2 : Localisation des glaciers analysés dans l'étude de Ramírez (2003) et du paléo lac Tauca

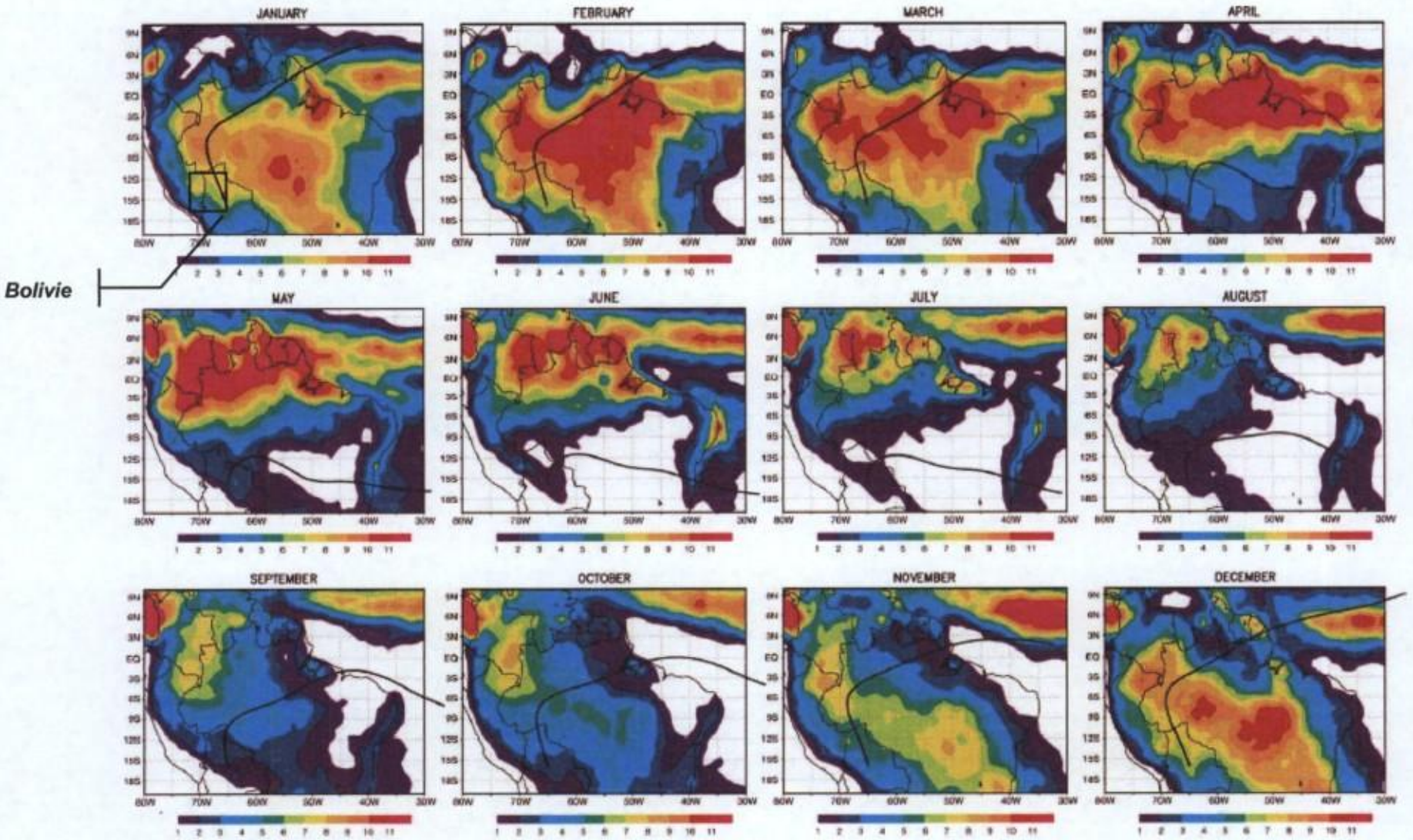


(Clayton 1995 in Ramírez 2003)

Selon Ramírez ***(2003)***, le paléo lac Tauca (Figure 3.2) a influencé le paléoclimat de certaines régions à proximité de Sajama. Avec la même logique à un niveau plus restreint (en gardant à l'esprit les grandes différences de taille entre l'ancien lac Tauca et le Titicaca), le lac Titicaca influence le climat l'environnant.

Notre étude s'effectuant entre 30 et 50km du lac pourrait donc être sous l'influence de ce phénomène. Une étude de Vimeux ***(2005)*** réalisée sur les variations isotopiques du deutérium dans les précipitations de la vallée du Zongo (moins de 10km de la région étudiée dans la présente étude) a mis en évidence que la température locale n'avait pas d'influence sur le signal isotopique des précipitations. Par contre, elles sont influencées par le transport d'humidité des masses d'air provenant de l'Est et du Nord-Est (Figure 3.3).

Figure 3.3 : Analyse de la variation des précipitations [mm/jour] *(Vimaux, 2005)*

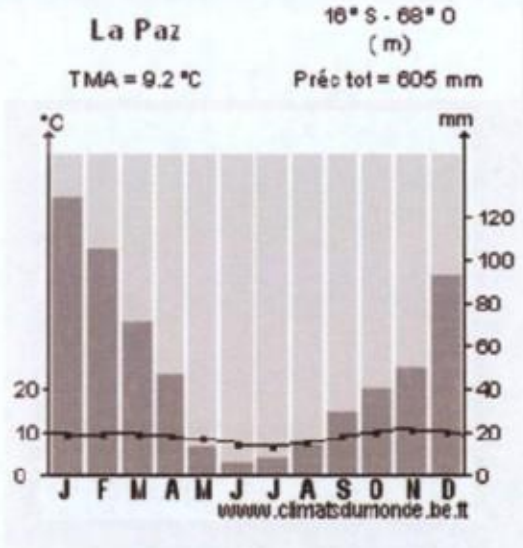


En cadre: zone d'étude

Trajectoires des masses d'air: Est vers l'Ouest

La Figure 3.3 présente les trajectoires des masses d'air (lignes noires) influençant le climat et les précipitations de l'Altiplano bolivien. Durant les mois d'octobre et/ou novembre, les masses d'air viennent du Nord-Est (Amazonie brésilienne) annonçant la période pluvieuse s'étendant de novembre à mars. A partir du mois d'Avril les masses d'air viennent principalement de l'Est. C'est la période sèche s'étendant jusqu'au mois d'Août. Ensuite, les vents dominant du Nord-Est étant de retour, le cycle recommence.

Figure 3.4 : Diagramme ombrothermique de La Paz



Le diagramme ombrothermique de La Paz (Figure 3.4), permet de bien visualiser la succession de la saison sèche d'hiver (MJJA) vers la saison humide en été (NDJF). C'est dans ce cadre climatique global que s'inscrit cette recherche, mais celle-ci va bien évidemment être conditionnée par les caractéristiques locales des précipitations.

3.2 Base de données

Les données des précipitations proviennent de différentes sources, la principale étant le SENAMHI. (Service National de Météorologie et Hydrologie de Bolivie). Cette institution est chargée de mesurer les précipitations et les données météorologiques de tout le pays. Cette base de données a été complétée par les mesures de l'EPSAS qui gère des pluviomètres à proximité de ses barrages dans un but de contrôle et de gestion.

Les données des stations disponibles à proximité de notre zone d'étude sont présentées dans le Tableau 3.1. Etant donné que le climat de ce secteur est influencé par la zone amazonienne, on a choisi comme référence deux stations situées à l'Est du pays (S. 19 à 20, Tableau 3.1), avec un registre de données étendu et de bonne qualité, pour contraster avec les analyses des données de notre champ d'étude.

En ce qui concerne les registres des écoulements des bassins étudié (voir Tableau 3.1), nous n'avons pas trouvé de stations qui possèdent un registre long et continu correspondant aux données pluviométriques (afin d'établir un bilan), excepté la station d'Alto Achachicala qui fait un jaugeage quotidien du débit, et qui peut être comparée avec la station pluviométrique du même nom (Station 25, Tableau 3.1). Toutefois, grâce à la collaboration d'EPSAS, il a été possible d'obtenir les niveaux d'opération de barrages de Hampaturi, Incachaca, Tuni et Milluni, avec lesquels, en comparant avec l'eau envoyée aux usines de traitement, nous avons pu calculer l'apport des débits de ces bassins (Stations 21 à 24, Tableau 3.1).

Bien qu'il n'existe pas des jaugeages des débits à l'entrée des barrages (input barrage), il est possible de les estimer à l'aide des débits envoyés vers les usines de traitement d'eau (output barrage), de l'altitude des niveaux des surfaces de l'eau (mesures journalières) et des volumes stockés.

Tableau 3.1 : Données disponibles pour étudier les précipitations

	Station	Paramètre (1)	Unité	Latitude	Longitude	Altitude	Années disponible	Périodicité des données (2)	Années complètes	Responsable Station
1	San Calixto	P	mm	16° 29' 0"	68° 7' 0"	3658	1917-2007	J	83/91 , 91.2%	SENAMHI
2	El Alto AASANA	P	mm	16° 31' 0"	68° 13' 0"	4071	1943-2006	J	61/64 , 95.3%	SENAMHI
3	Peñas	P	mm	16° 17' 0"	68° 38' 0"	3986	1949-2002	J	45/54 , 83.3%	SENAMHI
4	Laikakota	P	mm	16° 32' 0"	68° 8' 0"	3632	1991-2007	J	15/17 , 88.2%	SENAMHI
5	Huarina	P	mm	16° 12' 0"	68° 38' 0"	3825	1973-2008	J	35/39 , 89.7%	SENAMHI
6	Tuni	P	mm	16° 14' 30"	68° 14' 15"	4460	1970-2008	J	27/39 , 69.2%	SAMAPA- EPSAS
7	Condoriri	P	mm	16° 14' 30"	68° 14' 15"	4460	1971-1996	J	15/26 , 57.7%	EPSAS
8	Incachaca	P	mm	16° 24' 10"	68° 2' 45"	4380	1976-2008	J	22/33 , 66.7%	SAMAPA- EPSAS
9	Hampaturi	P	mm	---	---	4185	1999-2008	J	8/10 , 80%	EPSAS
10	Milluni	P	mm	---	---	4530	1970-2008	J	35/39 , 89.7%	COBEE - EPSAS
11	Huayna Potosí 1	P	mm	16° 28' 54"	68° 11' 50"	4050	1975-1991	M	---	SAMAPA
11b	Huayna Potosí 2	P	mm	16° 16' 48"	68° 11' 24"	4735	1997-2003	M	---	SAMAPA
12	Ayo Ayo	P	mm	17° 5' 0"	68° 0' 0"	3880	1953-2008	J	45/56 , 80.4%	SENAMHI
13	Calacoto	P	mm	17° 17' 0"	68° 38' 0"	3805	1950-2008	J	40/59 , 67.8%	SENAMHI
14	Chuquiaguillo	P	mm	16° 27' 0"	68° 6' 0"	4080	1975-2008	J	26/36 , 72.2%	SENAMHI
15	El Belén	P	mm	16° 1' 0"	68° 42' 0"	3820	1949-2008	J	25/60 , 41.7%	SENAMHI
16	Sorata	P	mm	15° 45' 0"	68° 41' 0"	3140	1970-2008	J	24/39 , 61.5%	SENAMHI
17	Alto Achachicala	P	mm	16° 20' 0"	68° 20' 0"	4380	1979-2008	M	29/30 , 96.7%	SENAMHI
18	Lambate	P	mm	16° 36' 0"	67° 42' 0"	3280	1975-2001	J	26/27 , 96.3%	SENAMHI
19	Trompillo (SC)	P	mm	17° 45' 0"	63° 10' 0"	413	1943-2007	J	63/65 , 96.9%	SENAMHI
20	Trinidad	P	mm	14° 49' 6"	64° 54' 48"	156	1943-2008	J	60/66 , 90.9%	SENAMHI
21	Incachaca	Q (OB)	mm	Barrage		4369.03	2000 - 2008	J	9/9, 100%	EPSAS
22	Hampaturi	Q (OB)	mm	Barrage		4203	2000 - 2008	J	9/9, 100%	EPSAS
23	Tuni	Q (OB)	mm	Barrage		4435	2000 - 2008	J	9/9, 100%	EPSAS
24	Milluni	Q (OB)	mm	Barrage		4532.7	2000 - 2008	J	9/9, 100%	EPSAS
25	Alto Achachicala	Q	mm	16°26'57"	68°08'52"	3870	2000 - 2008	J	9/9, 100%	SENAMHI
26	Temp de l'air	T	°C	15° - 17°	67.5°	4205	1948-2008	J - M	71/71 , 100%	NCEP/NCAR - NOAA (3)

(1): Précipitation: P; Apport du bassin versant (Q); Température (T),
Apport du bassin versant calculé a partir des niveaux Opération du barrage Q (OB) au période de temps (t)

(2): Journalier (J); Mensuel (M)
(3): http://www.cdc.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html

$$Q[mm] = \frac{Débit[\frac{mm^3}{t}]}{SurfaceBVersant[mm^2] * t}$$

Pour la température de l'air, on a choisi d'employer des données de réanalyse utilisées par différents chercheurs en glaciologie et hydrologie dans cette région (Amérique du Sud et Bolivie) ***(Francou B. & B. Pouyaud 2004;Francou B. et al. 2004;Ronchail J. et al. 2005;Suarez W. et al. 2008;Vuille M. & F. Keimig 2004)***

En ce qui concerne l'utilisation de ces données, on peut citer ce qui suit :

> *« Le NCEP (National Center for Environemental Prediction) et le NCAR (National Center for Atmospheric Research) proposent des réanalyses depuis 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 à partir du 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 2.5° x 2.5°), sur 28 niveaux de pression (de 1000 hPa a 10 hPa) »* ***(Kalnay E. et al. 1996) (Ardoin S. 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 masl) et 600 hPa (Théoriquement 4205 masl). On estime que le niveau de 500 hPa est le plus correct pour la hauteur des zones d'ablation de nos glaciers »* ***(Francou B. & B. Pouyaud 2004).***

Nous avons choisi d'utiliser des données de réanalyse parce qu'il n'existe pas de registre de température aux stations où il était nécessaire d'effectuer un bilan hydrique (voir chapitre suivant). La disponibilité des données permet de réaliser des bilans Q et de P des bassins Incachaca, Hampaturi, Tuni-Condoriri, Milluni et de Choqueyapu (Alto Achachicala), ces bassins étant l'une des bases d'analyse de cette thèse.

3.3 Bassins Sources

Les bassins versants étudiés sont présentés dans la Figure 3.5. Ce sont essentiellement les bassins sources des systèmes d'eau potable de La Paz et d'El Alto.

Figure 3.5 : Bassins Versants sources et leurs voisins



No	Bassin	No	Bassin	No	Bassin	No	Bassin	No	Bassin
1	Khullu Cachi	4	Condoriri	7	Huayna Potosí	10	Kelihuani	13	Hampaturi
2	Janchallani	5	Condoriri bajo	8	Chojlla Jipiña	11	Kaluyo (Choqueyapu)	14	Palcoma
3	Jachawaquipiña	6	Tuni	9	Milluni	12	Incachaca	15	Chojña Khota

Note: Les bassins étudiés sont en hachurés

Il faut remarquer que le bassin 11 possède trois noms différents : Choqueyapu, Kaluyo ou Alto Achachicala (nom de la station météorologique et de la station de jaugeage placé dans le bassin). Il est un des principaux bassins d'analyse et une des sources du système Achachicala.

Les infrastructures de gestion de l'eau sont organisées comme suit :

- Les bassins Condoriri (4), Tuni (6) et Huayna Potosí(7) donnent lieu au complexe Tuni-Condoriri, car ils alimentent le barrage du même nom, qui est la source de régulation pour le système El Alto. Le bassin de Milluni (9) accueille le barrage de Milluni et le bassin de la rivière Choqueyapu (11), où l'on trouve un ouvrage de prélèvement pour Achachicala
- Les bassins versants d'Incachaca (12) et Hampaturi (13) accueillent les barrages des mêmes noms, formant le système de Pampahasi.

La Figure 3.5 présente également les bassins voisins qui ont été considérés dans la vision stratégique du Plan Maestro des villes de La Paz et El Alto ***(Lahmeyer International - GITEC - TECNOSAN-SICO 1994)***.

La vision stratégique du Plan Maestro *(1994)* considérait une utilisation intégrale des bassins et de l'eau superficielle, avant de procéder à une exploitation intensive de l'eau souterraine. Ce plan prévoyait la gestion des bassins montrés précédemment de la manière suivante :

Système Pampahasi: ***Hampaturi, Incachaca,*** Chojña Khota, Palcoma,

Système Achachicala: ***Choqueyapu, Milluni,*** Tuni, Condoriri, Huayna Potosí.

Système El Alto: ***Tuni, Condoriri, Huayna Potosí,*** Jacha Waquiwiña, Chojlla Jipiña, Kelluhuani, Khullu Cachi y Janchallani

Les bassins employés actuellement comme sources sont soulignés. Cette information nous montre l'écart entre la planification du Plan Maestro de 1994 et la gestion actuelle des systèmes d'eau potable.

Les surfaces des bassins étudiés sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 3.2 : Surfaces des bassins versants

Source	Bassin Versant [Km^2]						
	Tuni-Condoriri			Hampaturi	Incachaca	Milluni	Choqueyapu
	Tuni	Condoriri	Huayna Potosi				
Soruco A.[1]	78.00			60.00	18.00	71.00	
Ramírez & Olmos[2]	76.00						
Étude d'Hidrologie du projet barrage Huayna Potosí [3]	16.90	19.40 88.10	51.80				
EPSAS (Pratiquant)[4]	16.97	65.54	48.57	59.18	33.25	59.65	
Plan Maestro[5]	16.60	19.60 71.70	35.50	59.08	33.20	58.20	107.10
Estudio PNCC (PRAA) (*)[6]	104.00		96.00	166.00	90.00	94.00	
Thèse Olmos	17.15	19.57 83.65	46.94	58.99	33.75	59.58	106.35

(*) Pour Tuni-Condoriri: Surface rivière principale jusqu'au lac Titicaca; pour Les autres: Surface rivière principal jusqu'au Rivière La Paz

Point de Control bassin: *Tuni-Condoriri, Hampaturi, Incachaca, Milluni* → Barrages EPSAS
Choqueyapu → Point de jaugeage des débits SENAMHI

1:(Soruco A. 2008), 2: (Ramírez E. & C. Olmos 2007), 3: (CES-CGL-J&S 1997) 4: (Base de données EPSAS, 2008) 5: (Lahmeyer International - GITEC - TECNOSAN-SICO 1994), 6: (PNCC-PRAA 2007)

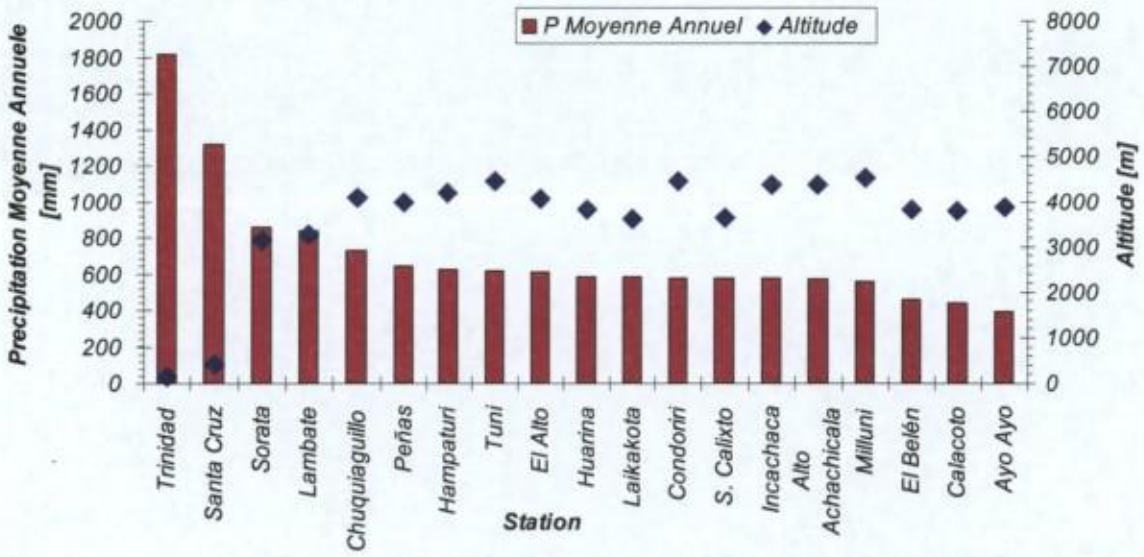
On peut remarquer qu'il y a une légère variabilité en fonction des différents auteurs induite par les techniques utilisées. Il existe encore d'autres valeurs dans la littérature dont les sources ne sont pas précisées et issues de publications de vulgarisation. Les valeurs utilisées dans le présent travail sont reprises à la dernière ligne.

3.4 Analyse des précipitations

L'analyse des précipitations est réalisée à partir de données journalières, mensuelles et annuelles selon les situations. Il est important de souligner que ces données sont précieuses car les relevés dans les stations hydrométéorologiques en Bolivie ne sont pas systématiques. La Figure 3.6 présente l'altitude et les valeurs des précipitations moyennes annuelles pour chaque station.

Il est nécessaire de valoriser l'utilisation des registres journaliers (voir l'analyse des concentrations, sous-titre 3.4.3), ce sont des données précieuses rarement employées pour l'analyse hydrologique en Bolivie et en Amérique du Sud en général.

Figure 3.6 : Altitude et Précipitations par station



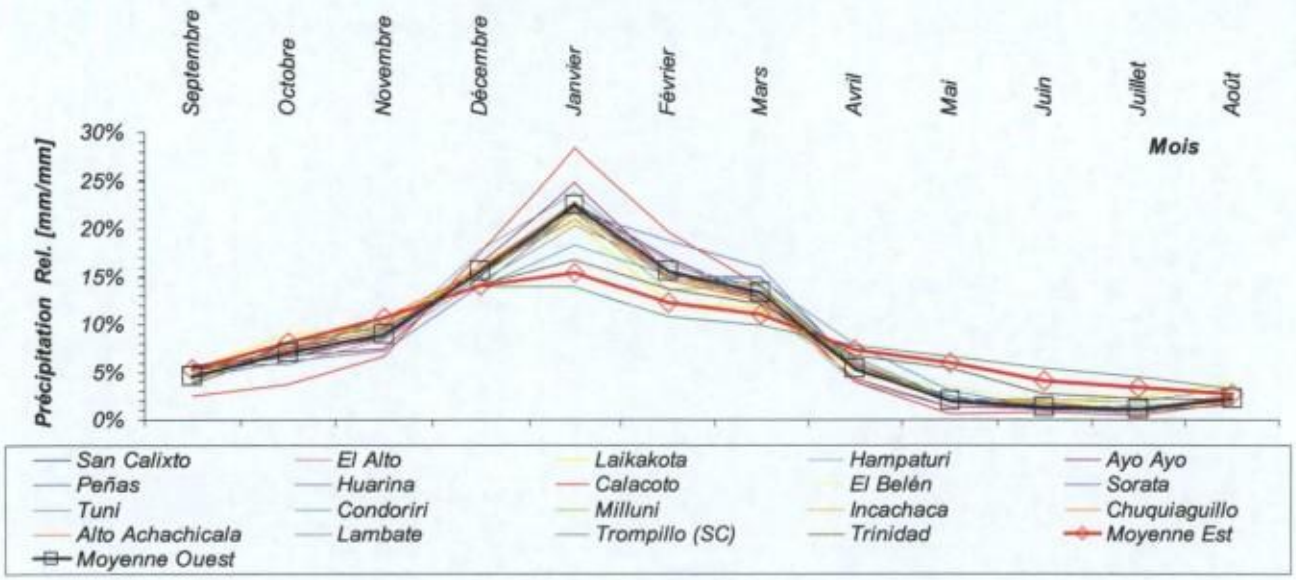
Moyennes calculées pour chaque station pour les périodes déclarées au Tableau 3.1.

Les villes de La Paz et El Alto, qui se trouvent respectivement à 3600 masl et 4000 masl, présentent des précipitations moyennes annuelles oscillant entre 575 et 600 mm/an, valeurs qui sont proches des précipitations aux bassins sources (entre 550 et 625 mm/an).

Nous remarquons également une différence importante entre les précipitations des stations situées dans la région Est du pays, avec une altitude proche du niveau de la mer et la région proche de l'Amazonie (Stations Trinidad et Santa Cruz) qui présente des valeurs des précipitations triples de celles du côté andin de la Bolivie.

La Figure 3.7 indique le comportement mensuel des précipitations. On peut observer qu'il y a un maximum au mois de janvier et que les stations plus à l'ouest présentent un pic des précipitations plus accentué que celui des stations orientales du pays. Cette observation suggère une concentration plus grande des précipitations dans la période comprise entre décembre et janvier dans cette région du pays (Ouest de la Bolivie) par rapport à celle de l'Amazonie (Est).

Figure 3.7 : Régime mensuel des précipitations



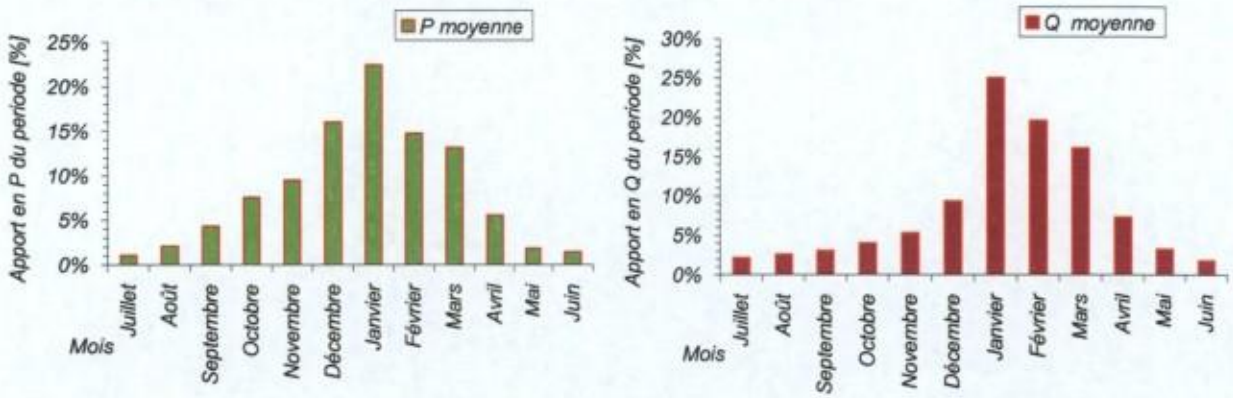
Les études hydrologiques et météorologiques en Bolivie sont généralement basées sur une année de référence « l'année hydrologique » qui s'étend du mois de septembre d'une année jusqu'au mois d'août de l'année suivante ***(Trujillo F., SENAMHI 2007, Communication personnelle)***. Cette année de référence sert à délimiter l'époque de début et de fin des précipitations.

Sur la base de nos premières analyses des régimes (Figure 3.7), nous remarquons que cette année de référence est valable pour les stations de la partie Est du pays puisque les précipitations plus faibles ont lieu au mois d'août, et la pluviosité remonte début septembre. Par contre, elle ne se vérifie plus dans nos stations de la partie Ouest de la Bolivie car les précipitations les plus faibles sont présentes entre les mois de juin et juillet. Dès lors, la délimitation de l'année hydrologique peut être remise en doute.

La Figure 3.8 montre la comparaison entre les valeurs relatives mensuelles des précipitations (P) et l'apport en eau du bassin versant (Q) ***(valeurs relatives par rapport à la valeur totale annuelle, calculées sur les données de Hampaturi, Incachaca, Milluni, Tuni et Alto Achachicala)***.

Il indique que le mois de juillet présente la plus faible proportion de précipitations et marque le début de l'augmentation des apports en eau du bassin versant. Nous pensons qu'une définition plus correcte qui correspondrait mieux au cycle hydrologique de la zone occidentale du pays (spécialement pour le secteur étudié), aurait une année hydrologique qui débute en juillet et termine à la fin du mois de juin de l'année suivante. ***Pour cette raison, nos analyses ont été effectuées pour les deux types d'année hydrologique.***

Figure 3.8 : Apport en eau du bassin versant et précipitations par période au total annuel (Ouest)



Nous observons également sur cette figure que le pic de l'apport (Q) se produit entre janvier et mars, ce qui diffère de ce qu'on a pu observer avec les précipitations. Cette observation est analysée et discutée dans le chapitre suivant traitant du bilan hydrique.

3.4.1 Questions pour la gestion des ressources en eau

D'après notre méthodologie (sous-titre 1.6.2), l'étude réalisée dans ce chapitre sera guidée par deux questions fondamentales sur les précipitations et leurs changements potentiels :

1. ***– Existera-t-il une variation de la quantité moyenne de précipitation annuelle ?***

2. ***– Y-a-t-il une tendance des précipitations à être plus concentrées durant certains mois de l'année ? Et si oui, est-ce que cette concentration des précipitations provoque un impact sur la gestion des ressources en eau ?***

Les études sur le changement climatique actuel mettent en évidence le recul des glaciers de montagnes

ainsi que des perturbations potentielles de la pluviosité *(IPCC 2007)*. Il persiste donc de grandes incertitudes sur l'évolution de ces systèmes et sur les conséquences concernant la disponibilité en d'eau à l'avenir et finalement de la gestion de l'eau.

3.4.2 Variation de la quantité des précipitations annuelles

La principale préoccupation sur le changement de la disponibilité de la ressource en eau et des précipitations, provient des impacts potentiels du changement climatique récent. La Figure 3.9 présente les prévisions du rapport de l'IPCC à niveau mondial sur ce sujet. Malheureusement, un tel document n'est pas exploitable pour notre échelle d'analyse. Le cercle rouge sur la figure permet d'observer que globalement la Bolivie se situe dans une région où les tendances ne sont pas clairement établies.

Figure 3.9 : Prévision des Impacts potentiels du Changement climatique dans le monde sur l'eau (à la fin du XXIème siècle)

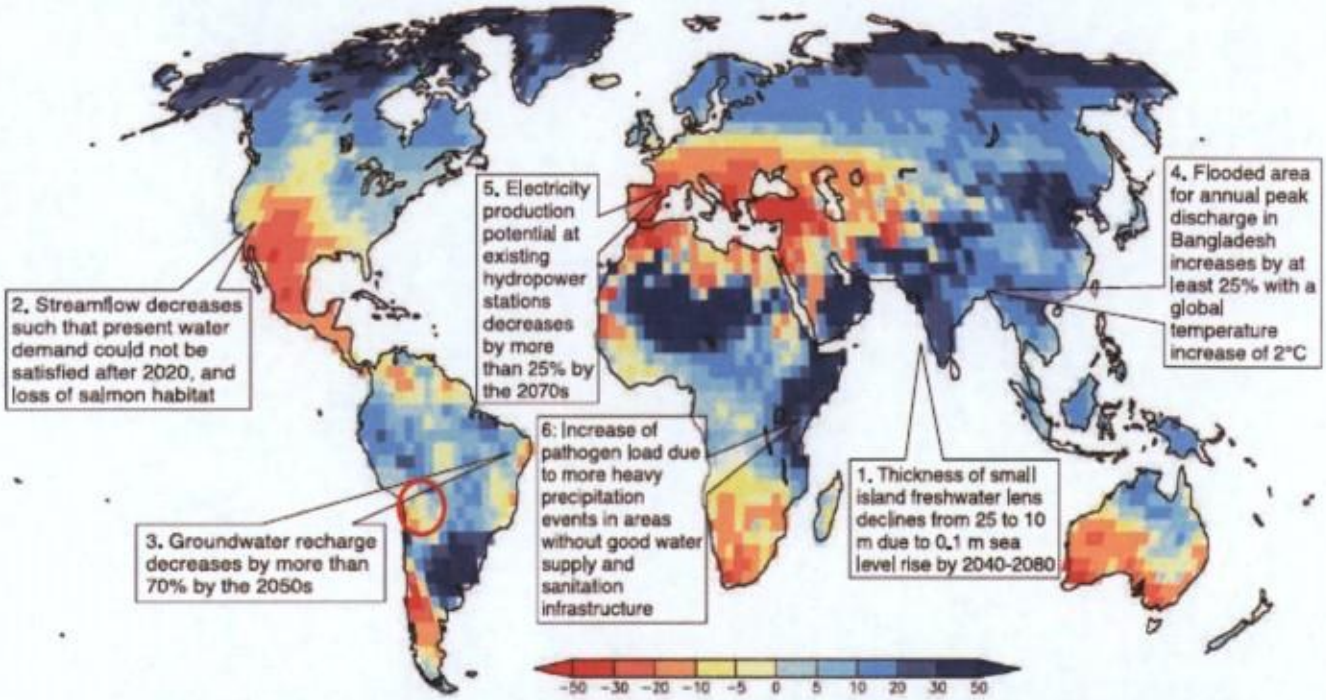


Figure TS.5. *Illustrative map of future climate change impacts on freshwater which are a threat to the sustainable development of the affected regions. Background shows ensemble mean change of annual runoff, in percent, between the present (1981-2000) and 2081-2100 for the SRES A1B emissions scenario; blue denotes increased runoff, red denotes decreased runoff. Underlying map from Nohara et al. (2006) [F3.8].*

(IPCC 2007)

A partir des prévisions de l'IPCC, le Tableau 3.3 présente des prévisions à une échelle plus régionale pour les différentes zones de l'Amérique Centrale et l'Amérique du Sud. Là aussi, les incertitudes sont telles qu'il est impossible de prédire une tendance à l'augmentation ou à la diminution des ressources en eau.

Tableau 3.3 : Prévision du changement actuel des précipitations (Moyenne de 7 modèles IPCC)

	Estación	2020	2050	2080
América Central	Est. Seca	-7 a +7	-12 a +5	-20 a +8
América Central	Est. Húmeda	-10 a +4	-15 a +3	-30 a +5
Amazonía	Est. Seca	-10 a +4	-20 a +10	-40 a +10
Amazonía	Est. Húmeda	-3 a +6	-5 a +1	-10 a +10
Sur de Sudamérica	Invierno (JJA)	-5 a +3	-12 a +10	-12 a +12
Sur de Sudamérica	Verano (DEF)	-3 a +5	-5 a +10	-10 a +10

Augmentation ou diminution des précipitations [%]

« Changements projetés des précipitations des grandes sous-régions de l'Amérique Centrale et du Sud. Les rangs indiqués rassemblent les estimations de changement de sept modèles climatiques globaux et considèrent quatre scènes d'émission de GES

(IPCC 2007 in RIOCC 2008)

L'étude menée par Jaffrain *(2007)* nous permet d'avoir des informations plus précises sur la région de notre étude. En effet, celui-ci a effectué une analyse en appliquant les tests de tendances de Mann Kendall à 151 stations boliviennes (et plusieurs péruviennes et Equatorienne) dont plus de trente stations sont dans notre zone d'étude ***(Données 1917-2004).*** Ses résultats sont présentés dans la Figure 3.10.

Figure 3.10 : Résultats d'analyses de tendances de l'étude de Jaffrain (2007)

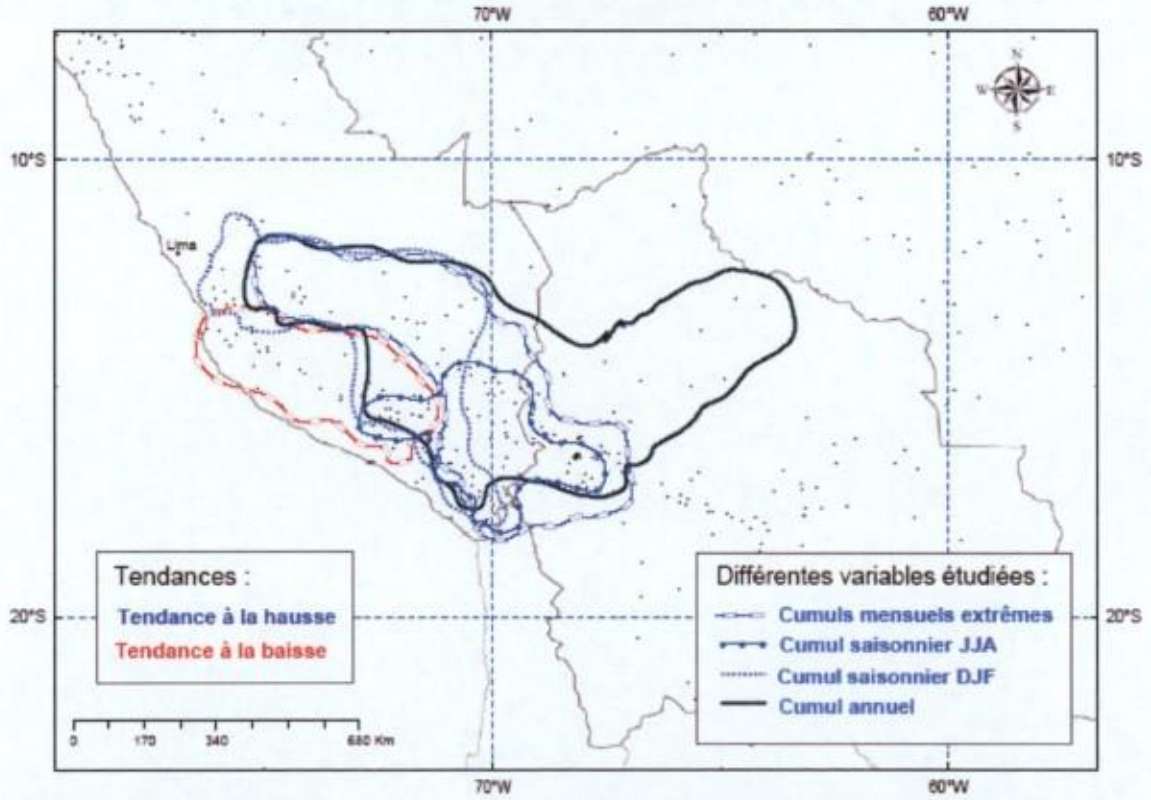


Figure 46 : Tendances majeures observées sur les différentes variables pluviométriques étudiées dans la zone Sud-Pérou/Nord-Bolivie. Les points noirs indiquent les stations utilisées dans cette étude.

Les résultats de Jaffrain *(2007)*, identifient une tendance à la hausse des cumuls annuels de précipitations dans la zone où se trouvent les bassins sources de La Paz et d'El Alto.

Contrairement aux estimations présentées, Vuille *(2003)* remarque que pour la période 1950-1994, les tendances de la zone sud du Pérou et ouest de la Bolivie sont légèrement en baisse. Les périodes d'analyses et les méthodes employées par Jaffrain et Vuille ne sont certainement pas les mêmes. A ce sujet, nous tenons à remarquer qu'il existe des estimations opposées.

Nous citons une autre analyse menée par le SENAMHI-PNCC *(2008)*, basée sur un « downscaling » de données obtenues du « Earth simulateur » au Japon[8], qui présente des prévisions plus précises et plutôt optimistes quant à la disponibilité des précipitations. Ces prévisions sont indiquées dans le Tableau 3.4, Area II.

Cette région correspond à une partie du plateau altiplanique et aux villes de La Paz et d'El Alto. On peut remarquer que cette simulation envisage une plus grande disponibilité d'eau entre 4 et 13%, pour l'année 2030. Toutefois, il est nécessaire de souligner que ces données issues du « Earth Simulator », ne sont pas encore calibrées sur le territoire bolivien, aspect qui pourrait engendrer une certaine incertitude sur ses prévisions, malgré la robustesse du modèle japonais *(PNCC-PRAA 2007)*.

Tableau 3.4 : Prévisions de l'augmentation des précipitations PNCC-PRAA (2007)

Tabla 4.2: Aumento de la precipitación en relación a la normal (periodo 1961-1990) en los diferentes modelos de circulación general (HADCM2. UKHI. GISSEQ) para el escenario IS92A

	2030		2050		2100	
AREA I						
Meses secos	-3 a12%	-2 a11mm	-6 a 14%	-4 a 15mm	-5 a 30%	- 3 a 27 mm
Meses húmedos	4 a 3%	5 a 27 mm	3 a 6%	5 a 41mm	2 a 14%	7 a 45 mm
AREA II						
Meses secos	4 a 13%	0.2 a 1.4 mm	4a 20%	0.2 a 2.1mm	14 a 54%	0.7 a 5.9 mm
Meses húmedos	4 a 15%	5.3 a 27mm	7 a22%	8 a 26mm	13 a37%	15 a 43 mm
AREA IV						
Meses secos	-4 a 22%	-0.9 a 7.1mm	-5 a 24%	-1.3 a 14 mm	-13 a 45%	-2.5 a 26 mm
Meses húmedos	1 a 15%	2 a 27mm	5 a 22%	10 a 41 mm	10 a 41%	20 a 71 mm
AREA V						
Meses secos	0a20%	0 a 4mm	0 a 20%	0 a 1mm	0 a 51%	0 a 10.5 mm
Meses húmedos	0 a 7%	0 a 12mm	0 a 10%	0 a 19 mm	0 a 19%	0 a 35 mm

(SENAMHI-PNCC 2008)

D'autre part, des chercheurs comme Marco Andrade du Laboratoire de Physique de l'Atmosphère de l'UMSA qui travaillent sur l'application des *Modèles de circulation* générale de l'atmosphère en Bolivie, indiquent qu'une prévision à court terme impliquerait une grande incertitude, dû au fait que le signal climatique modélisé n'apparaît pas évident dans les prochaines 40 à 50 années. Un autre obstacle pour l'application de ces modèles est leur résolution spatiale qui n'intègre pas les pentes de la cordillère ***(Andrade M. 2009)***. On trouve des endroits où il existe un décalage d'altitude de plus de 1000 mètres en moins de 5 km de projection horizontale (exemple : Vallée de Zongo) ***(Montes de Oca I. 2005)***.

Étant donné ces marges d'incertitude, il n'est pas possible actuellement de répondre à la question sur la future variation de la quantité des précipitations annuelles à cause du changement de régime des précipitations ou à cause du changement climatique.

Les ressources en eau du bassin versant sont dépendantes de la quantité de précipitations. Dans ce contexte, nous ne pouvons pas non plus conclure si l'apport en eau des bassins versants de notre région d'étude augmentera ou diminuera.

[8] *www.jamstec.go.jp/esc/index2.en.htm*

3.4.3 Concentration et retardement des précipitations

L'étude de Jaffrain *(2007)* prévoit une hausse des valeurs de cumuls saisonniers et des valeurs extrêmes des précipitations (Figure 3.10) Cette estimation provient d'une analyse de tendances des précipitations mentionnée dans le sous-titre 3.4.2.

Afin d'étudier l'évolution des précipitations dans le cadre des changement climatiques, le Programme National des Changements Climatiques de Bolivie *(PNCC 2007)* a effectué une évaluation de la perception des Communautés locales « zone du plateau Altiplanique », par rapport aux précipitations. Cette étude révèle que les habitants de ces régions ont le sentiment que durant ces dernières années, il existe une plus forte concentration des précipitations vers février et qu'il y aurait également un retard du début de la saison des précipitations *(PNCC 2007)*. Parallèlement à cette étude, un rapport de vulgarisation d'OXFAM *(2009)* reporte cette même situation. Précisons que « concentration des précipitations » signifie que l'on observe que la courbe de pluviosité annuelle est plus courte. Il y aurait donc globalement une période de précipitations plus restreinte et/ou un maximum de précipitations plus important.

Les deux publications ont un dénominateur commun : elles se basent sur des perceptions de la population « qui a le sentiment » d'une concentration plus grande de précipitations. Ces études basées sur le ressenti n'on aucune mesure réelle des précipitations vu l'absence de pluviographe. Il faut donc prendre ces études avec un recul critique bien que la population interrogée est principalement constituée de fermiers âgés qui connaissent bien leur climat pour en être dépendant.

3.4.3.1 Recherche d'une méthodologie pour déterminer la concentration des précipitations, leur retard et leur effet pour la gestion de l'eau

Pour déterminer cette concentration et son risque, une analyse a été menée par le SENAMHI à l'échelle mensuelle dans la région centrale du pays (Cochabamba) *(SENAMHI-PNCC 2007)*, dans laquelle a été utilisé comme instrument, l'indice de concentration recommandé pour la FAO *(2007)*, et par PHI *(2006)*. Cet indice est exprimé de la façon suivante :

$$ICP = 100 \frac{\sum_{1}^{12} Pi^2}{P^2}$$

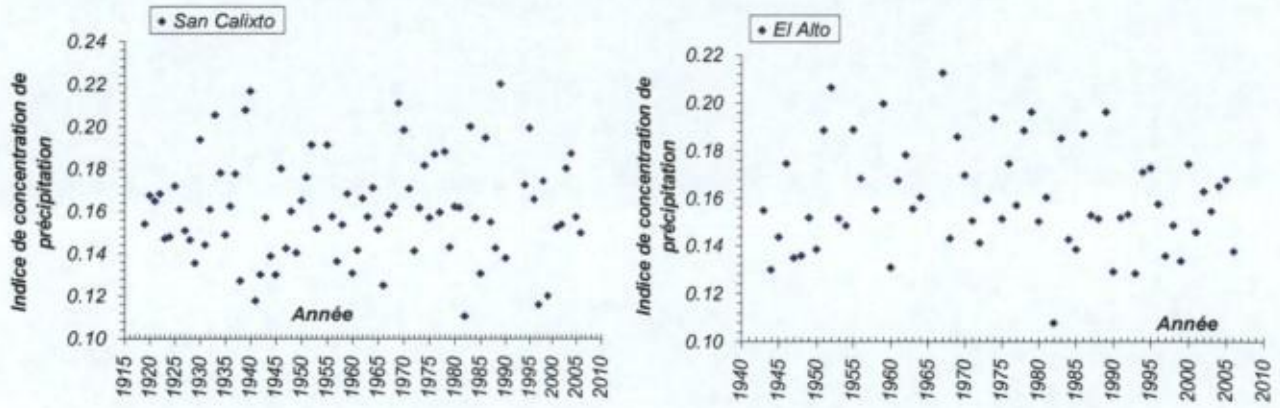
ICP	*Indice de concentration des précipitations*
Pi	*Précipitations mensuelles [mm]*
P	*Précipitations annuelles [mm]*

Il en résulte une caractérisation de la zone assignant des valeurs de « haut, moyen ou faible caractère saisonnier ». L'échelle de travail est mensuelle.

Théoriquement, en comparant le caractère saisonnier d'une année par rapport à une autre, on pourrait détecter une différence de concentration. C'est la raison pour laquelle on a employé cette méthode, afin de capter la présence de la concentration des précipitations durant les dernières années. Et on a ainsi calculé l'indice de concentration de chaque année pour toutes nos stations.

Les résultats obtenus pour les stations de San Calixto et El Alto son présentés dans la Figure 3.11. Aucune tendance de concentration n'est apparue.

Figure 3.11 : Application de l'indice de concentration des précipitations



A gauche: Station San Calixto, à droite: Station El Alto:

L'étape suivante de notre étude nous a amené à changer l'échelle d'analyse et de à réaliser une étude quotidienne. Voici donc la nouvelle hypothèse :

> *S'il existe une concentration (ou un retard) au début de la période des pluies, elle (ou il) pourrait être détectée en calculant - pour une année quelconque - le jour (J_i) où apparaît une certaine proportion des précipitations annuelles (S_i), qui peut être comparé avec le jour d'apparition de cette même proportion des précipitations pour les autres années. L'hypothèse a été formulée de la manière suivante :*

Si *J_i est un jour de l'année hydrologique ($1< i < 365$)*
S_i une proportion des précipitations annuelles qui correspond au jour J_i. ($0< S_i <1$).
S_i peut aussi s'exprimée en pourcentage alors S_i [%] : J_i. ($0< S_i$ *[%]* <100).
$P_i = S_i \times P_{Totale}$, *Précipitation cumulée jusqu'au jour* J_i.

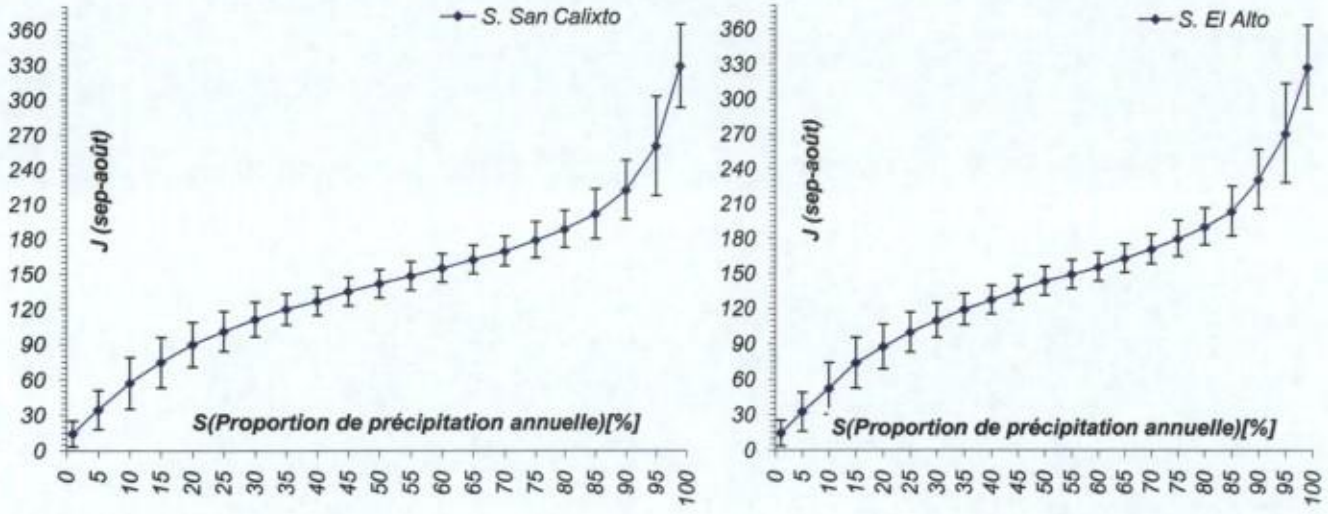
Le graphique du rapport entre J_i et S_i, représente la précipitation cumulée relative et son moment d'arrivée au cours de l'année hydrologique. Afin de simplifier les termes, on dénomme le rapport entre J_i et S_i: ***« Courbe de décharge ».***

Afin de construire la courbe de décharge, on a déterminé pour chaque année le jour d'arrivée « ***J*** », pour diverses proportions de la précipitation annuelle « ***S*** », S_i [%] =(1, 5, 10, 15,.....90,95,99). Pour chaque station, nous avons calculé la courbe de décharge de chaque année.

La Figure 3.12 pour les stations de San Calixto et El Alto, indiquent *la valeur moyenne* de ***Ji*** (+/- l'écart type) qui correspond à certaines proportions de la précipitation annuelle ***Si***, *des courbes de décharge pour chaque année* du registre pluviométrique de la station. On dénomme ces graphiques ***« courbe de décharge moyenne ».***

Un calcul similaire a été effectué pour toutes les stations de notre base de données.

Figure 3.12 : Courbe de décharge moyenne de San Calixto et d'El Alto (AH Septembre-Août)



AH : Année Hydrologique

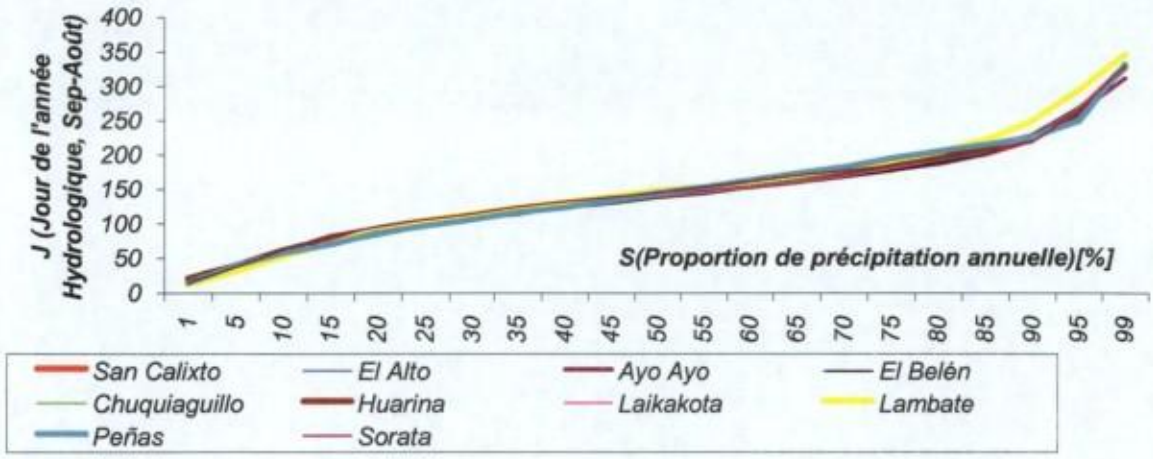
Cette première expérience nous permet de remarquer trois aspects importants qui pourraient devenir des hypothèses dans notre étude.

> *1. La variation de la valeur du jour d'arrivée (J) pour chaque proportion de précipitation annuelle (S) n'est pas importante, particulièrement celle qui correspond à S[%]=40 S[%]=45 et S[%]=50.*
> *2. Le jour d'arrivée (J), pour une certaine proportion S, ne variait pratiquement pas indépendamment du fait qu'on se trouve dans une année de faible ou de grande quantité de précipitation. Ce qui implique que la courbe de décharge est indépendante de la présence d'une année humide ou d'une année sèche.*
> *3. Les jours d'arrivée (J) des différentes stations analysées, qui correspondaient à une même proportion de précipitation annuelle (S), ne présentaient pas une grande variabilité entre elles.*

Le second aspect a beaucoup attiré notre attention puisque cette méthodologie est indépendante de la quantité totale de précipitation annuelle. Par conséquent, elle permettrait de comparer aussi bien les années sèches que les années humides pour une même station et aussi les registres des autres stations.

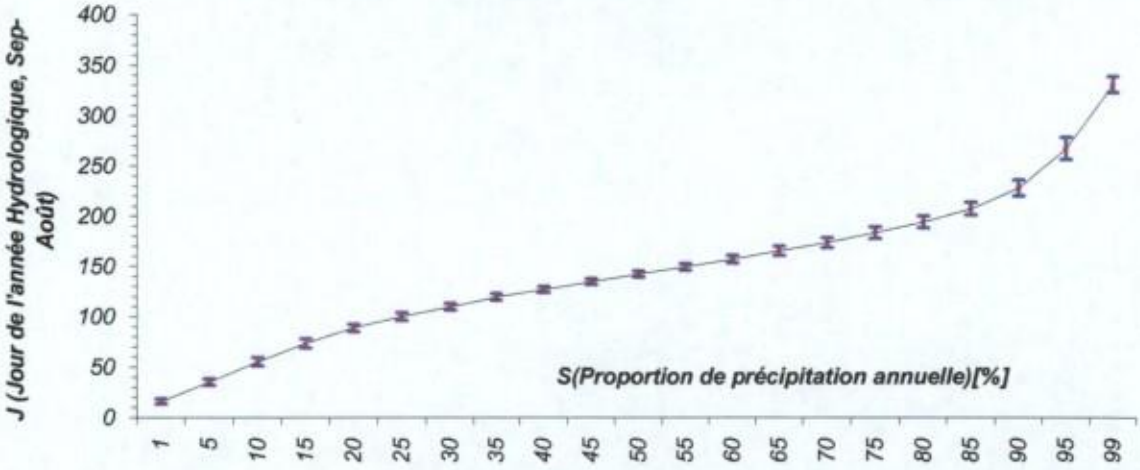
Afin de confirmer les aspects énoncés, les comparaisons présentées ont été présentées dans les graphiques suivants. La Figure 3.11 indique la comparaison des « courbes de décharge » de toutes nos stations. La Figure 3.12 montre la variabilité des courbes de décharges moyennes de chaque station. On remarque que globalement toutes les stations se comportent de la même manière.

Figure 3.13 : Comparaison des courbes de décharges moyennes de nos stations (AH Septembre-Août)



AH : Année Hydrologique

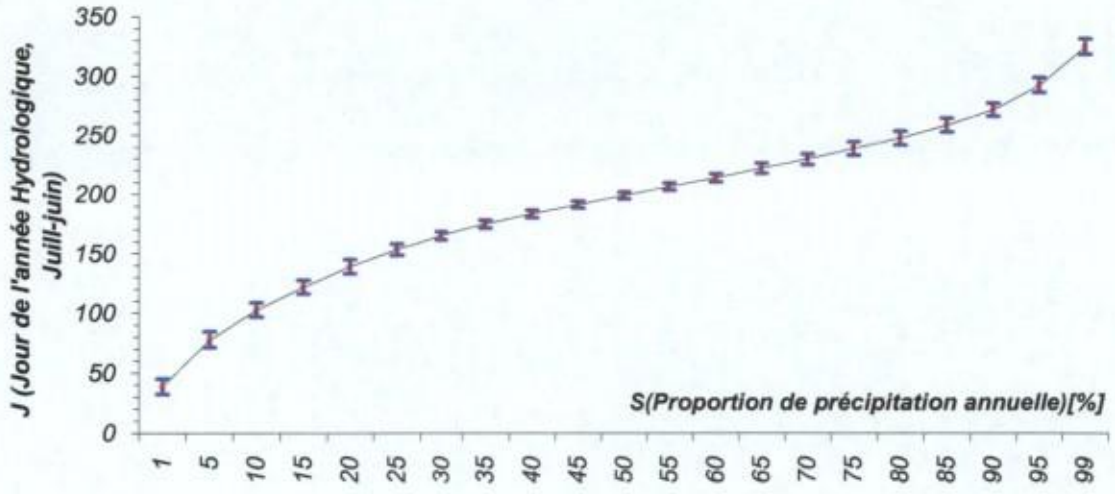
Figure 3.14 : Variabilité de la courbe de décharge entre stations (AH: Septembre-Août)



AH : Année Hydrologique

Les Figure 3.12 à 3.14 montrent les calculs des courbes de décharge effectués pour une année hydrologique standard (septembre – août) (voir sous-titre 3.4). La Figure 3.15 indique les résultats obtenus de la même analyse pour une année hydrologique juillet-juin.

Figure 3.15 : Variabilité de la courbe de décharge entre stations (AH: juillet - juin)



AH : Année Hydrologique

Cette figure montre que la variabilité de ***J*** est minimale, indépendamment de l'analyse des années humides ou des années sèches, que ce soit dans l'ensemble des registres ou dans l'ensemble des stations. La valeur moyenne de J_i pour S_i, reste similaire. (Voir Figure 3.14 et Figure 3.15). Cette observation nous conduit à formuler une autre hypothèse :

> *Si la décharge de précipitation est indépendante de la quantité de précipitation annuelle, il est alors possible de concevoir une analyse statistique à partir des moyennes des jours d'arrivée J_i –pour chaque S_i – afin de pouvoir les comparer avec* ***les courbes de décharge*** *de chacune des années de chaque station d'analyse.*

Comme l'analyse pouvait apparemment être appliquée pour déterminer le retard de la précipitation et sa concentration, la formulation de cette méthodologie est la suivante :

> *Si pour chaque station, nous calculons la courbe de décharge pour chaque année d'une période de référence 1961-90, on obtiendra le jour d'arrivée de la précipitation J_i pour chaque proportion de précipitation* ***Si****. La moyenne de toutes les* ***Ji*** *correspondra au jour de référence représentatif de la proportion* ***Si.***

$$P_{(i-1)} = S_{(i-1)} \times P_T \qquad P_{(i)} = S_{(i)} \times P_T \qquad P_{(i+1)} = S_{(i+1)} \times P_T$$

$$\downarrow \qquad\qquad \downarrow \qquad\qquad \downarrow$$

$$S_{(i-1)} \qquad\qquad S_{(i)} \qquad\qquad S_{(i+1)}$$

$$\downarrow \qquad\qquad \downarrow \qquad\qquad \downarrow$$

$$J_{(i-1)} \qquad\qquad J_{(i)} \qquad\qquad J_{(i+1)}$$

$$(1)\quad Jref_{(i)} = \frac{\sum_{n=1961}^{1990} J_{i(n)}}{30} \quad ; \quad Jref_{(i+1)} = \frac{\sum_{n=1961}^{1990} J_{i(n+1)}}{30}$$

> *Il est ainsi possible de calculer les anomalies de* ***Ji*** *pour une année quelconque par rapport au* ***Jref.*** *Les anomalies représentent le retard ou l'avance de la précipitation par rapport au* ***Jref****$_i$, pour une proportion de précipitation* ***Si****.*

Dans cette méthodologie, les anomalies positives (+) impliquent un retard de J_i et les négatives (-) représentent la venue anticipée des précipitations.

$$(2)\quad AnJref_{(i)} = Jref_{(i)} - J_{(i)}\ ;\ AnJref_{(i+1)} = Jref_{(i+1)} - J_{(i+1)}$$

Si l'on désigne Nref , la quantité de précipitation (%) répartie dans la période (jours) comprise entre $Jref_{(i)}$ et $Jref_{(i+1)}$.

$$(3)\quad Nref = \frac{S_{(i+1)} - S_{(i)}}{r}\quad [\%\ /\ jour]$$

$$(4)\quad r = Jref_{(i+1)} - Jref_{(i)} + 1\ ;\ s = J_{(i+1)} - J_{(i)} + 1$$

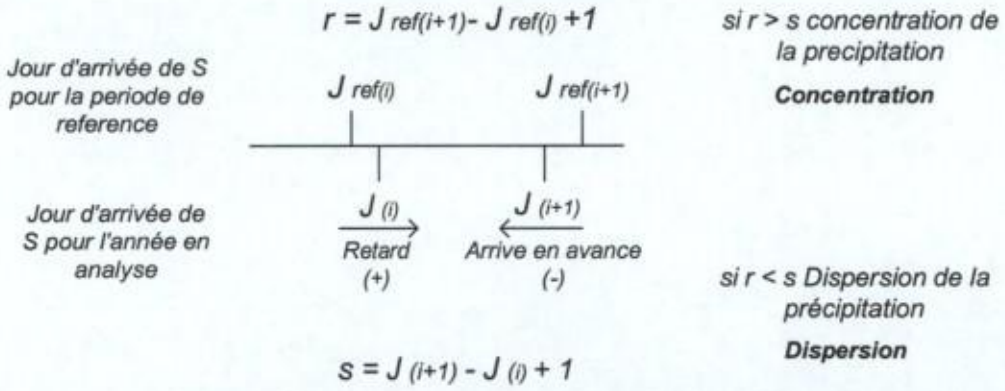
Si l'on désigne ΔJ, la différence de jours entre la période de base $Jref_{(i+1)}$-$Jref_{(i)}$ par rapport à la période de l'année en analyse pour $J_{(i+1)}$-$J_{(i)}$

$$(5)\quad \Delta J = r - s$$

$$(6)\ :\ \textit{(4) et (2) en (5)}\quad \Delta J = AnJref_{(i+1)} - AnJref_{(i)}\ .$$

On pourra finalement calculer l'augmentation de la précipitation durant la période de référence $Jref_{(i+1)}$-$Jref_{(i)}$ qui correspond respectivement aux proportions $S_{(i+1)}$ et $S_{(i)}$.

$$(7)\quad \Delta C = Nref * \Delta J$$



P_i :	*Précipitation cumulée jusqu'au jour Ji de l'année hydrologique, (1< i < 365)*
P_T :	*Précipitation cumulée totale d'une année hydrologique.*
$J_{(i)}$:	*Jour i de l'année hydrologique pour l'année d'analyse.*
$S_{(i)}$	*Proportion de la précipitation annuelle qui correspond au moment $J_{(i)}$. (0< S_i <1),*
$Jref_{(i)}$:	*Jour i de l'année hydrologique de la période de référence, (1961-1990) On peut associer une date qui correspondra au jour de référence Jref(i) pour la proportion S(i)*
n :	*An (1961 < n < 1990)*
$AnJref_{(i)}$:	*Anomalie de $J_{(i)}$ par rapport au $Jref_{(i)}$*
Nref :	*Pourcentage de référence de précipitation journalière ou période $Jref_{(i+1)}$-$Jref_{(i)}$.*
r :	*Période où a lieu la précipitation $S_{(i+1)}$-$S_{(i)}$, pour la période de référence.*
s :	*Période où a lieu la précipitation $S_{(i+1)}$-$S_{(i)}$, pour l'année d'analyse.*
ΔJ :	*Différence de jours entre la période de base $Jref_{(i+1)}$-$Jref_{(i)}$ et la période de l'année en analyse pour $J_{(i+1)}$-$J_{(i)}$*
ΔC :	*Augmentation de la précipitation durant la période $Jref_{(i+1)}$-$Jref_{(i)}$.(Augmentation (+), Diminution (-))*

Application de la Méthode

On a appliqué le critère mentionné à toutes les stations de notre base de données. On présente comme exemple l'application à la Station San Calixto, vu que cette station est considérée comme représentative de la zone d'étude, et elle a déjà été l'objet d'une analyse temporelle et d'une validation statistique ***(Gioda A. et al. 2004)***.

Avec cette méthode, il est possible de calculer pour chaque année du registre pluviométrique de la station en analyse les retards (anomalies) de la venue des précipitations pour n'importe quelle proportion de précipitation ***Si*** (Figure 3.16). Il est également possible de calculer l'augmentation de la concentration ou sa diminution (***ΔC***) (Figure 3.17). On remarque que les graphiques se ressemblent suite à la hausse qui est dépendante du retard des précipitations.

D'après la Figure 3.16 et la Figure 3.17, il n'y aurait pas moyen de déterminer clairement une tendance de retard ou de concentration des précipitations. Par contre, si on applique une moyenne mobile de 5 ans sur les valeurs de l'augmentation de la concentration, on découvre qu'il existe apparemment une tendance cyclique de l'augmentation et diminution de précipitation pour les proportions de précipitation ***Si***[%]=[25 et 30] (Voir Figure 3.18). Cette tendance pour des proportions mineures ***Si***[%]= [5,10,15,20] est aussi visible mais faiblement. Pour des ***Si*** majeurs, elle s'atténue. Cette tendance cyclique est visible depuis 1952, (elle était inexistante avant cette année-là), les cycles ayant une durée de 15 à 20 ans.

On remarque que les proportions de précipitation ***Si***[%]=[25 et 30] correspondent aux jours de référence $Jref_i$=[10 Décembre ; 20 Décembre]. Cette remarque est importante puisque décembre est le mois où les précipitations les plus importantes apparaissent (voir Figure 3.7).

Depuis l'année 1989, nous observons que les précipitations arrivent de plus en plus tard par rapport aux années précédentes, cette tendance est maintenue jusqu'en 2006 (fin de notre base des données).

Figure 3.16 : Retard de la précipitation par rapport à la période de référence 1961-90. Station San Calixto Si[%]= [5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50]

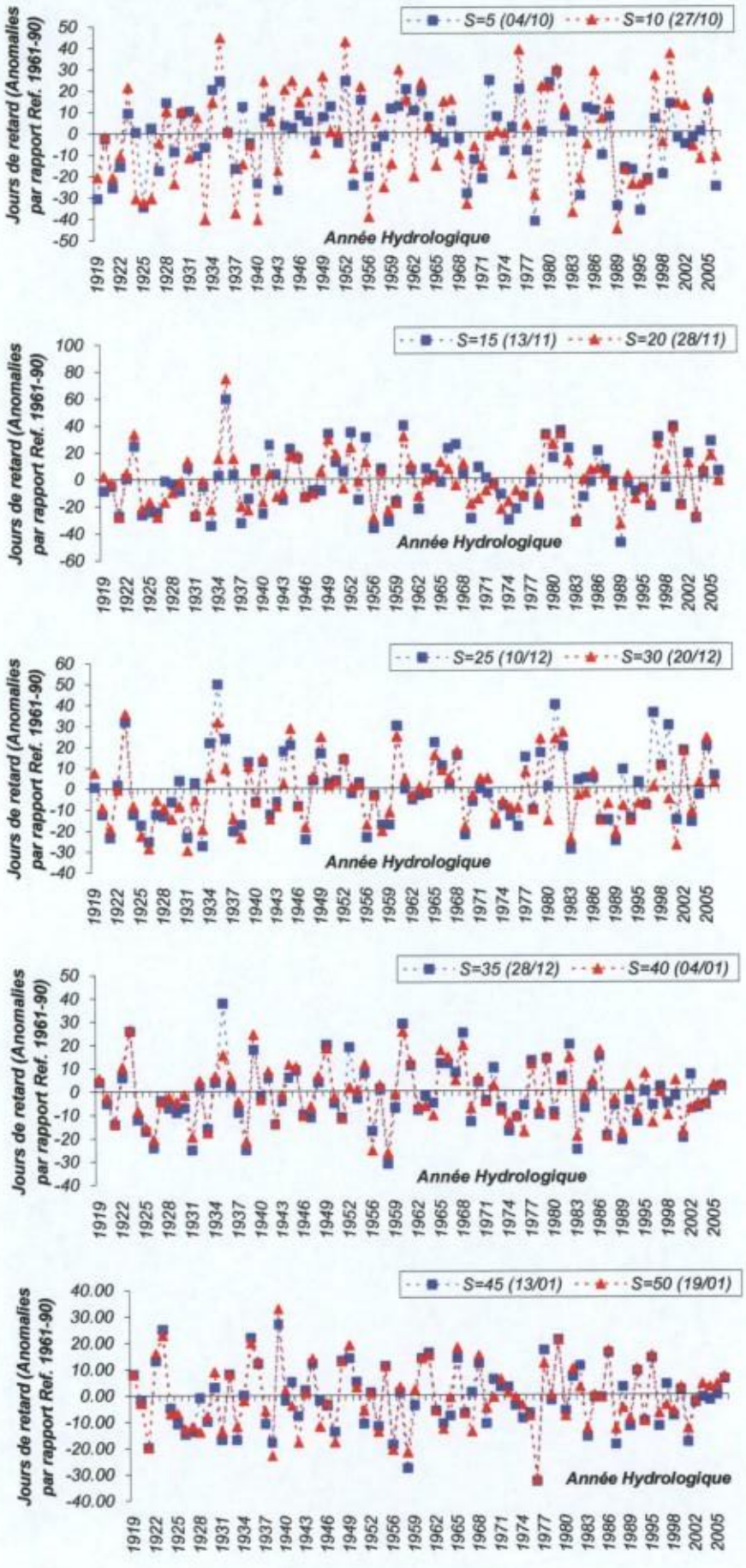


Figure 3.17 : Concentration des précipitations par rapport à la période de référence 1961-90. Station San Calixto Si[%]= [5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50]

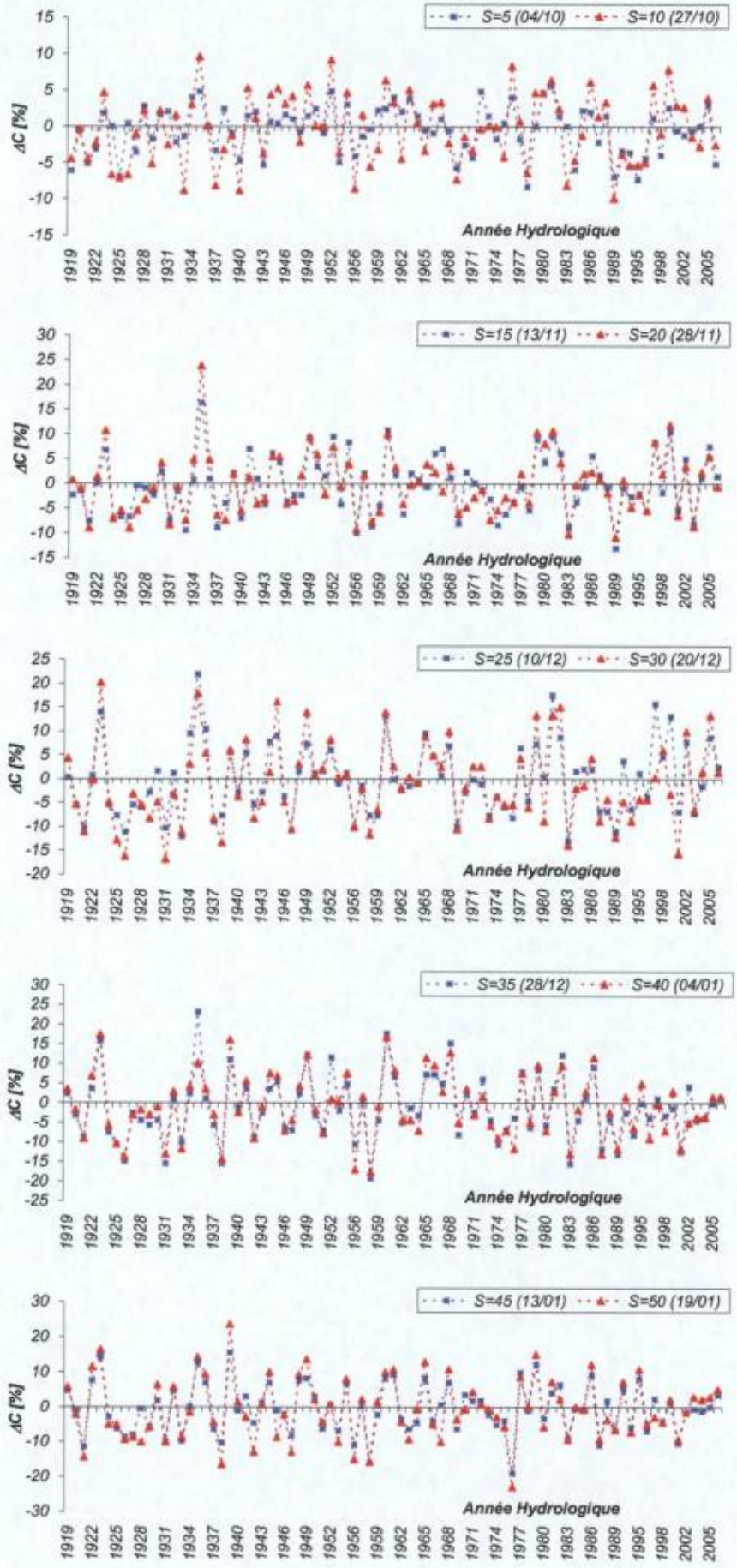
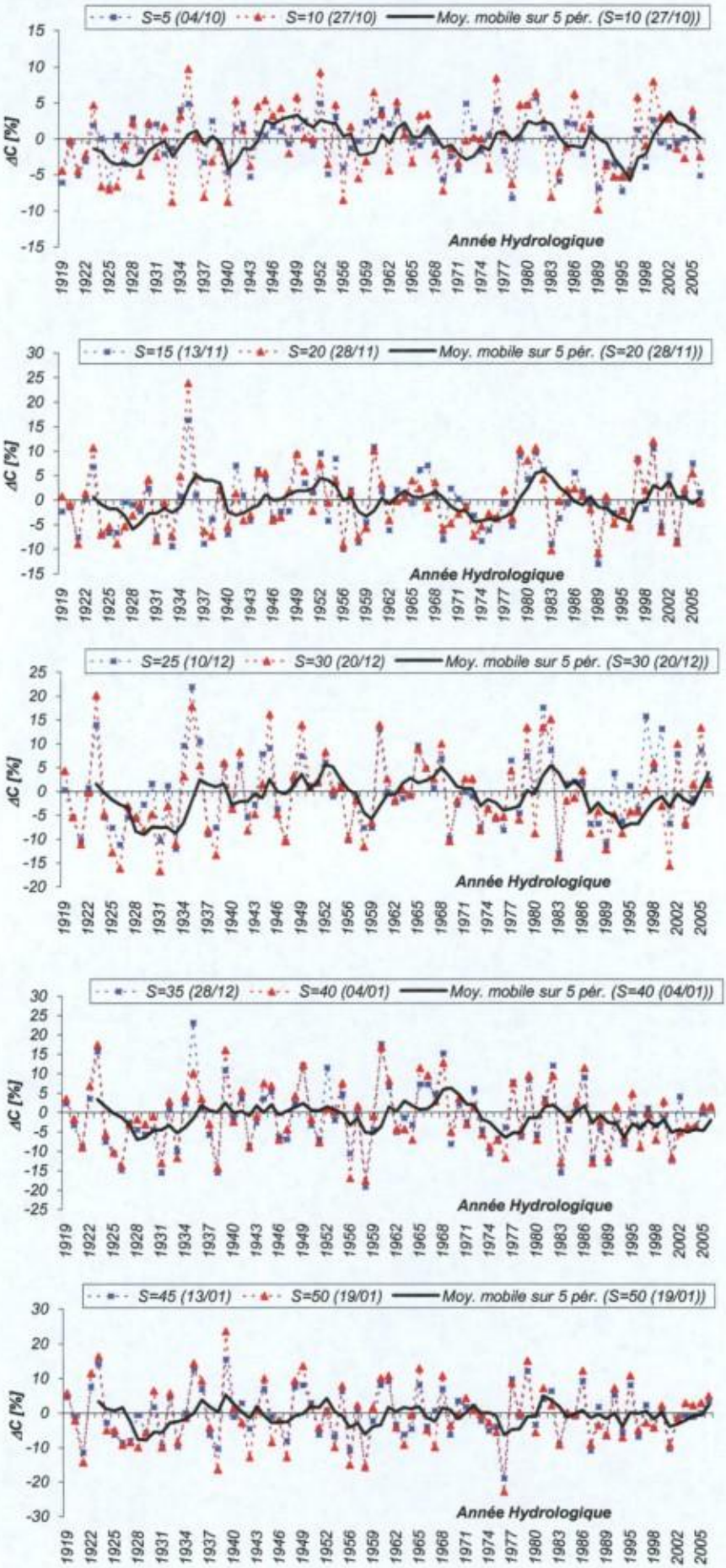


Figure 3.18 : Tendance de la concentration des précipitations

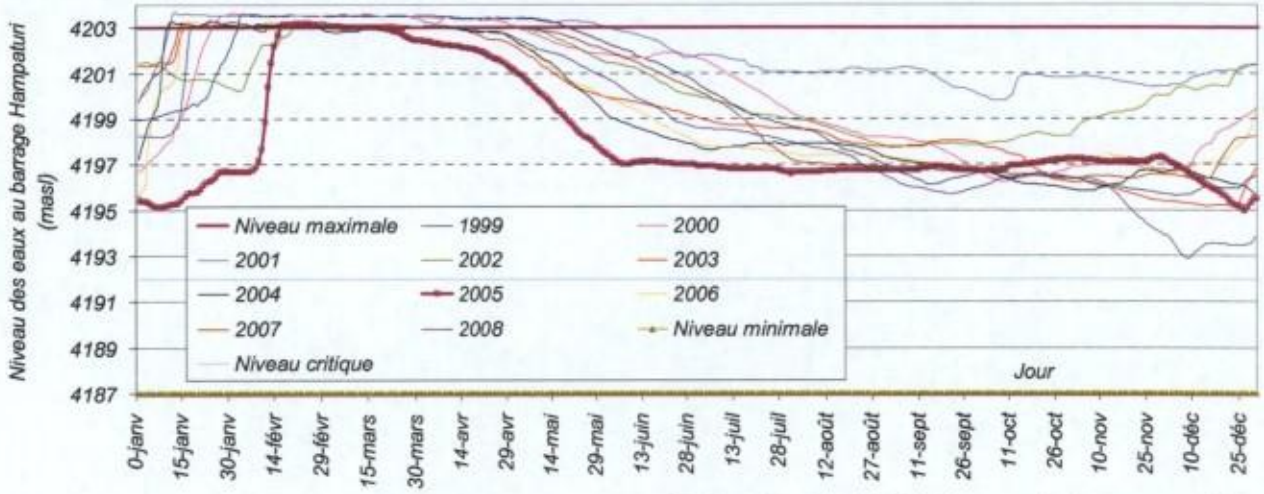


La méthode proposée peut servir aussi à analyser des années fondamentales pour la gestion de l'eau comme 2005 (Figure 3.19 et Figure 3.20).

Application pour la Gestion de l'eau : analyse de l'année 2005

En 2005 le fonctionnement des barrages a été critiqué pour la gestion de l'eau par EPSAS, en effet les prélèvements d'eau ont été tels que les limites de vidange des barrages ont presqu'été atteintes (Figure 3.19).

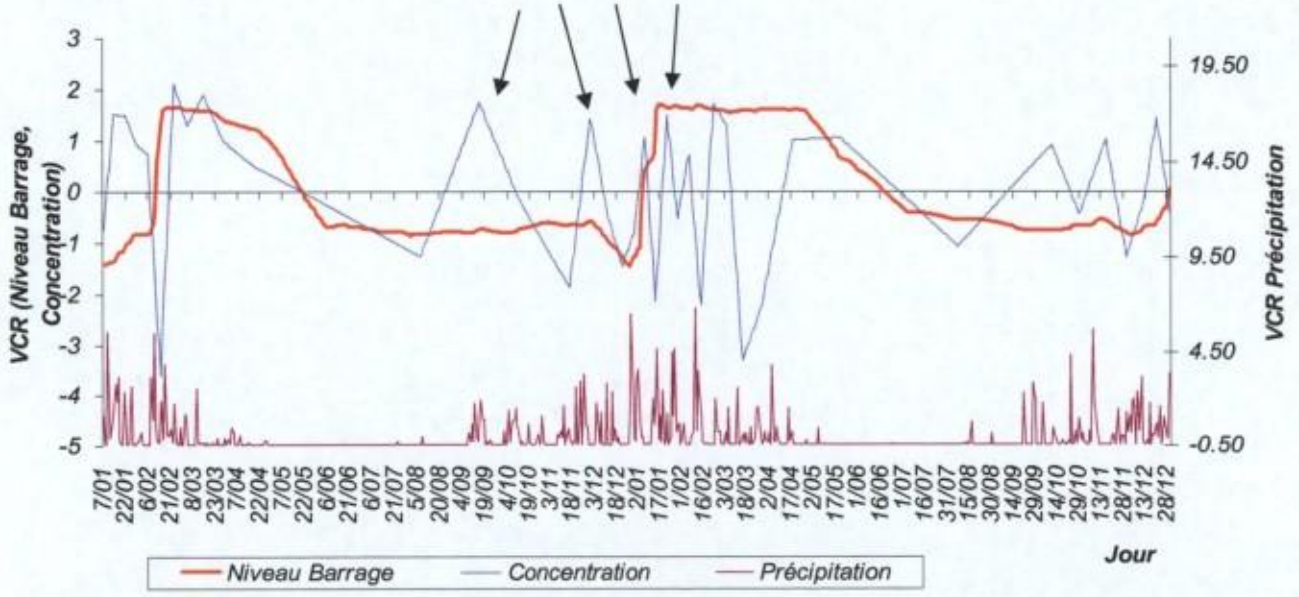
Figure 3.19 : Niveaux de fonctionnement du barrage Hampaturi 1999 - 2007



(Quisbert T. - EPSAS 2009, Communication personnelle)

Pour l'analyse du cas de la sécheresse de 2005, nous avons inclus dans le même graphique, les niveaux du barrage, les tendances de concentration des pluies et les précipitations. Pour comparer ces paramètres d'échelles différentes, nous avons utilisé des valeurs centrées réduites. Les résultats sont présentés dans la Figure 3.20.

Figure 3.20 : Analyse de l'influence de la concentration de la précipitation sur le fonctionnement du Barrage Hampaturi, Années 2005 et 2006



Sur cette figure, la première flèche à gauche indique une période où la concentration des précipitations n'affectait pas le fonctionnement du barrage. Le pic se situe en août, lorsque la quantité de pluies est encore faible et les conditions d'humidité du sol ne sont pas idéales pour l'écoulement.

A partir du début du mois de décembre (deuxième flèche à partir de la gauche), on observe la chute du niveau du barrage qui apparaît parallèlement à une baisse de la quantité de précipitations et surtout parallèlement à une dispersion des précipitations. On observe un troisième moment (troisième flèche) où les niveaux de remplissage du barrage présentent une légère diminution, celle-ci coïncide avec une nouvelle baisse de la concentration. Toutefois, cette baisse de la concentration est compensée par l'effet des précipitations.

L'effet d'une dernière d'augmentation de la concentration de la précipitation n'est pas visible sur les registres du barrage puisque son niveau a atteint sa limite. Dès lors, les eaux de surplus sont versées dans le déversoir du barrage).

La situation présentée dans la figure précédente se reproduit dans les barrages d'Incachaca et de Tuni. On observe l'influence de la concentration des précipitations sur les mois de décembre à janvier. Ces deux mois conditionnent le remplissage des barrages qui sont la clé de la gestion de l'eau potable.

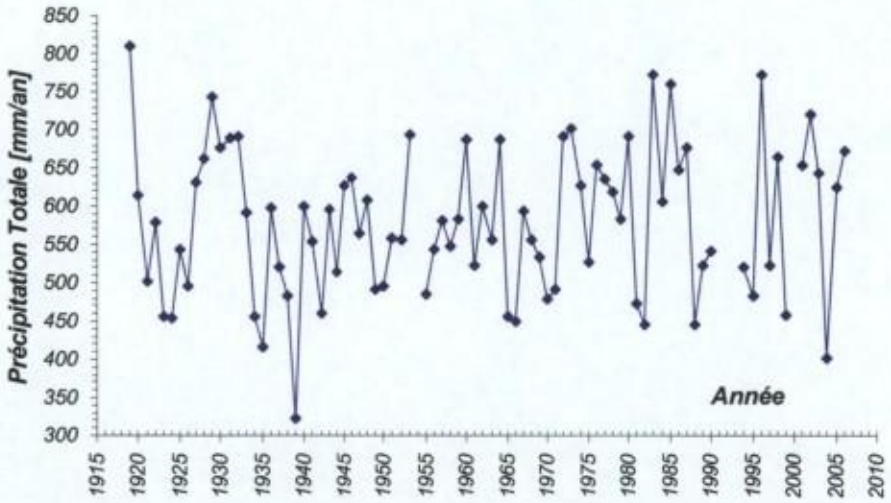
Cette thèse utilise comme instrument d'analyse la méthodologie présentée au sous-titre 3.4.3.1, avec les possibilités d'applications de la Figure 3.20 comme un outil pour l'analyse et pour la gestion de l'eau.

Dans de le cadre de la gestion des ressources en eau ***(d'application quotidienne)***, on peut employer cette méthode comme un outil d'analyse des données antérieures afin d'établir des prévisions et collaborer à la prise de décisions pour l'utilisation de barrages. Dans le contexte de la ***planification de la gestion***, on retiendra que la concentration joue un rôle sur son fonctionnement et qu'il serait souhaitable de tenir compte dans son projet d'ingénierie de l'effet probable sur son stock en eau et par conséquent de la simulation de l'opération du barrage.

3.4.3.2 Prévision des précipitations annuelles

La variation interannuelle des précipitations (Figure 3.21) est une incertitude de type ontologique de la gestion ***(van der Keur P. et al. 2008)***, elle pourrait avoir des impacts sur les décisions quotidiennes de la gestion de l'eau par rapport à l'opération des barrages.

Figure 3.21 : Exemple de Variation interannuelle des précipitations (S. San Calixto)



Chaque jour, le responsable de l'opération des barrages décide quel volume d'eau il doit envoyer vers l'usine de traitement selon les besoins journaliers de la population. Par exemple, les habitants des quartiers résidentiels consomment plus d'eau les weekends que durant la semaine, contrairement aux quartiers administratifs du centre ville où l'administration utilise une grande quantité d'eau pendant la semaine de travail ***(Quisbert T. Communication personnelle EPSAS 2007)***. Cette responsabilité est encore plus grande entre octobre et janvier, puisque le technicien doit décider les volumes d'eau à envoyer vers l'usine de traitement, en fonction du stock d'eau disponible aux barrages en attendant l'arrivée des pluies.

Il est parfois nécessaire de prendre la décision de rationner l'envoi d'eau des barrages afin que les réserves puissent satisfaire les besoins vitaux de la population en attendant la venue des précipitations (voir l'exemple de fonctionnement des barrages dans la Figure 3.19). Il est alors important de connaître la quantité des précipitations durant l'année afin de prendre des décisions pour l'opération des barrages.

Dans le cadre de l'opération des barrages et de la prise des décisions concernant la gestion de l'eau, la méthode de la courbe de décharge peut servir d'outil à la gestion quotidienne de l'eau. De même, cette méthode peut permettre d'estimer les volumes d'eau qui approvisionneront les différents barrages et donc de mieux gérer les stocks en fonction de la demande.

L'analyse de la courbe de décharge chaque station indique que le jour ***Ji*** correspondant à l'arrivée d'une proportion de précipitation ***Si,*** ne varie pas beaucoup dans le temps. (Figure 3.12, Figure 3.13, Figure 3.14, Figure 3.15). Il est même possible de calculer le premier et le dernier jour de l'année hydrologique ***(Jimin et Jimax)*** où l'on attend une valeur de précipitation ***Pi*** quelconque qui correspond à une proportion de précipitation ***Si***, basée sur l'analyse statistique effectuée pour ***la courbe de décharge***.

Pour chaque S_i on a: $J_{i(s)}$, $J_i min_{(s)}$ et $J_i max_{(s)}$ ***(Figure 3.22 et 3.25)***

$J_i min_{(S)}$: Premier jour de l'année hydrologique où il peut arriver P_i pour une proportion de précipitation ***Si***

$J_i max_{(S)}$: Dernier jour de l'année hydrologique où il peut arriver P_i pour une proportion de précipitation ***Si***

Pour $J_i min_{(S)}$ on peut calculer ***P cumulé*$_1$** et pour $J_i max_{(S)}$ on peut calculer ***P cumulé*$_2$**

***P cumulé*$_1$** : Précipitation cumulée jusqu'au moment $J_i min_{(s)}$

***P cumulé*$_2$** : Précipitation cumulée jusqu'au moment $J_i max_{(S)}$

D'où l'hypothèse :

$$(8) \quad PTotale\_annuelle_{(S)} = \left(\frac{Pcumulée_1 + Pcumulée_2}{2} \right) * \frac{100}{S_i}$$

PTotale_annuelle*$_{(S)}$**: Prédiction de la précipitation totale annuelle prévue à partir des valeurs associées aux proportions de la précipitation totale (S)***

Pour tester cette hypothèse, il faut d'abord connaître les moments J_i, $J_i min_{(S)}$ et $J_i max_{(S)}$, que l'on obtient de l'analyse statistique des valeurs de nos courbes de décharge. Les Figure 3.22 et 3.25 présentent ces moments, où l'on peut associer chaque jour à une date, pour une Année Hydrologique (AH) de septembre à août et pour une Année Hydrologique (AH) de juillet à juin.

Figure 3.22 : Jours possibles d'occurrence, J_i, $J_i$max, $J_i$min pour S_i (AH : septembre-août)

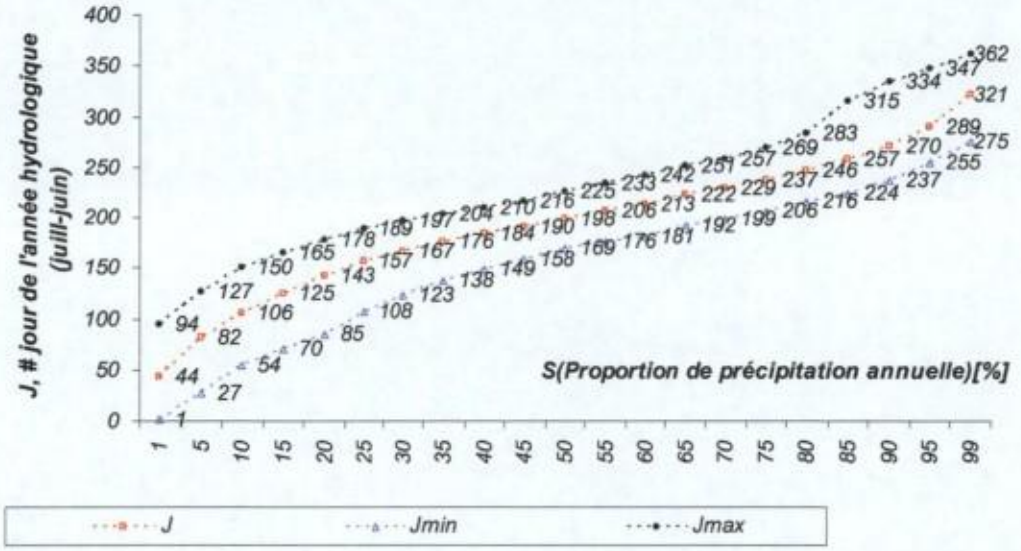
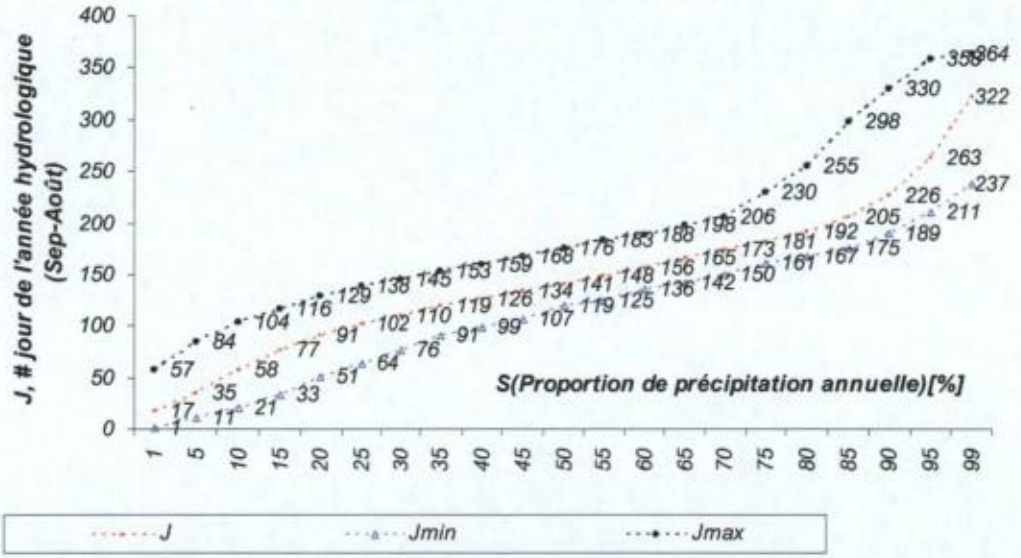


Figure 3.23 : Jours possibles d'occurrence, J_i, $J_i$max, $J_i$min pour S_i (AH : Juillet-juin)



Pour tester cette hypothèse aux bassins sources: Incachaca, Tuni, Hampaturi et Milluni, on applique la méthode afin de vérifier s'il' est possible de prédire la précipitation totale enregistrée sur ces bassins durant les années 2003-2008.

1. En premier lieu, pour chaque proportion de précipitation ***Si,*** on détermine une date pour J_i, J_i***min*** et J_i***max. :*** par exemple pour une année hydrologique Juillet-Juin (Figure 3.23), et pour une proportion S= 10 :

   $J_i = J_{106}$: 14-Octobre ; J_i**min** $= T_{54}$ *: 23-Août* ; J_i**max** $= T_{150}$ *: 27-Novembre*

2. Ensuite, pour l'année dont on veut prédire la précipitation totale, on calcule la précipitation cumulée (***Pcummulée***$_1$ et ***Pcummulée***$_2$) jusqu'à J_i***min*** et J_i***max.*** La valeur moyenne entre les deux précipitations cumulées sera la prédiction de la précipitation totale annuelle.

Dans l'exemple précédent, pour essayer de prédire la précipitation annuelle de 2003-04 d'Incachaca, on a :

Pcummulée$_1$ pour ***$J_i$min= J_{54}*** : *23-Août, qui correspondent à une proportion*

S=10 ➔ *20.10*

Pcummulée$_2$ pour ***$J_i$max=J_{150}*** : *27-Novembre qui correspondent à une proportion*

S=10 ➔ *87.00*

$$PTotale\_annuelle_{(10)} = 535.50mm$$

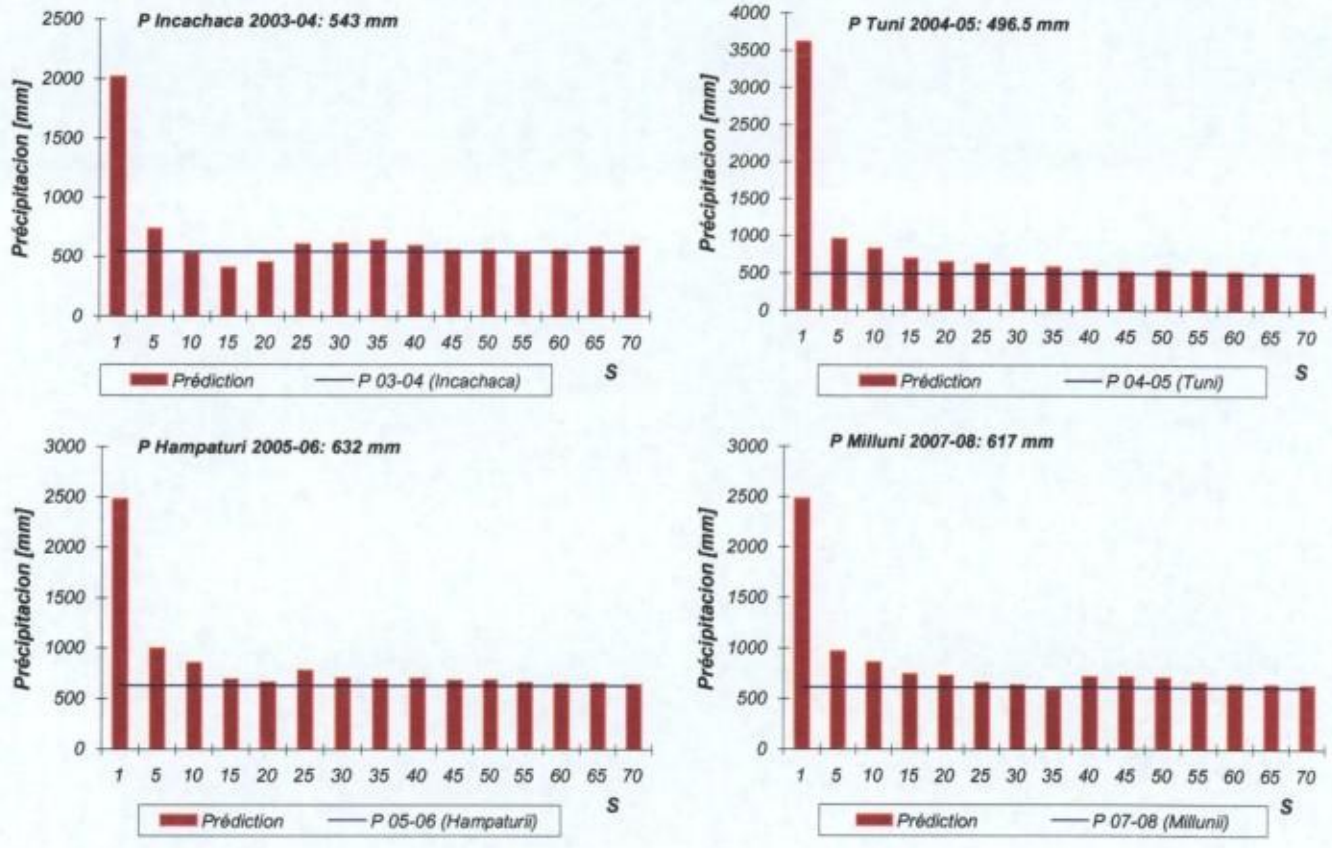
Si l'on compare la valeur calculée avec la valeur réelle de la précipitation totale d'Incachaca de l'année 2003-04 qui est P= 543 mm (Figure 3.24), on arrive à la conclusion qu'en utilisant une méthode simple, il est possible d'estimer avec précision une valeur très utile pour la gestion de l'eau en général.

Selon les données obtenues par cette méthode, nos valeurs correspondent pour la prédiction des précipitations totales annuelles d'Incachaca pour l'année 2003-04. Cette simulation est réalisée avec une proportion de la précipitation S [%]=10%. On a ensuite procédé à des prédictions pour les valeurs de S [%]= [1, 5, 10, 15.....60, 65,70] (Figure 3.24).

La prédiction calculée, a été élaborée avec des données de précipitation journalière de la période comprise entre le1ier juillet et le 27 novembre 2003 (pour une année hydrologique juillet-juin). Ce qui veut dire qu'à partir des données disponibles jusqu'à la fin du cinquième mois de l'année hydrologique, il a été possible de prédire la précipitation totale de l'année hydrologique 2003-04.

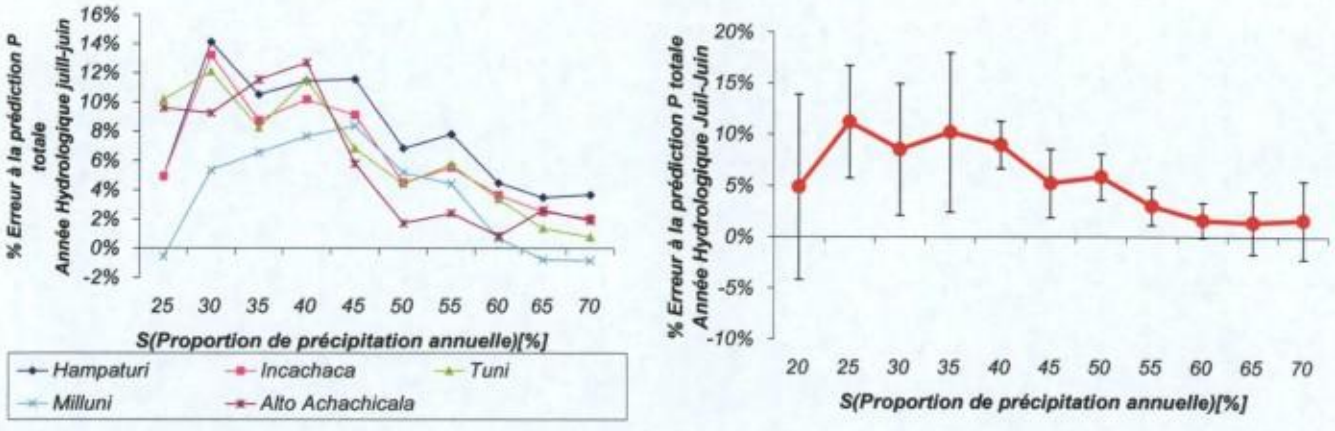
Dans la Figure 3.24, on présente un exemple de prédiction pour chaque bassin source et pour chaque année pour la période 2003 -2007.

Figure 3.24 : Essai de prédiction des précipitations (2003-2007) AH: Juillet-Juin



A partir de ces résultats il est possible élaborer une évaluation de la précision de notre méthode (Figure 3.25).

Figure 3.25 : Evaluation de l'erreur de la prédiction de la P totale



Le Graphique de gauche montre le calcul de l'erreur de la prédiction par rapport à la valeur réelle des précipitations pour la période 2003-07 pour chaque bassin source. A droite on présente une évaluation globale des erreurs de prédiction des 5 bassins versants. Ces erreurs atteignent 12% pour S=25 et descend jusqu'à des valeurs d'incertitudes inférieures à 2% pour S=60.

Les erreurs n'ont pas d'impact sur la gestion des barrages et celles-ci tendent à diminuer quand la valeur de S augmente, c'est-à-dire quand elle s'approche de 100% des précipitations.

Toutefois pour les fins de la gestion, il est intéressant d'observer que pour S= 40 et S=45, les marges d'erreur sont acceptables (entre 4 et 10%). Ce seuil de fiabilité s'améliore si l'on se réfère à une année hydrologique de juillet à juin, avec la possibilité d'avoir une prévision fiable dès les 10 derniers jours du mois de janvier (en incluant aussi le S=35). Il est cependant possible de prédire avant cette période mais avec une fiabilité moindre. Malgré tout, ces prédictions peuvent servir aussi comme référence pour l'opération du barrage.

Cette méthodologie pourrait servir à la gestion en retirant l'incertitude de la variabilité interannuelle des précipitations, laquelle constituent une des principales difficultés pour l'opération des barrages.

On recommanderait donc d'employer cette méthode avec les caractéristiques suivantes :

1. *Une année hydrologique qui débute le 1ier juillet.*
2. *Ella aura pour des valeurs de S, les jours* J_i***min, J,*** J_i***max.*** *de l'année hydrologique qui apparaissent dans la Figure 3.23. (Ex. 1=01/07, jour 27= 27/07, jour 44 =13/08).*
3. *Les prédictions plus sérieuses pourraient être effectuées dès les derniers jours de janvier (Si[%]= 40, 45, 50), avec une fiabilité de 4 à 10%, que l'on considère acceptable pour la gestion des ressources et l'opération des barrages.*

Le Tableau 3.5 présente les précipitations minimales requises pour répondre à la demande actuelle des villes de La Paz et El Alto.

Tableau 3.5 : Besoin en précipitation des Bassins versants alimentant La Paz et El Alto [mm/an]

Cond d'Humidite du sol du bassin	Hampaturi	Incachaca	Tuni	Milluni
Cond. Moyennes	357	379	611	509
Cond. Bonnes	314	321	532	374
Cond. Mouvais	413	464	720	796

3.5 Conclusions

La première conclusion répond aux deux questions posées au début de ce chapitre :

1. ***– Existera-t-il une variation dans la disponibilité des ressources en eau et quelle sera son impact sur leur gestion?***

La réponse à cette question est controversée, puisque quelques prédictions montrent des tendances à l'augmentation des précipitations. Cependant, d'autres études pronostiquent une diminution des précipitations (voir sous-titre 3.4.2). Les prévisions de l'IPCC *(2007)* contrastent parce qu'elles présentent une incertitude de +/- 5%. Cette ambiguïté est compréhensible puisqu'il s'agit d'une échelle d'analyse régionale et non locale, échelle d'analyse qui est indispensable pour la planification et la gestion de l'eau.

D'autres prévisions sur les moyennes annuelles de pluies, comme celles du SENAMHI-PNCC *(2008)* présentent une projection optimiste. Ces données proviennent d'un modèle robuste et complet de « downscaling » mais qui se trouve encore en processus de calibrage dans la zone d'étude. Ce modèle n'est donc pas accessible pour réviser ou appliquer des tests dans d'autres scénarios. Par ailleurs, les conclusions des analystes des tendances sont opposées *(Jaffrain J. 2007;Vuille M. et al. 2003).*

Selon des modélisateurs boliviens comme Andrade *(2009)* le problème principal de la modélisation climatique de cette région réside dans la résolution, par exemple en travaillant avec des pixels de plus de 10 x 10 km. ou même de 5 x 5 km, dans une région où la variation d'altitude est très importante. Ce qui rend compliquée la prévision climatique et ou encore l'estimation des précipitations. En supposant une situation future optimiste, une augmentation de la quantité de précipitation s'avère bénéfique pour les ressources en eau, mais il n'est pas prudent qu'elle soit prise en considération dans la planification de la gestion puisque cette tendance n'est pas encore confirmée. Par contre, si la quantité des précipitations diminue, la façon de gérer la nouvelle disponibilité devra être ajustée.

Dans ces conditions, il est nécessaire de vérifier la régulation des barrages en cas de hausse ou de baisse de la moyenne des ressources de +/- 5% (faibles d'après les estimations à court terme de l'IPCC *(2007)*). De même, pour les projets futurs, il est recommandable que les ingénieurs fassent leur dimensionnement en tenant en compte de marges d'incertitude.

Dans le cadre de l'application de la GIRE et en relation avec la connaissance des ressources, des prévisions stratégiques de l'apport des bassins versants devraient être réalisées en fonction des deux scénarios (augmentation et diminution). De cette façon, on disposera d'alternatives pour la gestion de l'eau dans les deux situations futures potentielles.

Nous considérons qu'avec des marges de +/- 5%, il est possible de faire cette planification qui inclut les deux scénarios, parce que cette incertitude est aussi comprise dans les marges des incertitudes ontologiques qu'ont les systèmes *(van der Keur P. et al. 2008)*.

2– Existe-t-'il une tendance des pluies à être plus concentrées durant certains mois de l'année ? Et si oui, est-ce que cette concentration des pluies exerce un impact sur la gestion des ressources en eau ?

Le retard et l'arrivée prématurée des précipitations et les tendances à avoir une concentration de celles-ci sont vérifiables avec la méthode proposée que nous ayons dénommée ***« courbe de décharge ».*** Elle a facilité l'analyse des cas des années « Niño » 1982-83, 1997-98 et le cas de 2005 qui a été critiqué par EPSAS. Notre méthode est un instrument qui a permis de conclure qu'il n'existe pas au niveau historique une tendance linéaire claire (de concentration de précipitations) appuyant les conclusions du PNCC *(2007)*.

Par contre on a détecté une tendance cyclique avec une période de retour entre 15 et 25 ans (pour des moyennes mobiles de 5 ans) (Figure 3.18), pour les proportions de précipitation $S_i[\%]$=[25 et 30] (25 et 30% de la précipitation totale annuelle). Cette tendance cyclique est perceptible à partir des années 50 où s'intercalent des périodes de retard et de concentration des précipitations de 8 à 13 ans avec des périodes similaires de dispersion et d'anticipation des précipitations.

Actuellement, nous nous trouvons dans un cycle où la tendance est plutôt à la concentration et au retard des précipitations depuis l'année 1995. Cette situation peut confirmer une partie des conclusions du PNCC *(2007)*. Cependant, il est prématuré d'annoncer que cette tendance peut être attribuée aux changements climatiques parce que s'il s'agit effectivement de tendances cycliques et on devrait s'attendre à un effet opposé dans les prochaines années.

Pour analyser l'impact de la concentration des précipitations sur la gestion de l'eau, il est indispensable d'examiner séparément les événements. L'étude du barrage Hampaturi en 2005 (Figure 3.20) en est un bon exemple. Dans cette étude on contraste la concentration des précipitations, les précipitations et les niveaux du barrage pour effectuer une analyse multicritère qui permet d'aboutir à une description complète de la situation. De même, une étude au niveau journalier fournit des informations précieuses pour la prise de décision dans le but d'optimiser l'utilisation des barrages. Grâce à cette analyse, nous concluons que l'arrivée des pics de concentration des précipitations pendant les périodes mentionnées est vitale pour la gestion de l'eau et l'opération des barrages.

Nous recommandons que les barrages doivent être gérés d'une manière rigoureuse principalement pendant les mois de décembre, janvier et février (voir Figure 3.7), puisque la plus grande partie de la ressource apparaît justement à cette époque de l'année. Après cette période, son utilisation et sa gestion dépendront des réserves accumulées et de la demande en eau tout au long de la période restante et de l'année suivante.

Prédiction des précipitations

La méthode de prévision des précipitations totales annuelles proposées dans ce chapitre, se base sur une année hydrologique juillet-juin, puisque on observe qu'elle offre de meilleurs seuils de fiabilité pour les mois de décembre et janvier. C'est dans cette période que l'EPSAS a besoin de guides pour sa gestion, parce qu'elle correspond au moment critique où les barrages atteignent leur niveau le plus bas. L'application de la méthode servira considérablement pour la gestion quotidienne de l'eau et la prise de décisions très importantes pour l'opération des barrages. Actuellement, celle-ci est dirigée selon les critères et l'expérience du technicien en charge de l'opération.

Bien qu'elle soit simple dans ses principes, cette méthode est capable de faire une prédiction avec une marge de fiabilité comprise entre 4 et 10%, au moment des décisions cruciales, c'est-à-dire au cours du mois de janvier. Car même avec une fiabilité plus faible, il est possible de prévoir la quantité de pluie depuis les mois de novembre et décembre, et d'envisager probablement des stratégies pour la gestion de l'eau.

Il est ainsi possible d'affronter une incertitude de type ontologique telle que la variabilité interannuelle des précipitations.

La méthodologie

La méthodologie exposée dans cette thèse, « la courbe de décharge » a été d'une grande utilité puisqu'elle permet l'analyse journalière des précipitations grâce à un concept fondamental : l'indépendance de l'arrivée de la période des pluies et de la quantité de précipitations pour une année.

Cette méthodologie d'analyse est simple, et se base sur l'estimation statistique des jours (J_i) où l'on attend l'apparition d'une proportion de la précipitation $S_{i..}$ Sur cette base on peut déterminer le retard potentiel des précipitations, la distribution et la concentration des pluies, pour une année ou une période quelconque, à une échelle d'analyse journalière.

Il convient d'indiquer que cette méthodologie pourrait être explorée dans d'autres applications de gestion de l'eau, où il est nécessaire de travailler avec une échelle d'analyse journalière.

Année hydrologique

En ce qui concerne les concepts plus généraux, on observe que par exemple l'utilisation d'une année hydrologique particulière n'est pas fondamentale pour les prises de décision, bien qu'on considère que conceptuellement une année hydrologique a comme période de référence les mois de juillet à juin, il serait plus correct que de travailler avec une année hydrologique allant de septembre à août dans cette partie du pays.

4 BILAN HYDROLOGIQUE DU BASSIN VERSANT

4.1 Introduction

Au sujet des données

Une gestion optimale des ressources en eau nécessite une connaissance rigoureuse du système hydrologique de la région. Il s'agit d'une part d'identifier des facteurs contrôlant les apports en eau et d'autre part de déterminer leur importance respective.

Pour analyser le système hydrologique, dans cette étude, nous avons pris en compte des facteurs tels que les précipitations, l'écoulement dans les bassins versants, les infrastructures de stockage et de distribution, l'apport en eau des glaciers, et la couverture végétale (puisqu'elle influence l'évapotranspiration).

Le rôle que jouent ces différents facteurs dans l'approvisionnement en eau des villes de La Paz et d'El Alto n'ont jamais été clairement définis. Or, la compréhension de l'ensemble des mécanismes contrôlant la disponibilité en eau est indispensable, pour faire possible une gestion durable de l'eau.

L'écoulement de l'eau dans un bassin versant est perçu de différentes façons. Il peut être perçu comme la réponse du bassin aux précipitations ***(Ven Te Chow 1994;Villón M. 2002)***. ou comme un service environnemental du bassin versant.» ***(FAO 2007)***.

Dans cette thèse, l'écoulement sera considéré comme la réponse hydrologique du bassin versant aux précipitations et on tentera de le modéliser pour les basins versants sources des villes de La Paz et d'El Alto, en utilisant les données dont on dispose (sous-titre 3.2, Tableau 3.1), qui ne sont pas nombreux, par rapport à la quantité de paramètres relevés dû aux limitations logistiques et économiques qui ont les institutions qui les collectent.

Dans notre cas, les bassins versants étudiés se trouvent dans une région éloignée des centres urbains. Par conséquent les relevés pluviométriques et hydrologiques nécessitent des efforts logistiques considérables.

En dépit des aspects mentionnés, EPSAS dispose d'une base de données structurée des deux paramètres (précipitations et des niveaux des barrages dont elle a la gestion) entre 2001 et 2007. Celle-ci n'a encore jamais été exploitée et sert de base à la calibration et validation du modèle décrit dans ce chapitre. ***(Base des données EPSAS, Quisbert 2006)***

Pour les bassins de Tuni et de Condoriri, il existe un réseau de mesures des débits qui a été mis en place par l'IRD à la fin des années 90. Ces installations sont composées de pluviographes et de limnimètres automatiques. Cependant, la quantité de données disponibles reste limitée : d'une part, à cause des vols de matériel. ceux-ci ont pour conséquence une discontinuité dans les séries de données ***(IRD-Bolivia 1995-2008;IRD-Bolivia 2007)*** et d'autre part, parce que l'acquisition de ces données nécessite un personnel qualifié capable d'assurer le suivi des mesures, l'entretien des appareils et l'interprétation des données. Ces données ne sont pas tenues en compte pour cette thèse, due à la discontinuité mentionné ci-dessus.

Nous estimons que la capacité de l'EPSAS ne changera pas à l'avenir. Par conséquent la disponibilité des données restera la même qu'actuellement, à savoir des relevés quotidiens de précipitations et de niveaux de barrages, sans plus. La formulation de notre modèle a tenu compte de cette limitation.

Il faut signaler que des études importantes ont été menées à partir des données de SAMAPA (Service Autonome Municipal Publique de l'eau potable et de l'Assainissement), l'ancienne entreprise responsable de la gestion de l'eau, du Plan Maestro ***(Lahmeyer International - GITEC - TECNOSAN-SICO 1994)***, et du projet des Systèmes d'eau Potable de la Ville de La Paz ***(CES-CGL-J&S 1997)***. Ce dernier document inclut le projet de la construction du barrage de Huayna Potosi sur le bassin versant du même nom. Malheureusement ces données ont disparu avec le changement d'administration.

Au sujet des modèles

Par la suite, les apports du bassin versant seront dissociés en 2 composantes : l'écoulement issu de la fusion des glaciers et l'écoulement issu de la partie non englacée du bassin versant.

Plusieurs études ont déjà été réalisées par l'IRD avec son partenaire bolivien, l'IHH, en particulier sur le thème de la modélisation des écoulements. On peut citer les recherches suivantes :

L'un des premiers antécédents est la thèse de Caballero *(2001)*, qui a appliqué le modèle ISBA *(Interaction Sol-Biosphère-Atmosphère)* de Noilhan et Plant *(1989)*, au bassin de Liviñosa (Vallée Zongo, Nord-Est de La Paz et d'El Alto, Bassin Huayna Potosi Est), en trouvant un apport de 15% du composant glacier.

Ce modèle qui a été appliqué au milieu andin dans des bassins versants englacés, par Caballero *(2001)* présente une difficulté fondamentale dans notre cas: il demande une grande quantité de données et différents types des variables.

Avant Caballero, Riguadière *(1995)* et Schuler *(1997)* *(in Ribstein P. 2003)*, ont essayé d'appliquer des modèles « degré-jour » aux glacier boliviens. Ce fut un échec, à cause des faibles corrélations entre la température et le bilan d'énergie *(Ribstein P. 2003)*. En effet, Sicart *(2002)* indique que la température de l'air est un mauvais indicateur de la fusion des glaciers tropicaux.

Pouyaud *(2005)*, dans son article sur la Cordillère Blanche propose un modèle dans lequel il divise l'écoulement en deux composants : glacier et bassin. La partie « glacier » est fonction de la fusion du glacier et de la température, ces dernières sont variables dans le temps. Cela rend le modèle particulièrement utile, aussi bien pour décrire les débits de l'eau de fonte des glaciers, que pour décrire leur évolution dans le temps (notamment les effets de changement climatique) *(Pouyaud B. et al. 2005)*.

Gellibert *(2009)*, a fait une application du modèle de Pouyaud aux bassins de Tuni et de Zongo, en effectuant une analyse de sensibilité sur la réponse de l'écoulement total et de l'écoulement dans la partie englacée des bassins aux changements de température probables. L'eau de fonte des glaciers contribuent en moyenne à 15% à l'écoulement total *(Ginot P. 2009, valeur issue d'une Communication personnelle)*

Soruco *(2008)*, présente une estimation sur l'apport des glaciers, en employant un modèle préliminaire où il fait également la séparation en deux composants : le glacier et le bassin. Dans le bassin, l'écoulement dépend principalement d'un coefficient d'écoulement et de la surface. L'écoulement dans la partie « glacier » est calculé en fonction du bilan de masse du glacier, de sa surface et des précipitations.

> *Dans le cas de l'écoulement du bassin sans couverture glacier, il utilise comme référence la valeur du coefficient d'écoulement de Ramírez et Olmos (2007) (Cesc=0.56) [9], qui a été estimée de manière préliminaire pour le bassin de Tuni. Soruco mentionne cet aspect avant de l'employer pour le calcul des débits des bassins sources.*
>
> *Le calcul de l'écoulement de la partie « glacier » ne prend pas en considération l'existence de pertes sur le trajet de l'écoulement (de l'amont 'à la zone de contrôle du bassin). En d'autres termes, Soruco calcule le débit brut qui sort du glacier et non pas ce qui arrive au point de contrôle.*

Les estimations de Soruco *(2008)* relatent un apport de l'eau venant des glaciers de 22% pour Tuni Condoriri sur l'apport total en eau du bassin versant, et qu'en général les débits de bassins sources devront diminuer d'environ 12% en absence des glaciers.

[9] ***Cesc : Coefficient d'écoulement : Approche théorique du rapport écoulement / précipitation, voir sous – titre 4.3.3)***

Durant l'année 2009, Ledezma F., a appliqué le modèle SRM (Snowmelt Runoff Model) pour modéliser les apports du Glacier Mururata (à l'Est de La Paz et El Alto). Il est arrivé à la conclusion d'un apport de 15 à 20 % de ce glacier. ***(Ramirez E., 2009 communication personnelle)***.

Il faut également noter que le modèle SMR se base sur le critère de PPD (Positive degree day - Critère de degré-Jour - ablation à partir de certain seuil de température) et que ce modèle a été conçu pour les bassins avec un régime pluvio-nival et non spécifiquement pour des glaciers, comme l'indiquent ses auteurs ***(Martinec - Rango & Roberts 2008)***.

En vue des études antérieures et surtout de la contrainte de disponibilité des données, nous avons opté pour la méthode du bilan hydrologique, qui sera développée au point 4.4.

4.2 Questions- clés pour l'analyse

De façon similaire au chapitre précédent, l'analyse sera guidée par des questions fondamentales pour l'application de la GIRE :

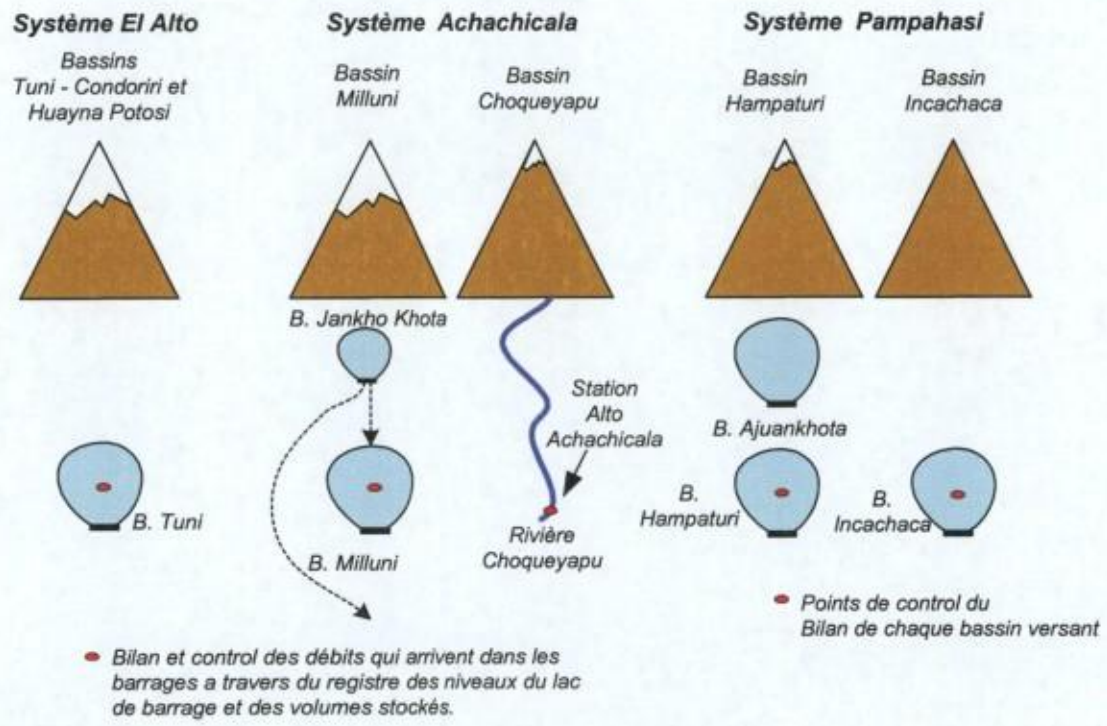
> ***1.*** *Comment réagit le bilan hydrologique du bassin versant par rapport aux précipitations et à l'écoulement ? Est-il possible de le décrire avec un modèle simple, utilisable à partir des données basiques?*
> ***2*** *Est-il possible de déterminer l'influence actuelle des glaciers sur l'apport d'eau au bassin versant à l'aide du modèle choisi ?*
> ***3. Ce*** *modèle permet-il d'établir des prévisions ?*

4.3 Rapport précipitation et écoulement

4.3.1 « Architecture » des bassins versants

Afin d'étudier le rapport entre la précipitation et l'écoulement il est tout abord nécessaire de connaître davantage la structure interne des bassins versants où les analyses ont été effectuées.

Figure 4.1 : « Architecture » des bassins versants



La Figure 4.1 met en relief les aspects suivants :

- Les bassins du Système d'El Alto ont des surfaces de glaciers les plus importantes des bassins sources (Tableau 1.3).

- La station Alto Achachicala se trouve dans le bassin de Choqueyapu (Appelé aussi Kaluyo).

- Hampaturi et Milluni présentent des surfaces glaciaires moindres : les glaciers occupent moins de 1% de la surface totale du bassin versant) (Tableau 1.3).

- Le bassin d'Incachaca n'a pas de glaciers. (Tableau 1.3).A l'aval du bassin se trouve le barrage d'Incachaca.

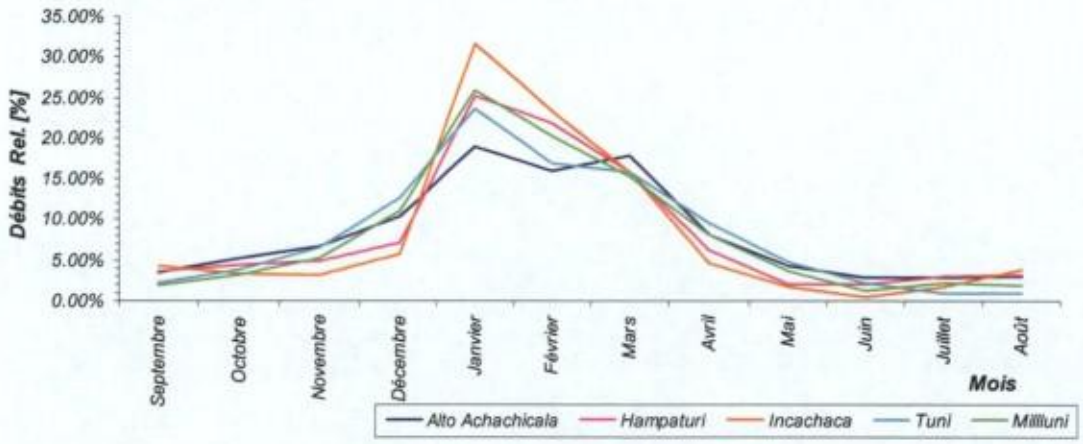
- Dans le bassin de Milluni, il existe un canal de « by pass » qui sort du petit barrage de Jankho Khota et qui fait le détour du barrage de Milluni. Le bilan de Milluni est incertain car aussi bien l'apport direct par le Jankho Khota que la perte par le canal « by pass » sont difficiles à évaluer, parce qu'il n'existe pas de point de jaugeage et que l'utilisation du canal de By pass est ponctuel.

- Le bassin de Hampaturi a deux barrages importants : Ajuankhota à l'amont et Hampaturi à l'aval. Le transfert d'eau entre ces deux barrages se fait via un cours d'eau

4.3.2 Régime des débits

Dans les Figure 3.8 et 4.2, on peut observer que le régime d'écoulement ***(E)*** des bassins en étude, présente son maximum en janvier. En examinant le rapport annuel de l'écoulement dans ces bassins (Figure 4.2), on peut généraliser certaines informations : (1) Hampaturi et Incachaca montrent des tendances similaires, du fait de leur proximité. Entre décembre et fin janvier, leur (E) présente une grande variation. ***(E)*** (2) Cependant, on observe le contraire pour les bassins Milluni et de Tuni. (3) Enfin, Alto Achachicala (Choqueyapu) possède deux pics de débits relatifs.

Figure 4.2 : Régime d'écoulement



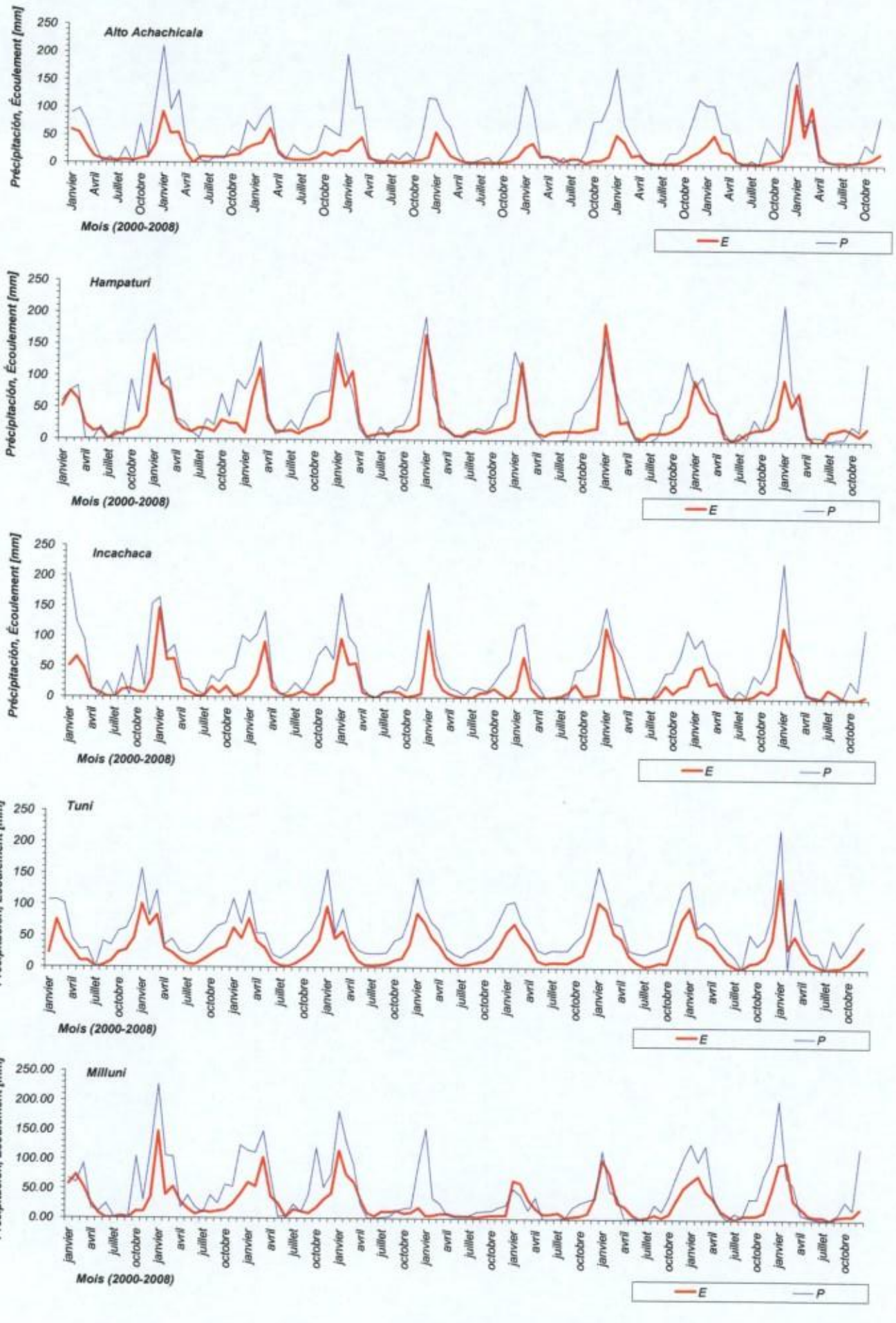
Courbes construits avec la base des données d'EPSAS et SENAMHI (voir tableau 3.1).

Pour évaluer le régime d'écoulement avec plus de précision, il est nécessaire, de faire cette analyse sur une plus longue période (
Figure 4.3), et de prendre en considération les configurations de chaque bassin, soit son « architecture », ainsi que la position des points de contrôle des débits (Voir Figure 4.1).

Il existe, en général un pic de précipitation maximal en janvier dans tous les bassins, mais les pics d'écoulement apparaissent au mois de mars. A Milluni et Hampaturi, l'analyse des écoulements doit tenir compte des barrages situés à l'amont, puisque ceux-ci influencent les débits des écoulements aux points de contrôle situés à l'aval.

Pour la gestion, il est indispensable de connaître la réponse hydrologique du bassin afin de procéder à des affirmations et des analyses sur le régime de l'écoulement. On relie donc cette analyse au rapport direct de la précipitation et l'écoulement.

Figure 4.3 : Régime mensuel de précipitation



4.3.3 Rapport écoulement - précipitation

Afin de caractériser la réponse hydrologique des bassins, nous utilisons le coefficient d'écoulement ***(Cesc$_i$)***. Celui-ci est calculé par année en utilisant la formule suivante :

$$Cesc_i = \frac{E_i}{P_i}$$; ***(Ven Te Chow 1994;Villón M. 2002)***

Cesc$_i$= *Coefficient d'écoulement de l'année i*
i=[2000 - 2008] pour Hampaturi, Tuni, Incachaca et Millluni
i=[1980 - 2008] pour Alto Achachicala (Choqueyapu)

Les relations entre ***E$_i$ P$_i$ et Cesc$_i$***, sont représentées dans la Figure 4.4. Afin de comparer des variables qui ont des amplitudes différentes, les valeurs sont centrées-réduites

$$VCR_{i(V)} = \frac{V_i - \mu}{\sigma}$$

VCR$_{i(v)}$ *: Valeur centrée –réduite de la variable* ***V****, pour l'année* ***i.***
μ : *Moyenne des valeurs* ***V$_i$***
σ : *Ecart type des valeurs* ***V$_i$***

Dans la pratique, les valeurs moyennes du ***Cesc*** servent de référence ***(Villón M. 2002)***, pour caractériser le rapport entre l'écoulement et les précipitations. Par conséquent, l'écoulement peut être exprimé comme une fonction linéaire des précipitations, même si en réalité il ne l'est pas.

Dans la Figure 4.4, il apparaît qu'il n'existe pas, pour tous les cas, de relation directe entre la précipitation et l'écoulement et par conséquent la valeur de ***Cesc*** n'est pas constante. Par contre, le coefficient d'écoulement peut servir comme paramètre de relation idéale entre ***E*** et ***P***, qui donne une idée de l'ordre de grandeur relatif des deux paramètres. Ce coefficient peut être aussi considéré comme l'efficacité du bassin versant à transformer la précipitation en écoulement. C'est la raison pour laquelle ***Cesc est utilisé*** dans cette thèse.

Pour le cas des bassins glaciers l'expression la plus adéquate du ***Cesc*** serait :

$$Cesc = \frac{E}{P+G}$$

Où G est l'apport en eau des glaciers,

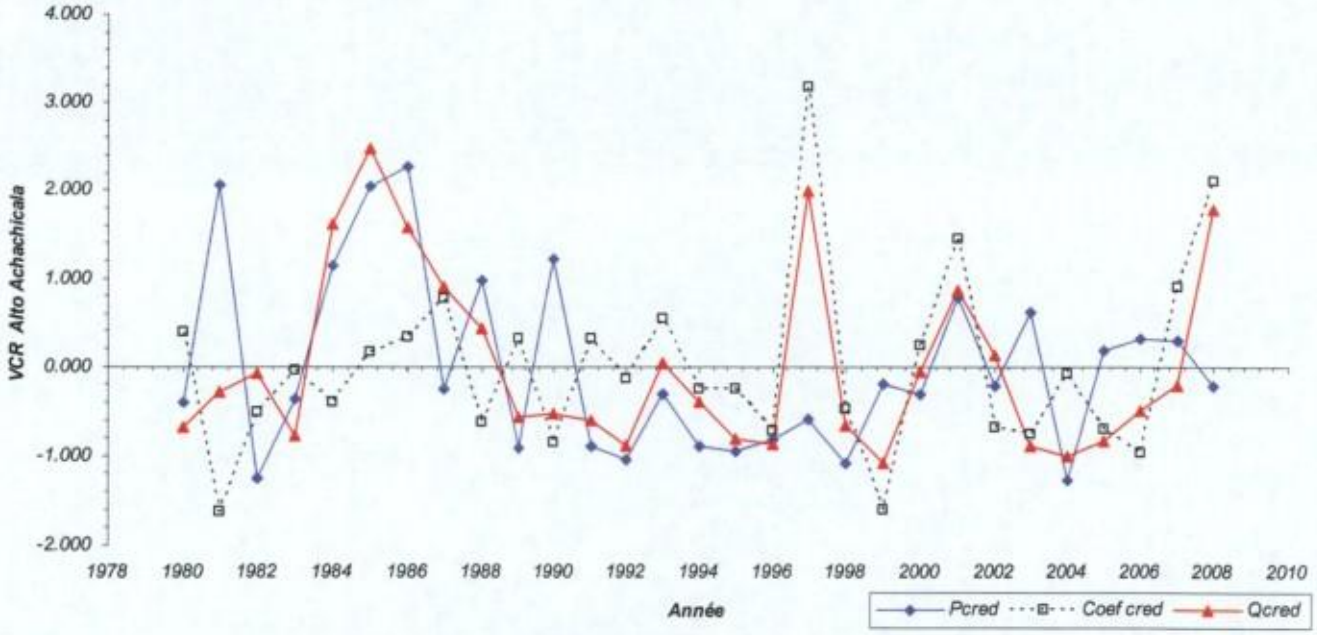
Pour revenir à la Figure 4.4, notons que les réponses de ***(E)*** de chaque bassin sont différentes pour une même année. Même si on considère des périodes différentes avec une même valeur de précipitation (Figure 4.3), les valeurs de l'écoulement diffèrent.

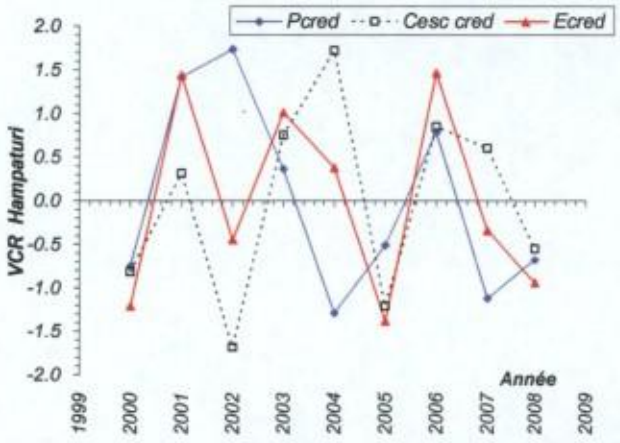
Par ailleurs, on observe qu'il existe une continuité dans la pente de la variabilité interannuelle de l'écoulement, du moins les variations ne sont pas aussi abruptes que celles des précipitations. Par exemple, à Alto Achachicala, pour les années 1988, 1989 et 1990, les valeurs de précipitation correspondent respectivement à des périodes humide, sèche et humide, par contre l'écoulement de l'année 1990 a été apparemment affecté par la baisse d'écoulement de 1989, parce qu'au lieu d'augmenter comme les précipitations, l'écoulement de 1990 a été encore moins importante que l'année précédente. Dans la même station, la situation inverse s'est présentée durant la période 1980-82.

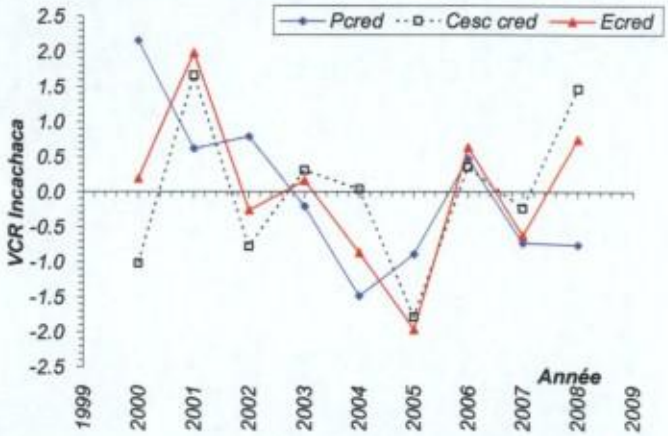
Pour Hampaturi et Incachaca, la période 2002-04 présente une tendance à la diminution des précipitations avec une remontée en 2005, tandis que l'écoulement a maintenu sa tendance à la baisse la même année.

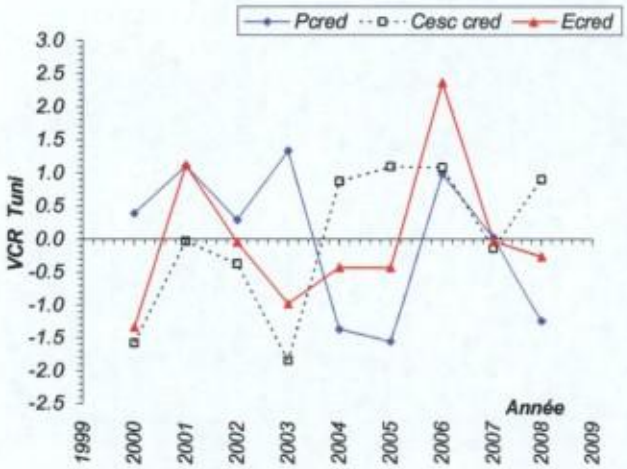
On peut conclure de façon préliminaire que l'écoulement a une conduite plus stable que la précipitation, puisque ses valeurs sont apparemment une fonction de ce qui est arrivé durant la période antérieure. Cela est dû à toutes les variables qui jouent un rôle dans le régime hydrologique du bassin. Alors, établir un bilan hydrologique semble adéquat pour caractériser la réponse hydrologique du bassin versant.

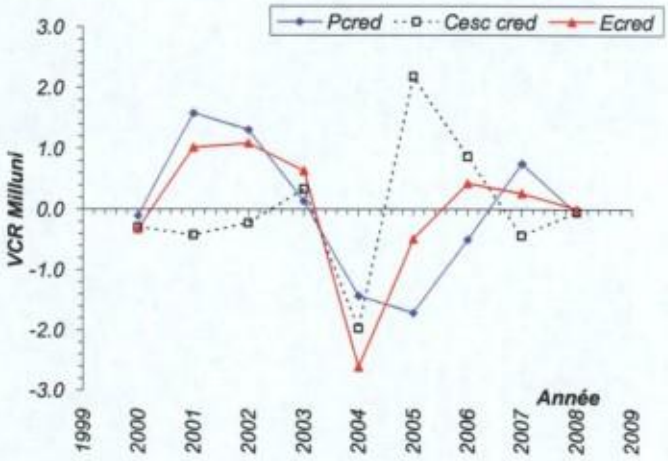
Figure 4.4 : Rapport P, E et Cesc











Comme référence pour nos analyses, il est intéressant de remarquer les faits suivants :

Les années 1982-83 et 1997-98 sont des années « El Niño », cataloguées comme déterminantes pour l'analyse de la fonte des glaciers (Ribstein P. et al. 1999), puisque la fonte augmente durant ce phénomène.

D'après la courbe qui correspond à la station d'Alto Achachicala, la réponse de l'écoulement a été autre pour chacun de ces phénomènes. Cette observation est en accord avec les constats de Vuille (2000).

On remarque également que durant « El Niño » 1997-98, l'écoulement a enregistré la deuxième valeur historique la plus élevée de la Station d'Alto Achachicala. Par contre la valeur de la précipitation pour la même année reste faible. Cette observation est à mettre en parallèle avec les résultats de Wagnon (2001), concernant le bilan de masse glaciaire fortement négatif sur le glacier de Zongo durant l'année « El Niño » 1997-98 .

L'écoulement le plus important de cette station a été observé en 1985, avec des précipitations aussi abondantes.

Dans le cadre présenté ci-dessus, nous avons calculé les ***Cesc*** moyens de chaque bassin source, ceux-ci sont résumés dans le tableau suivant

Tableau 4.1 : Coefficient d'écoulement moyen

Période	Station				
	Alto Achachicala	Hampaturi	Incachaca	Tuni	Milluni
1980-2008	0.43				
2000-2008	0.41	0.67	0.42	0.58	0.57

Ce tableau montre que Alto Achachicala et Incachaca qui n'ont ni barrages ni glaciers (mais seulement des petits glaciers), présentent les ***Cesc*** les plus faibles. Les bassins possédant des glaciers en amont (Tuni et Milluni) ont un Cesc plus important. Enfin, le coefficient estimé le plus élevé est celui du bassin de Hampaturi qui dispose d'un barrage en amont important (Ajuankhota).

4.4 Application du bilan Hydrologique

Considérant que l'architecture des bassins joue un rôle fondamental dans la réponse hydrologique et disposant uniquement de données concernant les précipitations et de l'écoulement, la méthodologie du bilan hydrologique semble la plus adéquate pour modéliser la réponse hydrologique du bassin. Elle a été conçue comme un outil de base permettant de connaître la disponibilité de la ressource dans un bassin ***(UNESCO/ROSTLAC 1982-2006)***.

Pour éviter toute confusion, le bilan hydrologique se situe à l'échelle du bassin versant et relève d' une démarche hydrologique ***(Ven Te Chow 1994)***, alors que le bilan hydrique se trouve à l'échelle de la végétation et suit une démarche agronomique ***(Ecosociosystemes 2004)***.

Cette recherche utilise le bilan hydrique du point de vue de la modélisation de la réponse hydrologique des bassins en étude, selon les concepts expliqués ci-dessous.

4.4.1 Méthode et algorithmes du bilan Hydrologique

En premier lieu, on présente les équations générales du bilan et les critères de base pour l'application de cette méthode aux 5 bassins versants sources de La Paz et El Alto.

Equation du bilan hydrologique

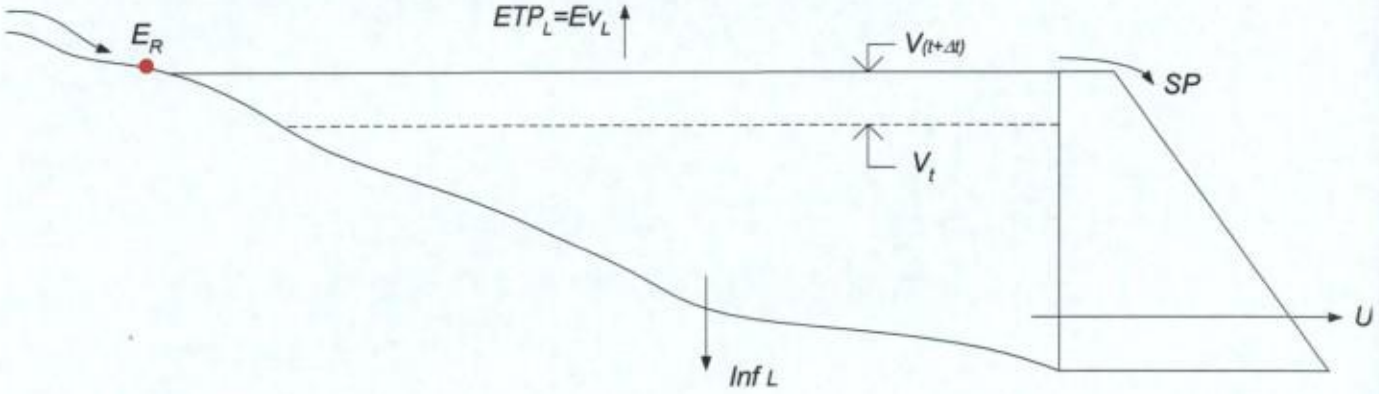
Equation générale du bilan pour la période comprise entre les temps t et (t+Δt)

$$(1)... V_{(t+\Delta t)} = V_t + \Delta V$$

$$\Delta V = Vol_{in} - Vol_{out}$$

V_t : *Volume d'eau du système moment* **(t)**
$V_{(t+\Delta t)}$: *Volume d'eau du système moment* **(t+Δt)**
ΔV : *Changement du stock du système sur la période* **Δt**
Vol_{in} : *Volume qui arrive au système sur la période* **Δt**.
Vol_{out} : *Volume qui sort du système sur la période* **Δt**.

Le bilan au barrage se traduit par le schéma suivant :



Bilan du barrage :

E_R= *Écoulement provenant du bassin alimentant le barrage.*
U= Débit envoyé à l'usine de traitement des eaux
SP=Surplus du barrage.
Inf_L= *Infiltration du lac de barrage*
ETP_L=*Evapotranspiration lac du barrage*

$$ETP_L = Ev_L + Tv_L$$

Ev_L= *Evaporations provenant des surfaces (sol ou de l'eau) (Zone du barrage)*
Tv_L=*Transpiration végétale (sur lac du barrage)*
Tv_L=*0 négligeable sur le lac du barrage*

$$ETP_L = Ev_L$$

En négligeant l'apport des précipitations **(P)** *sur le barrage, nous avons pour le bilan du barrage pour la période* **(Δt)** :

$$V_{t+\Delta t} = V_t + E_R - U - SP - Inf_L - ETP_L$$

$$(1a)... E_R = V_{t+\Delta t} - V_t + U + SP + Inf_L + ETP_L$$

Grâce aux relevés faits par l'EPSAS sur les barrages, nous connaissons les variables suivantes :

Le niveau du lac de barrage au moment **t**, *le niveau du lac de barrage au moment* **t+Δt**, *le débit envoyé à l'usine de traitement des eaux* **(U)** *et le surplus du barrage* **(SP)**.

On calcule les volumes au moment ***t et t+Δt****, grâce aux courbes élaborées par EPSAS, qui associent les niveaux du barrage et leur stock (volume d'eau).*

Si nous appelons ***(E_B)*** *Bilan d'eau du barrage calculé à partir des données d'EPSAS pendent l'intervalle de temps* ***Δt, (2)***

$$(2) \quad E_B = V_{t+\Delta t} - V_t + U + SP$$

(2) en (1a)

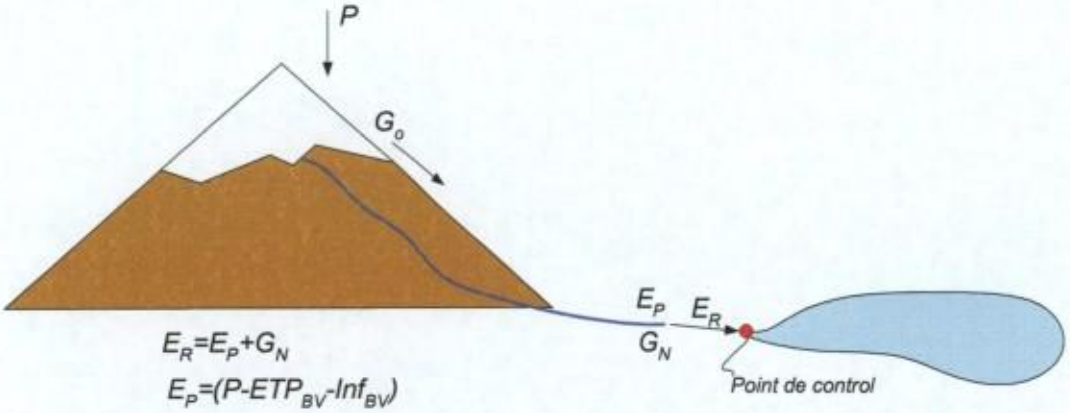
$$(3) \quad E_R = E_B + Inf_L + ETP_L$$

Écoulement à l'entrée du barrage (E_R):

Si un glacier se trouve en amont d'un bassin versant, l'apport en eau au sein du bassin versant provient des précipitations ***(P)*** *et de la fonte des glaciers qu'on symbolise comme* ***G_o.***

En ce qui concerne les précipitations : *Du fait de l'évapotranspiration* ***(ETP_{BV})*** *et de l'infiltration des eaux dans le sol* ***(Inf_{BV}),*** *tout au long de l'écoulement, le volume total d'eau mesurée au point de contrôle* ***(E_P)*** *n'est pas égal au volume d'eau fourni en amont du point de contrôle par les précipitations.*

En ce qui concerne à l'apport glaciaire : *au point de contrôle, on ne mesure pas l'apport initial par la fonte des glaciers* ***G_o*** *(apport glaciaire brut), mais bien un volume plus réduite* ***G_N,*** *(apport glaciaire net).*



$$(4) \quad E_R = P - ETP_{BV} - Inf_{BV} + G_N$$

E_R= Débit qui arrive au point de contrôle de la rivière.
P= Précipitations
G_O= Apport glaciaire en amont du bassin, au pied du glacier
G_N= Apport glaciaire net, qui arrive au point de contrôle de la rivière
ETP_{BV}= Evapotranspiration au sein du bassin versant (à l'exclusion des eaux d'origine glaciaire
Inf_{BV}= Infiltration de l'eau dans le sol au sein du bassin versant (approvisionnement de la nappe phréatique)

(3) = (4))

$$P - ETP_{BV} - Inf_{BV} + G_N = E_B + Inf_L + ETP_L$$

(5) $$E_B = P - (ETP_{BV} + ETP_L) - (Inf_{BV} + Inf_L) + G_N$$

Dans le cas où il n'y a pas d'apport glaciaire, (G_N=0) on peut écrire :

(5a) $$E_{B00} = P - (ETP_{BV} + ETP_L) - (Inf_{BV} + Inf_L)$$

Application de la Méthode de Thornwaite

Pour calculer la contribution de l'écoulement d'origine glaciaire ***(G_N)*** *on va utiliser la méthode de Thornwaite qui permet estimer l'écoulement d'un bassin versant à partir des précipitations* ***(P),*** *de l'évapotranspiration* ***(ETP)*** *et de l'échange en eau entre la nappe* ***(N)*** *et le bassin versant* ***(Villón M. 2002).***

(6) $$E_{TW} = P - ETP_{TW} \pm N_{TW}$$

E_{TW}= Écoulement de Thornwaite

Pour le calcul d' ***ETP_{TW}****, Thornwaite propose des expressions qui sont présentées à partir de l'équation* ***(10 - 12).***

L'estimation de ***(N)*** *se fait sur un pas de temps* ***(Δt)***, en tenant en compte du niveau de saturation de la zone racinaire. Cette dernière est délimitée par la surface du sol et la profondeur moyenne atteinte par les racines. Au sein de cette zone, l'écoulement se fait sous forme de flux hypodermique.

Si on accepte les hypothèses que :

(6'') $$ETP_{TW} \approx ETP_{BV} + ETP_L \quad \text{et} \quad N_{TW} \approx Inf_{BV} + Inf_L$$

(6a)... $$E_{TW} = E_{B00}$$

Alors :
(5a dans 5)...

(6b)... $$E_B = E_{B00} + G_N$$

(6a dans 6b)...

(6c)... $$E_B = E_{TW} + G_N$$

$$G_N = E_B - E_{TW}$$

Si (7) $$R = \frac{E_{TW}}{E_B}$$

(8) $$G_N = E_B(1 - R)$$

Considérations sur R et G_N

Aux équations *(7 et 8)*, ***R***, détermine la proportion de l'écoulement ***(E)*** qui fait partie de l'apport glaciaire ***(G_N)***.

Par exemple si R=1, l'apport du glacier est zéro

D'autres remarques sur l'interprétation de la valeur ***(G_N)***, par rapport à l'architecture du bassin versant sont indispensables (Figure 4.1). S'il n'y avait pas de glaciers en amont du point de contrôle, G_N pourrait être interprétée comme l'apport ou la perturbation due aux éléments de régulation qui se trouvent en amont du point de contrôle, tels que les barrages. Par exemple :

Dans le cas d'Incachaca, la valeur de G_N devra être proche à zéro, puisque qu'il n'existe pas de glaciers ou d'éléments importants de régulation situés en amont du point de contrôle.

En ce qui concerne Tuni, la valeur de G_N représente l'apport glaciaire net reçu au point de contrôle.

Dans le cas de Milluni, si l'on considère que le petit barrage de Jankho Khota ne joue pas de rôle notable sur la régulation des débits qui arrivent au barrage de Milluni ***(Quisbert T. 2008, EPSAS Communication personnelle)****, on pourrait interpréter G_N, comme une influence combinée de l'apport glaciaire et du petit barrage.*

Le barrage de Hampaturi se trouve à l'aval du barrage d'Ajuankhota, considéré comme très important pour la régulation des débits du bassin versant. G_N représente donc l'influence du barrage Ajuankhota sur Hampaturi. Pour déterminer l'influence glaciaire sur le bassin versant on utilisera le bilan hydrologique sur le barrage d'Ajuankhota.

Par ailleurs, les valeurs négatives de G_N pourraient aussi être interprétées comme des extractions d'eau à l'amont du point de contrôle.

Ces explications sont également valables pour l'interprétation de la variable ***R***.

Apport glaciaire au pied du glacier (G_o)

Pour déterminer la valeur de l'apport glaciaire en amont du bassin versant ***(G_o)****, on part de* ***l'hypothèse suivante*** *:*

Le paramètre E_R est l'écoulement réel qui arrive au point de contrôle, il peut être estimé avec l'équation (2), dans le cas des barrages de Tuni, Hampaturi, Incachaca et Milluni. Pour le bassin de Choqueyapu (Station d'El Alto Achachicala), il existe des jaugeages directs sur le point de contrôle.

Le calcul de l'écoulement ***(E_R)*** *comporte deux parties : l'écoulement sur le bassin versant et celui sur la partie englacée. L'écoulement sur bassin versant est dépendant des précipitations* ***P****, de* ***N*** *et de l'****ETP****. De même l'apport glaciaire qui arrive au point de contrôle* ***(G_N)*** *dépend de l'apport glaciaire au pied des glaciers* ***(G_O)****, de* ***N*** *et de l'****ETP*** *:*

$$\textbf{(9a)} \quad E_R = E\{P, ETP, N\} + G_N\{G_o, ETP, N\}$$

La méthode de Thornwaite dépend également de la précipitation, de ***N*** *et de l'****ETP****, mais pas de l'apport en eau des glaciers*

$$\textbf{(9b)} \quad E_{TW} = F\{P, ETP, N\}$$

Alors, hypothétiquement un écoulement de Thornwaite qui tiendrait compte de l'apport glaciaire au pied de glaciers, aura une dépendance de ***P, ETP, N*** *et aussi de* G_o *:*

$$\textbf{(9c)} \quad E_{TW+G} = F\{(P + G_o), ETP, N\}$$

En cherchant à forcer ***P*** *avec une valeur* ***fo*** *(pour chaque période de calcul)* ***(Eq 9d)*** *pour rendre possible l'égalité* $E_{TW} = E_R$ ***(Eq. 9e)*** *on obtiendra :*

$$\textbf{(9d)} \quad E_{TW+G} = F\{(P + (fo)), ETP, N\}$$

$$\textbf{(9e)} \quad fo \Rightarrow E_{TW} = E_R$$

$$\textbf{(9f)} \quad G_o = fo$$

La valeur de G_O représente l'apport du glacier en amont du bassin versant, qui est indépendant de la précipitation

Les algorithmes de la méthode de bilan de Thornwaite : *(Villón M. 2002)*

$$\textbf{(10)} \quad ETP'' = 16\left(10\frac{t}{I}\right)^a$$

ETP"= Evapotranspiration mensuelle en mm pour un mois de 30 jours et 12 heures par jour d'insolation directe

t= Température moyenne mensuelle °C

$$I = \sum i$$

$$i = \left(\frac{t}{5}\right)^{1.514}$$

I= Indice thermique annuel

a= Coefficient qui varie en fonction de l'indice thermique annuel

$$a = 0.6751x10^{-6} I^3 - 0.771x10^{-4} I^2 + 0.01792I + 0.49239$$

La valeur *ETP"* doit être affectée pour les coefficients de latitude et d'exposition solaire effective de la zone.

$$\textbf{(11)} \quad ETP = C_l * C_e * ETP''$$

Pour la zone d'étude :

C_l: Coefficient de latitude (Latitude 16°) d'après(Villón M. 2002).

Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
1.12	0.98	1.05	0.98	0.98	0.94	0.97	1	1	1.07	1.07	1.12

Ce= Exposition solaire (durée (en nombre d'heures) durant laquelle le bassin est exposé directement au soleil sans ombre) :

$$\textbf{(12)} \quad C_e = \frac{Hr}{12} = \frac{7.5}{12} = 0.625$$

Hr = 7.5 heures (Bassins fermés, par les montagnes) ;(Caballero Y. 2001)

Le bilan de Thornwaite tient compte d'une zone de circulation sous-superficielle correspondant à l'épaisseur de la zone racinaire. Cette zone est équivalente à la profondeur où arrivent les racines de la végétation.

On considère une Zone racinaire ***(Z)****= 50 cm d'après les estimations de Caballero (2001).*

Échelle temporelle d'application

Période : Un bilan de plusieurs périodes successives donnera lieu à un meilleur calcul du bilan ***(Ven Te Chow 1994;Villón M. 2002)*** *(sur 9 années de bilan).*

Échelle de temps : on a préliminairement effectué deux bilans (un journalier et un mensuel) à Hampaturi. Les résultats obtenus s'avèrent proches. Un pas de temps mensuel a été décidé pour l'application du modèle pour tous les autres bassins

Application du bilan Hydrologique

La méthodologie présentée avec modifications des hypothèses, a été appliquée en deux étapes :

D'abord, les valeurs de l'apport glaciaire net G_N *au point de contrôle ont été estimées. Après vérification, les valeurs de* G_N *et* R *sont apparues cohérentes par rapport aux concepts utilisés pour appliquer la méthode.*

Ensuite, on a procédé à l'application de la méthode pour estimer les valeurs de l'apport glaciaire en amont du bassin. G_O*. Les valeurs obtenues ont été comparées avec d'autres paramètres pour valider la méthode :*

- Pour Hampaturi, comparaison des valeurs de G_O *calculées avec les volumes d'eau qui sont envoyés du le barrage d'Ajuankhota.*

- De même, comparaison des valeurs de G_O *de Tuni avec les valeurs de bilan de masse des glaciers de Chacaltaya, Charquini et Zongo.*

a) Première Etape d'application, Détermination de G_N et R

Les résultats de la première partie de l'application sont présentés dans le Tableau 4.2 . Même procédé pour le calcul de G_N, où les valeurs calculées d'E_B, et E_{TW} apparaissent dans la Figure 4.5.

Figure 4.5 : Rapport E_B, E_{TW} et Précipitation

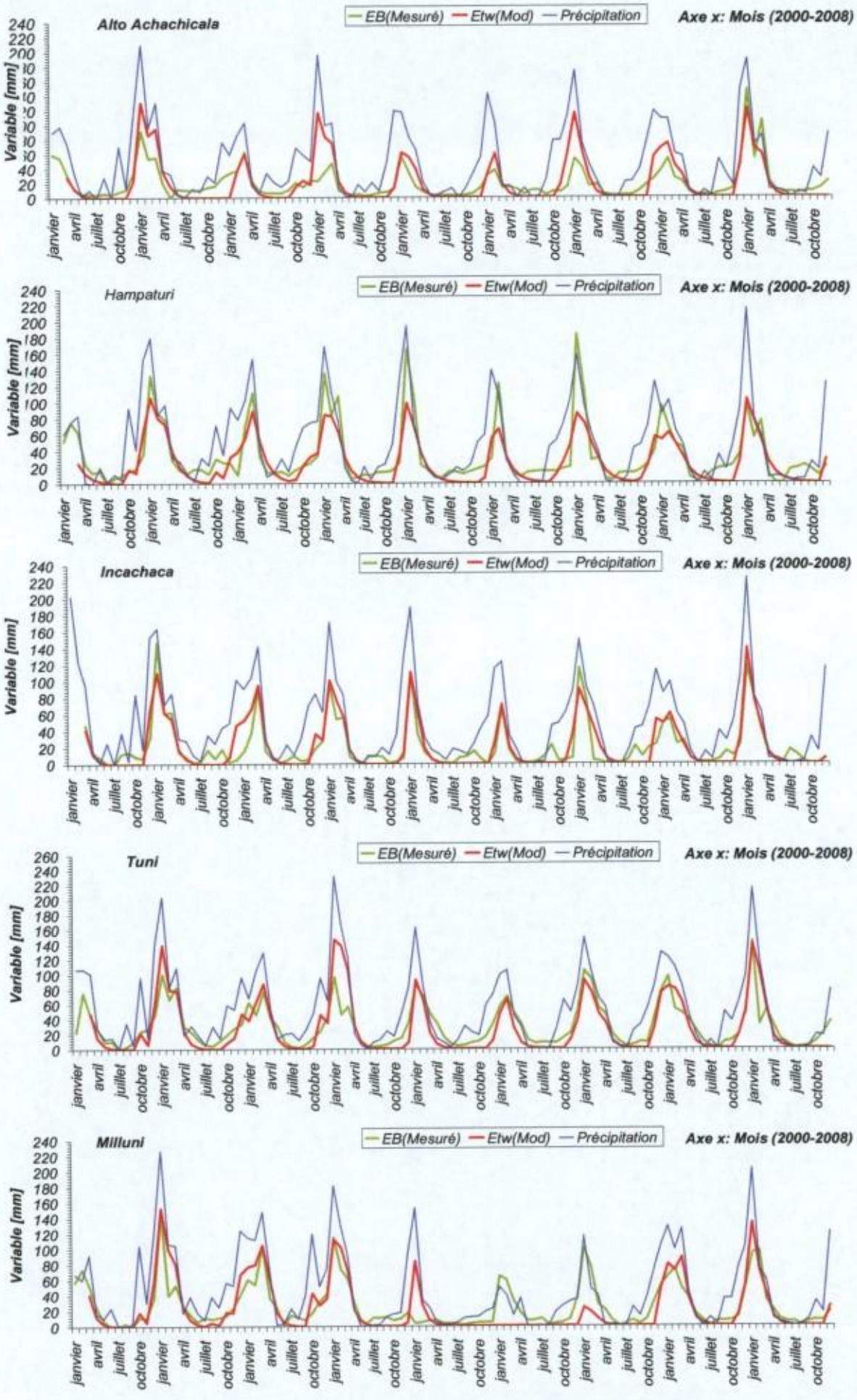


Tableau 4.2 : Résultat de l'application de l'algorithme du bilan hydrologique (Valeurs totales 2000-08)

Station	ΣE_{TW}	ΣE_B	R	G_N
Alto Achachicala	2107.69	1976.31	1.07	-131.39
Hampaturi	2705.49	3459.20	0.78	753.71
Incachaca	2186.39	2152.17	1.02	-34.22
Tuni	2768.95	3168.91	0.87	399.96
Milluni	2271.45	2601.51	0.87	330.06

Unités: E et G [mm] ; R [mm/mm]

Commentaires au sujet des résultats présentés dans le Tableau 4.2:

Incachaca : R~1, est un bon indicateur que le modèle a démontré, en ce qui concerne la détermination de l'influence glaciaire, étant donné qu'il n'existe pas de glacier sur le bassin versant.

*Alto Achachicala : Les valeurs négatives de G_N, attirent l'attention, puisqu'elles révèlent l'existence d'un prélèvement à l'amont du point de contrôle au lieu d'un apport. En d'autres termes, la valeur de R représente l'influence des activités qui se développent en amont du point de contrôle du bassin qui prélève environ 7% de l'apport du bassin versant. L'analyse de contexte des résultats du bilan hydrologique était nécessaire. Notons qu'il faut aussi tenir compte que le taux d'englacement du bassin versant de Choqueyapu (bassin où se trouve la station d'El Alto Achachicala) est faible (0.21%) (*Tableau 1.3*).*

Par rapport aux valeurs négatif de G_N, il convient de rappeler que des hypothèses de simplication ont été faites sur les équations de bilan (voir sous – titre 4.4.1, Eq. 6") et que ces hypothèses peuvent introduire des erreurs dans nos estimations.

Néanmoins, les résultats obtenus dans la plupart des bassins (dont Incachaca) indiquent que le modèle reproduit plutôt bien les échanges en eau entre la nappe et le bassin versant.

Hampaturi : La valeur de R pourrait être interprétée comme l'influence du barrage Ajuankhota. Cette influence atteindrait près de 22% de l'écoulement total qui arrive à Hampaturi.

Selon les valeurs de R, l'influence glaciaire de Tuni et Milluni serait d'environ 13%. Toutefois pour Milluni, l'interprétation doit être prise avec précaution.

Le paragraphe 4.5 présente une évaluation des interprétations commentées, qui inclut les autres valeurs estimées avec la méthode.

b) Deuxième Etape d'application, Détermination de G_O *et validation de la méthode*

Les résultats du forçage réalisé appliquant les principes des équations 9a à 9f apparaissent dans le Tableau 4.3.

Afin de montrer qu'il est possible d'associer la valeur de forçage f_o avec la valeur de l'apport glaciaire (G_o), et de valider ou éliminer cette méthodologie, il était d'abord nécessaire de prouver le rapport entre f_o et une valeur qui représente l'apport glacier en amont du bassin versant (G_o).

Dans ce cadre, on a fait le raisonnement suivant :

1. Pour vérifier les valeurs de f_0 estimées pour Hampaturi, il est possible d'utiliser les valeurs de volumes d'eau envoyées du barrage d'Ajuankhota vers celui de Hampaturi. (Données disponibles depuis mai 2005). En reliant ces registres avec la valeur f_0 on devrait obtenir des résultats semblables ;

2. Le comportement de f_0 devrait être similaire au comportement du bilan de masse des autres glaciers situés dans les bassins versants voisins, où on dispose des données. On a les valeurs f_0 de Tuni, pour les comparer avec les valeurs de bilan de masse de Zongo, durant la période 2000-2008.

L'application de ce processus de validation est présentée dans les Figure 4.7, 4.8 et 4.9.

Figure 4.6 : Comparaison : E_B, Précipitation (P) et P+(fo)

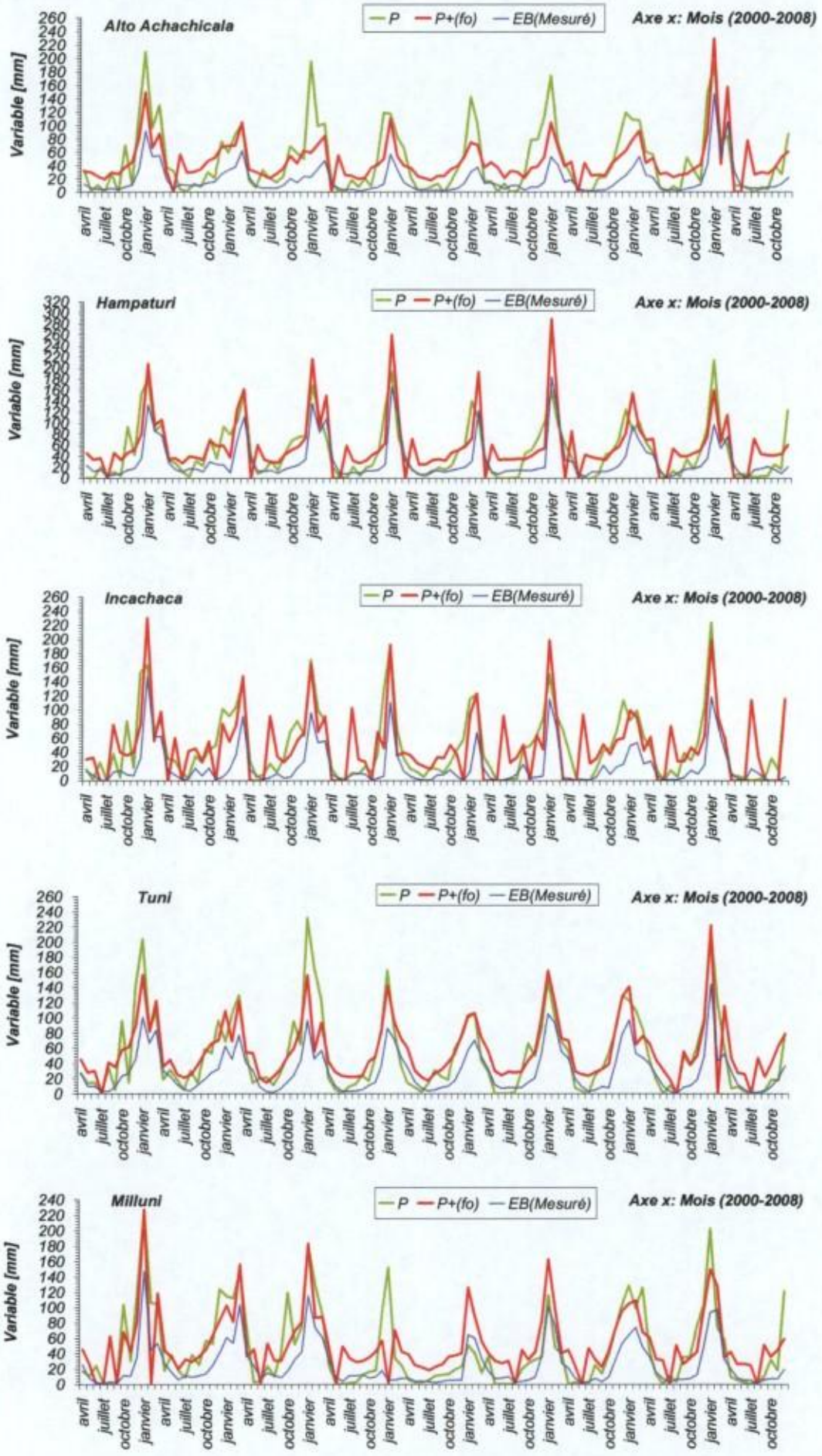
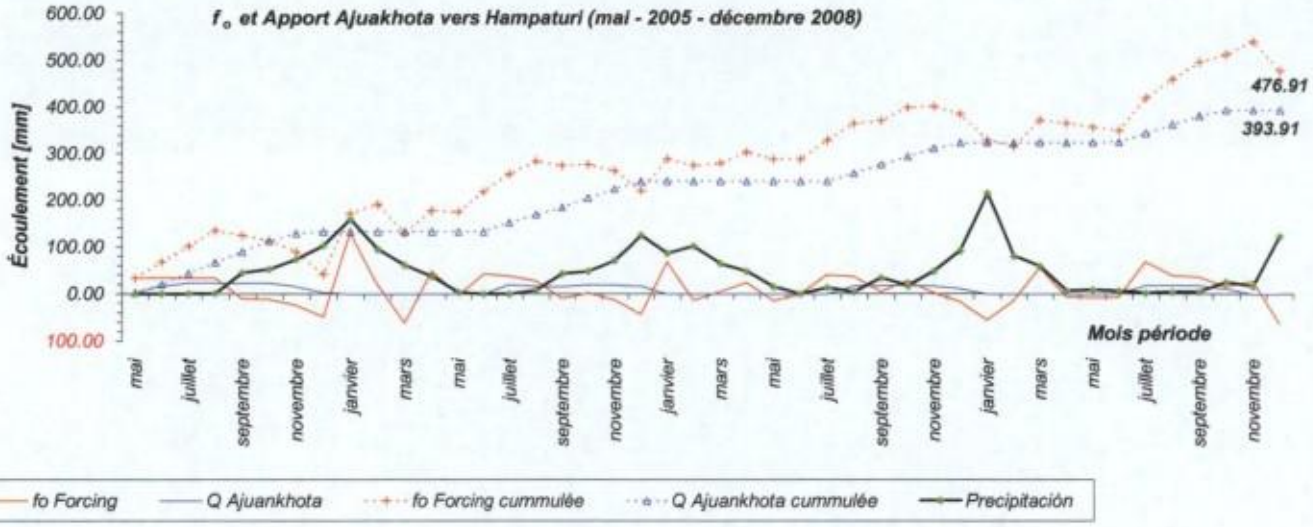


Figure 4.7 : Comparaison : Valeur fo du forçage pour Hampaturi et les volumes d'eaux envoyés d'Ajuankhota



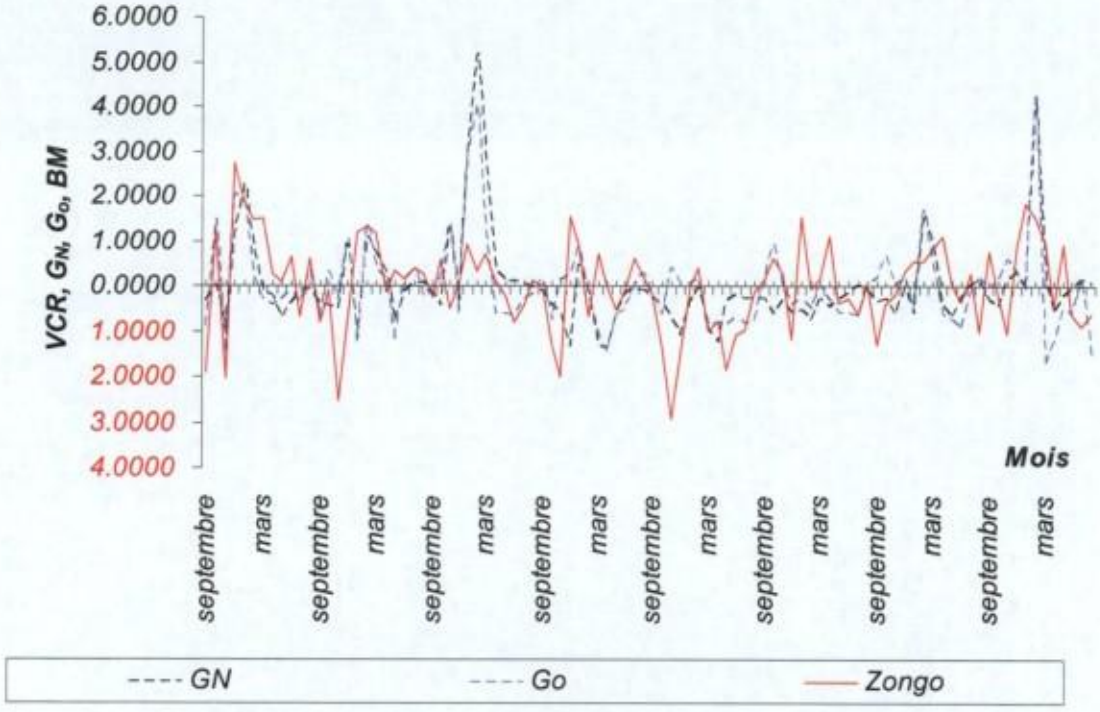
Rapprochant la valeur de f_o du forcing de Hampaturi aux apports en débits envoyés d'Ajuankhota [10], on observe quelque chose de curieux concernant la forme des courbes :

> *Les apports d'Ajuankhota sont concentrés de mai à janvier, (pour des raisons d'opération des barrages).Ensuite, presque à chaque apport concentré d'Ajuankhota, apparaît un pic de f_o. Ce pic pourrait être dû aux apports du barrage. Nous remarquons que les graphiques des valeurs accumulées (de l'apport d'Ajuankhota et de fo), présentent des pentes semblables et qu'ils arrivent à des valeurs accumulées proches, à la fin de la période d'analyse.*
>
> *Bien que la configuration de la courbe de f_o ne reproduise pas l'apport d'Ajuankhota, il existe un certain rapport entre ces valeurs partielles et cumulées et une ressemblance entre les pentes de deux courbes cumulées.*

Toutefois, il était nécessaire de faire un second essai pour valider la correspondance entre G_o et f_o. C'est pourquoi, la comparaison des valeurs G_o et G_N de Tuni avec celles du bilan de masse glaciaire de Zongo a été effectuée avec des valeurs centrées réduites. (Figure 4.8, Figure 4.9, Figure 4.10 et Figure 4.11).

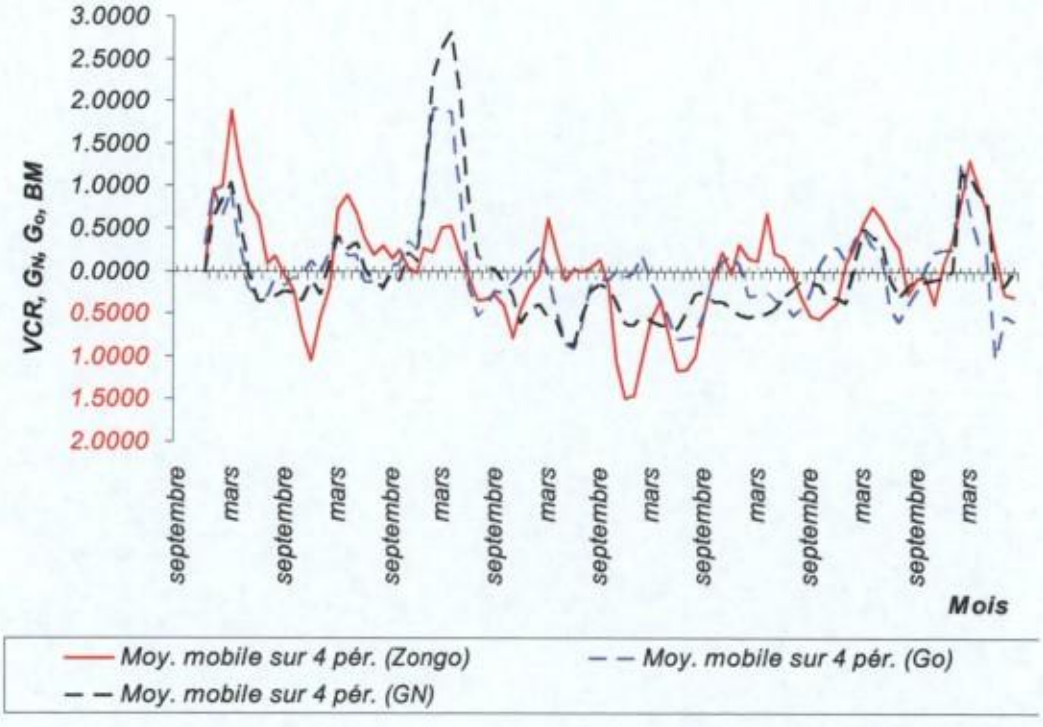
[10] *Ajuankhota est un barrage d'appui au barrage de Hampaturi, le principal du bassin versant. Son but est de stocker le maximum d'eau, en attendant la baisse des réserves. Le technicien chargé de l'opération des barrages – en fonction des besoins en eau de la population, décide le moment propice pour envoyer les eaux d'Ajuankhota vers Hampaturi.*

Figure 4.8 : Evolution des valeurs G_N et G_o calculées pour Tuni, comparées au bilan de masse du glacier Zongo (mensuelle 2000-2008)



Base des Données BM : IRD, (Leonardini G. 2010)

Figure 4.9 : Evolution des valeurs G_N et G_o calculées pour Tuni, comparées au bilan de masse du glacier Zongo (moyenne mobile chaque 4 mois, 2000-2008)



Base des Données BM : IRD, (Leonardini G. 2010)

Figure 4.10 : Valeurs cumulées de G_N et G_o calculées pour Tuni, comparées au bilan de masse du glacier Zongo (moyenne mobile chaque 4 mois, 2000-2008

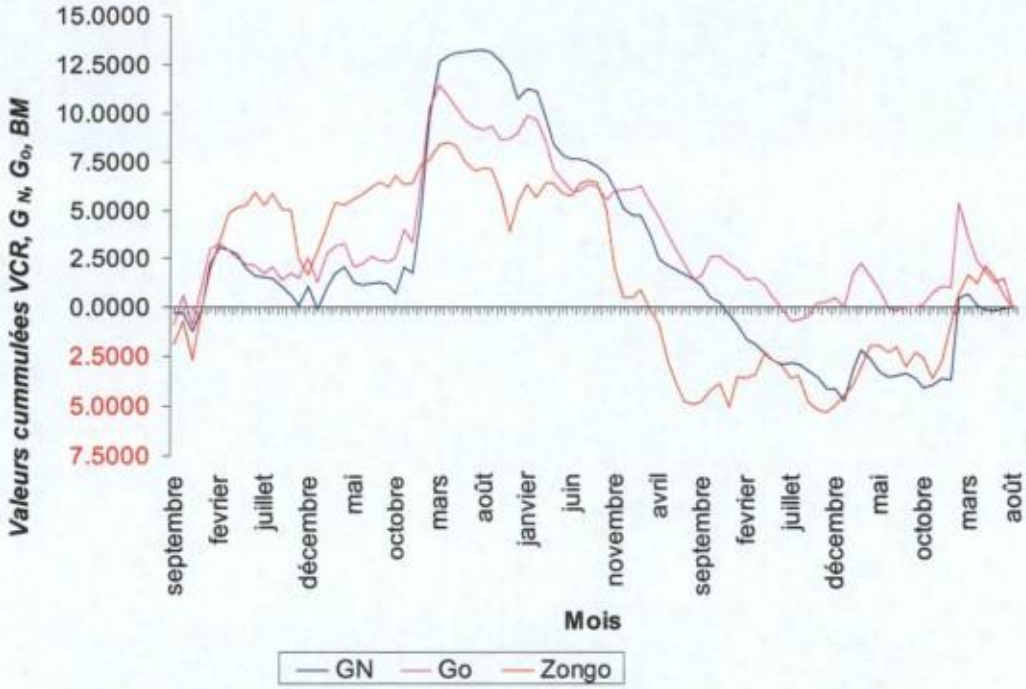
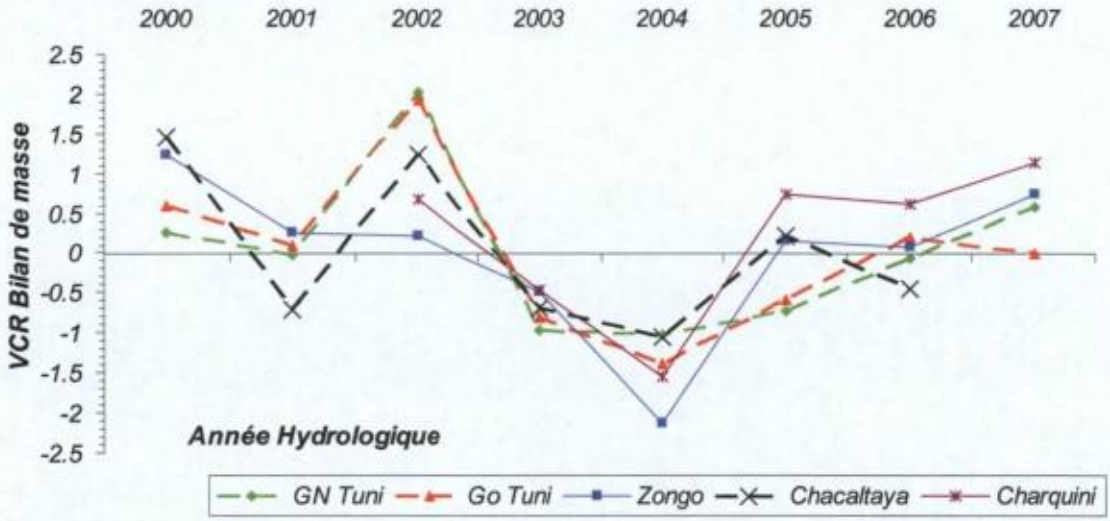


Figure 4.11 : Evolution des valeurs G_N et G_o calculées pour Tuni, comparées aux bilans de masse des glaciers Chacaltaya, Zongo et Charquini (Annuelle, 2000-2008)



Sur les figures (Figure 4.8 à Figure 4.11), on remarque que les valeurs G_o et G_N obtenues à partir de la méthodologie de balance hydrologique, montrent des tendances similaires aux bilans de masse des glaciers situées à proximité de la zone d'étude.

.

Les figures ci-dessus valident la méthodologie employée pour estimer approximativement l'importance de l'apport des glaciers dans nos bassins sources. Les estimations effectuées reflètent de manière approximative l'état actuel du bilan des variables hydrologiques dans les bassins étudiés. Ils reflètent également l'influence des glaciers dans l'apport des bassins versants.

Apport en eau des glaciers

Le Tableau 4.3 indique les valeurs de l'apport initial des glaciers

Tableau 4.3 : Résultat de forçage de P : Estimation de G_O

	Appot du glacier à l'amont du Bassin Versant (G_o) [mm]				
	Alto Achachicala	Hampaturi	Incachaca	Tuni	Milluni
2000	-78.15	36.35	3.44	-2.24	-112.60
2001	107.28	31.20	-5.14	49.20	-4.45
2002	-106.80	132.04	0.06	-133.40	32.10
2003	-36.10	170.20	-1.23	137.10	26.70
2004	97.30	209.08	4.15	194.97	325.90
2005	-144.00	148.49	-1.08	115.90	303.00
2006	-59.70	80.75	0.47	38.31	38.50
2007	119.20	94.13	4.93	58.10	24.90
ΣG_o	-100.97	902.24	5.60	457.94	634.05
P [mm]	4644.20	4957.71	4799.33	5185.66	4460.90
$T=P+G_o$ [mm]	4543.23	5859.95	4804.93	5643.60	5094.95
P / T	1.02	0.85	1.00	0.92	0.88
Go [%]	-2%	15%	0%	8%	12%

Le rapport entre l'apport glacier G_O et l'apport total du bassin versant ***($T=P+G_O$)***, révèle l'importance, de l'apport des glaciers sur les ressources en eaux disponibles du bassin versant. La dernière ligne du Tableau 4.3 reflète cette information.

Dans le cas d'Incachaca, l'apport glacier n'existe pas puisqu'il n'y a pas de glacier sur les bassins, ce qui permet de valider la méthode.

En ce qui concerne Alto Achachicala, la surface glaciaire étant réduite sur le bassin de Choqueyapu (0.21%) (Tableau 1.3), l'influence de l'apport glaciaire est également faible, mais positive. Cette valeur révèle l'incertitude de la méthode appliquée, dans le cas de Tuni, l'influence de l'apport glaciaire correspond à 8%.

A Milluni, il existe les incertitudes déjà commentées, sur le by pass, donc le 12% calculé résulte de l'influence combinée de ses glaciers et de son petit barrage de Janckho Khota.

Le cas de Hampaturi s'avère intéressant à cause de sa faible couverture glaciaire (0.16%) (Tableau 1.3), donc les 15% d'influence calculée provient de l'influence du barrage Ajuankhota.

4.4.2 Simulations

Après la validation de la méthodologie, nous avons tenté de :

- *Déterminer la situation de l'apport en eau du bassin versant sans glacier*
- *Tester la sensibilité de l'écoulement à la diminution et à l'augmentation des précipitations, de la température et les effets combinés*

Les simulations sont proposées à partir des valeurs des bilans hydrologiques des années 2000 à 2008.

Situation sans glacier

Considérant que l'écoulement calculé par la méthode de Thornwaite E_{TW}, représente l'écoulement d'un bassin versant dans les conditions naturelles ***(Villón M. 2002)***, la Figure 4.5 montre la simulation de la situation des bassins sources où il n'existerait pas de glaciers ni de structures de régulations à l'amont du point de contrôle.

Dans le cas d'Incachaca, l'écoulement calculé avec la méthode de Thornwaite E_{TW} reproduit l'écoulement observé ***(E_B)***, en absence de glaciers sur le bassin versant.

Les autres situations et des perspectives seront présentées dans le sous-titre 4.5, avec une analyse de contexte pour tous les résultats.

Sensibilité à la diminution de précipitation et à l'augmentation de température

17 scénarios de perturbation sont proposés : les 3 premiers testent les résultats d'une diminution de précipitation de 90, 95 et 99% respectivement ; les 2 suivants testent les effets d'une augmentation de précipitation en 1 et 5%. Les scénarios 6 à 9 simulent les effets d'une une augmentation de température de 0.5, 1, 2 et 2.5 °C. Les scénarios 10 à 13 tiennent compte l'effet combiné d'une augmentation de précipitation et de température. Enfin, les derniers 4 scénarios testent les conséquences d'une diminution de précipitation combinée à une augmentation de température :

Scénario	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Notation	E1 (P*0.90)	E2 (P*0.95)	E3 (P*0.99)	E4 (P*1.01)	E5 (P*1.05)	E6 (T+0.5)	E7 (T+1)	E8 (T+2)	E9 (T+2.5)
	Diminution Précipitation (↓P)			A. Précipitation (↑P)		Augmentation température (↑T)			

Scénario	10	11	12	13
Notation	E10 (P*1.01 ^T+1)	E11 (P*1.01 ^T+2)	E12 (P*1.05 ^T+1)	E13 (P*1.05 ^T+2)
	(↑P) + (↑T)			

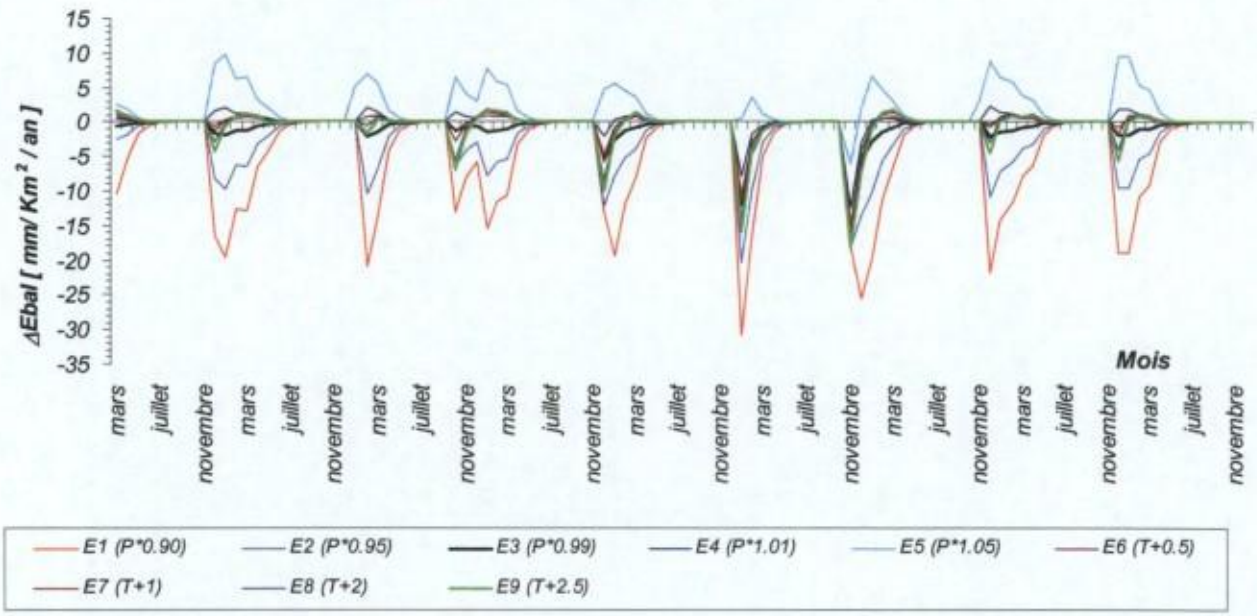
Scénario	14	15	16	17
Notation	E14 (P*0.99 ^T+1)	E15 (P*0.99 ^T+2)	E16 (P*0.95 ^T+1)	E17 (P*0.95 ^T+2)
	(↓P) + (↑T)			

En ce qui concerne les précipitations, les variations appliquées portent sur les données disponibles pour chaque bassin pour la période 2000-2008. Pour les changements de température, il a fallu recalculer l'ETP pour chaque scénario (la température donnée). Les résultats de ces simulations sont repris dans les figures 4.10, - 4.13

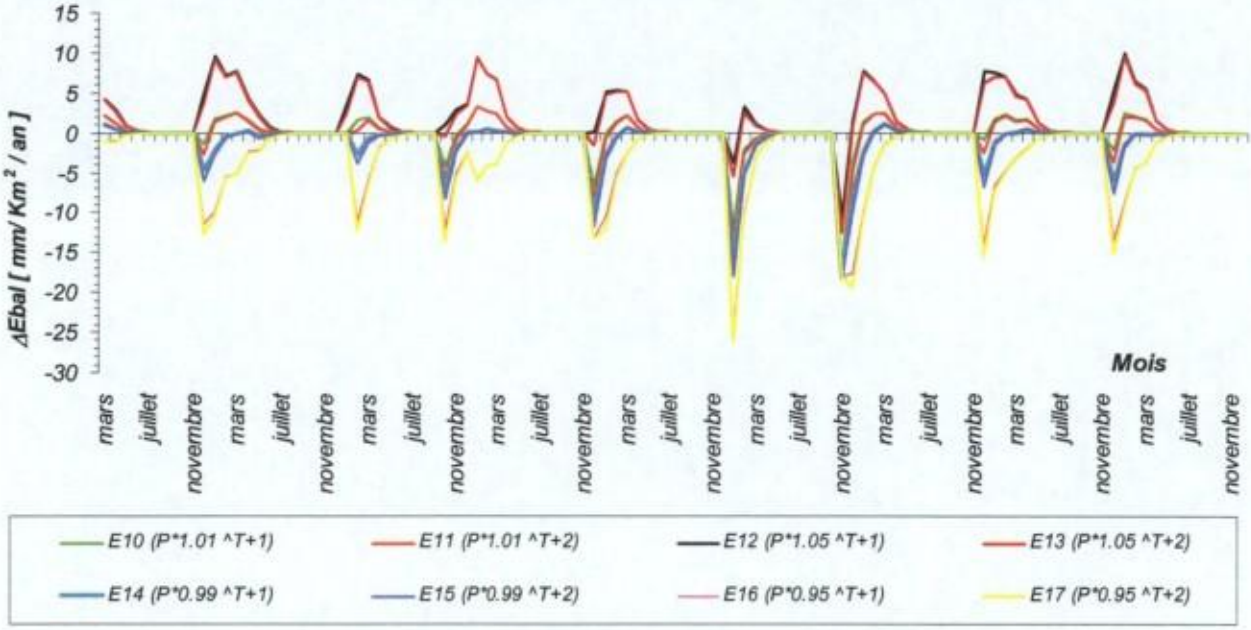
Figures 4.12 : Simulations des scénarios de changement de la a) précipitation (P) et de la température (T) b) effets combinés de changement de P et T

$$\Delta Ebal_i = E_{TW_i} - E_i scénario_n \text{ (Ecart d'écoulement)}$$

a) Scénarios de changement de la précipitation et la température



b) Scénarios de combinaison d'effets de changement de la précipitation et la température



Figures 4.13 : Simulations des changements de la température

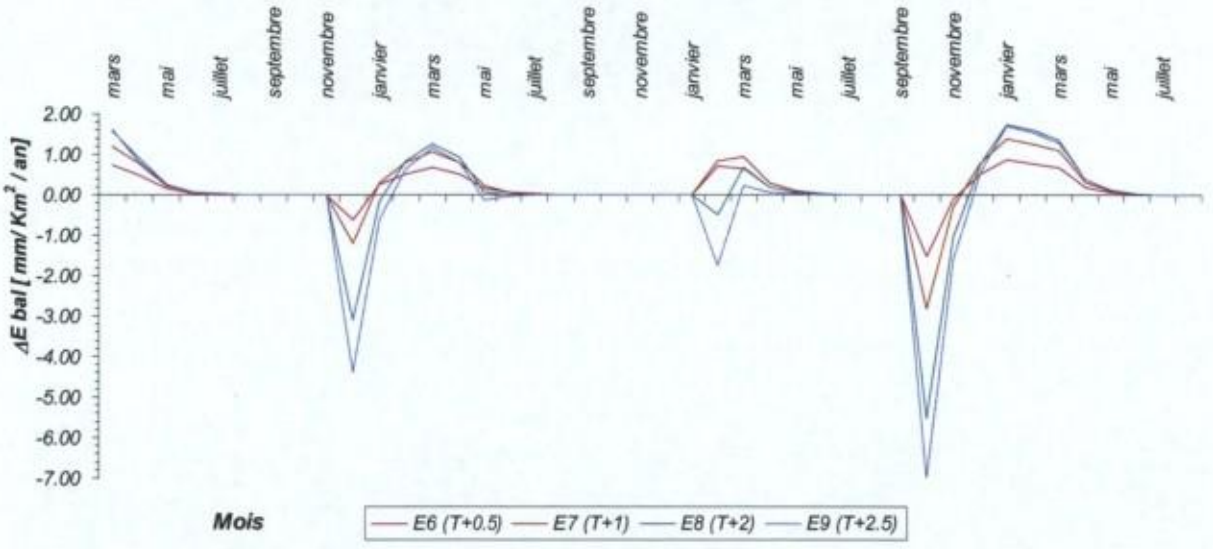
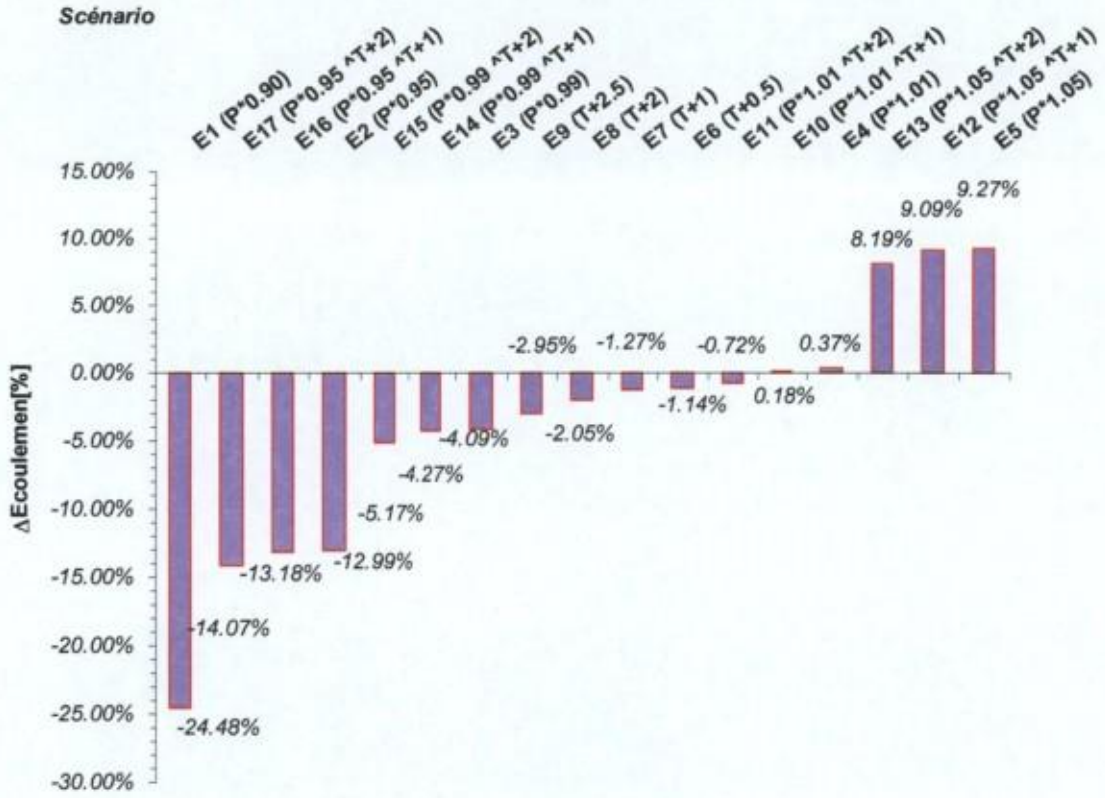


Figure 4.14 : Variation pourcentuelle de l'écoulement par rapport aux scénarios simulés



Nous pouvons observer que les diminutions de précipitation (scénarios 1 à 3) et les augmentations de température (scénarios 6 à 9), ont pour conséquence une diminution de l'écoulement (entre -1 et -25%). Les diminutions d'écoulement les plus importantes se rapportent aux scénarios de diminution de précipitation. . (Figure 4.14). Par contre, les simulations suggèrent que l'augmentation de précipitation (scénarios 4 et 5) augmente l'écoulement de 0.3 à 9%.

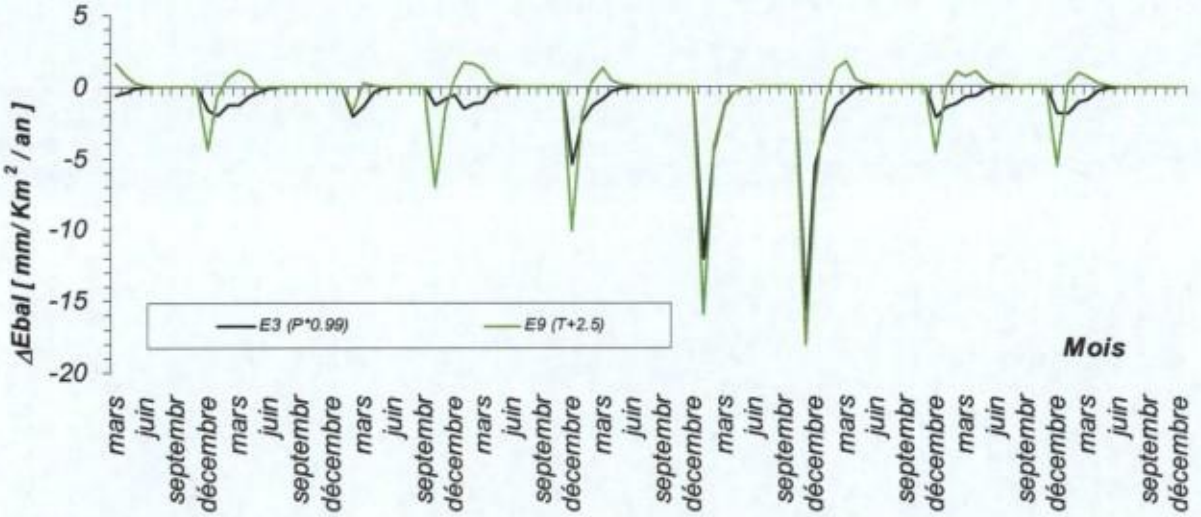
La combinaison des effets de température et précipitations donnent des résultats intermédiaires par rapport aux simulations où un seul paramètre a été modifié.

Les résultats obtenus avec une diminution de précipitations combinée à une augmentation de température sont plus négatifs (diminution de l'écoulement) que ce qui arrive quand on combine les effets de l'augmentation des précipitations, avec l'augmentation de la température

Les effets d'une diminution de précipitations ont plus d'impact sur l'écoulement que l'augmentation de température.

Les scénarios ***E3 (P*99) et E9 (T+2.5°C)*** ont été analysés séparément du fait de leur ressemblance.

Figure 4.15 : Comparaison des scénarios E3(P*99) et E9 (T+2.5°C)



Il est intéressant de superposer les résultats des les scénarios E3 (P*99) et E9 (T+2.5°C) puisque leur écart d'écoulement ***(ΔEbal)*** se ressemble. Par ailleurs, il est possible de visualiser les effets différentiels d'un changement de température par rapport aux effets d'une perturbation des précipitations. Ces différences se manifestent durant la même période (septembre à juin).
Les deux scénarios présentent une diminution maximale d'écoulement entre novembre et janvier. Cependant, l'augmentation de la température induit une diminution plus importante que la diminution des précipitations.

La diminution de précipitation a tout le temps pour effet une diminution de l'écoulement, alors que l'augmentation de température peut induire une faible augmentation d'écoulement entre décembre et avril.

On constate que l'été, qui correspond à la période des précipitations, reste la saison la plus sensible parce que la diminution d'écoulement est causée à la fois par la température et les précipitations.

4.5 Analyse et discussion des résultats

Apport en eau des glaciers

Les vérifications réalisées sur d'une part l'apport d'Ajuankhota en relation avec les valeurs de G_o et d'autre part, le rapport existant entre G_o de Tuni et Milluni avec les bilans de masse de Chacaltaya et Charquini, confirment que la méthodologie proposée est valable pour :

- *Refléter la dynamique intérieure du bassin*
- *Interpréter des résultats sur l'influence d'un glacier, d'un barrage ou d'une certaine activité des eaux en amont du point de contrôle.*
- *Tester des scénarios probables pour le futur, en perturbant les variables P et T.*

Cette méthode de bilan hydrologique permet à la fois de caractériser la situation actuelle du bassin versant, en mettant en évidence l'influence des glaciers, des barrages ou des activités d'extraction d'eau, en amont du point de contrôle, sur l'écoulement. Il permet également de simuler des futurs possibles d'un bassin versant dont l'unique source de l'écoulement provient des précipitations.

Dans le tableau suivant, sont résumés les résultats de diagnostic des 5 bassins versants sources.

Tableau 4.4 : Résumé des résultats

A) Apport à l'amont du bassin versant

	Choqueyapu S. Alto Achachicala	Hampaturi	Incachaca	Tuni	Milluni
G_o	-100.97	902.24	5.60	457.94	634.05
P	4644.20	4957.71	4799.33	5185.66	4460.90
$TOT_o = G_o + P$	4543.23	5859.95	4804.93	5643.60	5094.95
G_o/TOT_o	-0.02	0.15	0.00	0.08	0.12

G_o/TOT_o: Influence glaciaire dans l'apport du bassin versant à l'amont du bassin (Pour Tuni et Milluni) pour Hampaturi c'est l'influence du barrage Ajuankhota

B) Apport du bassin versant au point de contrôle

G_N	-131.39	753.71	-34.22	399.96	330.06
E	1976.31	3459.20	2152.17	3168.91	2601.51
$TOT_N = G_N + E$	1844.92	4212.91	2117.95	3568.87	2931.58
G_N/TOT_N	-0.07	0.18	-0.02	0.11	0.11

G_N/TOT_N: Influence glaciaire dans l'apport du bassin versantau point de contrôle pour Hampaturi c'est l'influence du barrage Ajuankhota

R	1.07	0.78	1.02	0.87	0.87
$1 - R$	-0.07	0.22	-0.02	0.13	0.13

C) Considerations sur l'écoulement

Cesc	0.41	0.67	0.42	0.58	0.57
$C' = E_{TW}/P$	0.43	0.52	0.43	0.50	0.47
C'/Cesc	1.05	0.77	1.02	0.87	0.83

Considérations pour l'analyse : G_o/TOT_o représente la proportion de l'apport du glacier ou du barrage en amont du point de contrôle. G_N/TOT_N représente la contribution du glacier ou du barrage dans l'écoulement qui arrive au point de contrôle.

La valeur de ***(C')*** est le coefficient d'écoulement obtenu sur les bassins versants sans glacier (Milluni, Tuni), ou sans barrage (Hampaturi) ou encore sans d'autres activités en amont (Choqueyapu).

Le rapport ***C' /Cesc*** donne une idée de la magnitude de la réduction de l'efficacité à transformer les précipitations en écoulement au sein du bassin versant sans les influences mentionnées dans le dernier paragraphe.

Incachaca : C'est un bassin versant considéré comme un élément de réglage, de confirmation de l'efficacité du modèle, puisqu'il ne subit pas d'influence glaciaire. Les valeurs de G_O/TOT_O et de G_N/TOT_N sont proches de 0. Par conséquent, cet exemple valide la méthodologie proposée.

De plus, ces valeurs indiquent que l'erreur potentielle de la méthode est de 2%.

Choqueyapu (Station d'Alto Achachicala): Les valeurs négatives de G_o et du rapport G_O/TOT_O peuvent aussi être considérés comme un indicateur de la précision de la méthode. Car hypothétiquement, la faible couverture glaciaire du bassin versant n'a pas d'influence sur l'écoulement. Les -2% pourrait constituer une marge d'erreur sur la précision des estimations effectuées et de la méthode. Cela est en concordance avec les valeurs trouvées pour Incachaca.

Bien que cette valeur d'incertitude sur l'erreur de la méthode devrait être testée sur d'autres bassins versants, elle sera considérée comme point de repère de la précision de la méthode utilisée, dans le cadre de cette étude.

En ce qui concerne les valeurs de G_N, et de G_N/TOT_N, le bilan hydrologique indiquerait l'existence d'une activité extractive des eaux en amont du point de contrôle. Cette valeur pourrait être liée aux activités comme l'extraction de l'eau pour les cabanes écologiques construites pour le tourisme, ou pour la population de Pamparalama (hameau situé au pied des glaciers), ou encore pour l'exploitation de granulats pour la construction. Ces prélèvements représentent 5 à 7% du volume total des eaux disponibles dans le bassin versant (tenant compte d'une erreur de -2% de la méthode).

Le rapport entre l'écoulement et la précipitation ***(E/T)*** est défini comme étant l'efficacité du bassin versant à « transformer » la précipitation en écoulement. Choqueyapu et Incachaca ont des bassins « peu efficaces » avec un ***Cesc*** proche de 0.40.

A Incachaca, l'influence glaciaire n'existe pas. A Choqueyapu, la situation est apparemment semblable. Cette faible efficacité pourrait caractériser un bassin sans influence d'apports additionnels en amont. Néanmoins, cette supposition n'est pas confirmée par les calculs effectués, et reste seulement au niveau de la spéculation.

Les valeurs du paramètre ***R*** ainsi que la valeur de ***(1-R)*** peuvent être calculées d'une façon simple à partir de l'équation (7) de ce chapitre. Elles reflètent approximativement les valeurs du rapport G_N/TOT_N.

Tuni (Complexe Tuni-Condoriri-Huayna Potosi): C'est le bassin le plus intéressant (du point de vue influence glaciaire) puisque l'apport en eau par les glaciers se situe entre 8 et 11% (G_O/TOT_O et G_N/TOT_N respectivement).

Hampaturi : Les résultats suggèrent une régulation des débits de l'écoulement par l'Ajuankhota. La contribution de ce dernier est estimée à 15% pour G_O/TOT_O et 18% pour G_N/TOT_N
Le rapport ***C'/Cesc*** indique que le barrage exerce une influence assez forte sur la dynamique du bassin versant puisqu'elle améliore de 23% sa capacité d'écoulement.

Pour observer l'influence glaciaire dans ce bassin, un bilan a été effectué dans le barrage Ajuankhota et a donné une valeur de 0.01 pour G_o/TOT_o. Cela signifie que l'eau de fonte des glaciers contribue pour 1% de l'écoulement total, donc l'influence pourrait être nulle si on tenait compte de l'éventuelle erreur sur la méthode.

Il n'y a écoulement que si les conditions d'humidité dans le bassin le permettent : il faut que le sous-sol arrive au point de saturation ***(Ven Te Chow 1994)***. Supposant que les glaciers et les barrages situés en amont d'un point de contrôle quelconque, contribuent à cette humidité, il est possible de procéder à l'analyse qui suit :

> *Au niveau de la formulation des équations, un barrage peut contribuer à l'écoulement comme s'il s'agissait d'un glacier. C'est le cas d'Ajuankhota pour Hampaturi. Toutefois, le barrage devra être en amont du point de contrôle et contribuer à l'écoulement. De plus, les conditions d'humidité doivent être satisfaites pour provoquer l'écoulement.*

Milluni: L'existence du canal « by pass » et la méconnaissance du débit de l'écoulement au sein de celui-ci rend le bilan hydrologique imprécis. Toutefois, à défaut de meilleurs résultats, nous prenons les résultats obtenus comme référence pour traiter toutes les questions liées à la gestion de l'eau.

Sensibilité aux changements éventuels dans le régime des précipitations et de la température

Les résultats obtenus, par les simulations de sensibilité de l'écoulement aux variations de précipitation et de température, indiquent que les précipitations jouent un rôle clé dans le fonctionnement du bassin versant. Une baisse de précipitations de 1% (par rapport aux conditions actuelles) provoque une même diminution d'écoulement qu'une augmentation de température de 2.5 °C.

Dans notre zone d'analyse, les études suggèrent une tendance à l'augmentation des précipitations. Cette situation peut être positive pour la gestion de l'eau, puisque selon nos scénarios, elle conduirait à une augmentation de l'écoulement (qu'elle soit combinée à une augmentation de température ou non).

En effet, la Figure 4.14 nous montre par exemple qu'une augmentation des précipitations de 1% permettra de maintenir l'écoulement aux niveaux actuels, malgré une éventuelle augmentation de température de 1°C.

Dans les scénarios équivalents **E3(P*99) et E9 (T+2.5°C) la** Figure 4.15 montre qu'un accroissement température de 2.5°C provoquerait une diminution de l'écoulement durant les mois humides. Cette diminution est plus prononcée que celle produite par une diminution de précipitation de 1%. Par contre, la hausse de la température induirait aussi une légère augmentation du débit d'écoulement entre avril et juin, alors que la diminution des précipitations induit toujours une réduction de l'écoulement.

4.6 Conclusions

Comment réagit le bilan hydrologique du bassin versant par rapport aux précipitations et à l'écoulement ? Est-il possible de le décrire avec un modèle simple, utilisable à partir des données basiques?

Un modèle simple a été élaboré, basé sur le bilan hydrologique avec quelques adaptations aux particularités des bassins. Il parvient à simuler convenablement la dynamique hydrologique actuelle. Il faut également remarquer que ce modèle demande peu de données et s'adaptent donc aux limitations liées à la disponibilité des données de l'EPSAS.

Le modèle utilise trois paramètres : ***les précipitations***, l'écoulement et la température. L'EPSAS possède des relevés quotidiens de précipitations et d'autres paramètres permettant le calcul de l'écoulement. Les données de température nécessitent une réanalyse des données brutes disponibles sur Internet (Tableau 3.1).

Ce modèle pourrait servir d'instrument pour la gestion de l'eau potable des villes de La Paz et EL Alto puisqu'il reproduit des valeurs totales semblables à celles observées. Il pourrait également être incorporé dans un modèle plus robuste qui tient compte d'autres variables (qui doivent être calibrées par des données mesurées dans le bassin versant).

L'écoulement (utilisé comme proxy de la réponse hydrologique du bassin) s'avère compliquée et difficile à prédire. Il a été toutefois observé que dans l'écoulement, il existe une certaine continuité et une dépendance de la période précédente. Le modèle proposé est capable de reproduire cette dépendance fondamentale qui distingue son évolution à celle des précipitations.

Le volume d'écoulement est dépendant des précipitations, de la température, et du stock en eau des nappes phréatiques. Ces dernières peuvent être à l'origine d'un effet « retard » entre l'observation des précipitations abondantes et l'augmentation du débit d'écoulement, (Figure 3.8) et expliquent l'absence de relation linéaire entre les précipitations et l'écoulement (voir Figure 4.4).

De plus, un paramètre simple comme le coefficient d'écoulement ***Cesc*** est utilisé pour paramétriser le rapport entre écoulement et précipitation. Il sert aussi de repère concernant l'architecture du bassin (Tableau 4.1 et Tableau 4.4)

Est-il possible de déterminer l'influence actuelle des glaciers avec le modèle choisi ?

La réponse est affirmative. Comme nous l'avons montré dans le sous-titre 4.5, le modèle permet non seulement de déterminer l'influence de l'apport en eau glaciaire, tant en amont qu'à l'aval du bassin versant mais également, l'influence des barrages et leur importance dans la gestion de l'eau.

Dans ce cadre, le modèle permet de répondre au doute essentiel concernant la gestion de l'eau potable des villes de La Paz et d'El Alto : ***Quel est le rôle des glaciers dans la gestion de l'eau?,*** une réponse fondamentale pour l'application de la GIRE.

Est-ce que ce modèle permet d'établir des prévisions ?

Les simulations présentées au point 4.4.2 issues des tests de sensibilité de l'écoulement aux variations de précipitations et/ou température, montrent que ce modèle peut être utilisé comme outil de prévision des variations de l'écoulement, et permettre ainsi une meilleure gestion de l'eau. Les données présentées dans le chapitre 3 (Tableau 3.1) facilitent la simulation et l'élaboration de scénarios pour la gestion de l'eau, en relation avec des prévisions de changement du régime de précipitation.

Par exemple, selon les critères de l'IPCC, la région centrale de l'Amérique du Sud pourrait connaître une diminution de précipitation d'environ 5% *(IPCC 2007)* (voir Tableau 3.3). Au point 4.4.2, un tel scénario ***(E2 (P*0.95)*** a été simulé *(*Figures 4.12 et 4.15 *)* pour le bassin de Choqueyapu.

> ***La simulation d'une diminution de 5% des précipitations*** *dans le bassin Choqueyapu conduirait à une diminution de l'écoulement de presque 250 mm sur la période 2000-08, sur un écoulement total de 1976.1 mm (Tableau 4.4). Cela représente une* ***diminution de l'écoulement*** *de plus de* ***12 %****.*
>
> *Le résultat de cet exemple est une conclusion en soi, puisqu'il révèle comment le modèle peut être un outil pour la gestion de l'eau. Il prévoit des situations vitales et délicates pour les décisions de la gestion de l'eau en Bolivie.*

Le Bilan Hydrologique comme instrument de la GIRE

L'exemple cité démontre que le bilan hydrologique avec les adaptations effectuées, constitue un instrument indéniable par la GIRE, tant pour donner la réponse hydrologique des bassins, que pour la simulation des scénarios futurs sur la disponibilité d'eau.

Le modèle utilise comme paramètres de base les précipitations et la température. Et comme il est possible de simuler des scénarios d'apport d'eau du bassin versant en modifiant les paramètres, le modèle sert aussi d'instrument pour des simulations de scénarios de changement climatique.

De plus, le modèle proposé permet de déterminer les bases de l'application de la GIRE comme celles de son organisation :

> *Il contribue à définir un état initial des ressources et à planifier la génération de scénarios futurs de disponibilité d'eau. Cela a été démontré par son application sur les 5 bassins sources de La Paz et El Alto.*
>
> *D'autre part les résultats et l'application du modèle, pourraient contribuer à consolider le concept de l'écoulement en tant que service environnemental du bassin versant. Les composants de ce service sont quantifiables et valorisés, de sorte que cette évaluation puisse servir de référence pour résoudre des conflits liés aux compensations ou aux droits d'utilisation de l'eau.*

En conclusion, le bilan constitue un instrument puissant pour déterminer les bases d'application de la GIRE

Architecture des bassins

La comparaison de la dynamique des bassins a permis d'observer l'importance de la structure ou l'architecture des bassins dans la gestion. Ces éléments doivent être pris en considération pour l'aménagement de territoire des bassins versants dont les ressources en eau dépendent des glaciers en amont.

D'autre part, la supposition que les barrages pourraient remplacer les glaciers a été partiellement confirmée par l'analyse. On a aussi vu que la disposition de ces barrages est importante pour compenser les effets liés au recul des glaciers.

> *On peut citer l'exemple du projet de la construction du barrage Huayna Potosí à côté du barrage Tuni (**CES-CGL-J&S 1997**). Ce barrage a été conçu pour réguler la disponibilité en eau du système d'El Alto. Depuis 2007, la construction de ce barrage est prévue comme mesure d'adaptation aux changements climatiques (**PNCC-PRAA 2007**), face au retrait des glaciers dans la zone des Andes.*

S'il est construit à côté du barrage de Tuni actuel, le barrage Huayna Potosi n'améliorera pas les conditions d'humidité du bassin en amont, cette fonction étant accomplie par les glaciers, donc le barrage Huayna Potosí contribuera uniquement à la régulation des débits.

L'application du modèle suggéré pourrait servir à mettre en évidence l'importance de l'architecture interne des bassins versants. Pour confirmer cette hypothèse, il est nécessaire d'étudier plus en profondeur les similitudes au niveau des processus physiques qui affectent les glaciers et les barrages (notamment les pertes liées à la sublimation, l'évaporation, et l'albédo).

5 GLACIERS

5.1 Introduction

Le changement climatique est accompagné d'une alerte sur la diminution des ressources hydriques dans la zone andine due au recul des glaciers *(IPCC 2007)*. Ceci a entraîné une préoccupation de ceux qui se soucient du développement humain tant au niveau régional *(PNUD 2006)*, qu'au niveau local en Bolivie *(PNUD - Bolivia 2007)*.

Des publications comme celle d'OXFAM *(2009)* vulgarisent cette information au sein de la population en renforçant l'idée d'une future pénurie en eau étant donné le recul et la future disparition des glaciers.

La population de La Paz et d'El Alto s'intéresse et se soucie du problème des glaciers et de la disponibilité en eau, puisqu'en cas d'un éventuel manque d'eau, il y aura des impacts directs sur les habitants de ces deux villes et sur leurs activités.

Cette préoccupation se reflète dans plusieurs articles de presse publiés sur le sujet. Pendant la période 2007-2009, les principaux journaux boliviens (La Prensa, La Razón et El Diario) ont publié en moyenne 2 à 3 articles par mois, qui prévoyaient une insuffisance de ressources en eau pour approvisionner La Paz et El Alto *(El Diario - La Prensa - La Razón 2007-2009)*. La plupart de ces articles mentionne également que l'eau consommée dans cette agglomération urbaine dépend entre 50 et 80% de l'apport des glaciers, principalement durant la saison sèche (mai à septembre).

Par exemple, le dernier article de presse du journal « La Razón » *(Oporto J. - LA RAZON 2010)* met en garde contre le danger de désapprovisionnement d'eau suite au changement climatique et au retrait des glaciers. Il souligne aussi la dépendance d'El Alto par rapport aux glaciers qui lui fournissent 30 à 40% de ses besoins en eau. La journaliste cite comme source l'Institut d'Hydraulique et d'Hydrologie (IHH).

Il existe probablement une mauvaise interprétation ou une méconnaissance des résultats de l'IHH de la part de la journaliste. Dans le chapitre 4 sont mentionnées les études effectuées sur le thème par des chercheurs de l'IRD-IHH qui indiquent 15 à 20% d'apport glaciaire. D'après les recherches de cette thèse, l'estimation atteint 11% d'apport glaciaire sur le total des bassins de Tuni, Condoriri, Huayna Potosí et Milluni. Ces valeurs réfutent donc les affirmations émises dans les articles de presse cités ainsi que d'autres documents de vulgarisation sur le sujet qui transmettent des appréciations similaires.

Toutefois, le recul des glaciers est un fait réel en Bolivie, *(Pouyaud B. et al. 2007;Ramírez E. et al. 2001)*,dans la Cordillère des Andes *(Pouyaud B. et al. 2005)* et dans le monde *(WGMS 2009)* qui se reflète principalement dans les bilans de masse négatifs de ces 20 dernières années.

Etant un sujet très sensible pour la société et acceptant la théorie selon laquelle le recul actuel des glaciers conduira à leur disparition, il est nécessaire de quantifier leur apport relatif pour le bassin et pour la gestion de l'eau. En outre, il faut se demander combien de temps pourra-t-on encore compter sur les ressources en eau qui proviennent de la fonte des glaciers.

Ces réflexions sont très importantes pour établir les bases de la gestion par rapport à la GIRE car l'utilisation des ressources en eau durant les années à venir pourra être planifiée. La connaissance du rôle des glaciers dans la gestion s'avère également nécessaire pour répondre aux questions et aux préoccupations de la population.

Donc, l'apport glaciaire doit être pris en compte dans la gestion de l'eau des villes de La Paz et El Alto. Il est nécessaire de connaître la valeur de cet apport glaciaire (chapitre 4) ainsi que la valeur des réserves en eau contenues dans la masse glaciaire *(stock glaciaire)*. Il est également nécessaire d'estimer le temps pendant lequel cet apport sera encore significatif dans la gestion de l'eau.

Cette recherche s'interroge sur les réserves en eau du glacier comme le volume de glace du glacier et la détermination du temps pendant lequel l'apport en eau des glaciers sera significatif, comme la durée du processus de recul des glaciers pendant les prochaines années jusqu'à sa disparition.

En relation avec ces inquiétudes, deux questions clés peuvent être posées dans ce chapitre :

1) ***Quelle est la réserve glaciaire dans les bassins sources de la ville de La Paz et El Alto ?***

2) ***Quel est le rôle des glaciers dans la gestion de l'eau potable de La Paz et d'El Alto? Y a-t-il une diminution de l'apport glaciaire?***

5.2 Recherches menées et disponibilité des données

Quand il a débuté sa recherche sur les glaciers des Andes, en 1991, l'IRD a installé deux réseaux de balises pour la détermination des bilans de masse des glaciers de Zongo et Chacaltaya. Depuis 2004, un troisième réseau de balises a été organisé au glacier de Charquini Sud par l'IRD. Ces bilans sont disponibles dans les rapports annuels des mesures glaciologiques de l'Institut ***(IRD-Bolivia 2007)*** et dans la compilation du World Glacier Monitoring Service ***(WGMS 2009)***.

Notons que Charquini et Chacaltaya sont situés sur les bassins sources du Système d'Achachicala (Tableau 1.3).

En 1998, une équipe de l'IRD a calculé les épaisseurs de glace du glacier Chacaltaya en utilisant un radar à pénétration de sol (*Ground Penetrating Radar*, GPR) ***(Ramírez E. et al. 2001)***. Ramírez ***(2001)*** a effectué le calcul du volume du glacier pour l'année 1998 sur base des données radar et a également estimé les volumes de Chacaltaya durant les années 1860, 1940, 1963, 1983 et la période 1992-98.

L'estimation du volume faite par Ramírez a été effectuée en employant des équations volume/surface proposées par Bahr ***((Bahr D. et al. 1997b;Bahr D. 1997a)*** sur base de photographies aériennes des années 1940, 1963 et 1983 et des surfaces mesurées par l'IRD entre 1992 et 1998. La surface de 1860 a été reconstruite en prenant comme référence les moraines attribuées au Petit Age Glaciaire (PAG).

En relation avec la procédure de Ramírez ***(2001)***, Soruco ***(2008)*** souligne que la surface de 1940 a été déterminée de manière approximative à partir d'une photo aérienne oblique. En ce qui concerne l'année 1860, il remarque que la moraine de référence date de la période 1642-1700 et fait référence à la thèse de Rabatel ***(2005)***.

Soruco ***(2008)*** a effectué une restitution des photographies aériennes prises en 2006, en déterminant les surfaces des glaciers d'une grande partie de la cordillère des Andes sur le territoire bolivien. Toutefois, son travail n'inclut pas l'estimation des surfaces des glaciers des bassins de Choqueyapu, Hampaturi, Incachaca, ni du glacier de Charquini sud (le bassin de Milluni), qui font partie de cette étude. Le modèle que Soruco ***(2008)*** a employé pour déterminer l'apport glaciaire est basé sur celui de Pouyaud ***(2005)***, qui a également été la base des estimations de Gellibert ***(2009)***.

En ce qui concerne les prévisions du recul glaciaire, Ramírez et Olmos ***(2007)*** ont estimé la disparition du complexe des glaciers Tuni pour l'année 2025 et de ceux de Condoriri pour l'année 2045, en extrapolant les tendances de diminution des surfaces de ces deux groupes de glaciers. A cette fin, ils ont restitué les surfaces des glaciers à partir de photographies aériennes et d'images satellite LANDSAT des années 1956, 1983, 1986, 1997, 2000 et 2006. L'extrapolation effectuée répond à l'ajustement de la tendance de diminution de surfaces à une équation polynomiale du troisième degré.

Rabatel ***(2005)*** a défini les périmètres approximatifs de certains glaciers de la cordillère bolivienne à différents moments de leur recul depuis le PAG. La reconstruction du recul glaciaire se base sur la position des moraines résiduelles et sur la datation des lichens qu'on trouve à l'intérieur des moraines. Les résultats déterminent que le PAG de la zone de la Cordillère des Andes se situe entre la moitié et la fin du 17ème siècle.

En résumé, en ce qui concerne les glaciers qui se trouvent aux bassins sources, les résultats obtenus via les références précédentes sont :

- *le bilan de masse des glaciers Chacaltaya et Charquini ;*
- *les surfaces des glaciers de Tuni (3), Condoriri (3) et Huayna Potosi (Sud et Ouest) rattachées au système de coordonnées WGS84 (latitude, longitude et altitude) ;*
- *les surfaces et périmètres du glacier Chacaltaya au cours de différentes années ;*
- *les épaisseurs de glace du glacier de Chacaltaya en 1998 et la topographie basale estimée pour cette année-là ;*
- *la datation des moraines du PAG et des périodes ultérieures.*

5.3 Modélisation des glaciers

Pour répondre aux questions relatives aux réserves et à l'avenir des glaciers suite à leur recul, la modélisation glaciaire a été choisie comme approche et outil.

La modélisation des glaciers se base sur les équations de Stokes dont la résolution s'avère compliquée pour des applications à la réalité ***(Schäfer M. 2007)***. La simplification la plus souvent utilisée est l'approximation de la couche mince, connue comme SIA (*Shallow Ice Approximation*) ***(Baral D.R. & Hutter K. 1999;Hutter K. 1983)*** . La plupart des modèles qui existent utilisent cette approximation ***(Pattyn F. 2003a)***.

Une des conditions de l'application de l'approximation SIA est que l'épaisseur caractéristique du glacier ***(H)*** doit être faible par rapport à sa longueur caractéristique ***(L)*** ***(Paterson W.S.B. 1994;Pattyn F. 2003a)***. Le rapport d'aspect (ξ=H/L) doit donc être faible .***(Le Meur E. et al. 2004)***

Il faut être prudent dans l'utilisation de cette application parce qu'elle n'est pas valable dans toutes les parties d'un glacier quand il existe des discontinuités ou quand on est proche des limites du glacier ***(Baral D. et al. 2001)***. En outre, Le Meur ***(2004)*** et Schäfer ***(2007)*** s'accordent pour dire que la SIA n'est pas valable pour un glacier de montagne qui a une épaisseur équivalente à sa longueur . La validité de l'application de SIA diminue lorsque la valeur de ξ augmente.

Il existe une seule application de ce type de modèles aux glaciers de la cordillère des Andes : celle de Schäfer ***(2007)*** sur le Glacier Cotopaxi en Equateur. L'essai a été réalisé avec une géométrie idéale construite à partir de quelques épaisseurs mesurées avec un GPR et avec des objectifs rattachés à la comparaison des modèles.

Tous les aspects cités précédemment ont été pris en compte pour l'application du modèle aux glaciers de la zone d'étude, notamment à Chacaltaya, où les conditions pour son application sont adéquates, puisque vers la fin de 2009 le glacier a complètement disparu. Mais il a laissé un antécédent de recul que l'on essayera de reconstruire pour vérifier la possibilité de l'application de ce type de modèle aux glaciers andins et surtout à ceux qui se trouvent dans les bassins sources de La Paz et El Alto.

5.3.1 Formulation physique du modèle

Nos glaciers ont en moyenne un rapport d'aspect faible (20 m < H < 90 m et 300 m < L < 1300 m). De même, la majeure partie de la zone d'accumulation a une pente moyenne de 0.2 (avec des valeurs de pente comprises entre 0.1 et 0.6). Pour cette raison, nous avons considéré que le glissement basal était négligeable (hypothèses de départ, pour l'utilisation d'un model SIA).

Une simulation avec différents modèles (High-order et SIA) menée par Pattyn ***(2002)*** a montré que la différence au niveau des réponses sur des changements dans le bilan de masse est négligeable. Il a également été montré que le comportement non linéaire du flux glaciaire (simulé par un modèle higher-order) provoque un retard de 10% dans le temps de transport de la masse glaciaire par rapport à la réponse du glacier avec un modèle SIA.

En prenant en compte les aspects mentionnés ci-dessus, nous assumons que l'application d'un modèle basé sur l'approche SIA dans notre région d'étude est possible,

Le point de départ du modèle est l'équation de continuité (1) qui décrit le changement d'épaisseur du glacier (H) dans le temps (t) en fonction du champ de vitesse et du bilan de masse du glacier :

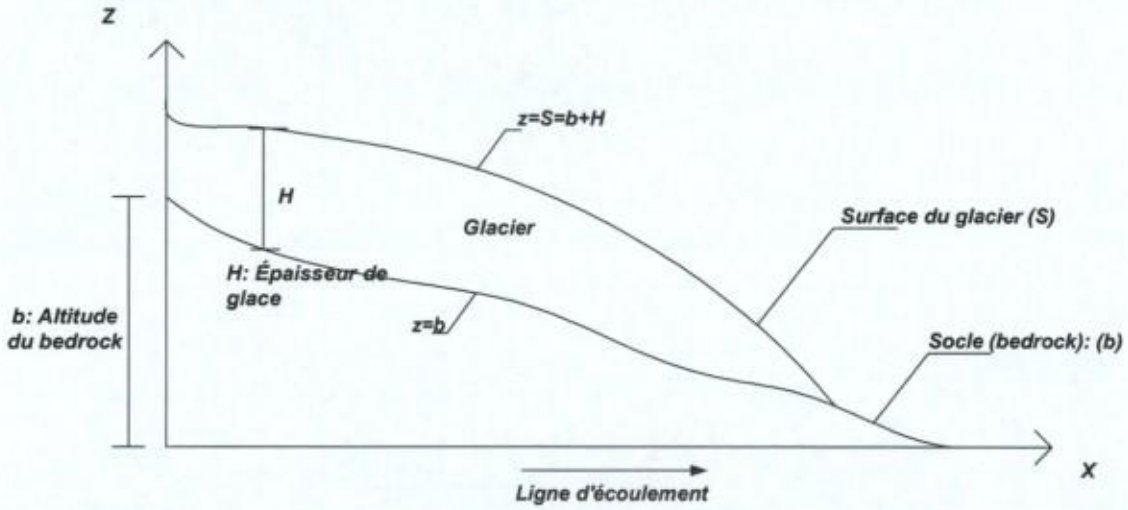
$$(1) \quad \frac{\partial H}{\partial t} = -\nabla(\vec{u}H) + BM$$

H : *épaisseur de glace [m]*
t : *temps [an]*
$\vec{u}$: *champ de vitesse [m a^{-1}]*
BM : *bilan de masse [m a^{-1}]*

Si on considère un modèle à deux dimensions (2D), en prenant l'axe x comme la ligne d'écoulement du glacier et l'axe z comme référence de l'altitude du profil glaciaire et de ses épaisseurs (Figure 5.1), on simplifie l'équation (1) comme suit :

$$(2) \quad \frac{\partial H}{\partial t} = -\frac{\partial(\bar{u}H)}{\partial x} + BM$$

Figure 5.1 : Axes de référence



Ensuite, en négligeant les termes d'accélération, la force de Coriolis et l'accélération gravitationnelle pour les deux directions horizontales, la conservation de l'impulsion s'écrit de cette façon (Figure 5.2) :

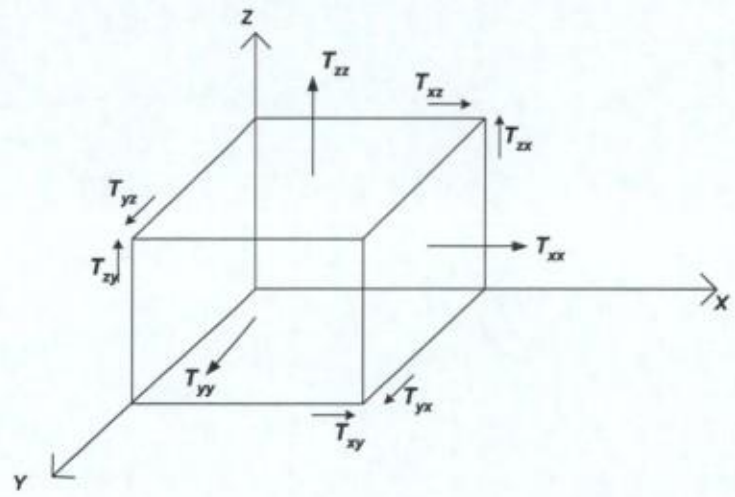
$$(3) \quad \frac{\partial Txx}{\partial x} + \frac{\partial Txy}{\partial y} + \frac{\partial Txz}{\partial z} = 0$$

$$(4) \quad \frac{\partial Tyx}{\partial x} + \frac{\partial Tyy}{\partial y} + \frac{\partial Tyz}{\partial z} = 0$$

$$(5) \quad \frac{\partial Tzx}{\partial x} + \frac{\partial Tzy}{\partial y} + \frac{\partial Tzz}{\partial z} = \rho g$$

Tii : contrainte normale agissant dans la direction i sur le plan perpendiculaire à la direction i [N m^{-2}]
Tij : contrainte de cisaillement agissant dans la direction i sur le plan perpendiculaire à j [N m^{-2}]
ρ : *densité de la glace [kg m^{-3}]*
g : accélération gravitationnelle [m s^{-2}]

Figure 5.2 : Contraintes intérieures d'un glacier



Dans l'équation (5), les gradients horizontaux des contraintes de cisaillement *Tzx* et *Tzy* peuvent être négligés par rapport au gradient vertical de la contrainte normale (approximation hydrostatique) :

$$(6) \quad \frac{\partial Txx}{\partial x}, \frac{\partial Tzy}{\partial y} << \frac{\partial Tzz}{\partial z}$$

De plus, en ne considérant le flux que dans la direction x, le système d'équations (3)-(5) devient :

$$(7) \quad \frac{\partial Txx}{\partial x} + \frac{\partial Txz}{\partial z} = 0$$

$$(8) \quad \frac{\partial Tzz}{\partial z} = \rho g$$

En intégrant l'équation (8) de la surface s jusqu'à une hauteur z, on obtient :

$$(9) \quad \int_z^s Tzz dz = Tzz(s) - Tzz(z) = \rho g \int_z^s dz$$

Considérant une surface libre qui n'est soumise à aucune contrainte, dont la pression atmosphérique et le frottement du vent sont négligeables, il vient :

$$(10) \quad Tzz(z) = -\rho g(s - z)$$

Comme les contraintes sont indépendantes de la direction, il est possible de les transcrire en contraintes déviatrices. Incluant une condition d'isotropie, on peut retirer le terme relatif à la pression et les contraintes déviatrices s'écrivent (pour i=j) :

$$\sigma ii = Tii - \frac{1}{3}(Txx + Tyy + Tzz)$$

Pour la direction du flux x, en ajoutant l'équation (10) à la précédente, on aura :

$$(11) \quad \sigma xx = \frac{2}{3} Txx - \frac{1}{3} Tyy + \frac{1}{3} \rho g(s - z)$$

D'une façon similaire, on aura pour y :

$$(12) \quad \sigma yy = \frac{2}{3} Tyy - \frac{1}{3} Txx + \frac{1}{3} \rho g(s - z)$$

A partir de (11) et (12), on obtient une relation entre la contrainte normale selon x et les contraintes déviatrices :

$$(13) \quad Txx = 2\sigma xx + \sigma yy - \rho g(s - z)$$

Les contraintes de cisaillement sont invariables, c'est-à-dire Txz = σxz. Considérant le flux uniquement selon la direction x, $\sigma yy = 0$. En dérivant l'équation (13) par rapport à x et en combinant la nouvelle équation avec l'équation (7), on obtient :

$$(14) \quad 2\frac{\partial \sigma xx}{\partial x} + \frac{\partial \sigma xz}{\partial z} = \rho g \frac{\partial s}{\partial x}$$

Selon l'approche ***SIA***, les contraintes longitudinales sont négligeables par rapport aux contraintes de cisaillement. On obtient ainsi le bilan de forces lorsque l'écoulement se fait uniquement selon la direction x (*flowline*) :

$$(15) \quad \frac{\partial \sigma xz}{\partial z} = \frac{\rho g \partial s}{\partial x}$$

En intégrant l'équation (15) entre s et z et en considérant qu'à la surface les contraintes sont nulles ou négligeables, on a l'expression de la contrainte de cisaillement verticale :

$$(16) \quad \sigma xz(z) = -\rho g(s - z)\frac{\partial s}{\partial x}$$

Pour établir le rapport entre contraintes et champs de vitesse, on incorpore la loi de flux de Glen qui gère le flux de la glace polycristalline comme une équation constitutive.

Equation constitutive :

Pour la déformation en x due à la contrainte en z, selon le SIA et en flowline :

$$(17) \quad \dot{\varepsilon}_{xz} = A(T)\sigma_{xz}^{\ n}$$

$\dot{\varepsilon}_{xz}$: *taux de déformation dans le sens x due à la contrainte de direction z*

n : *exposant de la loi de flux de Glen (n=3 ; Paterson, 1994)*

A(T) : paramètre de la loi de flux *dépendant de la température [Pa^{-n} an^{-1}]*

Par définition, les taux de déformation ont un rapport avec les gradients de vitesse :

$$\begin{pmatrix} \dot{\varepsilon}_{XX} & \dot{\varepsilon}_{XY} & \dot{\varepsilon}_{XZ} \\ \dot{\varepsilon}_{YX} & \dot{\varepsilon}_{YY} & \dot{\varepsilon}_{YZ} \\ \dot{\varepsilon}_{ZX} & \dot{\varepsilon}_{ZY} & \dot{\varepsilon}_{ZZ} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right) & \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right) \\ \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right) & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}\right) \\ \frac{1}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}\right) & \frac{1}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}\right) & \frac{\partial w}{\partial z} \end{pmatrix}$$

Dès lors, le taux de déformation dans le sens de l'écoulement sera :

$$(18a) \quad \dot{\varepsilon}_{XZ} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right)$$

Selon l'approximation hydrostatique, les gradients horizontaux de la vitesse verticale sont faibles par rapport au gradient vertical de la vitesse horizontale :

$$\frac{\partial u}{\partial z} >> \frac{\partial w}{\partial x}$$

Alors (18a), peut s'écrire comme :

$$(18b) \quad \dot{\varepsilon}_{xz} = \frac{1}{2}\frac{\partial u}{\partial z}$$

Si on met en rapport les équations (16), (17) et (18b) on a :

$$(19) \quad \frac{\partial u}{\partial z} = -2A(T)\left(\rho g(s-z)\frac{\partial s}{\partial x}\right)^n$$

On intègre (19) de la base b jusqu'à une hauteur z, et on obtient :

$$(20) \quad \int_b^z \frac{\partial u}{\partial z}dz = u(z) - u(b) = -2A(T)(\rho g)^n\left(\frac{\partial s}{\partial x}\right)^n \int_b^z (s-z)^n dz$$

De la Figure 5.1, s = H+b, d'où :

$$(21) \quad u(z) - u(b) = \frac{2A(T)}{n+1}(\rho g)^n\left(\frac{\partial s}{\partial x}\right)^n \left[(H+b-z)^{n+1} - H^{n+1}\right]$$

Pour obtenir la vitesse moyenne dans le sens du flux sur la colonne z, on intègre (21) de la base à la surface du glacier :

$$(22) \quad \bar{u} - u(b) = -\frac{2A(T)}{n+2}(\rho g)^n\left(\frac{\partial s}{\partial x}\right)^n H^{n+1}$$

Pour n = 3 et une vitesse basale nulle (sans glissement basal), on obtient :

$$(23) \quad \bar{u} = -\frac{2A(T)}{5}(\rho g)^3\left(\frac{\partial s}{\partial x}\right)^3 H^4$$

L'équation (23) représente la vitesse au premier terme du membre de droite de l'équation (2) en utilisant l'approximation SIA dans une seule direction (x).

Par rapport au bilan de masse, on élabore une paramétrisation similaire à celle qui a été employée par Pattyn ***(2002)*** pour ses analyses sur les glaciers d'Arolla en Suisse et par Delcourt ***(2008)*** sur le glacier Mc Call, Alaska :

$$(24) \quad BM = \beta Z + a$$

où β est le gradient altitudinal du bilan de masse ***(Oerlemans J. 2008)***

Un bilan de masse nul ($BM = 0$) signifie qu'il y a un équilibre entre accumulation et perte :

$$(25) \quad Z = -\frac{a}{\beta} = ELA$$

L'ELA *(Equilibrium Line Altitude)* est un niveau d'altitude de référence très important pour les études de bilan de masse ***(Paterson W.S.B. 1994)*** puisqu'il représente une altitude sur le glacier au-dessus de laquelle le bilan de masse est positif et en-dessous de laquelle le bilan de masse est négatif.

Si l'on formule le bilan en fonction de l'ELA, pour une condition à l'équilibre, on obtiendra le deuxième terme du membre de droite de l'équation (2) :

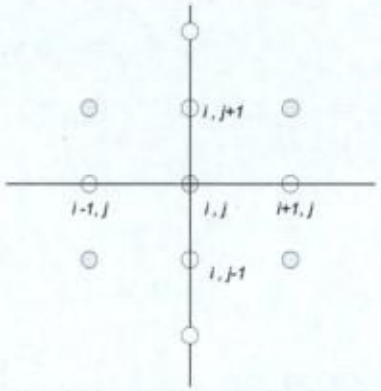
$$(26) \quad BM = \beta(Z - ELA)$$

5.3.2 Formulation computationnelle du modèle

La formulation computationnelle du modèle a été basée sur les concepts et algorithmes de l'EISMINT *(European Ice Sheet Modeling INiTiative)* sur la modélisation glaciaire ***(MacAyeal D.R. 1997)***, avec une formulation de différences finies communément employée pour ce type de modèles.

En discrétisant un objet en mailles régulières de points, on a le schéma de différences finies : un point (i,j) dépend de ce qui se passe avec les points voisins *(*Figure 5.3*)*

Figure 5.3 : Formulations du schéma de différences finies

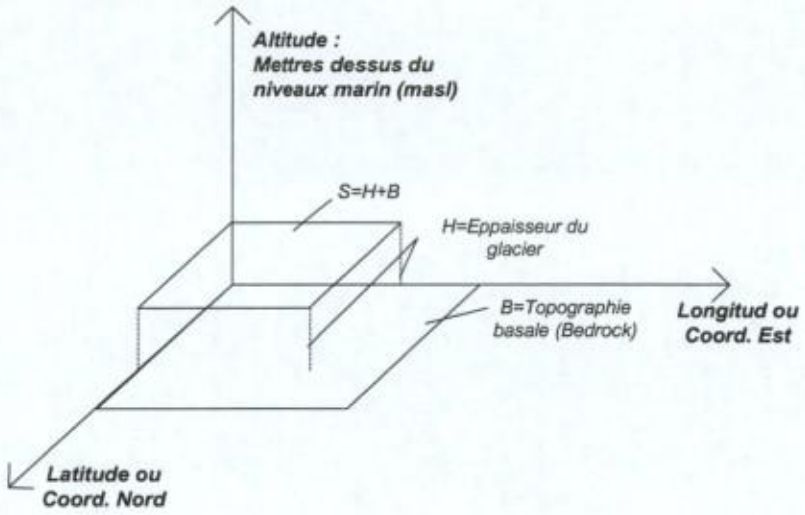


Cette formulation a été appliquée pour discrétiser la topographie basale du terrain, pour estimer pour chaque point de la maille construite, les paramètres considérés de l'équation (2).

Les calculs de modélisation ont deux niveaux de référence : (B) qui est la topographie basale du terrain et (S) qui correspond à la topographie de surface du glacier, S = H+B *(*Figure 5.4*)*.

La maille construite pour le modèle est géo-référencée selon la projection de coordonnées UTM (Universal Transverse Mercator), au système WGS 84 (*World Geodetic System 1984* : Système géodésique mondial, révision de 1984) qui est utilisé en Bolivie par l'IGM (Institut Géographique Militaire) comme référence officielle.

Figure 5.4 : Niveaux de références du modèle



Le modèle a été élaboré sur MATLAB, à partir d'un code écrit par Frank Pattyn pour la modélisation des calottes glaciaires.

5.3.3 Formulation des bases du modèle

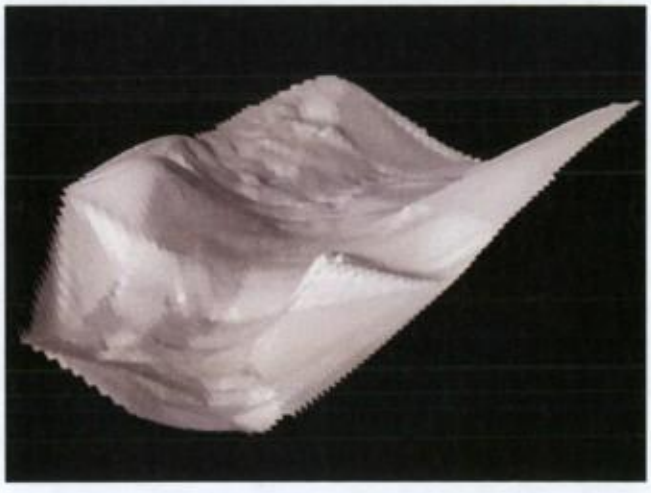
Pour le test et la calibration du modèle, nous avons choisi le glacier de Chacaltaya pour lequel il existe des données suffisantes. Il s'agit d'essayer de reproduire son recul depuis le PAG jusqu'à nos jours.

Topographie basale (bedrock)

Les données topographiques disponibles correspondent à la reconstruction de la surface basale (bedrock) du glacier Chacaltaya, qui a été réalisée en 1998, grâce à la mesure des épaisseurs de la glace avec un GPR ***(Ramírez E. et al. 2001)***. En 1996, l'IRD a autorisé l'accès aux données brutes de la topographie de la surface relevée à Chacaltaya. En 2009, nous avons fait le relevé de 23 points topographiques de la surface basale de Chacaltaya (le glacier avait disparu complètement) en employant un GPS différentiel sur la zone qui, en 1998, était couverte par le glacier, afin de compléter la topographie basale de Chacaltaya.

Grâce à cette information, ont été réalisés la reconstruction finale de la topographie basale de Chacaltaya (Figure 5.5) ainsi que son Modèle Numérique de Terrain (MNT). Les différences trouvées par rapport à la reconstruction effectuée par Ramírez ***(2001)*** ne sont pas significatives.

Figure 5.5 : Modèle Numérique de Terrain Chacaltaya



Géométrie du glacier de Chacaltaya (surface, volume et périmètre) et son retrait entre PAG et 1998

Dans la
Figure 5.6, sur le relevé topographique fait par l'IRD en 1996, on représente les périmètres des surfaces du glacier reconstitués pour différentes périodes : Petit Age Glaciaire (PAG), 1940, 1963, 1983, 1998, qui ont servi de référence à Ramírez ***(2001)***. Nous avons vérifié ces références avec les données brutes que Ramírez nous a envoyées. ***(Communication personnelle, 2007)***.

En premier lieu, les volumes ont été recalculés à partir des périmètres de référence de Ramírez. Des différences ont été découvertes par rapport à celles publiées par Ramírez ***(2001)***. La différence la plus notable est celle de la valeur de la surface du PAG (Tableau 5.1 A).

Les volumes ont également été comparés en employant les équations surface/volume de Paterson ***(1994)*** et de Bahr ***(1997a)*** (Tableau 5.1 B)

$$(27) \quad Log(V) = 1.23(LogS - 1) \quad \textbf{(Paterson W.S.B. 1994)}$$

$$(28) \quad Log(V) = 1.36LogS + 3.70 \quad \textbf{(Bahr D. 1997a)}$$

V: *Volume [km^3]*
S: *Surface [km^2]*

On remarque qu'il existe une grande différence entre les valeurs de volumes recalculées et celles de Ramírez ***(2001)***. De plus, l'ampleur de ces différences dépend aussi de l'équation que l'on utilise pour son calcul. Alors, il a été décidé de ne pas considérer les volumes comme référence quantitative pour cette recherche.

Par rapport à l'année 1860, que Ramírez ***(2001)*** a utilisé comme année de référence du PAG, nous optons pour l'année 1700 basée sur la thèse de Rabatel ***(2005)*** et les remarques de Soruco ***(2008)***.

Figure 5.6 : Topographie de Chacaltaya et surfaces glaciaires entre le PAG et 1998

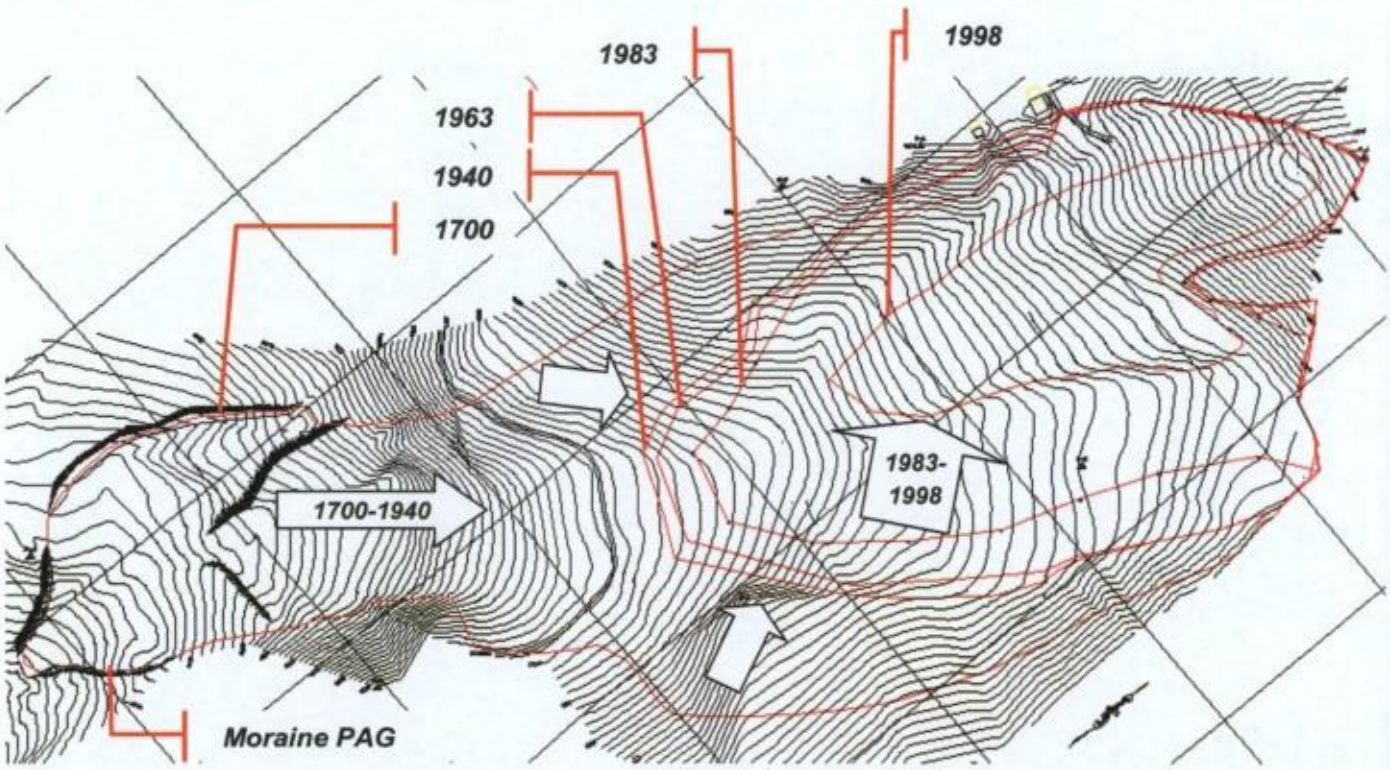


Tableau 5.1 : Vérification des données et références de Chacaltaya

A) Ramírez (2001) et vérification de volumes

Ramírez [2001]			Verification Volumes [2007]	
Année	Surface (S) [m^2]	Volume [m^3]	Volume V=f(S) [m^3]	
			Paterson [1994]	Bahr [1997 a]
PAG: 1860	527,000.00	29,950,000.00	26,781,003.53	20,973,110.10
1940	223,000.00	5,264,000.00	9,298,540.17	6,511,709.44
1963	195,000.00	4,068,000.00	7,883,922.78	5,425,596.24
1983	141,000.00	1,987,000.00	5,291,018.73	3,490,907.92
1998	60,000.00	374,000.00	1,849,804.48	1,092,159.58

B) Vérification de surfaces à partir de la base de données de Ramírez-IRD

Vérification [2007]		Volume 1 V1=f(S1) [m^3]	
Année	Surface 1 (S1) [m^2]	Paterson [1994]	Bahr [1997 a]
PAG: 1700	426,766.30	20,660,167.81	15,741,951.14
1940	223,109.90	9,304,181.53	6,516,068.25
1963	212,505.70	8,763,262.43	6,098,513.56
1983	172,601.60	6,785,238.62	4,596,009.86
1998	60,650.80	1,874,515.07	1,108,300.90

C) Paramètres de référence pour la modélisation

Année	Surface Ref. [m^2]	Vol. Ref. [m^3]
PAG: 1700	426,766.30	
1940	223,109.90	
1963	212,505.70	
1983	172,601.60	
1998	60,000.00	374,000.00

Dans le cadre de la révision des données disponibles afin de calibrer le modèle, les valeurs présentées dans la partie C du (tableau 5.1) ont été choisies comme références. De plus, le volume ainsi que la surface en 1998 ***(Ramírez E. et al. 2001)*** sont retenus comme des références importantes puisqu'elles représentent les seules valeurs obtenues à partir des données de mesures directes sur le terrain.

Les périmètres des surfaces des glaciers (Figure 5.6), sont considérés comme un indicateur qualitatif (indicateur visuel) pour vérifier que le modèle reproduise le contour du glacier.

Paramétrisation du bilan de masse

Le gradient altitudinal du bilan de masse de Chacaltya (β),a été calculé à partir des données des rapports de bilan de masse de Chacaltaya ***(IRD-Bolivia 2007)*** (Figure 5.7). Afin de comparer les résultats, nous avons calculé la valeur (β) pour les bilans de masse du glacier de Zongo, à partir des données reçues de Soruco ***(Communication personnelle 2007)*** (Figure 5.8.)

Au total, 5 valeurs de β ont été calculées dont deux pour chacun des deux glaciers : la première englobe la totalité des données de bilan de masse de chaque glacier et la deuxième a été calculée en excluant la valeur correspondant à l'année « El Niño » (ENSO) de 1997-1998 qui a provoqué un bilan de masse extrêmement négatif pour les deux glaciers ***(Wagnon P. et al. 2001)***. La cinquième valeur est la moyenne entre les deux β qui excluent l'effet ENSO. (Exemple de référence Figure 5.9) (Tableau 5.2).

Figure 5.7 : Bilan de masse du glacier de Chacaltaya (1991-2004)

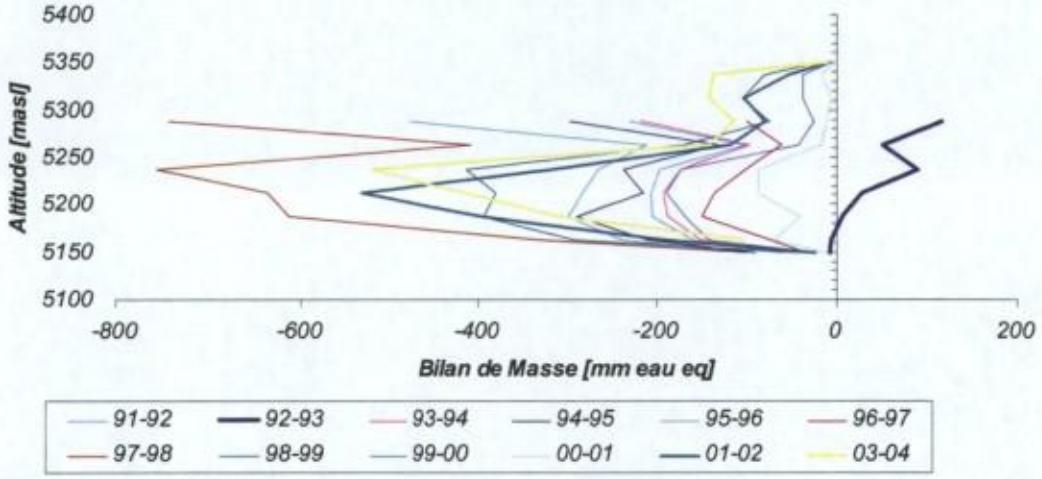
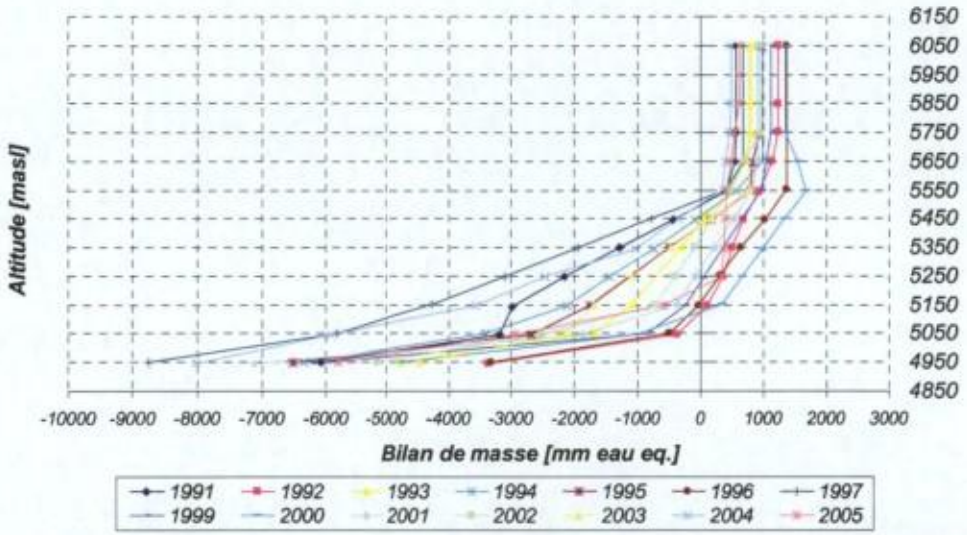


Figure 5.8 : Bilan de Masse du Glacier de Zongo (1991-2006)



(Soruco 2008, Communication personnelle) ; (Soruco A. et al. 2009)

Figure 5.9 : Exemple d'estimation de β (Zongo sans valeurs Z>5500m)

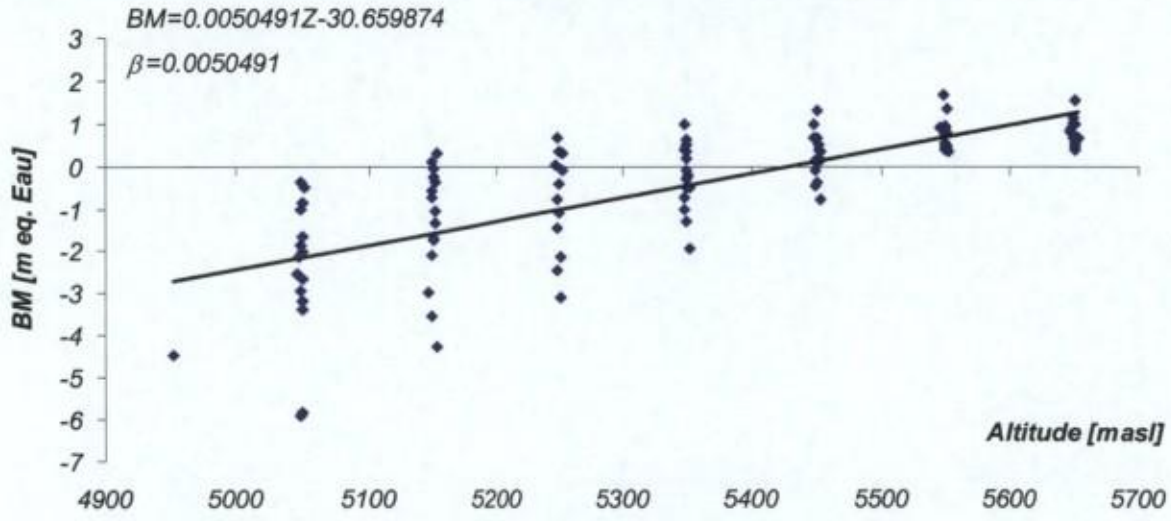


Tableau 5.2 : Valeurs de β

Valeur de β	Description
β1: 0.003649	Chacaltaya
β2: 0.003787	Chacaltaya sans ENSO 1997/98
β3: 0.004641	Zongo sans ENSO 1997/98
β4: 0.004983	Zongo
β5: 0.004214	*(β2+β4)/2*

ENSO:** El Niño-**Southern Oscillation

Les valeurs estimées sont considérées par Oerlemans ***(2008)*** proches des valeurs typiques d'un climat sec en zone arctique. Bien que la Bolivie se trouve en zone tropicale, le climat de la région où se situent nos glaciers (Cordillère des Andes et Altiplano) est particulièrement sec dû à l'altitude (au-dessus de 4000 m) et à l'humidité (entre 50 et 60 %) ***(Montes de Oca I. 2005).***

Valeurs des paramètres et unités

Les valeurs employées pour la modélisation sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 5.3 : Paramètres employés pour la modélisation

Symbole	Paramètre	Valeur	Unités
n	Exponent de la loi de Glen	3	
ρ	Densité de la glace	890	$Kg\ m^{-3}$
g	Pesanteur	9.81	$m\ s^{-2}$
A(T)	Paramètre ou facteur de flux dépendant de la température	$1x10^{-16}$	$Pa^{-n}\ an^{-1}$

Pour calculer le paramètre A(T), il existe des équations suggérées par Hooke***(Hooke R. 1981)*** et Paterson ***(1994)***. Néanmoins, nous avons estimé les valeurs du Tableau 5.3 en tenant compte des valeurs recommandées pour la comparaison de modèles du EISMINT ***(Huybrechts P. & T. Payne 1995)*** car ces valeurs sont applicables à des glaciers tempérés ***(Paterson W.S.B. 1994).***

Nous avons estimé une valeur de densité de la glace de 890 Kg m^{-3} qui reste proche de la valeur qu'emploie l'IRD (900 Kgm^{-3}) dans ses analyses aux Andes ***(IRD-Bolivia 2007)*** et qui se trouve dans les limites recommandées par Paterson ***(1994)***.

5.3.4 Calibration du modèle. Reconstruction du retrait du glacier de Chacaltaya

Etape I. Expérience temps-indépendant

Résumé des données analysées et du cheminement suivi pour l'application du modèle dans cette première étape de calibration :

*- L'hypothèse de départ des expériences a été fixée à partir de la valeur du volume de Chacaltaya au PAG qui peut être estimée en faisant tourner le modèle jusqu'à un état stationnaire **(dH/dt=0)**, ou steady-state **(SS)**. On intègre l'équation (2), dans le temps.*

*- La démarche qui guide cette procédure consiste à intégrer l'équation (2) dans le temps jusqu'au moment où on obtient un résultat de **(dH/dt=0).** Nous les appelons des expériences 'temps-indépendant' car l'important est d'arriver à l'état stationnaire, quelque soit le temps nécessaire pour atteindre cet état.*

- On a choisi le PAG pour nos expériences car il constitue la période où les glaciers ont atteint leur extension maximale (dans une échelle de temps récent).

*- Rabatel **(2005)** considère que les moraines déposées lors du PAG correspondent à des glaciers d'équilibre, dans un état stationnaire **(SS).** Selon Rabatel **(2005)**, il est relativement facile de dater l'extension maximale du glacier à ce moment, grâce aux moraines qui sont les traces laissées par le recul glaciaire sur les bassins.*

- Si l'ensemble des épaisseurs du glacier (H) calculées par le modèle reproduisent la surface et le périmètre de cette période (Figure 5.6 et Figure 5.1 C) et qu'en plus la condition d'équilibre (SS) est remplie, la reconstruction complète de la géométrie du glacier au PAG sera réalisée.

Application :

- La variable d'ajustement a été la valeur ELA puisque la valeur des surfaces ***(S)*** *et des volumes* ***(V)*** *reproduits par le modèle sont fonction de la valeur du bilan de masse. En conséquence*

$$Si\ H=f(BM),\ S=f(H)\quad et\quad BM=f(ELA) \rightarrow S=f(ELA)$$

- Il a été vérifié que le modèle est capable de reproduire une surface de glacier de valeur égale ou semblable à celle que nous avons comme référence (Tableau 5.1) ***(paramètre quantitatif)*** *et qu'il est aussi capable de reproduire cette surface dans les limites du périmètre établi au PAG. (Figure 5.6)* ***(paramètre qualitatif).***

- le modèle a été appliqué à 5 séries d'expériences en faisant varier tant les valeurs de (β) (Tableau 5.2). Les résultats sont résumés dans le Tableau 5.4.

Tableau 5.4 : Résultats Etape I

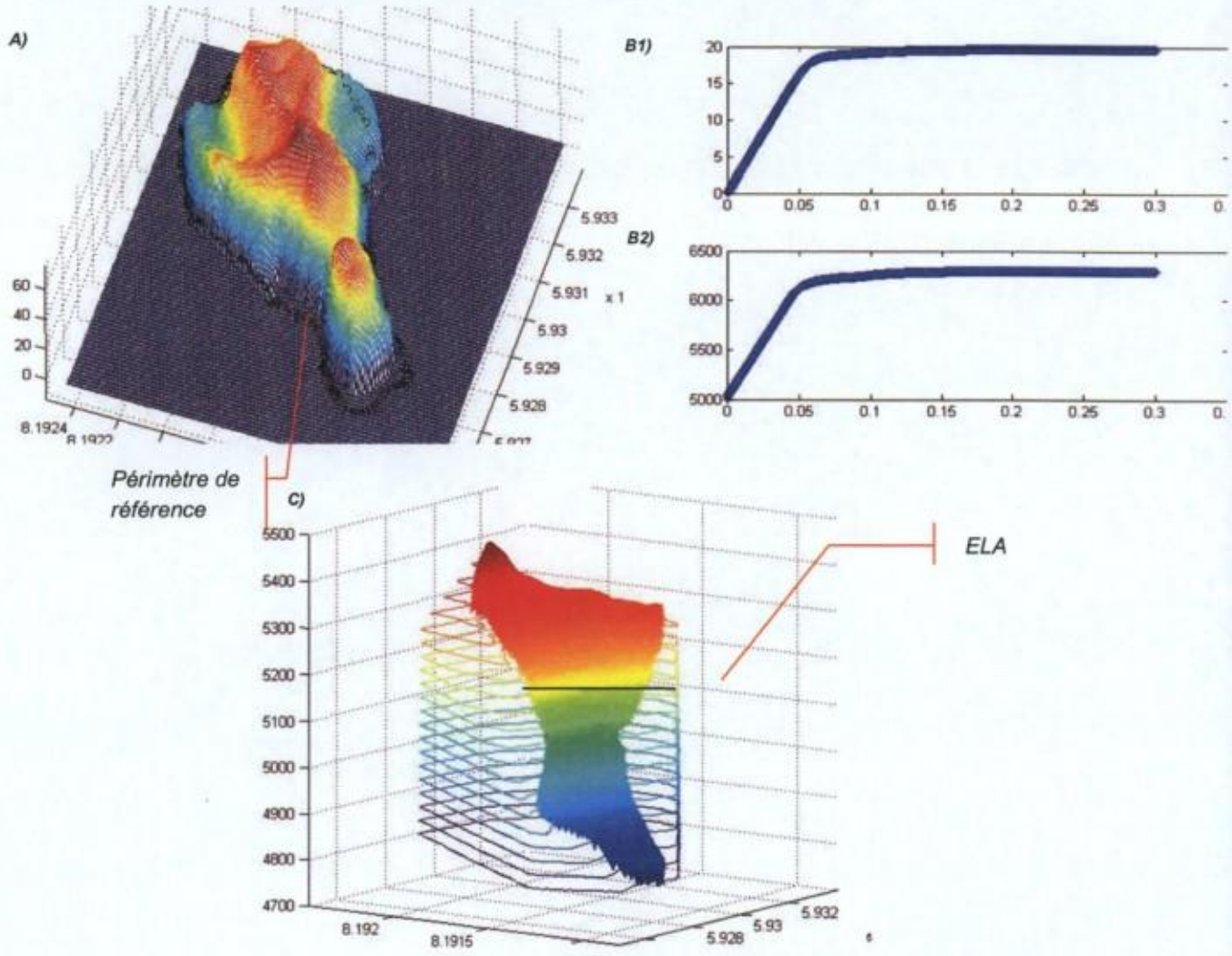
Surface de référence [m^2] *426,766.30*

Beta	ELA [masl]	Volume (V) [m^3]	Surface (S) [m^2]
0.003649	5,176.54	15,337,741.26	425,600.00
0.003787	5,175.60	15,640,502.13	429,300.00
0.004641	5,179.29	16,059,302.12	427,500.00
0.004983	5,179.90	16,282,173.84	427,900.00
0.004214	5,178.35	15,784,478.99	427,400.00
Moyenne	**5,177.94**	**15,820,839.67**	**427,540.00**
Ecart type	**1.63**	**327,695.39**	**1,184.23**

Les résultats présentés au Tableau 5.4 montrent que pour différentes valeurs de β, les valeurs estimées d'ELA, de volume et de surface sont proches les unes des autres.

Dans la Figure 5.10.A., on constate que le modèle peut reproduire le périmètre de référence. Dans le même graphique ***(B1 et B2)***, on peut voir que les calculs du modèle arrivent à une situation d'équilibre ***(SS)***. La Figure 5.10.C: présente le MNT de surface de la glace et du bassin avec l'ELA calculée pour cette expérience.

Figure 5.10 : Résultats Etape I (Exemple d'application pour un β=0.004983)



***A)** : Valeurs de H dessinées sur un niveau de référence 0 ;*

***B1)** Variation de l'épaisseur moyenne de la glace dans le temps*

***B2)** Variation du bilan de masse cumulé dans le temps*

***C)** : Valeurs de S=B+H (voir **Figure 5.4**)*

***Axes:** X:* Coordonnées UTM Est x 10^5 ; *Y:* Coordonnées UTM Nord x 10^6 ; *Z:* Epaisseur de glace (H) [m]

***Axes:** X:* Temps [Années x 10^4] *Y:* Epaisseur (Hm) moyenne de glace [m]

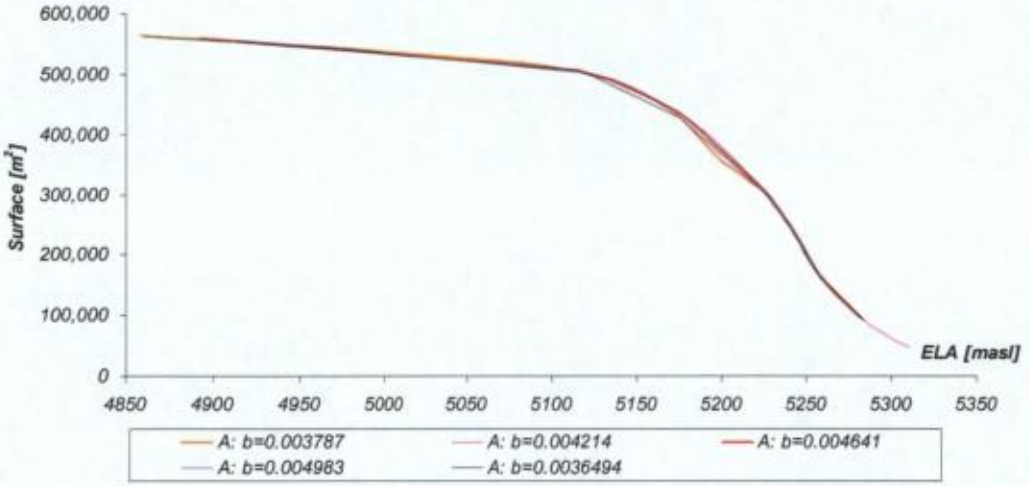
***Axes:** X:* Temps [Années x 10^4] *Y:* Bilan de masse cumulée [m eq. eau]

***Axes:**X:* Coordonnées UTM Est x 10^5 ; *Y:* Coordonnées Nord x 10^6 ; *Z:* Valeurs de S [masl]

Pour confirmer cette situation à travers plusieurs expériences « en état stationnaire » (***SS***), on a estimé la surface du glacier Chacaltaya pour plusieurs valeurs d'ELA, pour les différentes valeurs de β (figure 5.11).

On a constaté qu'indépendamment des valeurs de β, les valeurs de surface calculées restent similaires pour une même valeur d'ELA. Donc les changements de volumes du glacier sont relativement insensibles à la variation du gradient du bilan de masse β. Comme les résultats obtenus à partir des différentes valeurs de (β) sont très proches (Tableau 5.4 et Figure 5.11) il a été décidé de prendre la valeur de 0.003787 pour β dans la de nos expériences.

Figure 5.11: Estimation de Surfaces à partir de la variation d'ELA et pour différentes valeurs de β



En conclusion de cette première étape de calibration, le modèle est capable de reproduire la géométrie du glacier de Chacaltaya du PAG (surface, extension et volume). Un autre résultat est la valeur que la ligne d'équilibre ELA, que le glacier avait à ce moment- là. (Tableau 5.4)

Etape II. Expérience temps dépendant - Modélisation du retrait glaciaire depuis le PAG jusqu'à 1998

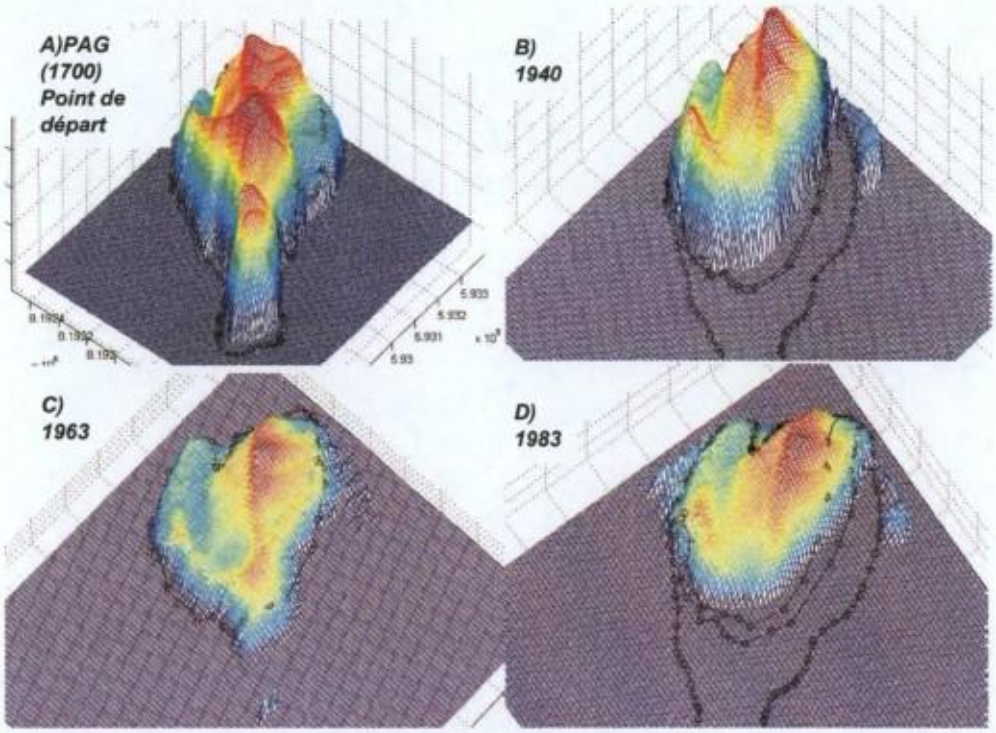
Pour cette seconde étape dont le but est de reconstruire le recul du glacier de Chacaltaya depuis le PAG jusqu'à 1998, nous avons considéré le temps et l'ELA comme les variables dont dépendait la géométrie du glacier.

Nous prenons comme point de départ la géométrie du glacier et l'ELA modélisée correspondant à β=0.003787. La valeur du bilan de masse (eq. 26) est également calculée avec cette valeur de (β).

Le modèle a été appliqué pour 4 périodes de temps *a)1700-1940 b) 1940-63, c)1963-83, d) 1983-98.*
Chaque période se trouve entre deux années pour lesquelles nous avons des données de référence (Tableau 5.1 C). A chaque période, nous avons déterminé une valeur d'ELA moyenne qui permet de reproduire tant la surface que le périmètre du glacier pour la dernière année de la période considérée.
La géométrie résultant de la première étape de notre procédure a servi comme géométrie pour le début de l'étape suivante. Le même concept a été appliqué pour les étapes ultérieures.

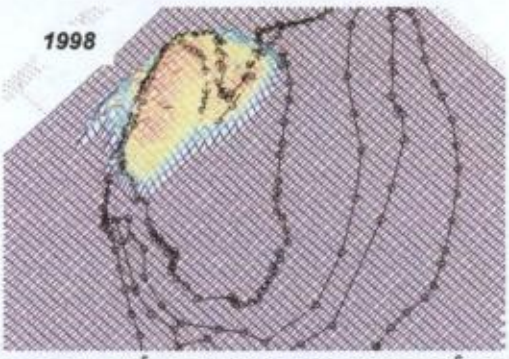
Les résultats des paliers *a), b) et c),* ont reproduit de manière satisfaisante la géométrie de référence *(*Figure 5.12*)*, pourtant le palier *d)* ne donne pas comme résultat la géométrie de l'année 1998 *(*Figure 5.13*)*.

Figure 5.12 : Premiers résultats Etape II. (A)



Axes: X: Coordonnées Est x 10^5 ; ***Y:*** Coordonnées Nord x 10^6 ; ***Z:*** Epaisseur de glace (H) [m]

Figure 5.13: Premières résultats, Etape II-1998. (B)

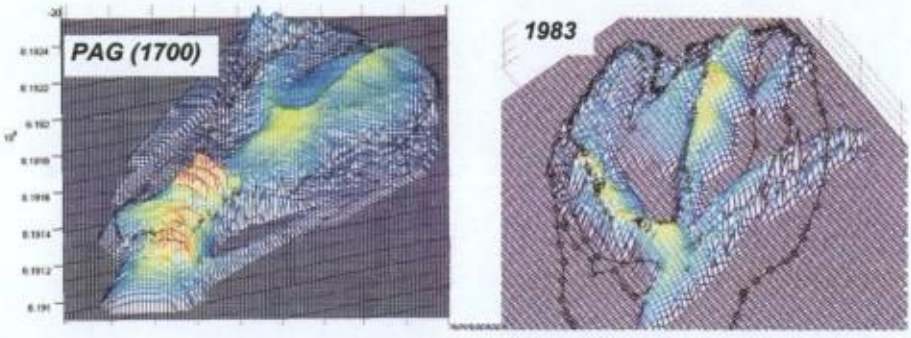


Axes: X: Coordonnées Est x 10^5 ; ***Y:*** Coordonnées Nord x 10^6 ; ***Z:*** Epaisseur de glace (H) [m]

Bien que le résultat de 1998 n'était pas prévu, le modèle n'a pas été rejeté vu les résultats obtenus à l'étape I et aux paliers *a), b) et c)*. Cette situation a provoqué certaines modifications du modèle. La première option de modification testée a été l'introduction du glissement basal dans le modèle de façon similaire à celui De Smedt et Pattyn *(2003)* dans ses modifications du modèle de Huybrechts ***(1989)***.

Les résultats obtenus n'ont pas été meilleurs comme l'indique la Figure 5.14*)*. Cette modification a donc été rejetée.

Figure 5.14 : Exemples des résultats obtenus avec l'introduction du glissement basal dans le modèle



Axes: X: Coordonnées Est x 10^5 ; ***Y:*** Coordonnées Nord x 10^6 ; ***Z:*** Epaisseur de glace (H) [m]

La façon dont le glacier de Chacaltaya a reculé a attiré notre attention (voir Figure 5.6) : le recul n'a pas été uniforme de l'amont à l'aval.

En prenant comme référence le périmètre qu'avait le glacier de Chacaltaya dans ses différentes phases de recul, on remarque que le retrait du glacier entre 1700 à 1940, a eu lieu principalement sur la vallée centrale. Pour arriver au périmètre de 1940, le recul a été plus marqué du côté est, en direction ouest. Le recul entre 1940 et 1983 n'a pas été significatif (Tableau 5.1) et a eu lieu sur les flancs du glacier. Entre 1983 et 1998 la tendance de recul du glacier a été au centre de la vallée, avec une fusion principalement en direction ouest nord-ouest.

Ces observations ont été associées au concept de Soruco ***(2008)***, sur le rapport de l'exposition du glacier au rayonnement Solaire incident et son bilan de masse.

L'exposition de la vallée amont de Chacaltaya varie de S a SW (sur la base de référence de ***(Soruco A. 2008)***). L'exposition sud est la moins affectée par l'incidence solaire tandis que l'exposition SW, est moins favorable au bilan de masse.

> *Les différentes expositions au sein du même glacier pourraient-elles jouer aussi un rôle sur son recul ?*

Cette question conduit vers une deuxième tentative de modification des paramètres du modèle. Sur la base des concepts d'exposition de bassins de Soruco ***(2008)***, la vallée du glacier a été divisée en trois zones en fonction de son exposition et avec une équation de bilan de masse différenciée (Figure 5.15) :

Zone 1 : Exposition S → $BM = \beta(Z - ELA - 5)$

Zone 2 : Exposition SW → $BM = \beta(Z - ELA)$

Zone 3 : Exposition W → $BM = \beta(Z - ELA + 5)$

Cette modification au modèle impliquait que la simulation du bilan de masse aurait un effet différent dans chacune de ces trois zones. Il existerait un bilan de masse plus négatif dans la zone 3, et plus positif dans la zone 1. La zone 2 aurait une valeur moyenne, étant donné qu'il s'agit de la zone représentative de l'exposition de la vallée de Chacaltaya.

Les étapes de modélisation *a), b), c) et d)* ont été refaites et les résultats sont présentés dans la Figure 5.16. Cette fois les résultats sont satisfaisants car ils reproduisent la géométrie glaciaire de référence de l'année 1998 ***(Ramirez E. et al. 2001)***.

Figure 5.15 : Traitement différencié par zones de la vallée de Chacaltaya en fonction de son exposition

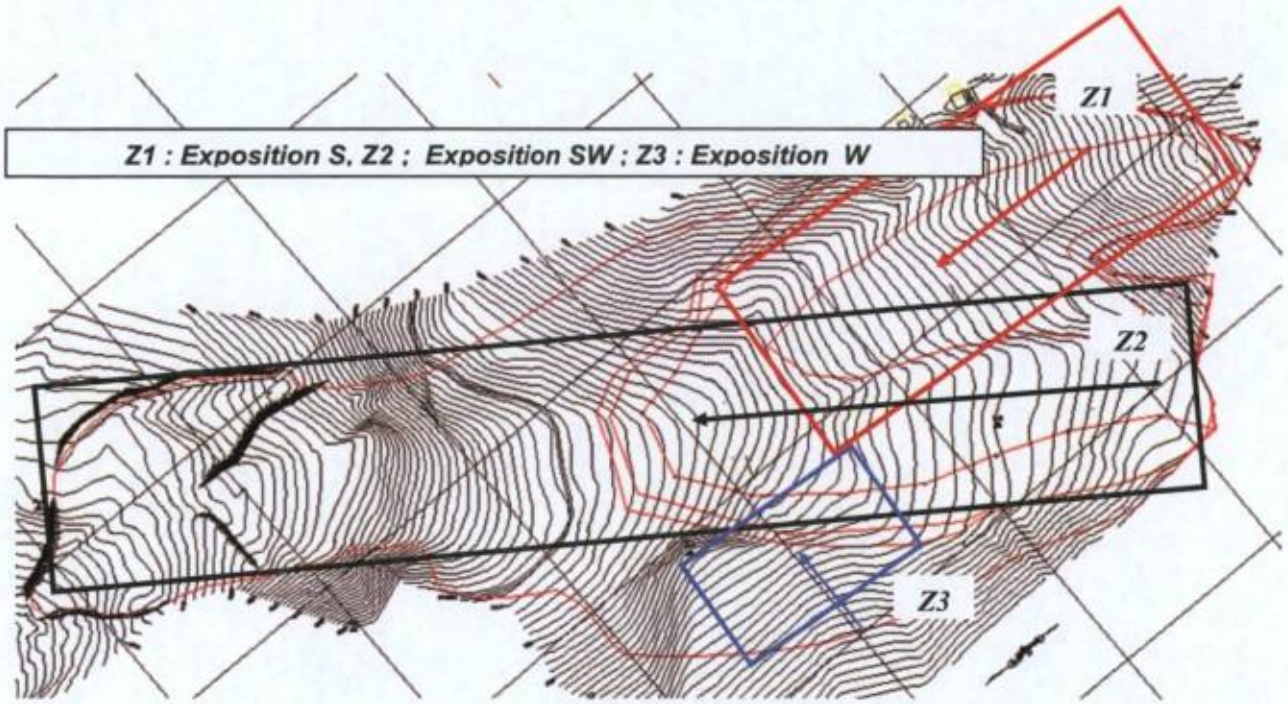
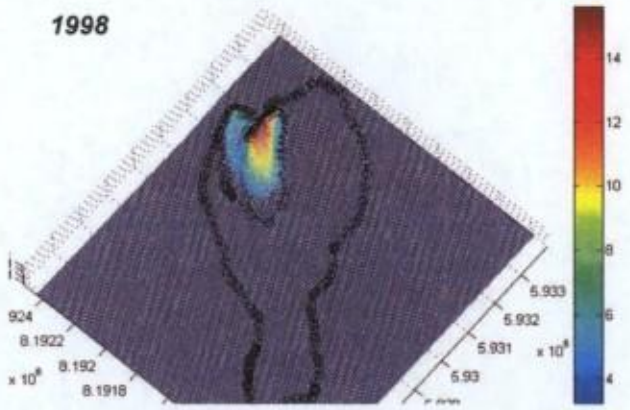


Figure 5.16 : Modélisation de l'étape II de Calibration : Reproduction de la géométrie du glacier de Chacaltaya pour 1998



Axes: X: Coordonnées Est x 10^5 ; ***Y:*** Coordonnées Nord x 10^6 ; ***Z:*** Epaisseur de glace (H) [m]

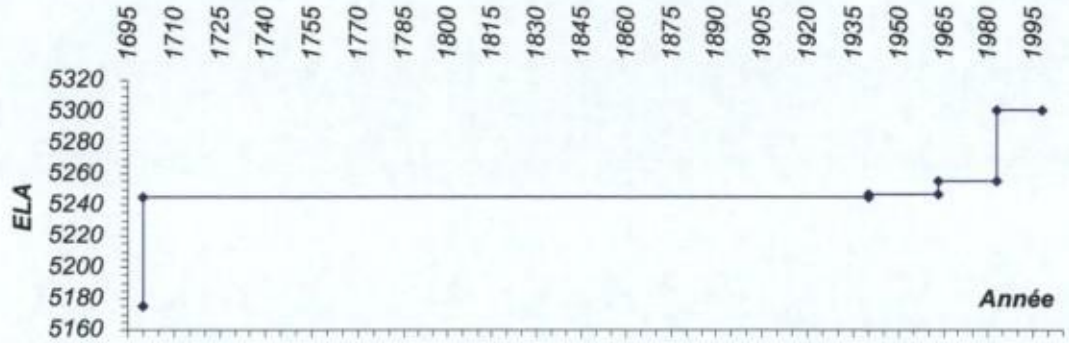
Les résultats de cette deuxième étape de calibration sont présentés au (Tableau 5.5).

Tableau 5.5 : Résultats finaux de la deuxième étape de calibration

Año	ELA	Volume [m^3]	Surface [m^2]
1700	5,175.60	15,565,482.02	429,300.00
1940	5,244.98	5,989,017.75	224,200.00
1963	5,247.12	5,635,472.50	213,900.00
1983	5,255.40	4,453,138.54	173,300.00
1998	5,301.24	373,994.27	60,300.00

Le modèle a donné comme résultats les valeurs d'ELA moyennes des périodes comprises entre les années de référence (voir ci-dessous).

Figure 5.17 : Valeurs d'ELA moyennes de Chacaltaya (1700-1998)



Conclusion

L'application du modèle proposé basé sur la dynamique du glacier (flux et bilan de masse) a été possible sur le glacier de Chacaltaya, puisque les simulations reproduisent bien la géométrie pour la PAG et à partir d'elle la géométrie des différentes étapes de son retrait jusqu'à l'année 1998.

Considérant que Chacaltaya est un glacier représentatif de la zone d'étude (et considéré pour quelques auteurs représentatif de la partie bolivienne de la cordillère de Andes ***(Rabatel A. 2005;Ribstein P. 2003;Sicart J.-E. 2002;Wagnon P. et al. 2001)***), il est possible d'appliquer ce modèle aux glaciers proches de Chacaltaya, c'est-à-dire à ceux situés sur les bassins sources d'eau pour La Paz et El Alto. Cette application a été effectuée et est présentée dans le paragraphe suivant.

Pendant le processus de calibrage, il a été observé que l'exposition au rayonnement incident, en plus d'avoir une importance au niveau régional *(Soruco A. 2008)*, joue aussi un rôle dans le recul du glacier au niveau local. (Étape 1983-1998).

L'hypothèse du rôle négligeable du glissement basal dans le recul du glacier est confirmée : son introduction dans le modèle donne des résultats plus éloignés des observations (Figure 5.14), ce qui était cohérent avec les hypothèses de validité de l'approche SIA.

En fonction des objectifs de la thèse, la reproduction du retrait du glacier de Chacaltaya est un fait important puisqu'il a été possible de profiter des données récoltées pendant son retrait pour la calibration d'un modèle qui peut servir à estimer l'avenir d' autres glaciers similaires dans la cordillère des Andes.

Cette modélisation de la reconstitution de l'évolution du glacier de Chacaltaya s'avère utile pour d'autres chercheurs puisque ce glacier est un icône pour le Changement Climatique et ses effets ***(IPCC 2007)*** .

5.3.5 Application du modèle et estimation du stock glaciaire

Simulation du retrait de Chacaltaya dès 1998

Le modèle ainsi calibré a été appliqué pour simuler le recul du glacier de Chacaltaya depuis 1998 jusqu'à nos jours.

Pour comparer les résultats, nous avons pris comme référence les surfaces de Chacaltaya mesurées par l'IRD ***(2007)*** de 1991 jusqu'à 2006. Un autre point de repère pour la modélisation est le fait que le glacier avait complètement disparu fin 2009.

Dans un premier scénario de modélisation, on emploie les valeurs d'ELA estimées par l'IRD d'après ses mesures de bilan de masse avec balises[11] (ELA variable). Un deuxième scénario considère une ELA constante (valeur calculée pour 1998 dans la deuxième étape de calibration du modèle) (Figure 5.17) et (Tableau 5.5). Les résultats de l'application du modèle sont présentés dans la Figure 5.18) et le (Tableau 5.6).

Figure 5.18 : Modélisation du recul final de Chacaltaya I

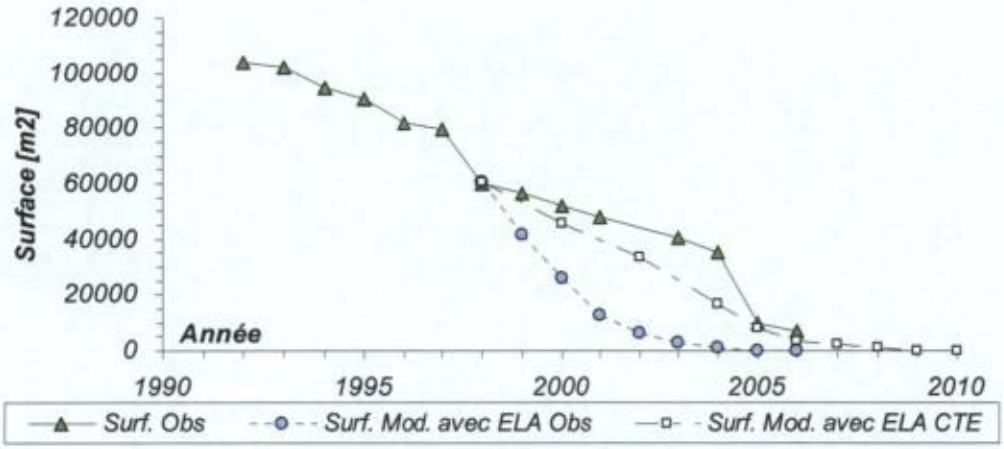


Tableau 5.6 : Références et résultats de la modélisation du recul du glacier de Chacaltaya 1998-2010

Modelisation avec ELA CTE= 5301.24

Année	1998	2000	2002	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Volume [m³]	373,994.27	215,580.42	102,887.68	29,602.66	13,580.87	6,732.33	3,030.40	848.25	105.27	0.00
Surface [m²]	60,300.00	45,700.00	33,400.00	16,500.00	7,800.00	3,700.00	2,100.00	1,100.00	200.00	0.00

Modelisation avec ELA OBS. (IRD)

Année	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
ELA (IRD)		5,475.00	5,383.00	5,451.00	5,518.00	5,329.00	5,599.00	5,431.00	5,383.00
Volume [m³]	373,994.27	185,341.48	71,125.00	30,254.87	11,455.00	5,345.00	527.00	110.00	0.00
Surface [m²]	60,300.00	41,581.31	26,075.32	12,579.64	6,527.31	3,100.38	952.78	205.73	0.00

Surfaces obs. (IRD)

Année	1992	1993	1994	1995	1996	1997
Surface Obs [m²]	103,600.00	102,100.00	94,800.00	90,700.00	82,100.00	79,800.00

Année	1998	1999	2000	2001	2003	2003	2004	2005	2006
Surface Obs [m²]	59,800.00	56,600.00	51,700.00	47,900.00	—	40,400.00	35,100.00	10,000.00	7,000.00

Les résultats indiquent que le scénario qui considère une ELA constante, arrive à prédire la disparition du glacier de Chacaltaya pour l'année 2010, ce qui est un fait constaté. Toutefois, les valeurs des surfaces mesurées ne sont pas reproduites par le modèle.

Malheureusement nous ne disposons pas de mesures de surfaces sur Chacaltaya au-delà de 2006, où apparemment les surfaces simulées commencent à être similaires à celles observées.

Le deuxième scénario qui se sert des valeurs d'ELA de l'IRD, offre des résultats des surfaces éloignés des valeurs mesurées. De plus, les résultats montrent une disparition du glacier en 2006.

Les expériences réalisées avaient comme point de départ la géométrie estimée par le modèle en 1998, après calibration. Un nouveau test du modèle a été élaboré sur base de la géométrie calculée par Ramírez *(2001)* en 1998. Bien que celle-ci présente une surface inférieure à celle calculée avec le modèle pour la même année, sa forme est apparue un peu différente, plus étalée vers le sud. (voir Figure 5.19 et Figure 5.20).

[11] *A partir de 2005 le bilan de masse n'est plus mesuré avec des balises à cause de sa taille, c'est la topographie qui est utilisée IRD (2007).*

Figure 5.19 : Comparaison des formes du glacier

Surface Ramirez 1998 *Surface modèle 1998*

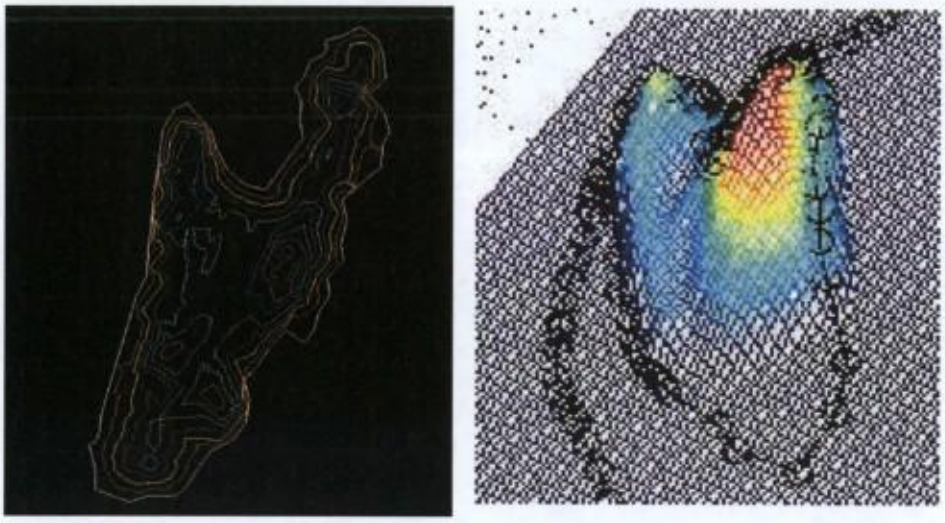
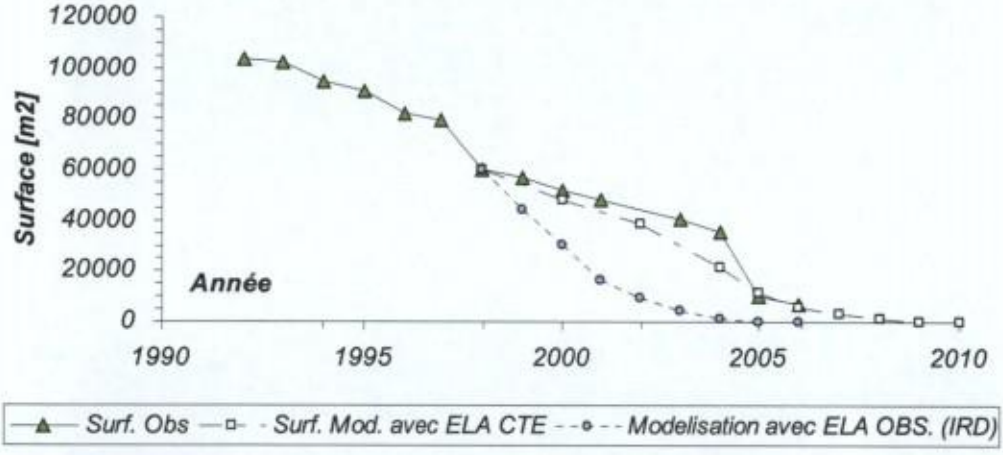
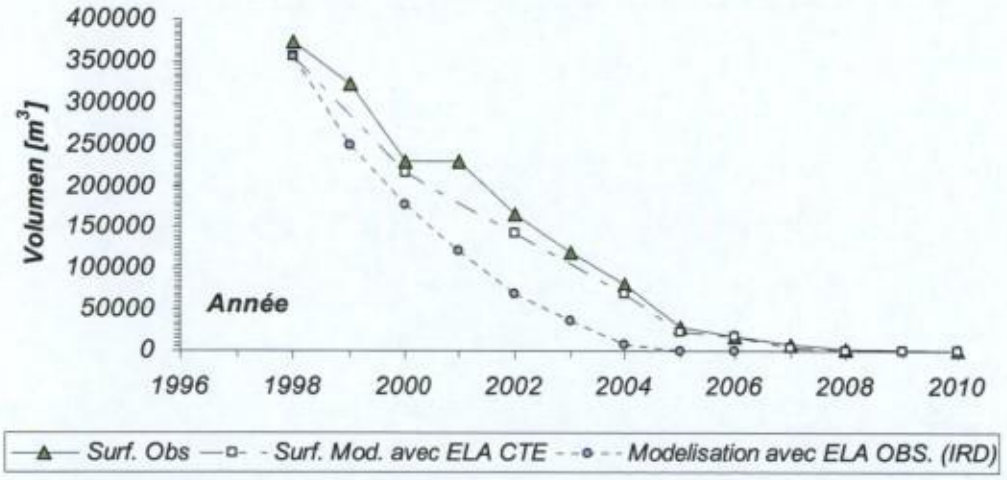


Figure 5.20 : Modélisation du recul final de Chacaltaya II

A) Surfaces



B) Volumes



Les résultats obtenus montrent qu'en utilisant comme base de départ la géométrie réelle du glacier, les surfaces (Figure 5.20 A) et volumes (Figure 5.20 B) modélisés se rapprochent des surfaces et volumes observés.

Tenant compte des résultats de cette application qui, bien que ne reproduisant pas exactement les surfaces observées, ne s'en éloignent pas non plus, et aussi des résultats obtenus à l'étape de calibration, nous pouvons considérer ***l'hypothèse selon laquelle le modèle est valable pour son application aux glaciers de la cordillère de La Paz,*** et principalement ceux qui se trouvent dans les bassins de la zone d'étude.

Le caractère représentatif du glacier Chacaltaya pour tous les glaciers de la cordillère de La Paz est discutable vu sa petite taille. Néanmoins, les glaciers de notre zone d'étude sont aussi de petite taille (surface inférieure à 1 km^2, dont la plupart ont une surface inférieure à 0.5 km^2). Dès lors, nous pouvons affirmer qu'il est représentatif des glaciers de notre zone d'étude.

Volumes des glaciers des bassins sources (stock) et leur temps de retrait

D'une part, les volumes et la topographie basale des glaciers des bassins étudiés sont des variables inconnues. D'autre part, ces deux éléments sont essentiels pour répondre aux questions posées au début de ce chapitre. En effet, pour connaître le stock d'eau disponible, nous avons besoin de la géométrie (volume, surface) et, à l'aide du modèle calibré, la modélisation de son retrait est alors possible.

Dans ce cadre, observons d'abord les données disponibles et celles élaborées dans cette thèse :

Nous disposons des valeurs de toutes les surfaces des glaciers situés dans les bassins sources (Tableau 1.3).

Soruco ***(Communication personnelle)****, a transmis les périmètres géo-référenciés (Coordonnées géographiques) pour :*

Charquini Sud
Les 4 glaciers de Condoriri
Les 3 glaciers de Tuni
Les 4 glaciers de Saltuni à Huayna Potosí

Nous possédons également le relevé du périmètre de Charquini Sud fait par P Ginot en 2008 ***(Communication personnelle)****, avec un GPS différentiel (Coordonnées géographiques).*

Les épaisseurs de glace des trois glaciers ont été mesurées : Tuni (Tuni3), Condoriri (Pic Tarija) et Charquini Sud.

A partir des données disponibles, trois options se présentent pour le calcul des volumes des glaciers et de leur géométrie.

Reproduction des épaisseurs glaciaires avec la modélisation
Relevé direct des épaisseurs des glaciers sur le terrain
Emploi des expressions Volume / Surface pour l'estimation du stock du glacier.

a) Reproduction des épaisseurs des glaciers par modélisation inverse

Farinotti ***(2009)*** propose une méthode d'estimation des épaisseurs des glaciers basée sur le calcul du bilan du flux glaciaire et sur ***la contrainte principale en direction du flux***, nommée en anglais *Driving Stress* ***(Paterson W.S.B. 1994)***.

A ce sujet, Paterson ***(1994)*** ainsi que Farinotti ***(2009)*** observent que, quand le flux glaciaire est considéré dans un modèle fait pour deux couches parallèles, la relation de flux de Glen peut être intégrée pour calculer l'épaisseur de la glace.

D'après Farinotti *(2009)*, l'épaisseur de glace ***(H_i)*** peut être calculée à n'importe quel point de la ligne d'écoulement en calculant la valeur moyenne du flux de la glace à ce point ***(u_i)***. Ce processus est itératif et est proposé par le calcul de l'expression suivante :

$$(29) \quad H_i = \sqrt[n+2]{\frac{\bar{u}_i}{2A(T)} \frac{n+2}{(C\rho g Sin\alpha)^n}} \; ; \textbf{(Farinotti D. et al. 2009)}$$

Pour l'application de cette expression, nous analysons son origine dans les équations de la physique des glaciers, basées sur le concept de bilan de flux du glacier :

Le bilan de flux pour toute la surface du glacier est :

$$(30) \quad B.Flux = \iint_S BM\,dxdy = \bar{u}_{bal} H$$

Donc :

$$(31) \quad \bar{u}_{bal} = \frac{B.Flux}{H}$$

On obtient une égalité de la vitesse de bilan du flux et la vitesse déduite grâce à la simplification de SIA (23). Alors (23) en (32)

$$(32) \quad \bar{u}_{bal} = \bar{u}$$

$$\bar{u}_{bal} = \frac{B.Flux}{H} = -\frac{2A(T)}{5}(\rho g)^3 \left(\frac{\partial s}{\partial x}\right)^3 H^4$$

$$(33) \quad H^5 = \frac{5B.Flux}{2A(T)(\rho g)^3 \left(\frac{\partial s}{\partial x}\right)^3}$$

L'expression (33) est similaire à celle de Farinotti (29) pour n=3

Il existe une différence entre les deux équations : Farinotti *(2009)* applique un coefficient C qui représente l'influence du glissement basal. Dans notre cas, ce paramètre ne sera pas retenu, vu les résultats négatifs dus à l'inclusion de ce paramètre dans la calibration du modèle de Chacaltaya (Figure 5.14)

En vue de son application, nous utilisons l'équation (33) en résolvant l'équation de bilan du flux (30) L'application effectuée sera dorénavant dénommée comme la méthode de Farinotti.

Quelques données préliminaires:

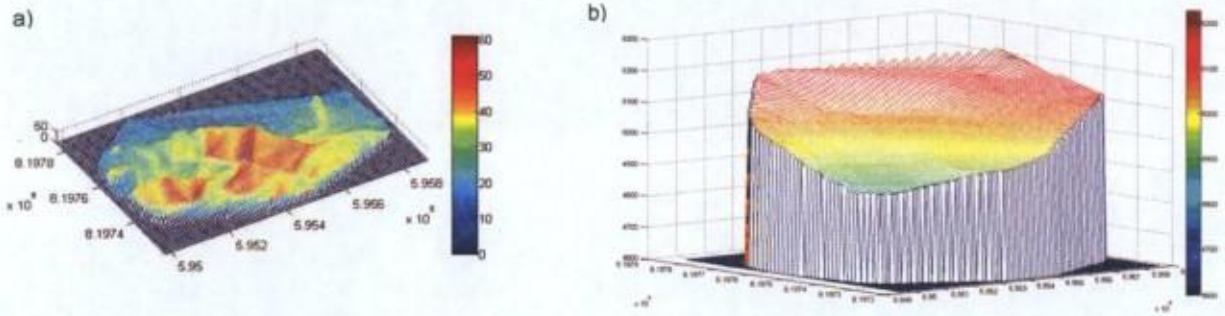
- Les principes de flux du glacier qui sont à la base du modèle, s'appliquent dans ce cas-là
- L'application de cette méthode n'est réalisable que pour les glaciers dont la surface et les points représentatifs sont connus, reliés à un système de référence (Coordonnées géographiques).
- A partir de ces conditions et des données de périmètres des glaciers restituées par Soruco (2008), les MNT's des surfaces des glaciers ont été calculés comme base géométrique de la méthode.
- Farinotti (2009) considère que la précision de sa méthode est de l'ordre de 20%

Les résultats des estimations effectuées avec cette méthode sont présentés dans le Tableau 5.8. Comme exemple de l'application de cette méthode, nous représentons, dans la Figure 5.21, les épaisseurs reconstituées des glaciers de Charquini, Condoriri (Pic Tarija) et Tuni 3.

Les résultats ainsi obtenus s'avèrent indispensables pour l'application du modèle puisque le MNT de la surface du glacier (S) et les épaisseurs de la glace (H) permettent de calculer la topographie basale (bedrock, B). Ces trois informations sont nécessaires pour modéliser le recul du glacier.

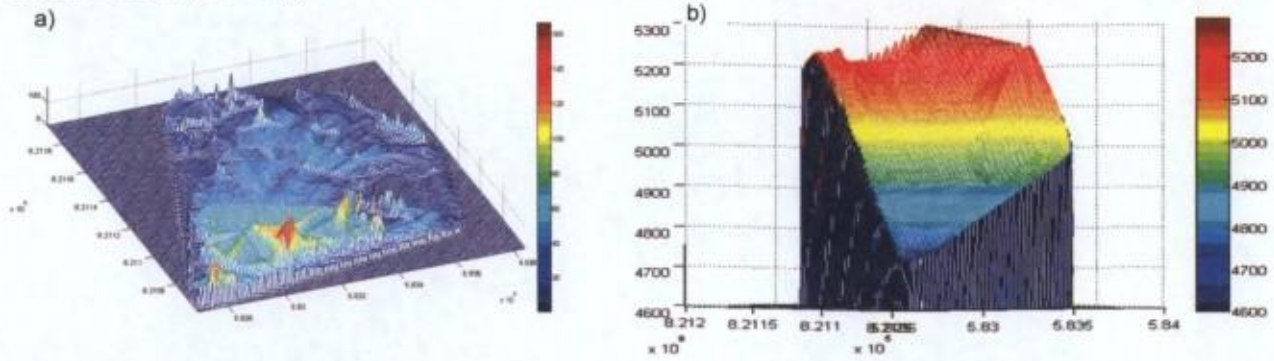
Figure 5.21 : Exemples des résultats de l'application de la méthode de Farinotti

Glacier Charquini



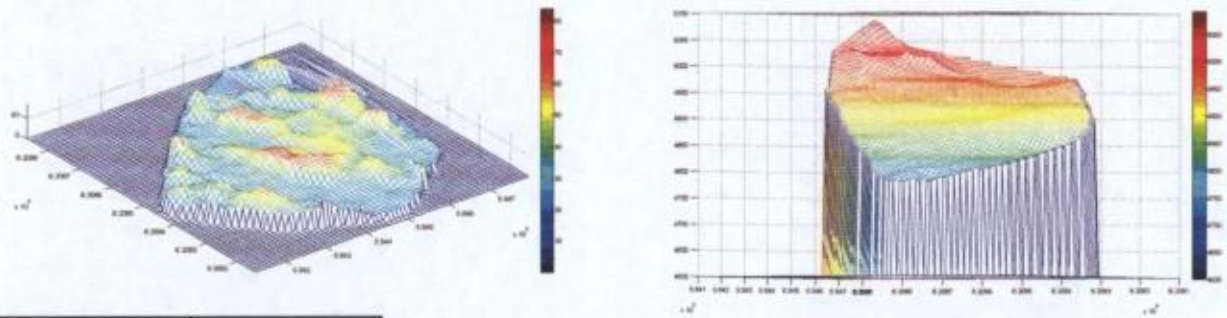
Vol [m³]	*12,003,108.1*
H Moyenne [m]	*20.43*
H Max [m]	*60.79*

Glacier Condoriri (Pic Tarija)



Vol [m³]	*39,508,801.6*
H Moyenne [m]	*25.06*
H Max [m]	*165.93*

Glacier Tuni 3



Vol [m³]	*10,814,163.1*
H Moyenne [m]	*21.21*
H Max [m]	*83.67*

a)Epaisseurs de glace : Axes: X: Coordonnées Est x 10^5 ; ***Y:*** Coordonnées Nord x 10^6 ; ***Z:*** Epaisseur de glace (H) [m]
b) Bedrock : Axes: X: Coordonnées Est x 10^5 ; ***Y:*** Coordonnées Nord x 10^6 ; ***Z:*** Altitude (masl) [m]

b) Calcul des volumes a partir des mesure des épaisseurs de glace sur le terrain

Pendant les mois de juillet 2008 et 2009, des mesures des épaisseurs de glace ont été prises sur les glaciers Tuni 3, Condoriri (Condoriri Pic Tarija) et Charquini Sud.

A cet effet, nous avons employé un ***Narod Ice radar*** de pénétration de glace, qui utilise un système de radar Narod Geophysisc Ltd générant des signaux de 1600 Volts à l'antenne bipolaire intégrée au transmetteur. Les deux antennes bipolaires mesurent 5 et 10 mètres chacune avec une capacité de transmission de 8.4 Mhz et de 4.2 Mhz respectivement. ***(Icefield Instruments Inc 2000)***. Le récepteur employé est un oscilloscope TekTroniX.

Entre 30 et 100 mesures distribuées en 3 ou 4 lignes transversales ont été effectuées.

Concernant le relevé et le traitement des mesures, voici quelques remarques :

- *Au glacier Tuni, des mesures représentatives ont été réalisées sur presque la totalité de la surface, sauf sur la section la plus haute du glacier (soit à peu près 20% de la surface), rendue difficilement accessible par des pentes trop importantes. Cette situation s'est également présentée pour les deux autres glaciers.*
- *Au glacier de Condoriri, les mesures ont été concentrées dans la partie centrale.*
- *Plus de 40% des signaux enregistrés sur les glaciers de Condoriri et Charquini n'apparaissent pas clairement. Il n'a pas été évident de déterminer les temps entre le signal de transmission et sa réception, ce qui influence la précision des mesures et des relevés.*

La topographie de surface a été mesurée à l'aide d'une paire de GPS THALES de double fréquence. Il en résulte les informations suivantes :

- A Tuni, les points de contour du glacier ont été repérés ainsi que d'autres éléments représentatifs de la surface. Il n'a pas été possible de prendre des mesures à cause de la pente raide à l'amont du glacier. Les données de Soruco ont servi pour les surfaces non mesurables.
- Dans le cas de Condoriri, la situation fut similaire à celle de Tuni.
- A Charquini sud, la paire de GPS s'est abîmée. Dès lors, la topographie de surface a été établie ultérieurement grâce aux quelques mesures d'épaisseurs (23) et au relevé du contour réalisé par P. Ginot en 2008.
- Le MNTs de surface de ces trois glaciers ont été construits à l'aide du software Eagle Point de Autodesk (www.eaglepoint.com), et les calculs réalisés avec MATLAB.

Pour la construction du MNT de la surface basale (Bedrock, B) de ces trois glaciers, nous nous sommes basés sur les concepts de Paterson ***(1981)***, d'employer la contrainte directrice (Driving stress, T) pour reproduire les épaisseurs de glace. Dans notre cas, ce concept a été utilisé selon la procédure suivante :

Pour chaque point (i,j) dont l'épaisseur de la glace (H) est connue, il est possible de calculer la contrainte directrice (Driving Stress, T) :

$$(34) \quad TD_{(i,j)} = \rho g H \alpha$$

$TD_{(i,j)}$: *contrainte directrice au point (i,j), [N m^{-2}]*
ρ *: densité de la glace [kg m^{-3}]*
g : accélération gravitationnelle [m s^{-2}]
H : épaisseur de la glace [m]
α *: pente dans le sens de la ligne de flux*

Pour calculer la pente dans la direction du flux :

$$(35)\quad \alpha_x = \frac{sn_{(i,j+1)} - sn_{(i,j-1)}}{\Delta_x} \quad ; \quad \alpha_y = \frac{sn_{(i+1,j)} - sn_{(i-1,j)}}{\Delta_y}$$

$$(35a)\quad \alpha = \sqrt{\alpha_x^{\,2} + \alpha_y^{\,2}}$$

$sn_{(i,j)}$: Point (i,j) sur la surface du glacier
Δ_x, Δ_y : Distance horizontale dans le sens x ou y entre deux points de grille du MNT (dans notre cas, $\Delta_x = \Delta_y = 20$ m).

En ayant calculé les valeurs de T à partir des valeurs de H connues, on interpole les valeurs de T où H n'est pas connu pour chaque point (i,j).

A partir de la pente dans le sens de la ligne de flux de chaque point (i,j) (35a) dont nous avons interpolé T, nous calculons H où il n'est pas connu.

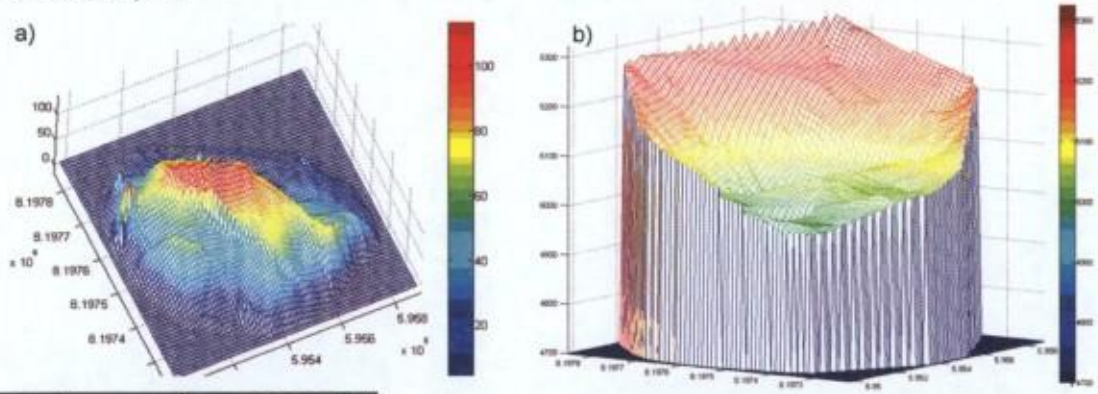
En connaissant les valeurs H de chaque point (i,j), le calcul du volume du glacier est possible.

Pour des raisons pratiques on appellera dorénavant cette méthode comme ***la méthode de Patterson*** :

Dans la Figure 5.22 nous présentons les résultats de l'application de cette méthode.

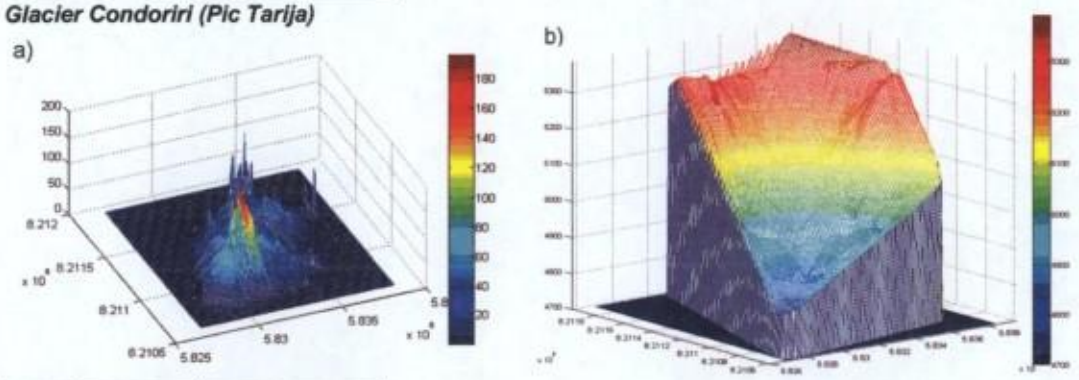
Figure 5.22 : Exemples des résultats de l'application de la méthode de Farinotti

Glacier Charquini



Vol [m³]	*14,060,791.6*
H Moyenne [m]	*37.80*
H Max [m]	*120.68*

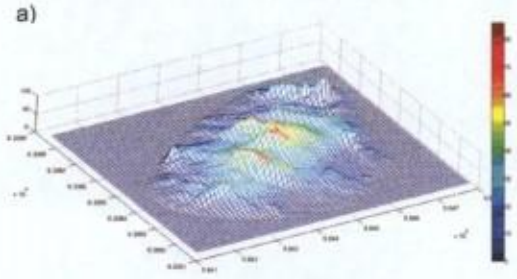
Glacier Condoriri (Pic Tarija)



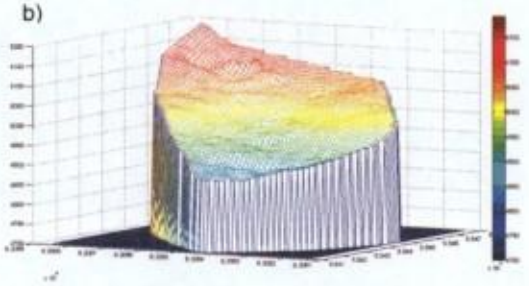
Vol [m³]	*22,386,944.1*
H Moyenne [m]	*25.40*
H Max [m]	*194.97*

Glacier Tuni 3

a)



b)



Vol [m^3]	*5,583,020.2*
H Moyenne [m]	*19.51*
H Max [m]	*85.63*

a)Epaisseurs de glace : Axes: X: Coordonnées Est x 10^5 ; ***Y:*** Coordonnées Nord x 10^6 ; ***Z:*** Epaisseur de glace (H) [m]
b) Bedrock : Axes: X: Coordonnées Est x 10^5 ; ***Y:*** Coordonnées Nord x 10^6 ; ***Z:*** Altitude (masl) [m]

En comparant les résultats montrés aux Figure 5.21 et 5.22 (voir aussi Tableau 5.8) nous remarquons des volumes calculés similaires pour Charquini et mais qui varient de presque 90% pour Condoriri et Tuni. Cet aspect nous montre la variation que l'on peut avoir dans nos estimations selon la méthode employée.

Il ne faut pas oublier que la méthode Farinotti se base sur la reconstruction des épaisseurs à l'aide du bilan de flux. Cependant, les flux glaciaires, qui se concentrent dans la partie centrale du glacier, estiment des valeurs d'épaisseur moyenne pour toute la surface de la vallée glaciaire. Cette méthode est basée sur la dynamique de la glace. Par contre, la méthode de Paterson se base sur les valeurs de la contrainte directrice, sans tenir compte du flux.

Néanmoins nous voulons faire remarquer que ceux deux méthodes peuvent se compléter afin faire une estimation réaliste du volume glaciaire.

Nous observons aussi que les deux méthodes reproduisent la topographie basale de façon similaire, laquelle présente les formes semi-circulaires typiques des vallées glaciaires (cirque glaciaire).

Sans oublier les différences entre les valeurs obtenues, nous considérons que ces deux méthodes sont valables pour reproduire la géométrie et estimer la valeur du stock glaciaire en eau, ce qui est l'objectif de cette analyse.

Aspects à remarquer entre les épaisseurs de glace (H) estimées par la méthode de Farinotti (a) et ceux qui ont été mesurés sur terrain (b)

Dans les Figure 5.23, 5.24 et 5.25 les valeurs mesurées sur le terrain sont comparées à celles qui ont été calculées avec la méthode de Farinotti :

Il existe des différences entre les résultats des épaisseurs (H) calculées pour chacune des méthodes. De plus, il n'est pas possible d'établir un rapport entre elles ou de caractériser leurs différences.

Néanmoins il y a des aspects que nous pouvons analyser sur les différences signalées :

> *Les valeurs de Farinotti maintiennent une tendance presque constante sur une même transversale, due au fait que la méthode calcule des épaisseurs de glace sur base d'un bilan de flux sur toute la surface : les valeurs des point voisins sont dépendantes les unes des autres et donnent cette homogénéité des valeurs.*

Farinotti (2009) remarque que sa méthode reproduit les épaisseurs de la glace avec une déviation moyenne de 25% par rapport aux valeurs mesurées sur terrain.

Le Tableau 5.7 *montre que les moyennes des écarts entre ces deux valeurs est de 28.15 %, valeur qui est proche à l'erreur que Farinotti, prévoit pour la méthode. Ces écarts moyens sont d'environ 34% pour Charquini et Tuni, de 18% pour Condoriri.*

Nous considérons donc que, malgré les différences observées, les deux méthodes donnent une idée de l'ordre de grandeur de l'épaisseur des glaciers, valable pour une estimation du stock glaciaire à des fins de gestion de l'eau.

Tableau 5.7 : Moyenne en pourcentage des différences des valeurs entre les épaisseurs calculées pour la méthode de Farinotti et les mesurés sur terrain

Glacier	Profil	Difference Farinotti - Points Mesurés
Charquini	1	26.87%
	2	41.25%
Condoriri	1	19.50%
	2	19.09%
	3	16.08%
Tuni	1	37.05%
	2	35.87%
	3	29.47%
Moyenne		28.15%

Figure 5.23 : Comparaison des épaisseurs estimées pour la méthode Farinotti et des épaisseurs mesurés sur terrains avec radar (Glacier de Charquini Sud)

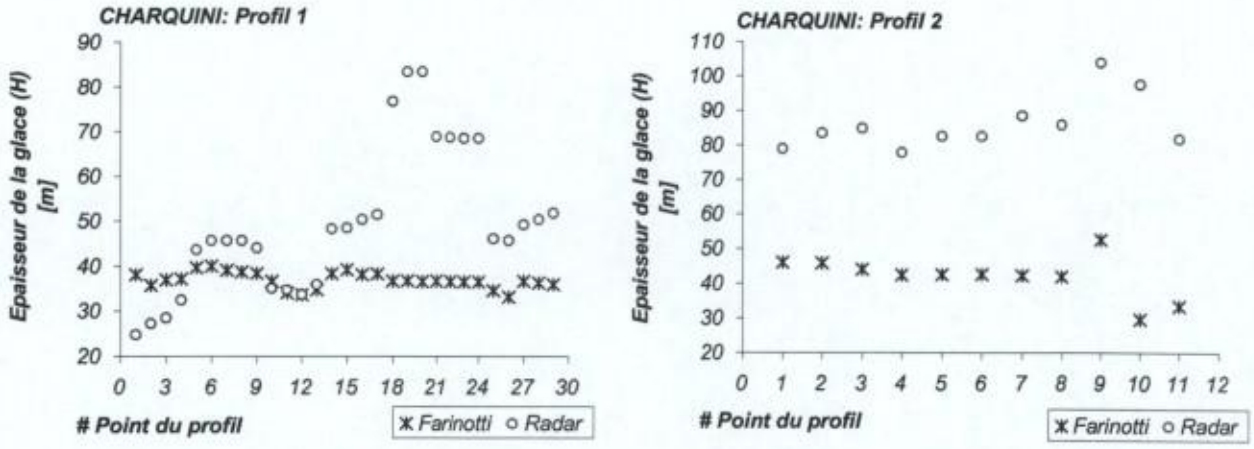


Figure 5.24 : Comparaison des épaisseurs estimées pour la méthode Farinotti et des épaisseurs mesurés sur terrains avec radar (Glacier de Condoriri, Pic Tarija)

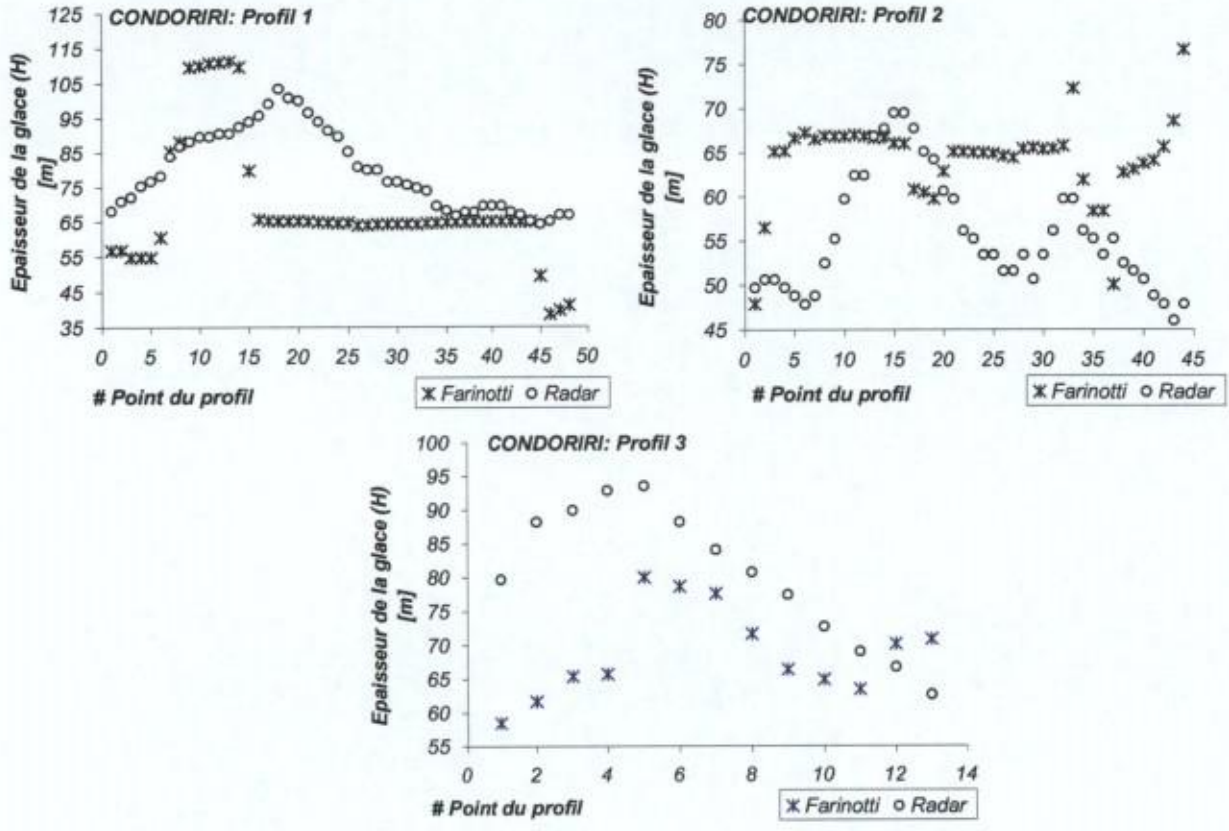
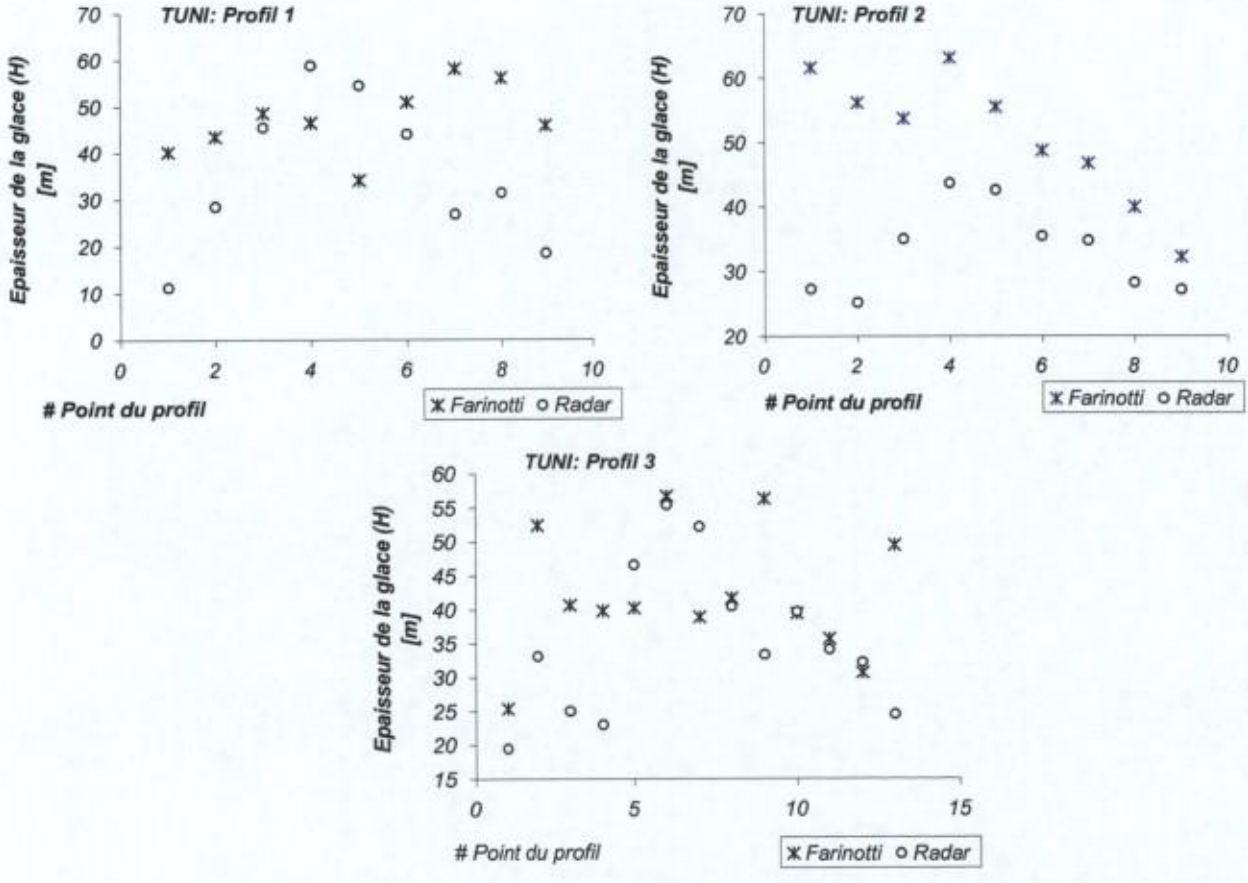


Figure 5.25 : Comparaison des épaisseurs estimées pour la méthode Farinotti et des épaisseurs mesurés sur terrains avec radar (Glacier de Tuni)



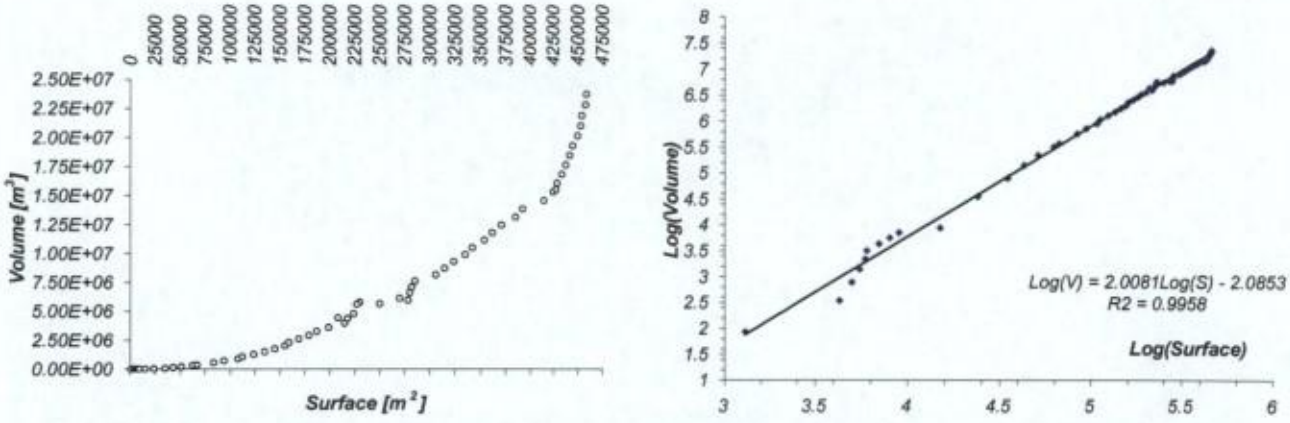
c) Equations surface / volume, v = f(S) - Résultats de l'estimation des réserves glaciaires

L'utilisation de ce type d'équations permet d'estimer le volume à partir de la surface du glacier, mais pas les caractéristiques de la géométrie du glacier. (voir Tableau 5.8). Il n'est donc pas possible de modéliser l'avenir des glaciers avec les résultats obtenus. Par contre, cette méthode offre la possibilité d'estimer les réserves en eau des glaciers pour lesquels il n'existe pas de données géo-référencées mais uniquement des valeurs de surface, situation qui se présente fréquemment en Bolivie.

Dans notre cas, à partir des résultats de la modélisation de Chacaltaya, nous avons reconstruit la courbe (V, S) du retrait du glacier (Figure 5.26). En appliquant un ajustement logarithmique aux valeurs de surface et volume comme Bahr *(1997b;1997a)* et Paterson *(1994)*, nous avons déterminé une équation surface - volume pour Chacaltaya (Figure 5.26).

Nous considérons que cette équation peut être appliquée aux autres glaciers analysés dans la zone d'étude, tout en prenant en compte les aspects remarqués à propos de la représentativité du glacier de Chacaltaya.

Figure 5.26 : Rapport volume – surface de Chacaltaya (1700-2009)



Pour l'estimation du stock glaciaire, nous avons appliqué l'équation trouvée à partir de l'ajustement logarithmique (Figure 5.26) ainsi que les équations proposées par Bahr *(1997a)* et Paterson *(1994)*. Les résultats sont résumés dans le Tableau 5.8, où sont également inclus les volumes glaciaires estimés avec la méthode de Farinotti et ceux calculés sur base des données de terrain.

Tableau 5.8 : Valeurs estimées du stock glaciaire dans les bassins et Systèmes d'eau de La Paz et El Alto

Système	Bassin Versant	Glacier	Stock Glaciar [m^3]				
			V= F(S)			Autres méthodes	
			Eq. Proposé (1)	Paterson (2)	Bahr (3)	Paterson	Farinotti
Achachicala	Milluni	Huayna Potosí Sud 1	85,785.60	947,829.68	521,432.82		
		Huayna Potosí Sud 2	963,492.79	4,170,051.77	2,682,948.36		
		Charquini Sud	9,885,179.26	17,357,285.52	12,984,086.83	14,060,791.60	12,003,108.15
		B. Milluni	**10,934,457.65**	**22,475,166.98**	**16,188,468.02**		
	Choqueyapu	Kuna Tikuta 1	1,930,506.77	6,382,837.27	4,295,601.55		
		Kuna Tikuta 2	2,898,445.08	8,186,902.13	5,656,602.17		
		Wila Mankilisani	1,262,855.28	4,921,705.20	3,222,504.16		
		Chacaltaya	0.00	0.00	0.00		
		B. Choqueyapu	**6,091,807.13**	**19,491,444.60**	**13,174,707.88**		
	Total Syst. Achachicala		**17,026,264.77**	**41,966,611.57**	**29,363,175.89**		
Pampahasi	Hampaturi	Serkhe	598,053.79	3,113,749.46	1,942,436.36		
		Mikhaya	0.00	0.00	0.00		
		B. Hampaturi	**598,053.79**	**3,113,749.46**	**1,942,436.36**		
	Incachaca	**B. Incachaca**	0.00	0.00	0.00		
	Total Syst. Pampahasi		**598,053.79**	**3,113,749.46**	**1,942,436.36**		
El Alto	Condoriri	Condoriri 1 (Lengua de Vaca)	14,608,125.35	22,048,099.86	16,915,348.40		18,474,151.50
		Condoriri 2	327,312.57	2,152,483.61	1,291,386.02		1,676,957.00
		Condoriri 3	13,437,904.15	20,948,812.61	15,985,330.07		19,306,098.80
		Condoriri 4, Pico Tarija, La Ilusión	45,659,252.71	44,312,676.70	36,599,801.39	22,386,944.14	39,508,801.64
		B. Condoriri	**74,032,594.78**	**89,462,072.78**	**70,791,865.87**		**78,966,008.95**
	Tuni	Tuni 1	2,624,456.72	7,703,787.57	5,288,694.43		6,149,818.76
		Tuni 2	4,301,451.46	10,426,438.87	7,390,457.65		8,859,310.09
		Tuni 3	5,065,412.97	11,524,571.01	8,255,748.86	5,583,020.25	10,814,163.08
		B. Tuni	**11,991,321.14**	**29,654,797.45**	**20,934,900.95**		**25,823,291.93**
	Huayna Potosí	Huayna Ouest	39,725,013.88	40,690,419.13	33,306,465.88		
		Saltuni 1	10,231,705.68	17,727,489.37	13,290,629.18		13,347,363.64
		Saltuni 2	221,367.91	1,693,965.92	990,889.68		1,057,466.72
		Saltuni 3	992,337.74	4,246,082.78	2,737,087.50		3,748,770.11
		Saltuni 4	633,278.93	3,224,836.53	2,019,202.54		2,904,638.65
		B. Huayna Potosí	**51,803,704.14**	**67,582,793.72**	**52,344,274.78**		
	Total Syst. El Alto		**137,827,620.06**	**186,699,663.96**	**144,071,041.60**		
	TOTALES La Paz El Alto		**155,451,938.63**	**231,780,025.00**	**175,376,653.85**		

(1) Equation proposée: $Log(V) = 2.0081 * (Log(S) - 2.0853)$

(2) Eq. Paterson (1994): $Log(V) = 1.23 * (Log(S) + 0.31707)$

(3) Eq. Bahr (1997a): $Log(V) = 1.36 * (Log(S) - 0.338235)$

Figure 5.27 : Estimation du stock glaciaire (par glacier)

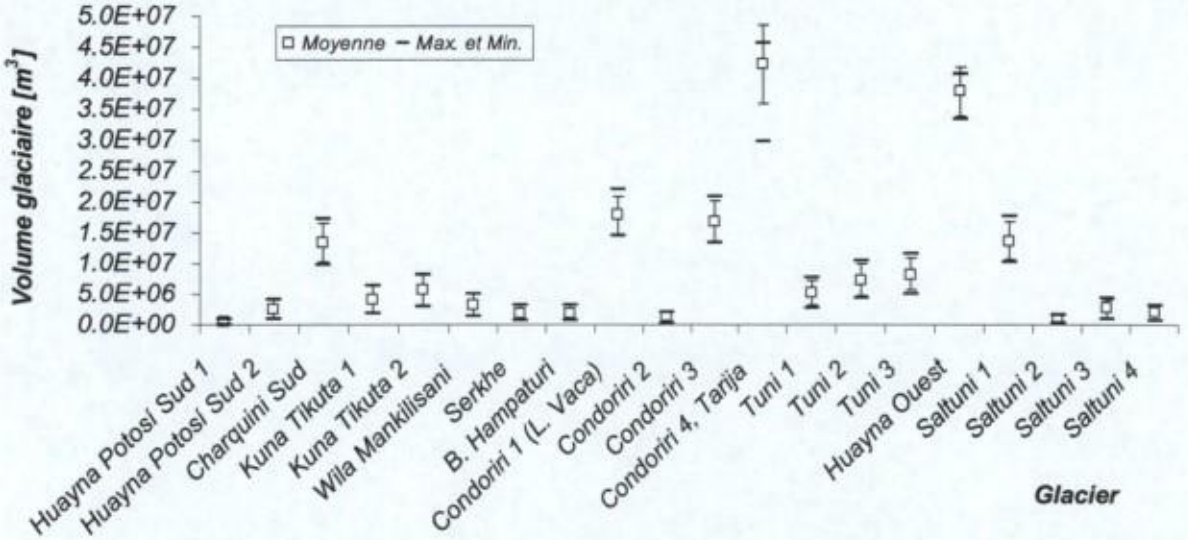
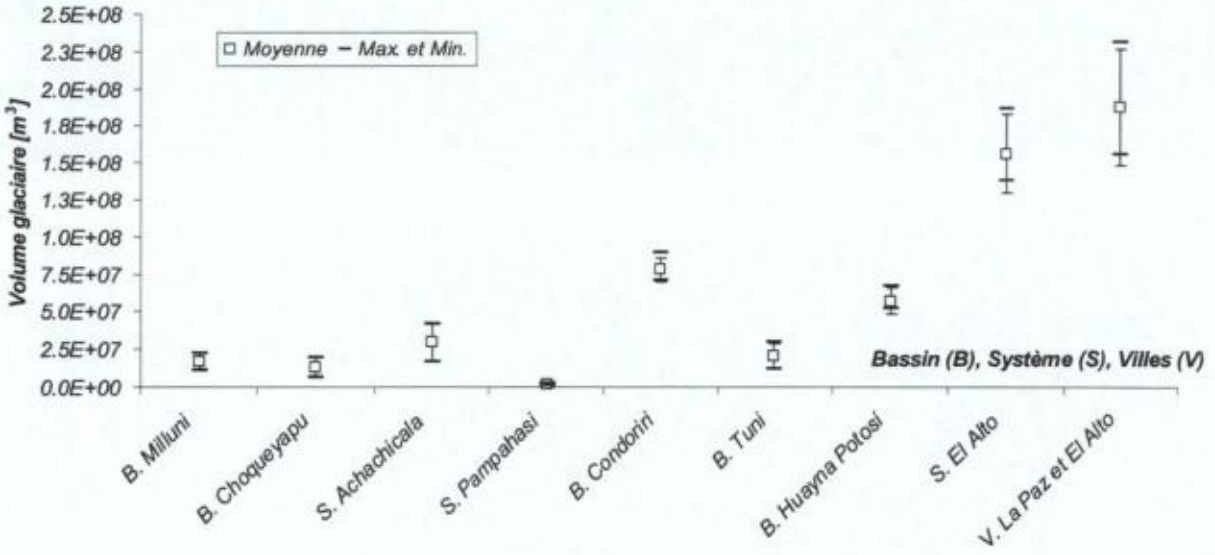


Figure 5.28 : Estimation du stock glaciaire (par bassin, système et total pour les villes de La Paz et El Alto)



D'après les données du Tableau 5.8 (qui sont reprises dans les Figure 5.27 et 5.28), les valeurs estimées par les trois méthodes proposées présentent parfois des différences notables comme c'est le cas des valeurs du glacier Condoriri 4 (le plus grand des bassins sources). Par contre, pour Charquini Sud et Tuni, ces valeurs restent relativement proches.

Les différences entre les valeurs estimées sont liées aux différences de concept des méthodes appliquées et à leur précision. Dans cette optique, les analyses suivantes peuvent être effectuées :

a) La mesure des épaisseurs de glace sur terrain, implique un travail exhaustif et de détail, ce qui n'est pas toujours réalisable. D'autre part, la qualité des résultats et de leur précision, vont au-delà de l'exhaustivité du travail de terrain, quand le temps passé entre l'émission et la réception de l'impulsion radar ne peut pas être déterminé clairement (ce temps est la base du calcul des épaisseurs).

Nous ne pouvons pas directement interpoler et extrapoler les épaisseurs obtenues au moyen du radar, nous devons alors utiliser des méthodes comme celle de Paterson pour obtenir le volume du glacier.

L'expérience avait pour but l'obtention du MNT de surface et basal ainsi que des volumes de 3 glaciers sur 19. Les MNT's calculés présentent des incertitudes suite à l'estimation des valeurs des épaisseurs pour les zones non accessibles et aussi du fait de la qualité du signal obtenu à Charquini et à Condoriri. Les MNT's obtenus peuvent servir à la modélisation du retrait du glacier.

b) La méthode de Farinotti qui se base sur la physique des glaciers, a besoin d'un MNT de surface pour démarrer. Ceci n'est pas toujours évident à trouver ou à faire, parce qu'une restitution des surfaces des glaciers de bonne précision nécessite la photogrammétrie aérienne ***(Soruco A. 2008)*** *et des photos récentes. La planification et les vols rendent la photogrammétrie très coûteuse et sa disponibilité n'est pas non plus évidente.*

Cette méthode a une précision de 25% selon son auteur ***(Farinotti D. et al. 2009)****. Toutefois les différences découvertes entre les épaisseurs estimées et les épaisseurs mesurées sur le terrain sont d'un ordre de grandeur supérieur à la précision signalée par l'auteur. 12 des 19 MNT's et volumes des glaciers ont été obtenus. Les MNT's sont utiles à la modélisation du recul des glaciers.*

c) La méthode d'estimation de volume à travers des expressions surface / volume s'avère la plus simple au niveau des données puisqu'elle n'a besoin que des valeurs de surface qui peuvent être calculées avec des images satellitaires accessibles en Bolivie.

Il existe cependant des incertitudes liées aux données modélisées qui ne concerne qu'un seul glacier. Bien que ce glacier puisse être représentatif de la zone d'étude, il faut être prudent avec son utilisation.

Les réserves de tous les glaciers (19) ont été calculées. Ces valeurs constituent une référence des réserves en eau que l'on trouve dans les glaciers. Le résultat est une valeur, il n'est donc pas possible d'en faire des projections de modélisation.

Chacune des méthodes employées présente des inconvénients, mais aussi des avantages. Nous avons exploré les méthodes souhaitables pour estimer les réserves glaciaires sur base des données obtenues et mesurées. Pour la quantification des ressources en eau qui proviennent des glaciers (Tableau 5.9), les résultats retenus sont les moyennes calculées à partir des approches effectuées, en remarquant l'existence d'une incertitude entre 20 et 25% (voir Tableau 5.8, Figure 5.27 et Figure 5.28).

Si ceux-ci ne sont pas définitifs, ni tout à fait exacts, ils constituent les toutes premières références sur les réserves glaciaires disponibles en Bolivie et surtout sur les bassins sources de La Paz et El Alto.
L'analyse devra être prudente car il faudra tenir compte de l'écart des résultats obtenus. Néanmoins, il existe déjà un point de repère pour la planification de la gestion par rapport aux réserves glaciaires.

Les résultats des calculs des réserves en eau de la totalité des glaciers (volume) des bassins sources de La Paz et d'El Alto sont résumés dans le Tableau 5.9. La réserve en eau est calculée avec une densité de la glace de 890 kg m^{-3} et une densité de l'eau de 1000 kg m^{-3}.

Tableau 5.9 : Volumes d'eau estimés, stockés sans les glaciers sources des villes de La Paz et El Alto

Système	Bassin Versant	Glacier	Stock en eau [m^3]	
			Moyenne	(+/-) Ecart type
Achachicala	Milluni	Huayna Potosí Sud 1	461,330.94	383,616.98
		Huayna Potosí Sud 2	2,318,892.90	1,428,166.92
		Charquini Sud	11,799,700.34	2,456,557.92
		B. Milluni	**14,579,924.18**	**5,142,464.63**
	Choqueyapu	Kuna Tikuta 1	3,740,653.86	1,982,572.74
		Kuna Tikuta 2	4,966,778.31	2,354,091.40
		Wila Mankillsani	2,790,762.51	1,629,562.65
		Chacaltaya		
		B. Choqueyapu	**11,498,194.68**	**5,966,086.86**
	Total Syst. Achachicala		**26,078,118.86**	**11,098,665.57**
Pampahasi	Hampaturi	Serkhe	1,677,424.42	1,120,367.29
		Mikhaya		
		B. Hampaturi	**1,677,424.42**	**1,120,367.29**
	Incachaca	**B. Incachaca**		
	Total Syst. Pampahasi		**1,677,424.42**	**1,120,367.29**
El Alto	Condoriri	Condoriri 1 (Lengua de Vaca)	16,030,173.84	2,781,051.45
		Condoriri 2	1,212,210.97	689,319.54
		Condoriri 3	15,503,387.40	2,992,891.11
		Condoriri 4, Pico Tarija, La Ilusión	33,547,210.83	8,278,062.97
		B. Condoriri	**66,292,983.04**	**7,259,868.66**
	Tuni	Tuni 1	4,843,103.54	1,893,473.19
		Tuni 2	6,892,528.92	2,321,719.11
		Tuni 3	7,341,239.08	2,615,757.78
		B. Tuni	**19,076,871.54**	**6,787,394.39**
	Huayna Potosí	Huayna Ouest	33,737,496.67	3,572,078.53
		Saltuni 1	12,147,874.30	2,744,674.47
		Saltuni 2	881,921.08	536,691.02
		Saltuni 3	2,608,651.88	1,278,857.44
		Saltuni 4	1,953,985.35	1,032,045.32
		B. Huayna Potosí	**51,329,929.29**	**7,972,700.81**
	Total Syst. El Alto		**136,699,783.86**	**23,672,038.22**
	TOTALES La Paz El Alto		**164,455,327.15**	**35,235,292.44**

Retrait glaciaire et leur possibles impacts sur la disponibilité d'eau

En assumant l'hypothèse du processus de retrait glaciaire comme irréversible et aboutissant à la disparition des glaciers boliviens, la simulation du recul se fera en employant le modèle calibré sur le glacier de Chacaltaya.

Le retrait des glaciers est lié aux conditions climatiques ***(Rabatel A. 2005)*** et par conséquent difficile à prédire. De plus, chaque glacier a une réponse particulière face aux effets climatiques selon sa taille, sa pente, son épaisseur, son exposition, etc. Pour cette raison, un scénario de retrait similaire pour tous les glaciers est considéré dans la modélisation, avec une ELA régionale moyenne.

Bien que cette méthode ne soit pas précise, elle nous donne une approximation de l'impact de la diminution de l'apport en eau pour les bassins sources.

Pour déterminer cette ELA régionale, nous avons fait une analyse des valeurs de bilans de masse glaciologiques enregistrées par l'IRD depuis 1991 sur les glaciers Chacaltaya et Zongo et depuis 2001 sur Charquini. (Figure 5.29).

Dans la Figure 5.29, nous présentons la variation des valeurs d'ELA, que les glaciers ont eue pendant les derniers 10 à 19 ans. D'après ces données, nous remarquons que l'altitude de 5300 masl peut être considérée comme une valeur moyenne de référence pour les trois glaciers et qu'il y a un écart de plus ou moins 100 m entre toutes les valeurs moyennes et la plupart des valeurs historiques. Nous prenons comme référence une valeur de 5300 ± 100 m a.s.l.

Pour la modélisation, nous nous baserons également sur les géométries calculées avec la méthode de Farinotti (12 glaciers).

Tout d'abord, nous déterminons les volumes de fonte actuelle de chaque glacier (perte en masse de glace), que nous assumons comme l'apport actuel en eau des glaciers vers le bassin versant (valeur de base).

Nous modélisons le retrait glaciaire jusqu'en 2026 avec une ELA constante dans le temps. Trois expériences sont menées avec des valeurs d'ELA différentes : 4200, 4300 et 4400 masl.

Figure 5.29 : Détermination des possibles valeurs d'ELA pour une modélisation régionale

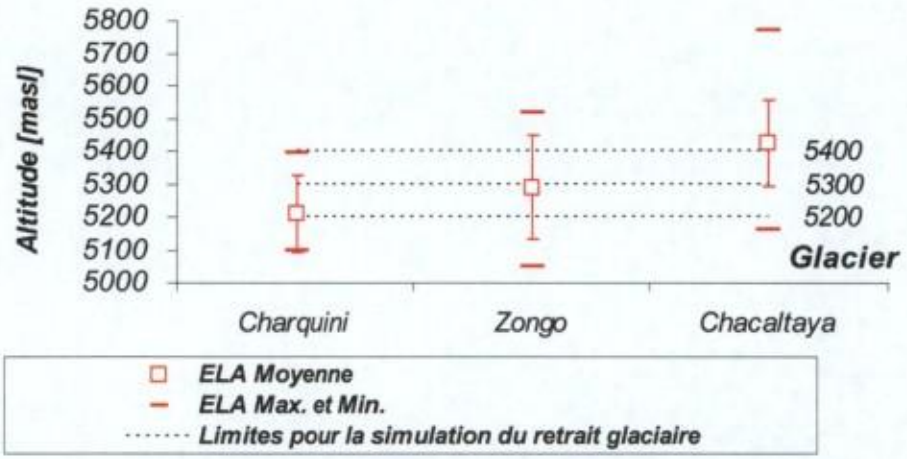
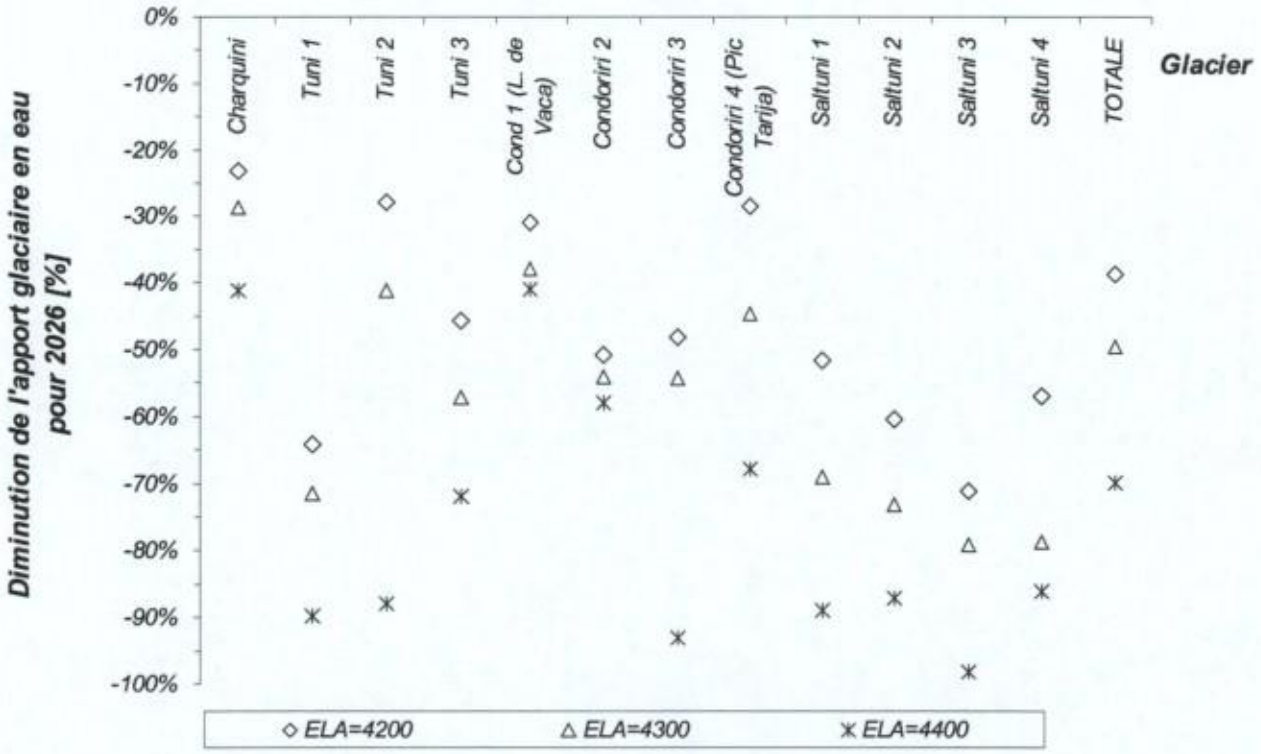


Figure 5.30 : Estimation de la diminution de l'apport glaciaire en eau pour l'année 2026



La Figure 5.30, montre les valeurs possibles de diminution de l'apport glaciaire en eau pour les trois différentes valeurs d'ELA choisies. On remarque que, malgré l'ELA constante, la diminution de l'apport glaciaire n'est pas homogène, dû à la particularité de chaque glacier ; caractéristiques géométriques, pente, volume de départ.

Au vu de ces résultats, nous observons qu'il est possible que la diminution de l'apport en eau provenant des glaciers d'ici 2026 soit en moyenne de -50% (entre -38% et -70%).

Sachant que l'apport glaciaire est estimé à 8-11% de l'apport total au bassin versant (cas d'El Alto, Chapitre 4), nous pouvons conclure à la possibilité que cet apport total soit diminué de 4 à 5%. Ce résultat est à prendre en compte pour la planification de l'eau du point de vue de la diminution de disponibilité d'eau.

5.4 Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons essayé de répondre aux deux questions suivantes :

1) Quelle est la réserve glaciaire dans les bassins sources de La Paz et d'El Alto ?

Nous avons utilisé trois méthodes pour estimer le stock en eau des glaciers et des bassins sources :

1. Utilisation de la méthode de Farinotti pour mesurer les épaisseurs de glace, à partir des concepts de la physique des glaciers, qui forment la base du modèle de ce chapitre.
2. Relèvement direct des épaisseurs de la glace avec un radar de pénétration. Les épaisseurs de trois glaciers des bassins versants ont été mesurées. Le calcul du stock glaciaire a été fait par la méthode nommé de Paterson.
3. Estimation du volume glaciaire avec l'emploi d'une expression surface/volume. Nous avons employé deux équations proposées dans la bibliographie ainsi qu'une autre équation élaborée dans le cadre de cette thèse à partir des résultats de la modélisation du recul du glacier de Chacaltaya.

Les résultats obtenus à partir de chaque méthode sont présentés dans le Tableau 5.8.

En dépit des différences existant entre ces trois méthodes, tant du point de vue conceptuel que des résultats, il est possible de réaliser une estimation du stock glaciaire, à interpréter toutefois avec prudence.

Les résultats constituent une référence qui devra considérer les marges d'erreurs probables (estimées entre 20 et 25%), vu les différences des résultats obtenus avec chaque méthode.

Malgré les différences détectées, les résultats obtenus s'avèrent positifs pour la gestion de l'eau puisqu'il s'agit de la toute première estimation du stock glaciaire est réalisée en Bolivie

2) Quel est le rôle des glaciers dans la gestion de l'eau potable de La Paz et d'El Alto ?

Les estimations de l'apport glaciaire ajoutées à celles du stock en eau des glaciers ainsi qu'aux résultats du chapitre 4 (influence de l'apport glaciaire) constituent un point de repère important pour la planification de la gestion de l'eau par rapport à l'importance de l'apport des glaciers, de ses réserves et de son avenir.

L'ensemble des résultats offrent une toute première référence des réserves glaciaires et des années probables de disparition des glaciers qui doivent être interprétées dans leur contexte plus que comme des valeurs isolées.

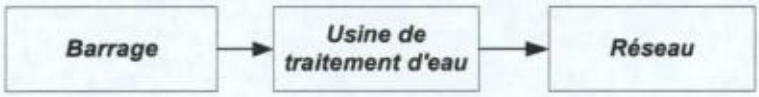
En généralisant les résultats obtenus sur la modélisation de 12 glaciers et en considérant les résultats du chapitre 4, nous notons que l'importance de l'apport glaciaire varie est selon les systèmes. Pour le système d'El Alto, cet apport glaciaire constitue 8 à 11% de l'apport des bassins sources. Cette contribution est considérée comme significative alors que pour les autres systèmes, l'apport glaciaire n'est pas aussi déterminant. Les réserves en eau glaciaire d'El Alto pourraient atteindre jusqu'à 166 hm^3, ce qui est équivalent à l'apport total du bassin versant durant 4 à 6 ans.

Toutefois, le recul actuel et futur des glaciers pourrait conduire à une diminution moyenne de l'apport glaciaire allant jusqu'à 50% en 2026. Par rapport à l'influence de l'apport glaciaire sur l'apport total des bassins versants pour le système d'El Alto, celle-ci pourrait diminuer jusqu'à environ 4%. Par conséquent, les gestionnaires de l'eau devront prendre en compte cette évolution et modifier leurs techniques de gestion afin de minimiser l'impact du changement climatique sur leurs ressources hydrologiques.

6 CAPACITÉ TECHNIQUE DE MOBILISATION DE L'EAU

La capacité technique de mobilisation de l'eau est un aspect important de la gestion de l'eau comme nous l'avons mentionné dans le chapitre 4 ((Figure 4.1) « Architecture du bassin versant »). De même, elle peut jouer un rôle déterminant dans la réponse hydrologique d'un bassin comme elle le fait dans notre cas d'étude.

Ce chapitre traite de la capacité technique de mobilisation de l'eau, et plus particulièrement de son efficacité. Les pertes sont évaluées au cours des différentes étapes durant lesquelles l'eau circule : de la source (barrages) jusqu'à la distribution (réseau) en passant par son traitement (usine de traitement de l'eau).



La quantification des pertes est importante pour la gestion, puisque la demande du réseau, et les pertes qui existent dans le processus de potabilisation, déterminent la quantité d'eau à prélever du bassin versant.

L'analyse effectuée dans ce chapitre se base sur deux interrogations :

Combien de litres d'eau a-t-on besoin de prélever des sources pour qu'un litre d'eau arrive aux robinets?
Quelle est l'importance et l'origine des pertes enregistrées dans les systèmes ?

6.1 Barrages

Capacités

Tout d'abord, rappelons les données sur les capacités des barrages qui fournissent l'eau des systèmes de La Paz et El Alto.

Tableau 6.1 : Capacité des barrages

	Barrage				
Description	*Tuni*	*Milluni*	*Incachaca*	*Hampaturi*	*Ajuankhota*
Volume effectif [hm^3]	21.5	10.8	4.2	3.2	3.5
Volume non profitable [hm^3]	9.10	1.39	0.3	0.06	0.1
Volume total [hm^3]	30.60	12.19	4.5	3.26	3.6
Surface du lac du barrage: [km^2]	2.45	2.44	0.71	0.41	0.43

Source : Sur base des données d'EPSAS

Le volume effectif nous intéresse pour les calculs, puisqu'il s'agit du volume dont on tient compte dans la gestion de l'eau et sa planification d'utilisation.

Capacité de régulation

Le concept du temps de résidence est utilisé pour interpréter la capacité de régulation des barrages.

$$(1) \quad Tres = 12 * \frac{Vef}{Q}$$

Tres: *Temps de résidence [mois]*
Vef: *Volume effectif du barrage [m^3]*
Q: *Débit d'apport du bassin [m^3/an]*

Le temps de résidence est le temps durant lequel une molécule d'eau demeure au sein d'un océan, d'un glacier, d'un lac, d'une nappe d'eau souterraine, d'une rivière ou encore au sein des cellules des êtres vivants. Ce temps peut être très court (quelques heures dans le cas des plantes), mais peut aussi atteindre quelques milliers d'années dans le cas d'un glacier.

En ce qui concerne les rivières, les molécules d'eau y demeurent seulement quelques jours avant de rejoindre la mer, mais restent stockées plusieurs centaines d'années dans les nappes d'eau souterraine, avant de rejoindre la surface ***(ONEMA 2008)***.

Pour cette thèse, le concept de « temps de résidence » de l'eau se réfère au temps moyen durant lequel une molécule d'eau séjourne dans le barrage. C'est le laps de temps calculé entre le moment où elle arrive dans le barrage (à partir d'un affluent) et le moment où elle en ressort (exutoire du barrage). ***(USDI 1987)***.

Etablissons une relation entre le temps de résidence du barrage ***(Tres)*** avec le débit d'eau qui doit être prélevé pour couvrir les besoin en eau de la population ***(Qbes)***, et le temps de résidence nécessaire pour couvrir ce besoin ***(Tbes)*** .

De façon similaire à l'équation (1) on obtient :

$$(2) \quad Tbes = 12 * \frac{V}{Qbes}$$

Tbes: Temps de résidence indispensable pour couvrir les besoins en eau de la population [mois]

Qbes: Débit à prélever du barrage pour répondre aux besoins en eau de la population [m^3/an]

A partir de ces deux équations, nous proposons un critère qui sert à déterminer la capacité de régulation du barrage et à contribuer aux décisions relatives à l'opération des barrages.

*Si le temps de résidence **(Tres)** est inférieur au temps de résidence de la demande en eau **(Tbes)**, le débit provenant du bassin versant s'avère suffisant pour couvrir les besoins en eau de la population. Par contre, si ce n'est pas le cas, il faudra considérer le volume d'eau qui correspond à la différence entre **Q** et **Qbes** du stock du barrage (situation de déficit d'eau).*

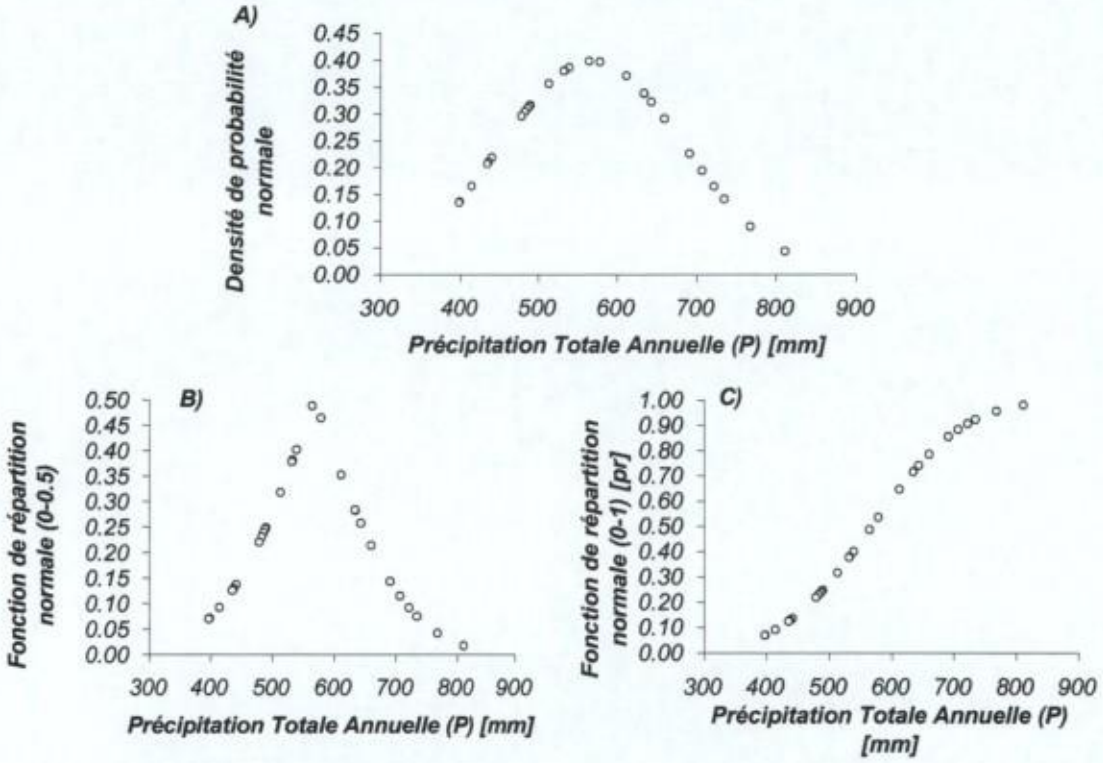
*La différence de temps entre **Tres** et **Tbes** correspond au temps que l'opérateur du barrage devra prévoir pour réguler l'eau, et vérifier si son stock est suffisant pour couvrir le déficit en eau.*

Pour l'application de cette idée, on estime la disponibilité probable des ressources des bassins versants associée à une probabilité d'occurrence :

*Les valeurs de la précipitation totale annuelle suivent une loi normale (Figure 6.1). En appliquant la fonction de répartition de probabilités, il est possible d'associer chaque valeur de la précipitation **(P)** à une valeur de probabilité **(pr)***

A partir des précipitations de chaque bassin associées à une valeur de probabilité ***(Ppr)*** (nous prenons comme référence les valeurs de la fonction de répartition ***(pr)*** de la Figure 6.1 C) nous calculons les valeurs de l'apport annuel du bassin versant ***(Epr)***. (Tableau 6.2)

Figure 6.1 : Probabilité associée à la précipitation (Ex. Station Alto Achachicala)



Application de la fonction normale de répartition de probabilités aux valeurs de précipitation de la station Alto Achachicala de SENAMHI (1980-2008)

Tableau 6.2 : Disponibilité des ressources pour chaque bassin

Bassins Tuni, Condoriri y Huayna Potosi

Probalité associé (pr)	Ppr [mm]	Epr [mm/Km²]
90%	743.23	445.94
75%	681.50	408.90
50%	616.00	369.60
25%	551.17	330.70
10%	487.79	292.67

Bassin Milluni

Probalité associé (pr)	Ppr [mm]	Epr [mm/Km²]
90%	743.23	423.64
75%	681.50	388.46
50%	616.00	351.12
25%	551.17	314.17
10%	487.79	278.04

Bassin Hampaturi

Probalité associé (pr)	Ppr [mm]	Epr [mm/Km²]
90%	679.00	435.03
75%	630.00	403.64
50%	575.00	368.40
25%	520.00	333.16
10%	472.00	302.41

Bassin Incachaca

Probalité associé (pr)	Ppr [mm]	Epr [mm/Km²]
90%	679.00	285.18
75%	630.00	264.60
50%	575.00	241.50
25%	520.00	218.40
10%	472.00	198.24

Bassins

Probalité associé (pr)	Qpr [hm³/an]			
	Tuni	Milluni	Hampaturi	Incachaca
90%	38.85	25.24	25.92	9.62
75%	35.62	23.14	24.05	8.93
50%	32.20	20.92	21.95	8.15
25%	28.81	18.72	19.85	7.37
10%	25.49	16.57	18.02	6.69

(P: Précipitation, E: Ecoulement unitaire Q: Volume annuel d'eau disponible)

Ces tableaux sont aussi un outil qui peut servir à la gestion de l'eau des villes de La Paz et El Alto, puisqu'ils indiquent les capacités probables des bassins sources.

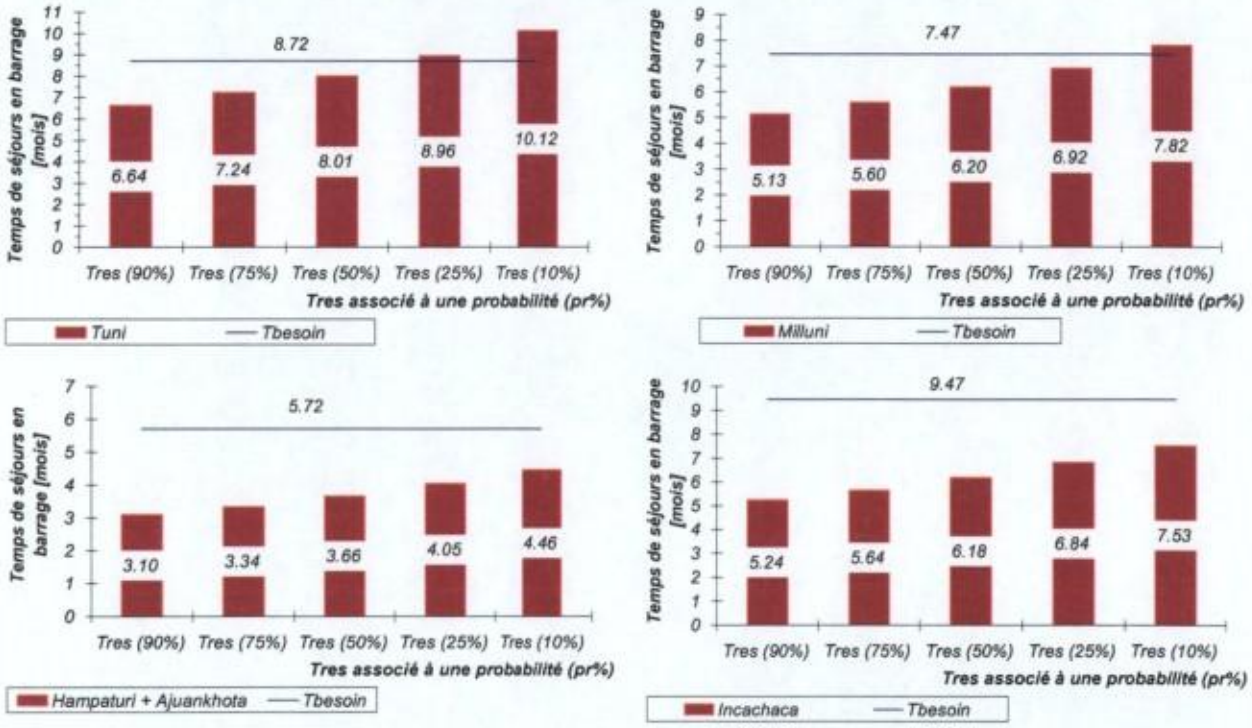
Afin de comparer les différents barrages et pour mettre en relation les besoins en eau des villes, nous avons estimé le volume d'eau théorique nécessaire à prélever des barrages pour satisfaire la demande en eau de la population ***(Qbes).***

Tableau 6.3 : Besoin théorique en eau qui devrait être envoyée aux usines de traitement

Barrage:	Tuni	Milluni	Hampaturi y Ajuankhota	Incachaca
Usine de traitement:	El Alto	Achachicala	Pampahasi	
Besoin: [m^3/an]:	29.59	17.35	14.07	5.32

La Figure 6.2 indique les temps de résidence qui correspondent à une valeur de l'apport du bassin versant ***(Qpr)*** associé à une probabilité ***(pr)***, identifiée par la variable: ***Tres (pr%)*** (barres rouges), et le temps de résidence nécessaire pour répondre aux besoins en eau de la population ***Tbes*** (ligne bleue).

Figure 6.2 : Barrages de Tuni, Milluni, Hampaturi et Incachaca, Tres (pr %), Tbes



Dans l'exemple d'El Alto (barrage de Tuni), nous remarquons que la capacité de régulation est très proche des besoins de temps de résidence de la demande en eau. Nous observons également qu'au cours des années sèches (Tres=10%) ou semi-sèches (Tres =25%), les quantités d'eau provenant du bassin versant ne seront pas suffisantes pour couvrir la demande de la population et il sera nécessaire d'utiliser le stock du barrage durant 1.4 et 0.24 mois (Figure 6.2, *barrage Tuni, Tres-Tbes)*, respectivement.

Le concept de temps de résidence suggère une échelle de temps réelle, qui donne une idée du temps de régulation nécessaire pour affronter le problème de la disponibilité d'eau dans la régulation des barrages.

La Figure 6.2 offre un diagnostic de la situation des barrages concernant leur capacité de régulation des débits par rapport à la demande, où le barrage de Tuni présente une capacité de régulation qui arrive à sa fin.

En considérant une année des apports avec une probabilité associée ***(pr)*** de 50% comme année des apports moyens, nous constatons que la marge de capacité de régulation, par rapport au temps de régulation requis pour la demande, est inférieure à un mois (8.72-8.01=0.70 mois)

Pour une année sèche (pr=10%), la capacité de régulation de Milluni serait dépassée mais dans une moindre mesure (moins d'un mois). Les capacités de régulation des autres barrages ne présentent pas de problèmes par rapport au temps de résidence requis par la demande.

Pertes entre le barrage et l'usine de traitement des eaux

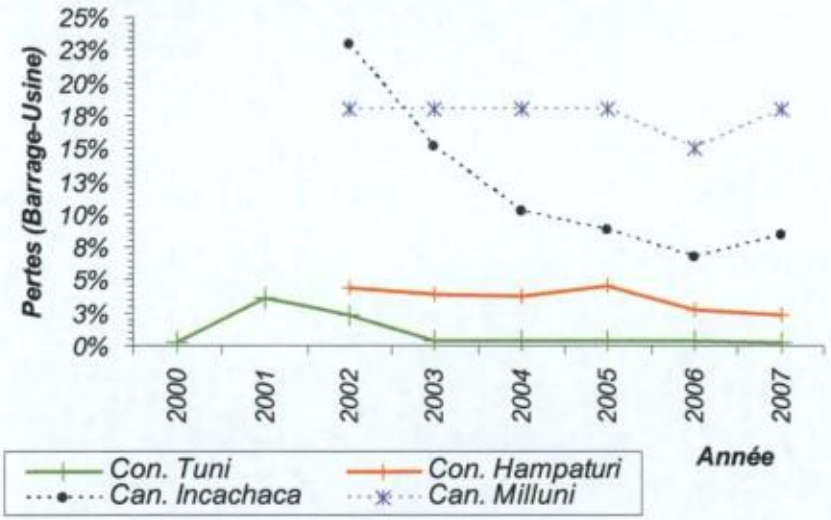
Les pertes entre le barrage et l'usine de traitement d'eau sont des fuites présentes dans les canalisations et conduites (regroupées sous le nom d'adductions) qui les relient. Nous avons évalué ces pertes en calculant le bilan entre l'eau qui a été envoyée du barrage et celle qui est arrivée à l'usine de traitement. Il existe aussi des stations de jaugeage dans tous les barrages et des usines de traitements où des données ont été relevées pour évaluer les pertes des adductions.

Le Tableau 6.4 indique les pertes calculées aux adductions des trois systèmes d'eau des villes de La Paz et El Alto, (Quatre adductions : Tuni pour le système El Alto, Hampaturi et Incachaca pour Pampahasi et Milluni pour Achachicala).

Tableau 6.4 : Pertes dans les adductions

	Type d'adduction			
	Conduite		Canal	
	Tuni	Hampaturi	Incachaca	Milluni
2000	0.21%			
2001	3.60%			
2002	2.38%	4.47%	22.98%	18.00%
2003	0.35%	3.83%	15.18%	18.00%
2004	0.41%	3.80%	10.26%	18.00%
2005	0.42%	4.48%	8.86%	18.00%
2006	0.43%	2.70%	6.77%	15.00%
2007	0.26%	2.30%	8.43%	18.00%
Moyenne	1.01%	3.59%	12.08%	17.50%

Figure 6.3 : Pertes entre les barrages et les usines



Dans la Figure 6.3 qui reprend les mêmes données que le Tableau 6.4, nous remarquons que les conduites de Hampaturi présentent des pertes plus importantes que celles de Tuni, dû au fait que ce dernier a eu la priorité dans son entretien, pour diminuer les pertes du système d'El Alto, ***(Quisbert T. EPSAS 2007, Communication personnelle)***. Il faut remarquer également que la conduite d'adduction de Tuni est enterrée, alors que celle de Hampaturi est exposée à l'air libre.

En ce qui concerne les canaux, la situation est similaire. Alors qu'Incachaca avait initialement des pertes supérieures à celles de Milluni, actuellement, grâce à un entretien plus régulier, les pertes ont diminué de presque 15%. Il est à noter que précédemment, l'entretien de Milluni était assuré par l'entreprise d'électricité qui utilisait cette eau. Cependant, depuis 2007, c'est EPSAS qui s'en charge. De nos jours, l'entreprise a planifié d'assurer un entretien continu de ce canal, comme c'est le cas de celui d'Incachaca.

Les pertes des conduites de Tuni et des canaux de Milluni influencent celles des systèmes d'El Alto et Achachicala. Les pertes de Pampahasi résultent de la combinaison de celles de Hampaturi et Incachaca. Dans les Tableaux 6.5 : nous présentons les bilans d'eau qui ont servi pour calculer les pertes aux adductions, ainsi que les pertes totales des différents systèmes.

Tableaux 6.5 : Bilan d'eau du barrage à l'usine de traitement [Hm^3/an]

El Alto

Année	Tuni	En usine	Pertes	% Pertes
2000	26.90	26.85	0.06	0.21%
2001	29.85	28.77	1.08	3.60%
2002	30.29	29.57	0.72	2.38%
2003	30.19	30.09	0.10	0.35%
2004	30.17	30.05	0.12	0.41%
2005	29.05	28.93	0.12	0.42%
2006	30.02	29.89	0.13	0.43%
2007	29.87	29.80	0.08	0.26%
				1.01%

Pampahasi

Année	Hampaturi	Incachaca	Totale	En usine	Pertes	% Pertes
2000	12.60	7.15	19.74	18.01	1.73	8.77%
2001	15.40	3.55	18.95	17.47	1.48	7.81%
2002	14.45	5.56	20.01	18.21	1.80	8.98%
2003	13.74	4.61	18.34	17.31	1.03	5.61%
2004	13.68	5.49	19.17	18.25	0.92	4.81%
2005	14.60	4.83	19.43	18.40	1.03	5.28%
2006	14.76	5.14	19.89	18.76	1.14	5.72%
2007	15.07	4.62	19.68	19.32	0.36	1.85%
						6.10%

Achachicala

Année	Milluni	Rivière Choqueyapu	Totale	En usine	Pertes	% Pertes
2000	14.89	6.40	21.29	17.79	3.50	16.44%
2001	21.09	0.05	21.14	17.18	3.96	18.73%
2002	20.94	0.86	21.80	17.97	3.83	17.56%
2003	18.32	4.71	23.03	18.85	4.18	18.16%
2004	16.66	4.26	20.93	17.06	3.87	18.50%
2005	14.84	4.63	19.48	16.54	2.93	15.06%
2006	16.36	4.03	20.39	16.81	3.58	17.56%
2007	16.29	4.45	20.74	17.12	3.62	17.44%
						17.43%

Notons que dans le cas d'Achachicala, nous prenons en compte les prélèvements d'eau venant de la rivière Choqueyapu, dont les pertes sont négligeables car le prélèvement a lieu à 200 mètres de l'usine de traitement d'eau. (Données EPSAS)

6.2 Usines de traitement des eaux

Pertes des usines de traitement des eaux

Les pertes d'eau aux usines de traitement correspondent à la différence entre le volume d'eau qui entre dans l'usine et le volume qui en sort.

Ces pertes proviennent essentiellement du nettoyage des étangs de sédimentation et des filtres d'eau. Cependant, l'eau employée pour nettoyer les filtres est recyclée dans le processus de traitement. Les pertes dues aux nettoyages des filtres sont donc négligeables. Cette procédure de recyclage de l'eau de nettoyage des filtres a été mise en œuvre en 2001 (Figure 6.3 :).

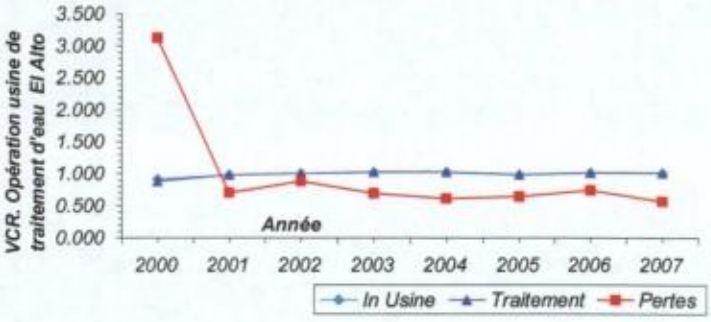
Les pertes enregistrées dans le processus de traitement des eaux sont donc principalement dues à l'eau qui utilisée pour le nettoyage des étangs de sédimentation. Á Pampahasi et El Alto, le concept de recyclage a été aussi initié. Par contre à Achachicala, où se trouvent les plus grands étangs de sédimentation, le recyclage n'est pas possible: la qualité des eaux de la source Milluni nécessite des étangs de sédimentation 6 et 15 fois plus étendus que ceux des usines de Pampahasi et d'El Alto, respectivement. Le recyclage des eaux s'avère donc plus compliqué et les pertes relatives sont presque inévitables.

Tableaux 6.6 : Pertes d'eau des usines de traitement [m^3]

Figure 6.4 : Pertes d'eau des usines de traitement

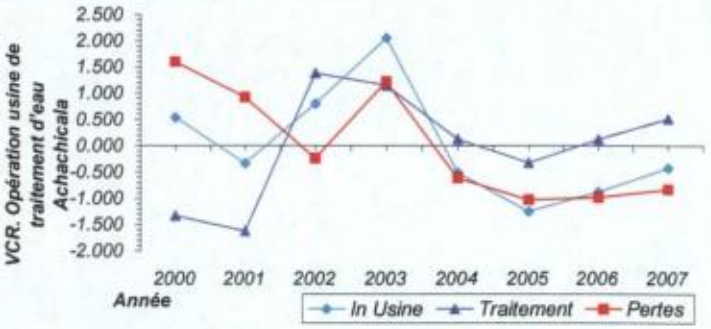
El Alto

Année	In Usine	Traitement	Pertes	% Pertes
2000	26,848,231	25,553,722	1,294,509	4.82%
2001	28,771,067	28,479,027	292,040	1.02%
2002	29,566,746	29,199,293	367,452	1.24%
2003	30,085,270	29,795,801	289,470	0.96%
2004	30,046,863	29,791,903	254,960	0.85%
2005	28,933,691	28,664,560	269,132	0.93%
2006	29,891,928	29,582,190	309,738	1.04%
2007	29,795,542	29,556,675	238,867	0.80%
Moyenne	29,242,417	28,827,896	414,521	1.46%
ET	1,014,898	1,321,588	334,602	1.28%



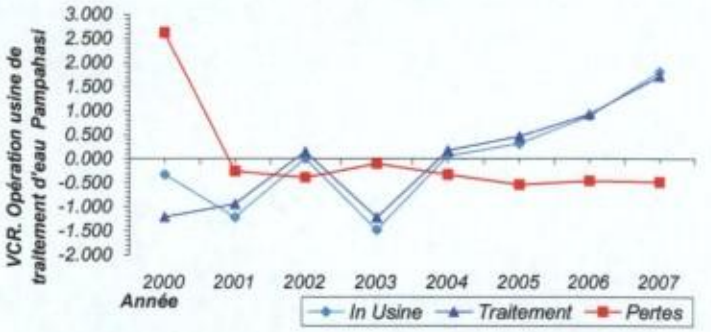
Achachicala

Année	In Usine	Traitement	Pertes	% Pertes
2000	17,789,855	15,116,882	2,672,973	15.03%
2001	17,180,501	14,967,095	2,213,407	12.88%
2002	17,974,958	16,552,760	1,422,197	7.91%
2003	18,848,903	16,429,224	2,419,679	12.84%
2004	17,056,397	15,889,038	1,167,359	6.84%
2005	16,543,826	15,653,259	890,567	5.38%
2006	16,808,081	15,887,252	920,829	5.48%
2007	17,122,852	16,096,513	1,026,339	5.99%
Moyenne	17,415,672	15,824,003	1,591,669	9.04%
ET	698,782	529,544	681,112	3.65%



Pampahasi

Année	In Usine	Traitement	Pertes	% Pertes
2000	18,012,822	17,140,819	872,003	4.84%
2001	17,470,086	17,331,531	138,556	0.79%
2002	18,214,459	18,109,350	105,109	0.58%
2003	17,313,431	17,134,094	179,337	1.04%
2004	18,247,541	18,126,908	120,633	0.66%
2005	18,404,138	18,336,417	67,721	0.37%
2006	18,756,140	18,667,626	88,514	0.47%
2007	19,318,435	19,235,494	82,941	0.43%
Moyenne	18,217,132	18,010,280	206,852	1.15%
ET	607,844	711,284	253,562	1.41%



Les Tableaux 6.6 indiquent les pertes enregistrées au cours du traitement des eaux pour la période 2000-07. Elles sont représentées dans la Figure 6.4.

On remarque que les pertes des usines de Pampahasi et d'El Alto de 2001 à nos jours sont minimes, ce qui signifie que la situation actuelle à ce niveau est optimale. Par contre, Achachicala présente des pertes moyennes d'environ 9%, causées par les processus de nettoyage des étangs de sédimentation. Avant 2004, elles étaient encore plus importantes qu'aujourd'hui. Néanmoins, ce processus pourrait encore être amélioré en récupérant les eaux de lavage.

6.3 Réseaux

Pertes dans les réseaux

Les pertes du réseau résultent de la différence entre le volume d'eau qui sort des usines de traitement et ce qui est consommé par la population.

Les Tableaux 6.7 et les Figure 6.5 présentent les valeurs des pertes calculées dans cette recherche et les valeurs estimées par EPSAS (fin 2009).

Tableaux 6.7 : Pertes d'eau dans le réseau [m^3]

El Alto

Année	Traitement	Réseau	Pertes	Pertes Calculées	EPSAS
2000	25,553,722	15,592,276	9,961,447	38.98%	
2001	28,479,027	15,570,369	12,908,658	45.33%	27.15%
2002	29,199,293	14,634,756	14,564,537	49.88%	44.00%
2003	29,795,801	15,991,805	13,803,995	46.33%	47.60%
2004	29,791,903	16,464,516	13,327,387	44.73%	50.00%
2005	28,664,560	17,027,271	11,637,288	40.60%	40.00%
2006	29,582,190	17,697,520	11,884,670	40.18%	38.80%
2007	29,556,675	15,885,598	13,671,077	46.25%	37.64%
Moyenne	28,827,896	16,108,014	12,719,882	0.440	0.407
ET	1,321,588	886,508	1,385,915	0.035	0.070

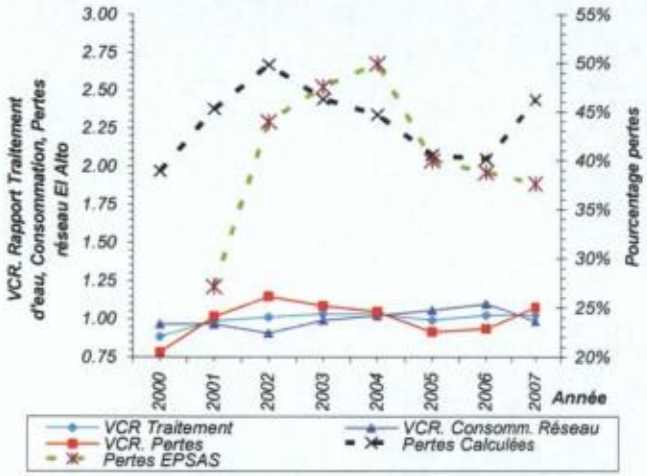
Achachicala

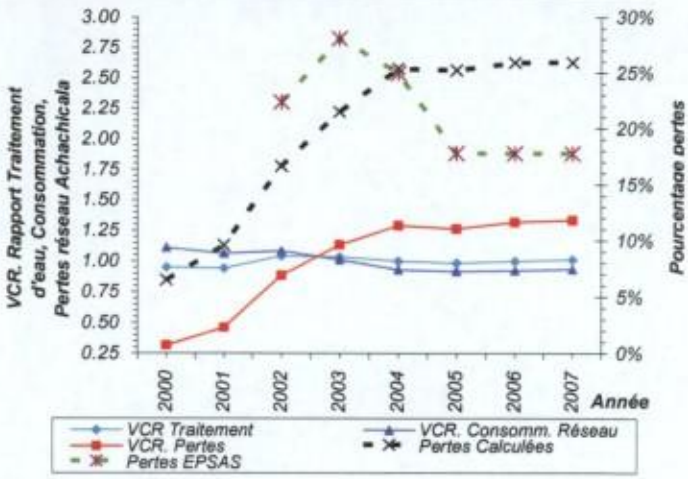
Année	Traitement	Réseau	Pertes	Pertes Calculées	EPSAS
2000	15,116,882	14,131,449	985,433	6.52%	
2001	14,967,095	13,530,599	1,436,496	9.60%	
2002	16,552,760	13,797,024	2,755,737	16.65%	22.39%
2003	16,429,224	12,897,067	3,532,157	21.50%	28.10%
2004	15,889,038	11,858,459	4,030,579	25.37%	25.00%
2005	15,653,259	11,702,893	3,950,366	25.24%	17.80%
2006	15,887,252	11,769,937	4,117,315	25.92%	17.80%
2007	16,096,513	11,922,193	4,174,320	25.93%	17.80%
Moyenne	15,824,003	12,701,203	3,122,800	0.196	0.215
ET	529,544	945,624	1,189,430	0.073	0.040

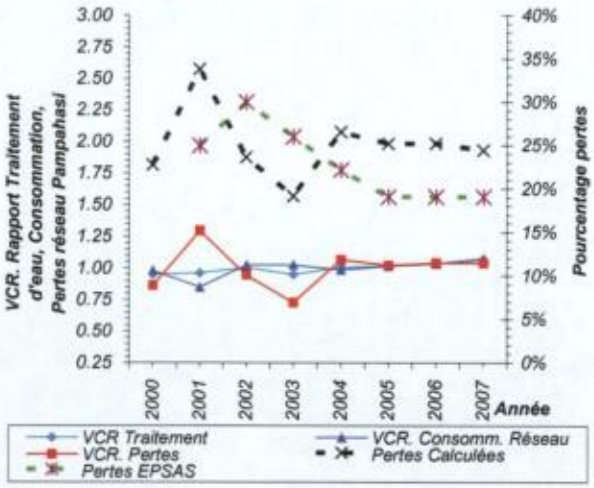
Pampahasi

Année	Traitement	Réseau	Pertes	Pertes Calculées	EPSAS
2000	17,140,819	13,235,183	3,905,635	22.79%	
2001	17,331,531	11,472,485	5,859,046	33.81%	25.00%
2002	18,109,350	13,830,182	4,279,168	23.63%	30.00%
2003	17,134,094	13,847,433	3,286,661	19.18%	26.00%
2004	18,126,908	13,307,965	4,818,943	26.58%	22.20%
2005	18,336,417	13,714,014	4,622,404	25.21%	19.10%
2006	18,667,626	13,956,555	4,711,071	25.24%	19.10%
2007	19,235,494	14,533,182	4,702,312	24.45%	19.10%
Moyenne	18,010,280	13,487,125	4,523,155	0.251	0.229
ET	711,284	849,113	699,923	0.039	0.039

Figure 6.5 : Pertes d'eau dans le réseau







Le système d'El Alto a subi des pertes notables et les valeurs moyennes que nous avons calculées et celles estimées par EPSAS se rapprochent (0.44 et 0.407). Cependant, les valeurs fournies par EPSAS pour les dernières années sont optimistes car elles révèlent une diminution des pertes et par conséquent une amélioration du service de distribution.

La situation apparaît similaire pour Achachicala et Pampahasi: les pertes qu'EPSAS estime ces dernières années sont inférieures à celles que nous avons calculées.

La méthode employée par EPSAS pour son estimation des pertes est la suivante : plusieurs détecteurs de débit sont installés sur les canalisations principales et secondaires, ainsi que sur les réseaux de quartiers de différentes zones de La Paz et El Alto.

Les résultats sont comparés au bilan entre la sortie des usines de traitement et les volumes enregistrés sur les factures des consommateurs. Habituellement, EPSAS réalise un calcul basé sur la moyenne de ces deux méthodes ou corrige les valeurs du bilan à l'aide des valeurs provenant des mesures directes.

Les mesures n'étant ni nombreuses, ni constantes, il existe une certaine incertitude sur leur représentativité. (Entre 7 et 10 mesures sont réalisées par mois, chaque détecteur restant sur le tuyau entre 2 et 3 jours. Nous remarquons que l'extension du réseau est supérieure à 3.035 km). ***(Arias I. 2010, EPSAS, communication personnelle)***

Notre méthode de calcul est fondée sur le bilan entre l'eau envoyée depuis les usines et le volume consommé dans les réseaux, calculé à partir des registres commerciaux d'EPSAS (factures d'eau des usagers).

Il est difficile d'estimer laquelle des méthodes est la plus fiable. Cependant, les deux méthodes utilisées permettent d'avoir une notion de l'ordre de grandeur de ces pertes.

Ces pertes pourraient être attribuées aux canalisations du réseau de distribution qui, en vieillissant, se fissurent et entrainent des fuites considérables. Á La Paz (Système Achachicala), certaines conduites ont été installées, durant les années 60 et 70, et durant les années 80 à El Alto. ***(Arce M. 2007, Ex. AISA, communication personnelle)***

Cette explication est fournie par la population et les techniciens travaillant pour le réseau de distribution. Toutefois, elle ne justifie pas les chiffres observés. En effet, Achachicala présente les pertes les plus faibles et la canalisation la plus ancienne. Notons que l'entretien y est meilleur. Cet exemple indique qu'un entretien régulier permet de minimiser les pertes au maximum malgré l'ancienneté de l'infrastructure. Ceci confirme les conclusions émises à propos des canalisations reliant les barrages aux usines de traitement.

A propos des entretiens, les enquêtes réalisées auprès des techniciens d'EPSAS révèlent que la tâche est assez compliquée la longueur totale des canalisations du réseau (plus de 3.035 km).

Une autre explication, fournie par EPSAS concernant les pertes du réseau d'El Alto, est le décalage de pression qui existe à l'intérieur des canalisations du réseau dû aux différences d'altitudes du service du système d'El Alto qui oscille entre 4240 masl. et 3750 masl. (presque 500 mètres). Ce problème résulte de la géographie particulière de la ville.

A cause du décalage d'altitude, la pression à l'intérieur du réseau est élevée. Pendant la journée cette pression diminue avec la consommation de la population mais entre 2 et 5 heures du matin, elle atteint sa valeur maximale, provoquant des fuites et pertes dans les réseaux.

Il existe des dispositifs qui réduisent la pression dans les réseaux, mais selon EPSAS, ces valvules ne sont pas suffisantes. Leur installation revient chère et entraîne des excavations et des chantiers sur les rues de la ville et des coupures d'eau temporaires.

Pour entretenir les réseaux et installer les valvules, il faudrait ouvrir une partie des axes routiers principaux de la ville, ce qui compliquerait encore plus le trafic urbain déjà congestionné.

D'après EPSAS, une partie des pertes sont provoquées par les connexions clandestines qui, mal réalisées, entraînent des fuites considérables. Cependant, la part de ces connexions clandestines dans les pertes totales est difficilement estimable. L'ensemble des pertes qui inclut l'eau consommée pour les clandestins *est appelé Eau non comptabilisée (ENC).*

Selon quelques techniciens d'EPSAS, les pertes dues sur ce phénomène représentent plus de 35% du total des pertes d'eau dans le réseau. EPSAS prévoit d'estimer ces pertes clandestines lors d'une étude qui a été planifiée mais pas encore mise en marche ***(Arias I. 2009, EPSAS, communication personnelle).***

Il est clair qu'il s'agit d'un problème qui va plus loin que les aspects techniques du réseau et qui tombe sur le côté social du service. Sa quantification est une tâche ardue, mais qui devrait se faire puisqu'il s'agit de l'eau consommée par un secteur de la population. Ce sujet sort toutefois de cette recherche mais mériterait une analyse plus approfondie dans le cadre d'une autre thèse.

Dans cette étude, nous ne ferons pas de distinctions pour des motifs pratiques, mais ces pertes clandestines seront prises en compte tant dans le bilan d'offre et demande et dans nos conclusions. Nous leur attribuons une valeur de référence de 35% du total de pertes.

6.4 Pertes totales

Pour répondre à la première question posée en début de chapitre, il faut additionner toutes les pertes d'eau découvertes sur le parcours des canalisations, du barrage à la distribution.

> *Combien de litres d'eau a-t-on besoin de prélever des sources pour qu'un litre arrive aux robinets?*

Le Tableau 6.8 reprend pour chaque système, la somme des pertes existant sur l'ensemble du circuit de l'eau. De ces pertes totales, nous pouvons déduire la quantité d'eau à prélever du bassin versant pour distribuer un litre à la population.

Tableau 6.8 : Pertes totales par système

Pertes	Système		
	El Alto	Achachicala	Pampahasi
Réseau	44.03%	19.59%	25.11%
Traitement	1.46%	9.04%	1.15%
Conduction	1.01%	17.43%	6.10%
Totale	46.50%	46.06%	32.36%

Besoin en source pour 1 litre d'eau au réseau [l]		
1.48	1.53	1.34

Lorsque l'on observe les quantités d'eau nécessaires à prélever à la source pour obtenir un litre d'eau à la distribution, nous concluons que les systèmes ont un rendement très faible, surtout ceux d'El Alto et Achachicala. De plus, les valeurs calculées dans cette thèse sont plus élevées que celles estimées par EPSAS. Ce constat implique que l'entreprise de l'eau sous-estime sans doute les pertes et par conséquent, les problèmes liés à la gestion de l'eau en général.

6.5 Conclusions

Une analyse des résultats et des considérations présentés, permet de répondre à la deuxième question et de conclure cette partie de la recherche.

> *Quelle est l'importance et l'origine des pertes enregistrées dans les systèmes ?*

Les ordres de grandeur des pertes d'adduction sont inhérents au type d'infrastructure employé. Les conduites apparaissent plus efficaces et les canaux présentent des pertes supérieures qui affectent le contexte de la gestion. Par exemple les pertes du canal Milluni influent fortement l'efficacité de tout le système d'Achachicala. (Tableau 6.8).

Les pertes dans les usines de traitement d'eau ont leur origine dans le nettoyage des filtres et surtout dans le nettoyage des étangs de sédimentation. Le recyclage d'eau de nettoyage des filtres offre une solution efficace pour diminuer les pertes dans les systèmes de Pampahasi et El Alto. Bien qu'il soit aussi possible de recycler les eaux de lavage des étangs, la taille de ceux-ci et la qualité de l'eau qui y est traitée ne permettent pas de diminuer d'avantage les pertes (cas du système d'Achachicala).

Si les pertes les plus considérables ont lieu dans les réseaux, l'ancienneté de la canalisation n'est pas l'explication puisque un système comme Achachicala, équipé de vieux tuyaux, ne présente pas de pertes notables, soulignant l'importance d'un bon entretien du réseau.

Les pertes élevées dans le réseau du système d'El Alto sont attribuées selon EPSAS aux connexions clandestines, aux forts décalages de pression à l'intérieur du réseau et à l'ancienneté des canalisations. Les solutions pour les deux derniers aspects entraîneraient des problèmes de circulation dans les rues de la ville d'El Alto et auraient un coût élevé.

Actuellement, pour 1 litre d'eau consommé dans les réseaux, il faut prélever presque 1,5 litre des bassins sources. Cette situation peut rendre insoutenable la gestion de l'eau et provoque une demande qui serait supérieure à la capacité d'apport des bassins versants.

Au niveau des barrages, la demande en eau est la somme de la demande de la population et des pertes du système, ce qui veut dire que les ressources du bassin versant doivent assumer la demande ainsi que les pertes du processus.

Nous concluons que du point de vue de la gestion et de l'utilisation durable des ressources, la diminution des pertes du réseau est nécessaire et justifierait des investissements et des travaux dans les rues d'El Alto, même s'ils pourraient occasionner des problèmes pour la circulation en ville.

Il faut aussi remarquer que l'eau non comptabilisée due aux connexions clandestines peut changer cette perspective, dans la mesure où une partie des pertes estimées (environ le 35%) peuvent être considérées comme une consommation de la population, qui peut augmenter une fois que la situation de ces connexions aura été mise en règle.

Utilisation du temps de résidence

En ce qui concerne les barrages et les besoins de régulation, nous proposons une option pour gérer les barrages, basée sur le temps de résidence de l'eau à l'intérieur du barrage ***(Tres)*** et le temps de résidence nécessaire pour couvrir la demande en eau de la population ***(Tbes)***. La différence entre les deux temps est le temps nécessaire de régulation du stock d'eau du barrage, selon les critères présentés au sous-titre 6.1, (Figure 6.2).

Cette option permettra aux responsables des barrages de prendre les décisions adéquates pour gérer les barrages dans le cas où l'apport prévu du bassin versant est minimal, en fonction des prévisions des précipitations et du stock d'eau présents dans le barrage. Les prévisions de précipitations et d'apport en eau du bassin pourraient être réalisées avec la méthodologie de pronostic que nous proposons.

Le technicien aura comme information les prévisions de l'apport du bassin versant et le temps qu'il lui faut pour réguler l'eau du barrage. Il pourra ainsi prendre les décisions appropriées pour gérer l'eau des barrages à partir de ces estimations, alors qu'actuellement, la gestion réalisée par EPSAS se base sur l'expérience du technicien qui gère le barrage.

7 ESTIMATION DE LA POPULATION ET BESOIN EN EAU

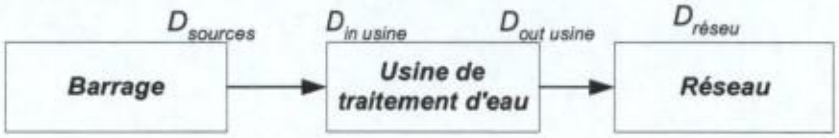
Dans ce chapitre nous présentons une estimation de la demande actuelle en eau et estimée pour l'année 2026, concernant les trois systèmes de La Paz et d'El Alto.

La question qui nous a amené à cette partie de l'étude est la suivante :

Quelle est la demande en eau des villes de La Paz et d'El Alto?

7.1 La demande en eau

La demande correspond au besoin en eau de la population ***(Jaen E. 2004)***. Par « demande », nous nommons les volumes d'eau nécessaires à chaque étape de la potabilisation, qui peut être illustré par le schéma suivant :



:

Dans ce cadre, apparaissent 4 types de demande à considérer pour la gestion de l'eau.

$D_{réseau}$: Il s'agit de la consommation en eau de la population du réseau, cette consommation dépendant de trois variables ***(Jaen E. 2004)***.

- la couverture du réseau « Cr », qui est le rapport entre le nombre d'habitants desservis par le réseau d'eau potable et la population totale du réseau.
- la population « Pop »
- la consommation journalière en eau par habitant « CJE »

$$(1) \quad Dréseau = Cr * Pop * CJE$$

$D_{out\ Usine}$: C'est la *quantité d'eau à la sortie de l'usine de traitement. En d'autres termes, il s'agit du* volume d'eau nécessaire pour couvrir la consommation de la population en tenant compte des pertes existantes sur le réseau:

$$(2) \quad Dout\_usne = \frac{Dréseau}{Pertes\_Réseau}$$

$D_{in\ Usine}$: Il s'agit du volume d'eau *entrant de l'usine de traitement ;* ce volume provenant des barrages.

$$(3) \quad Din\_Usne = \frac{Dout\_Usne}{Pertes\_usne\_traitement}$$

$D_{sources}$: *C'est le* volume d'eau qui doit être prélevé des bassins versants.

$$(4) \quad Dsources = \frac{Din\_Usne}{Pertes\_aducction}$$

Nous constatons que les différentes demandes dépendent de la consommation de la population et des pertes existantes. Pour les calculer, nous devrons, dans un premier temps, déterminer précisément cette consommation. Quant au calcul des demandes, nous utiliserons les valeurs des pertes estimées dans le chapitre 6 (Tableau 6.8), (*Pertes_Réseau, Pertes_usne_traitement et Pertes_aduction*). Les calculs ont été faits en unité de volume (*Dout_Usne, DinUsne, Dsources et pertes*).

7.2 Estimation de la population

Données historiques sur la population et taux de croissance

En Bolivie, l'Institut National de Statistiques (INE) est la principale référence en ce qui concerne la démographie. C'est cette institution qui a réalisé les trois derniers recensements de la population bolivienne (1976, 1992 et 2001) ***(INE 2001)***. Les registres de l'état civil n'étant pas encore informatisés, il faut se déplacer dans chaque ville afin de recenser la population le plus précisément possible. L'INE découpe donc le pays en secteurs, mais ces secteurs ne sont pas nécessairement les mêmes d'un recensement à l'autre. Pour les deux premiers recensements, les différences ne sont pas très marquées, mais en 2001, la division en secteur a été complètement restructurée, ce qui implique que les comparaisons démographiques à petite échelle sont parfois compliquées.

Pour estimer la population dépendant de chaque système, les deux derniers recensements ont été superposés, celui de 1976 n'étant pas assez détaillé. Les données de population reprises dans le Plan Maestro d'eau potable ont été utilisées ***(Lahmeyer International - GITEC - TECNOSAN-SICO 1994)***. De cette manière, il a été possible de quantifier la population appartenant au secteur de chaque système dont les années ou les données de recensement sont connues. *(voir* Tableau 7.1*)*

En ce qui concerne les taux de croissance annuelle, Nous avons fait appel aux critères de calcul de la Norme Bolivienne, qui existent pour des projets de réseaux en eau potable ***(Norma Boliviana NB 689, 1996)***. Les équations suivantes reprennent ces taux, selon différentes méthodes:

$$(5) \quad P_f = P_o * (1+i) * t \quad \textit{Méthode arithmétique}$$

$$(6) \quad Pf = Po * (1 + \frac{i}{100})^t \quad \textit{Méthode géométrique}$$

$$(7) \quad P_f = P_o * e^{r*i} \quad \textit{Méthode exponentielle}$$

(Norma Boliviana NB 689, 1996)

Pf: Population future [hab]
Po: population de référence [hab]
i: Indice de croissance annuelle
t: Temps

Les estimations de la population et des taux de croissance sont présentées dans le Tableau 7.1.

Tableau 7.1 : Population et taux de croissance annuelle en fonction du système

Système	Année			Croissance période	
	1976	1992	2001	1976-1992	1992-2001
Achachicala	185,687	211,710	179,031	114.01%	84.56%
Pampahasi	149,553	242,889	274,470	162.41%	113.00%
El Alto versant	204,608	259,675	316,832	126.91%	122.01%
El Alto plateau	95,435	374,841	631,919	392.77%	168.58%
El Alto Totale	300,043	634,516	948,751	211.48%	149.52%

Système	Croissance Annuel 1 Méthode arithmétique		Croissance Annuel 2 Méthode géométrique		Croissance Annuel 3 Méthode exponentiel	
	1976-1992	1992-2001	1976-1992	1992-2001	1976-1992	1992-2001
Achachicala	0.88%	-1.72%	0.82%	-1.85%	0.82%	-1.86%
Pampahasi	3.90%	1.44%	3.08%	1.37%	3.03%	1.36%
El Alto versant	1.68%	2.45%	1.50%	2.24%	1.49%	2.21%
El Alto plateau	18.30%	7.62%	8.93%	5.97%	8.55%	5.80%
El Alto Totale	6.97%	5.50%	4.79%	4.57%	4.68%	4.47%

Nous remarquons que la population du système d'Achachicala a légèrement augmenté entre 1976 et 1992, mais qu'elle a ensuite diminué durant la période suivante (1992 - 2001). Dans cette zone, il n'existe plus d'espace habitable disponible, c'est pourquoi l'expansion de la population se fait d'une façon verticale, ce qui signifie que la hauteur des bâtiments est augmentée.

Il est à noter que la zone qui dessert le système d'Achachicala est le centre historique de la ville de La Paz, ainsi que le centre administratif de la Bolivie, où la plupart des institutions publiques et du gouvernement s'y trouvent concentrées.

Ces valeurs pourraient être interprétées comme étant une situation de saturation de population, provoquée entre autre par la concurrence d'espace entre l'administration publique et les commerces ***(INE 2001)***. D'autre part, certains habitants déménagent vers d'autres quartiers, recherchant un espace de meilleure qualité de vie, qu'ils ne peuvent trouver au centre ville ***(GMLP 2005)***. Notons que l'administration a aussi augmenté durant cette période de recensement.

Dans le cas de Pampahasi, une croissance importante de la population est constatée entre 1976 et 1992, croissance qui s'est un peu atténuée entre 1992 et 2001. Il y a 30 ans, les zones du sud de la ville et de Miraflores étaient habitées par une population bourgeoise. Avec le temps, ces régions ont connu une sorte de migration interne et ces quartiers sont devenus des quartiers de classe moyenne ***(GMLP 2001)***. Cette migration reflète le besoin d'expansion du centre ville, dû entre autre à la croissance de l'administration et du commerce.

El Alto (la ville et le système inclus) a connu la plus grande croissance durant les deux périodes. Cela est principalement dû à la migration de la population venant de la campagne, qui s'installe en ville, cherchant une meilleure qualité de vie et des possibilités de travail ***(Laruta C. 2006)***.

Actuellement la population d'El Alto et celle desservie par le système portant le même nom, ont le taux de croissance le plus élevé du pays. El Alto est la deuxième ville du pays, juste après Santa Cruz et avant La Paz ***(Albo X. 2008)***.

Taux de croissance

En révisant l'ajustement inverse des taux de croissance, nous avons constaté qu'il existe une meilleure compatibilité entre les taux calculés par la méthode géométrique pour la ville de La Paz et que ceux de la méthode exponentielle pour la ville d'El Alto.

Pour définir les taux de croissance utilisables pour les calculs de cette thèse, nous faisons les hypothèses suivantes:

> ***1.*** *Le point de départ est le taux de croissance calculé avec la méthode géométrique en 2001, en remarquant qu'il n'existe pas de grande différence avec la méthode exponentielle.*
> ***2.*** *Le taux de croissance varie au cours du temps. Si on souhaite prédire un taux de croissance, il ne faudrait pas prendre cette valeur comme constante. Nous ne savons donc pas comment ce taux évoluera avec le temps*

Bien qu'il existe trois recensements de référence sur des secteurs hétérogènes par rapport à la croissance démographique, nous n'avons pas pu déterminer de modèle permettant de prévoir l'évolution du taux de croissance. Pour cette raison, nous prenons comme référence les valeurs de CIESS ***(2006)***, utilisées actuellement par EPSAS et ayant été définies par l'entreprise AISA (prédécesseur d'EPSAS). Les modèles utilisés n'étant pas réellement expliqués dans ce document, nous avons dû les déduire. Les formules obtenues de cette analyse sont les suivantes :

$$(8)\quad \text{El Alto} \qquad i_{2001+\Delta t} = -6E^{-5}(\Delta t)^2 - 0.0008t + i_{2001}$$

$$(9)\quad \text{Pampahasi} \qquad i_{2001+\Delta t} = -2E^{-5}(\Delta t)^2 - 0.0003t + i_{2001}$$

$$(10)\quad \text{Achachicala} \qquad i_{2001+\Delta t} = 7E^{-6}(\Delta t)^2 - 0.0001t + i_{2001}$$

estimées à partir des valeurs de CIESS (2006)

i: Indice de croissance annuelle
Δt: Intervalle de temps entre 2001 et l'année à laquelle on calcule son ***i***

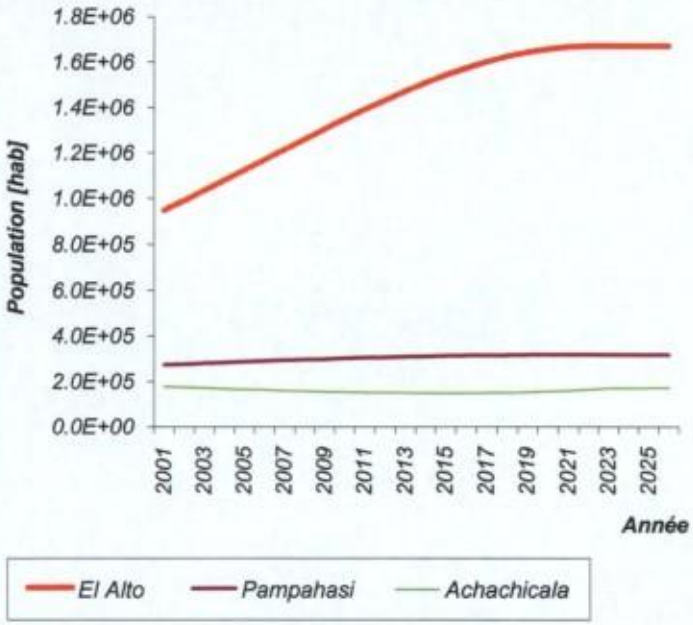
Nous avons fait des estimations de la croissance de la population depuis 2001 jusqu'en 2026. Il faut remarquer que la période 2001-2009 a aussi été estimée, puisque le dernier recensement remonte à 2001, ***on observe donc une incertitude sur cette estimation***. Comme mentionné auparavant, 2026 est l'année qu'EPSAS utilise comme référence pour sa planification. ***(Arias I. EPSAS 2009, Communication personnelle).***

À partir des données obtenues aux recensements, et selon le critère de variation du taux de croissance exposé, nous avons estimé la population pour les trois systèmes et pour chaque année entre 2001 et 2026. Les résultats sont présentés dans la Figure 7.1 et résumés dans le Tableau 7.2.

Tableau 7.2 : Population par système entre 2001 et 2026

Année	Population estimée par Système		
	El Alto	Pampahasi	Achachicala
2001	9.49E+05	2.74E+05	1.79E+05
2002	9.91E+05	2.78E+05	1.76E+05
2003	1.03E+06	2.82E+05	1.73E+05
2004	1.08E+06	2.85E+05	1.69E+05
2005	1.12E+06	2.89E+05	1.67E+05
2006	1.17E+06	2.92E+05	1.64E+05
2007	1.21E+06	2.95E+05	1.61E+05
2008	1.26E+06	2.99E+05	1.59E+05
2009	1.30E+06	3.02E+05	1.57E+05
2010	1.35E+06	3.04E+05	1.55E+05
2011	1.39E+06	3.07E+05	1.53E+05
2012	1.43E+06	3.09E+05	1.52E+05
2013	1.47E+06	3.12E+05	1.51E+05
2014	1.51E+06	3.14E+05	1.51E+05
2015	1.54E+06	3.15E+05	1.50E+05
2016	1.57E+06	3.17E+05	1.51E+05
2017	1.60E+06	3.18E+05	1.52E+05
2018	1.63E+06	3.19E+05	1.53E+05
2019	1.64E+06	3.19E+05	1.55E+05
2020	1.66E+06	3.20E+05	1.58E+05
2021	1.67E+06	3.20E+05	1.61E+05
2022	1.67E+06	3.20E+05	1.66E+05
2023	1.67E+06	3.20E+05	1.71E+05
2024	1.67E+06	3.20E+05	1.71E+05
2025	1.67E+06	3.20E+05	1.73E+05
2026	1.67E+06	3.20E+05	1.75E+05

Figure 7.1 : Estimation de la population entre 2001 et 2026



Nous constatons que selon les prévisions, la population d'El Alto aura augmentée de 76% en 2026, celle de Pampahasi de presque 17%, par contre la population d'Achachicala aura diminuée de 2,5%.

7.3 Couverture des réseaux

La couverture du réseau, est le pourcentage de la population qui a accès au service d'eau potable. Une couverture de 100% signifie que toute la population bénéficie de ce service ***(Norma Boliviana NB 689, 1996).*** Les valeurs des couvertures actuelles des réseaux de La Paz et d'El Alto sont présentées dans le Tableau 7.3.

La couverture du réseau dépend de la planification de l'entreprise quant à l'élargissement des réseaux, qui à son tour est fonction de la croissance de la ville et des besoins de la population. ***(Arias I. EPSAS 2009, Communication personnelle)***

Le fait qu'EPSAS soit une entreprise de type social, qui doit répondre aux orientations sociales du gouvernement bolivien, implique qu'actuellement, sa politique de travail donne priorité aux nécessités de la société plutôt qu'à la viabilité économique. Par conséquent, la capacité d'extension du service devrait être équivalente ou supérieure à la croissance de la population, afin d'atteindre 100% de couverture.

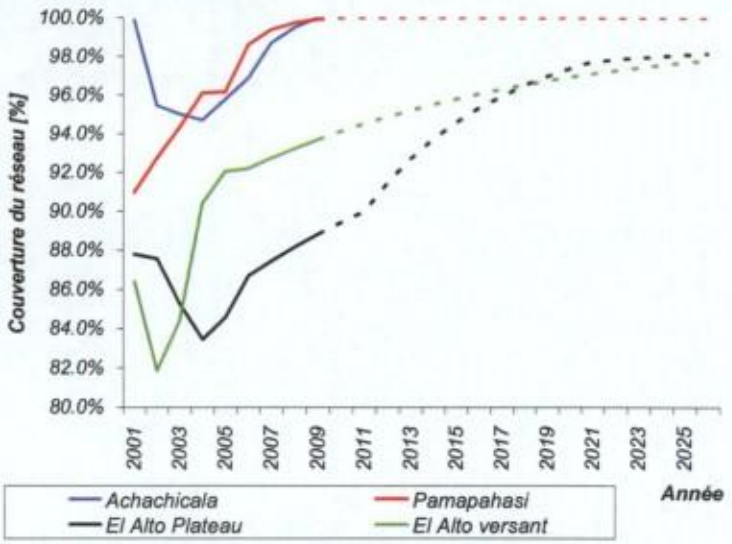
Dans la Figure 7.3, il apparaît que les couvertures de services ont diminué entre 2002 et 2005 dans les différents systèmes. Cette diminution est due aux choix de l'entreprise de l'eau de l'époque: AISA.

Les valeurs présentées dans le Tableau 7.3 et la Figure 7.2 représentent les couvertures prévues par 'EPSAS pour les trois systèmes, et ceci jusqu'en 2026. On remarque que le système d'El Alto est divisé en deux secteurs, le plateau et le versant, selon l'organisation de service de l'entreprise.

Tableau 7.3 : Couverture du service d'eau potable par système, actuelle et prévue pour 2026

Figure 7.2 : Couverture du service d'eau potable par système, actuelle et prévue pour 2026

	Couverture Réseaux par Système [%]			
Année	Achachicala	Pampahasi	El Alto Plateau	El Alto versant
2001	99.9%	91.0%	87.8%	86.4%
2002	95.5%	92.7%	87.6%	81.9%
2003	95.0%	94.3%	85.3%	84.4%
2004	94.7%	96.1%	83.5%	90.5%
2005	95.8%	96.2%	84.6%	92.1%
2006	96.9%	98.6%	86.7%	92.2%
2007	98.7%	99.4%	87.5%	92.8%
2008	99.5%	99.7%	88.2%	93.3%
2009	100.0%	99.9%	88.8%	93.7%
2010	100.0%	100.0%	89.4%	94.1%
2011	100.0%	100.0%	90.0%	94.5%
2012	100.0%	100.0%	91.5%	94.9%
2013	100.0%	100.0%	92.7%	95.2%
2014	100.0%	100.0%	93.7%	95.5%
2015	100.0%	100.0%	94.6%	95.8%
2016	100.0%	100.0%	95.3%	96.1%
2017	100.0%	100.0%	96.0%	96.3%
2018	100.0%	100.0%	96.5%	96.5%
2019	100.0%	100.0%	97.0%	96.7%
2020	100.0%	100.0%	97.4%	96.9%
2021	100.0%	100.0%	97.7%	97.1%
2022	100.0%	100.0%	97.8%	97.3%
2023	100.0%	100.0%	97.9%	97.4%
2024	100.0%	100.0%	98.0%	97.6%
2025	100.0%	100.0%	98.1%	97.7%
2026	100.0%	100.0%	98.1%	97.8%

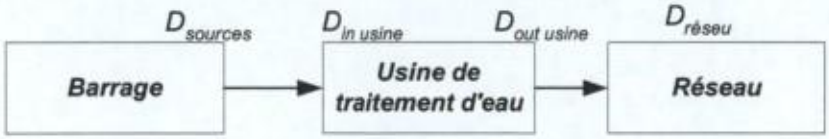


Source: EPSAS

7.4 Estimation de la consommation journalière en eau par habitant (CJE)

La consommation journalière en eau (CJE) résulte de la division du volume en eau produite par l'usine de traitement d'eau dans un espace de temps déterminé par la population. Par définition, la CJE représente l'ensemble de la consommation de toutes les activités de la ville telles que la consommation domestique, publique (état), industrielle et commerciale ***(Jaen E. 2004)***.

Le calcul de la consommation journalière en eau par habitant (CJE [l/hab-jour]) exprime la consommation quotidienne, lié à la totalité du processus de potabilisation. En d'autres termes, le fonctionnement du système et la consommation totale à chaque étape du processus (prélèvement du barrage, traitement de l'eau et distribution) est une fonction de la consommation quotidienne. Il est donc nécessaire de reprendre le fonctionnement du système pour son calcul, en utilisant l'algorithme suivant :



$V_{consommation\ réseu} = P \times CJE$

P= Population

CJE = Consommation Journalièrer en eau par habitant

$$\Delta 1 = V_{outbarrage}Calc - V_{outbarrage}Mes$$

$$\Delta 2 = V_{inu\,sin\,e}Calc - V_{inu\,sin\,e}Mes$$

$$\Delta 3 = V_{outu\,sin\,e}Calc - V_{outu\,sin\,e}Mes$$

$$\Delta 4 = CJExP - V_{ConsomRéseau}Mes$$

(Calc: Calculé ; Mes: Mesuré)

On cherche la CJE pour $\sum_{i=1}^{4}(\Delta_i) = 0$

Le calcul de cet algorithme se base sur des itérations, d'après lesquelles nous évaluons les différentes demandes jusqu'à trouver une valeur de la CJE qui peut boucler le bilan d'eau à chaque étape. Les demandes calculées sont supposées être proches de celles qui ont été mesurées.

Les valeurs calculées sont présentées dans le Tableau 7.4, ainsi que les pourcentages de consommation journalière qui correspondent aux autres utilisations en eau, estimées par EPSAS à partir de son registre d'usagers ***(Arias I. EPSAS 2009, Communication personnelle)***. La Figure 7.3 reprend également ces valeurs.

Tableau 7.4 : CJE par systèmes et par activités

Figure 7.3 : Comparaison CJE, valeurs calculées et prévues

A) Consommation journalière en eau par habitant

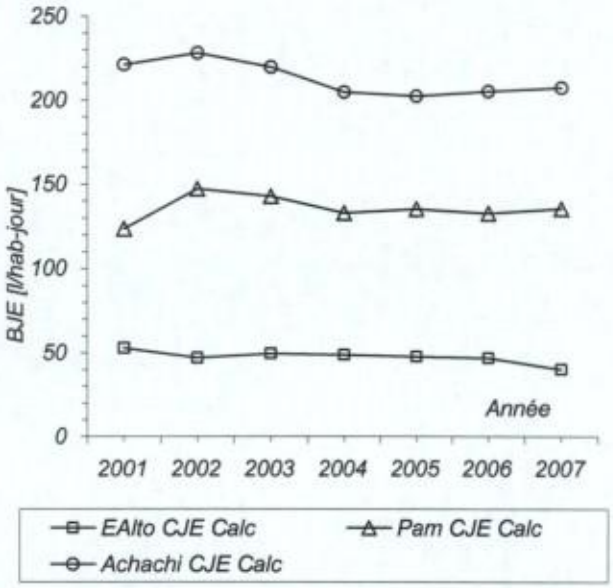
	Consommation journalière d'eau par habitant [l/hab-jour]		
	El Alto	Pampahasi	Achachicala
2001	52.97	123.71	221.42
2002	47.13	147.24	228.29
2003	49.79	142.91	219.89
2004	48.92	133.06	205.11
2005	47.89	135.42	202.63
2006	47.02	132.89	205.49
2007	40.32	135.66	207.64
Moyenne	47.72	135.84	212.93

B) Consommation journalière en eau par habitant par activité [%] (Arias I., EPSAS, 2009)

	El Alto	Pampahasi	Achachicala
Domestique	86.55%	83.13%	58.94%
Commercial	7.56%	7.66%	21.71%
Etat	3.28%	4.95%	12.23%
Industriel	1.86%	3.83%	6.96%
Autres	0.74%	0.44%	0.17%
	100.00%	100.00%	100.00%

C) Consommation journalière en eau par habitant par activité [l/hab-jour]

	El Alto	Pampahasi	Achachicala
Domestique	41.30	112.92	125.49
Commercial	3.61	10.40	46.22
Etat	1.57	6.73	26.04
Industriel	0.89	5.20	14.81
Autres	0.36	0.59	0.36
	47.72	135.84	212.93



Les valeurs calculées ont été consultées auprès de l''EPSAS. Elles sont considérées proches de celles qui ont été estimées. Cependant, l'entreprise utilisera nos valeurs comme référence pour sa planification (Arias I. EPSAS 2009, Communication personnelle).

En ce qui concerne les valeurs estimées, nous faisons les commentaires suivants :

La population du système d'El Alto a la CJE la plus faible, malgré son pourcentage de consommation domestique le plus élevé. Cette consommation domestique atteint 41.30 l/hab-jour. En réalité, bien qu'El Alto soit considéré comme zone industrielle, beaucoup d'industries obtiennent leur eau par des puits privés, ce qui explique qu'au final cette valeur de CJE. ***(Arias I. EPSAS 2009, Communication personnelle).***

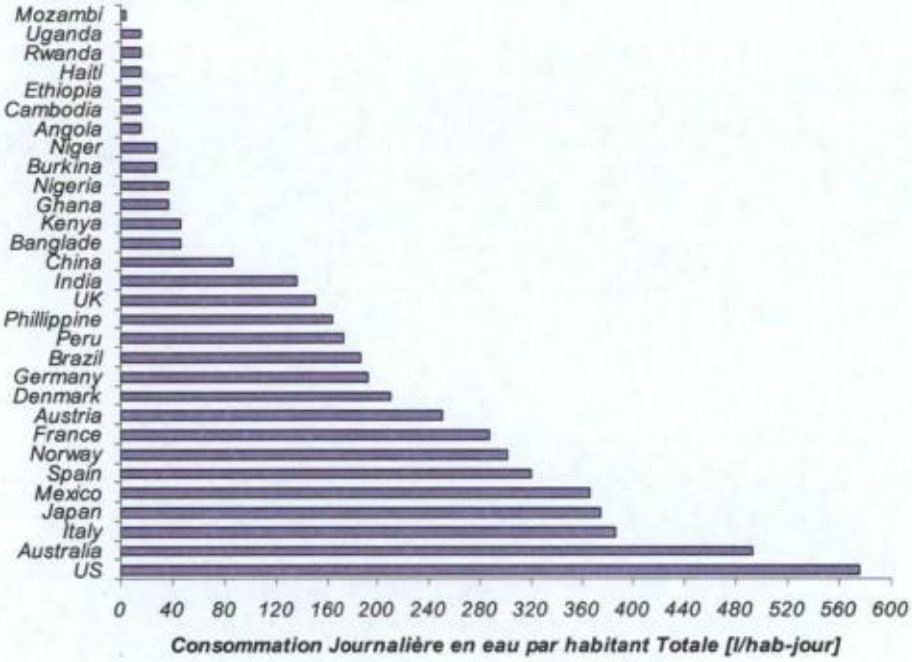
La CJE d'Achachicala est le plus élevé de tous les systèmes, malgré une consommation domestique qui ne conditionne pas cette valeur, parce qu'il existe d'autres consommations importantes comme celles du commerce, de l'industrie et de l'état, qui représentent au total plus de 85 l/hab-jour.

Enfin, Pampahasi, qui est une zone résidentielle, a des pourcentages d'utilisation proche du système d'El Alto. Notons toutefois que la valeur de sa CJE triple presque celle d'El Alto.

En ce qui concerne les valeurs de consommation domestique, on remarque que celles de Pampahasi (112 l/hab-jour) et d'Achachicala (125 l/hab-jour) sont proches. Ces valeurs pourraient être un indicateur typique de la consommation domestique de la zone de La Paz.

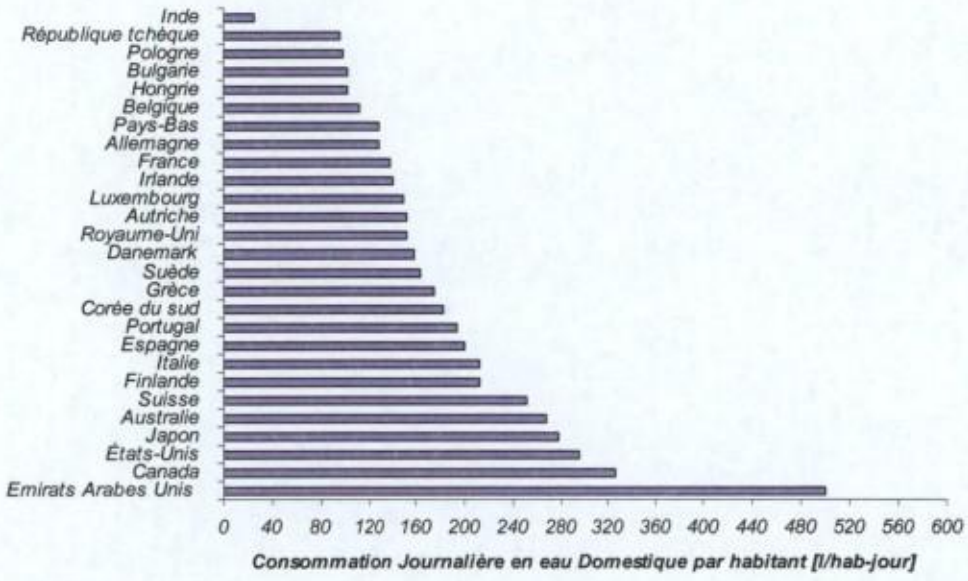
En observant les Figure 7.4 et 7.5 nous remarquons les aspects suivants : la CJE d'Achachicala s'avère plus élevée que celle de l'Allemagne et par conséquent plus haute que celles du Brésil et du Pérou. Pampahasi a une consommation semblable à celle de l'Inde et moindre que celles du Brésil et du Pérou. Dans le cas d'El Alto nous observons une CJE semblable à celles du Bangladesh et du Kenya. Cette situation révèle l'hétérogénéité de la consommation au sein d'une même agglomération urbaine.

Figure 7.4 : CJE dans le monde



(PNUD 2006)

Figure 7.5 : Consommation domestique journalière en eau par habitant selon Eurostat



(Eurostat 2005)

A propos de la consommation domestique, nous remarquons que les valeurs des CJE de Pampahasi et d'Achachicala sont plus importantes que celles de la Belgique et de plusieurs pays de l'Europe de l'Est (Figure 7.5). Par contre El Alto a une consommation domestique comparable à celles des villes africaines ***(Ballong S. 2007)*** comme par exemple Katarko au Nigéria ***(Kanaroglou N. 1999)***.

Bien que la Bolivie soit considérée comme un pays en voie de développement, la consommation en eau de la population peut atteindre des valeurs semblables à celles des pays dits développés, mais par ailleurs dans ces villes, il existe aussi des consommations comparables à celles de villages africains enregistrés à la fin des années 90. Nous remarquons alors, cette hétérogénéité.

Les grandes différences trouvées entre les CJE de La Paz et d'El Alto peuvent s'expliquer par le niveau moyen des populations qui résident dans chacune de ces villes. Rappelons qu'il y a moins de 30 ans, El Alto était encore un quartier de La Paz ou vivait une population migrant des campagnes, cherchant des opportunités de travail ***(Albo X. 2008)***. El Alto était alors le quartier le plus pauvre de la ville de La Paz.

Aujourd'hui, la population d'El Alto continue d'être mal payée[12] et ce, malgré les avancées sociales ***(Laruta C. 2006)***, et malgré l'expansion de cette nouvelle grande ville, voisine de La Paz ***(Poupeau F. 2009)***.

Cette vision des choses à propos d'El Alto est montrée par Poupeau, ***(2009)***, qui présente le centre-ville comme étant une ville consolidée et ses alentours comme étant des quartiers en expansion, qui souffrent de pénuries (eau, égout et électricité).

7.5 Estimation des demandes

Les estimations des demandes des différents systèmes pour 2026 et leurs augmentations se basent sur les aspects suivants :

- *Equations (1), (2), (3) et (4) de ce chapitre*
- *Projection de la population calculée à la section 7.2*
- *Couverture du service calculée à partir de la section 7.3*
- *CJE calculée à partir de la section 7.4. Cette valeur est considérée constante pour la période 2008-2026*
- *Pertes considérées comme constantes sur le système entre 2008-2026 (calculées dans le chapitre 6).*

Les Figure 7.6, 7.7 et 7.8 et le Tableau 7.8 indiquent les demandes estimées à chaque étape du processus de potabilisation de chaque système, et ce jusqu'en 2026. Les Tableau 7.5, 7.6 et 7.7 présentent les valeurs de référence pour effectuer ces estimations (2001-2026).

Remarquons que ces valeurs seront utilisées pour les bilans, présentés dans le chapitre 8.

[12] *La majorité des habitants d'El Alto n'ont pas d'emploi stable (Laruta, 2006). Cette population doit rechercher du travail à La Paz.*

Figure 7.6 : Estimation des consommations (2001-2026) El Alto

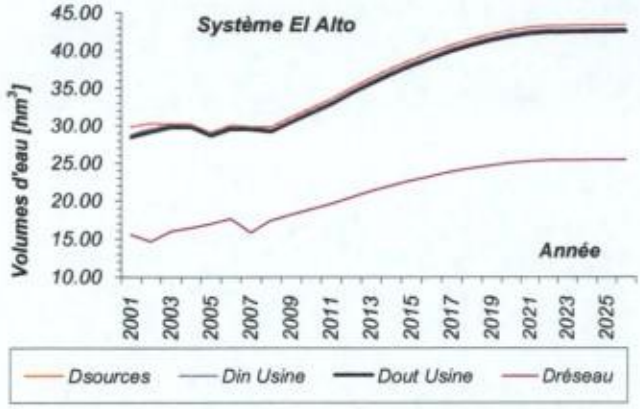


Tableau 7.5 : El Alto : Valeurs de référence pour l'estimation des demandes (2001-2026)

	2001	2008	2026
Population Totale	948,751	1,259,534	1,672,691
Population desservi	805,741	1,127,306	1,640,467
Couverture du service	84.93%	89.50%	98.07%
CJE (par habitant)	52.97	42.50	42.50
Pertes réseau	45.33%	40.18%	40.18%
Pertes Usine	1.02%	0.80%	0.80%
Pertes Conduction	3.60%	1.12%	1.12%

Figure 7.7 : Estimation des consommations (2001-2026) : Pampahasi

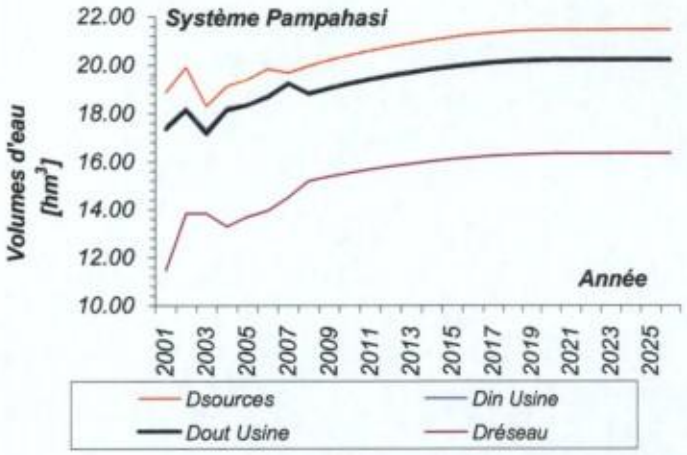


Tableau 7.6 : Pampahasi : Valeurs de référence pour l'estimation des demandes (2001-2026)

	2001	2008	2026
Population Totale	274,470	298,526	319,740
Population desservi	254,533	297,693	319,740
Couverture du service	92.74%	99.72%	100.00%
CJE (par habitant)	123.71	140.00	140.00
Pertes réseau	33.81%	19.18%	19.18%
Pertes Usine	0.79%	0.37%	0.37%
Pertes Conduction	7.81%	5.72%	5.72%

Figure 7.8 : Estimation des consommations (2001-2026) : Achachicala

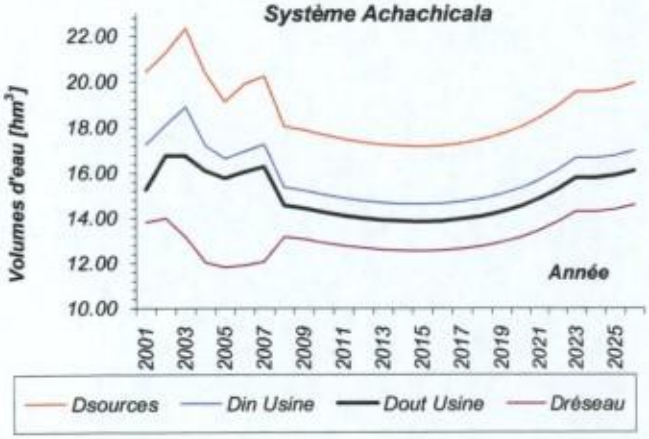


Tableau 7.7 : Achachicala : Valeurs de référence pour l'estimation des demandes (2001-2026)

	2001	2008	2026
Population Totale	179,031	158,872	174,810
Population desservi	170,910	158,079	174,810
Couverture du service	95.46%	99.50%	100.00%
CJE (par habitant)	221.42	228.29	228.29
Pertes réseau	9.60%	9.60%	9.60%
Pertes Usine	12.88%	5.38%	5.38%
Pertes Conduction	18.73%	17.57%	17.57%

***Tableau 7.8 :* Demandes en eau par système**

Année	Demande El Alto [hm^3/an]			
	Dsources	Din Usine	Dout Usine	Dréseau
2001	29.82	28.78	28.49	15.58
2005	29.05	28.93	28.67	17.03
2008	29.80	29.47	29.23	17.49
2010	32.29	31.93	31.68	18.95
2015	38.69	38.26	37.95	22.70
2020	42.66	42.19	41.85	25.04
2025	43.32	42.84	42.50	25.43
2026	43.36	42.88	42.54	25.45

Année	Demande Pampahasi [hm^3/an]			
	Dsources	Din Usine	Dout Usine	Dréseau
2001	18.87	17.50	17.36	11.49
2005	19.39	18.42	18.35	13.72
2008	19.97	18.89	18.82	15.21
2010	20.42	19.31	19.24	15.55
2015	21.16	20.01	19.94	16.12
2020	21.45	20.29	20.22	16.34
2025	21.45	20.29	20.22	16.34
2026	21.45	20.29	20.22	16.34

Année	Demandes Achachicala [hm^3/an]			
	Dsources	Din Usine	Dout Usine	Dréseau
2001	20.48	17.25	15.28	13.81
2005	19.14	16.64	15.79	11.80
2008	18.05	15.35	14.57	13.17
2010	17.69	15.04	14.27	12.90
2015	17.18	14.61	13.86	12.53
2020	18.02	15.33	14.55	13.15
2025	19.70	16.76	15.90	14.37
2026	19.96	16.98	16.11	14.57

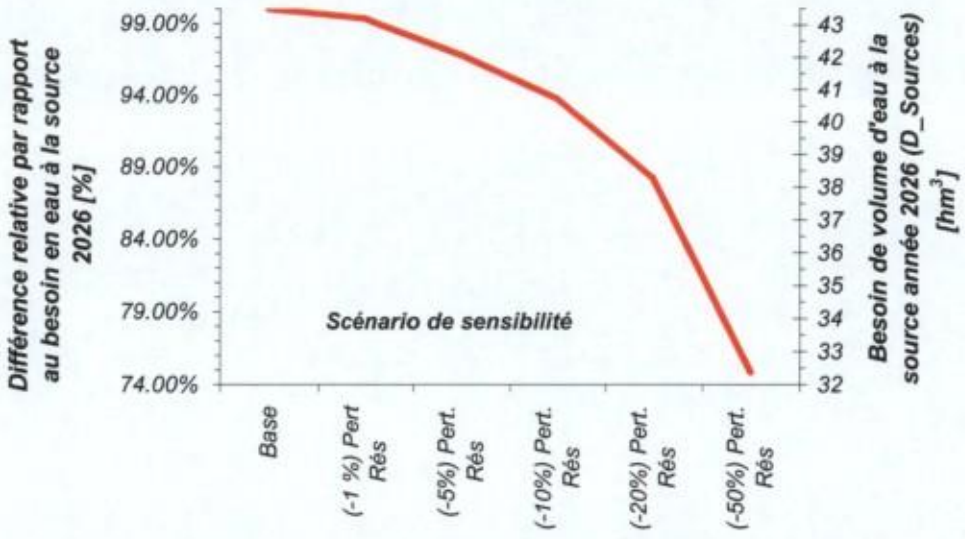
Dans chaque graphique (*Figure 7.6*, 7.7 et 7.8), apparait des différences entre les volumes d'eau. Chacun de ces volumes est influencé par les pertes qui leurs sont propres et ce, à chaque étape du processus de potabilisation. Les différences les plus notables sont celles d'El Alto dont la demande au réseau diffère de celle de l'usine et des sources. (*Figure 7.6*).

Sensibilité de la valeur de la consommation par rapport aux pertes sur le réseau

Afin de déterminer l'importance relative des pertes sur le réseau ***(Pertes_réseau, Eq.2)*** par rapport au volume d'eau qui doit être prélevé dans les bassins versants ***(Dsources, Eq. 4),*** nous estimons ce volume pour diverses valeurs de pertes (1%, 5%, 10%, 20% et 50%) en 2026,

Les résultats de cette analyse sont présentés dans le Graphique 7.9. Notons que la notation *« (-10%) Pert Rés »* signifie une diminution de 10% des pertes ***(Pertes_réseau)*** dans le futur par rapport aux pertes qui existent actuellement).

Figure 7.9 : Analyse de sensibilité selon l'augmentation de la CJE et la diminution des pertes, El Alto



Consommation de Base 2026: 43.36 hm³

Scénario	(-1 %) Pert Rés	(-5%) Pert. Rés	(-10%) Pert. Rés	(-20%) Pert. Rés	(-50%) Pert. Rés
Dif. Rel	99.33%	96.75%	93.71%	88.16%	74.86%
Red. prélèvement	0.67%	3.25%	6.29%	11.84%	25.14%
DSources [hm³]	43.07	41.95	40.63	38.22	32.46

Dans la Figure 7.9 (voir tableau : Scénario et Dif. Rel) nous observons qu'à chaque diminution de 1% des pertes, les besoins de prélèvement d'eau sur les bassins versants se réduisent d'environ 0.5%

Une autre remarque intéressante concernant le système d'El Alto est que si nous parvenons à faire diminuer les pertes de 50%, nous devrions prélever 32.46 hm3 d'eau à la source. Or, cette valeur se trouve proche de la disponibilité actuelle des ressources en eau du bassin d'El Alto pour une année.

Ce résultat est fondamental parce qu'il montre qu'en diminuant les pertes du réseau d'El Alto de 50%, la consommation en eau potable prévue en 2026 pourrait alors être compensée par les ressources moyennes en eau qu'offre le bassin (Tableau 6.2, 32.20 hm^3,). Cette perspective accentue l'importance qu'ont les pertes sur les besoin en eau de la population.

Sensibilité des besoins en eau aux sources (El Alto)

Le besoin en eau dépend de la demande de la population (au niveau du réseau), mais dépend aussi, de sa variabilité. La demande, comme nous l'avons vu aux sections précédentes, est fonction de la population et de la consommation par habitant. De plus, il faut aussi tenir compte des pertes, dont nous venons de parler dans les paragraphes précédents.

Pour ces raisons, nous avons fait une analyse de sensibilité des besoins de prélèvement aux sources. En ce qui concerne El Alto, il faut prendre en compte plusieurs scénarios probables. Pour ce faire, nous partons d'une situation de base, déjà présenté à la Figure 7.6.

Couverture du réseau de 100% de la population: L'objectif est d'avoir un système de distribution d'eau potable idéal, qui desservirait la totalité de la population. Pour justifier ce scenario, rappelons que lorsque l'état bolivien a privatisé les ressources en eau potable de La Paz et El Alto, il a imposé à AISA de permettre une couverture du réseau de 100 %, dans les 10 premières années de contrat (Contrat de concession, Aguas del Illimani, 2006).

Augmentation de la consommation journalière par habitant : Etant donné les faibles valeurs de consommation actuelle, on s'attend à une augmentation de celle-ci. Nous estimons donc des scenarios tels que la CJE augmente de façon linaire (1, 2, 3 et 4% par an, ce qui correspond à une valeur de CJE de 50, 58, 68 et 80 l/hab/jour respectivement en 2026). Remarquons que ces valeurs restent néanmoins assez faibles par rapport aux CJE d'Achachicala et de Pampahasi.

Diminution de pertes sur le réseau: C'est un aspect déjà analysé du point de vue de son importance dans les paragraphes précédents. Les scenarios considérés comptent une possible diminution constante des pertes chaque année de 0.375, 0.7 et 1.5%, ce qui revient à dire qu'en 2026 nous arriverions à des pertes de 34, 29 à 25% respectivement. (Rappelons que pour le système El Alto, les pertes en 2010 sont de 40%).

N'oublions pas de prendre aussi en compte les consommations non comptabilisées, comprises dans les pertes totales du réseau (estimées à environ 35% du total des pertes, voir section 6.3). Choisir un scenario de diminution des pertes plus optimiste ne serait donc pas très réaliste.

Aux Figure 7.10, 7.11 et 7.12, nous présentons des analyses différentes, prenant en comptes les différents scenarios mentionnés. La première figure montre la possible évolution du besoin de prélèvement d'eau. La seconde figure montre la variation de la moyenne par rapport à l'écart type de tous ces scenarios. Enfin, la troisième, présente l'écart de la moyenne, par rapport aux valeurs minimales et maximales de tous les scenarios.

Figure 7.10 : Scenarios du besoin de prélèvement d'eau aux sources (El Alto)

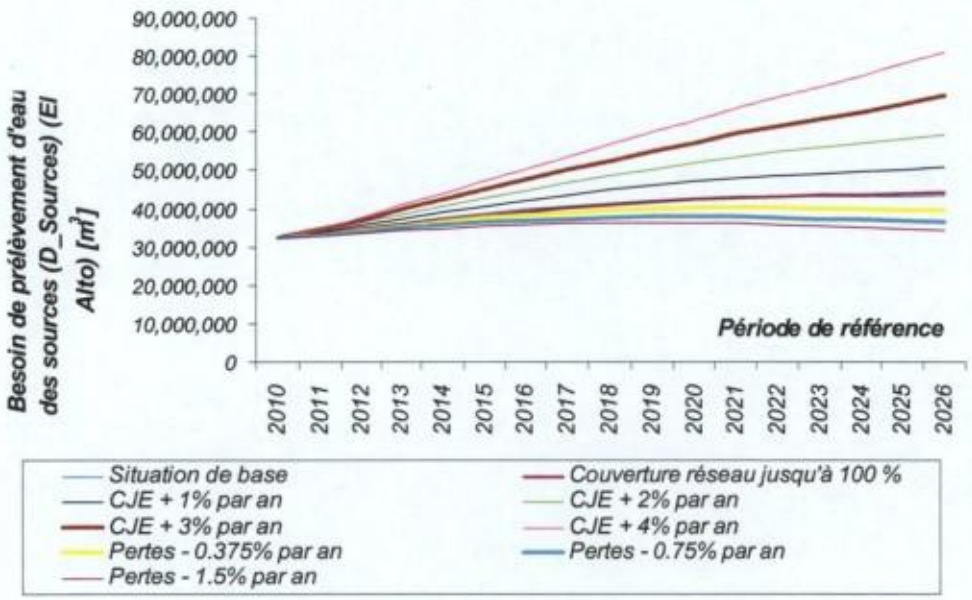


Figure 7.11 : Besoin de prélèvement d'eau aux sources (El Alto), Ecart type

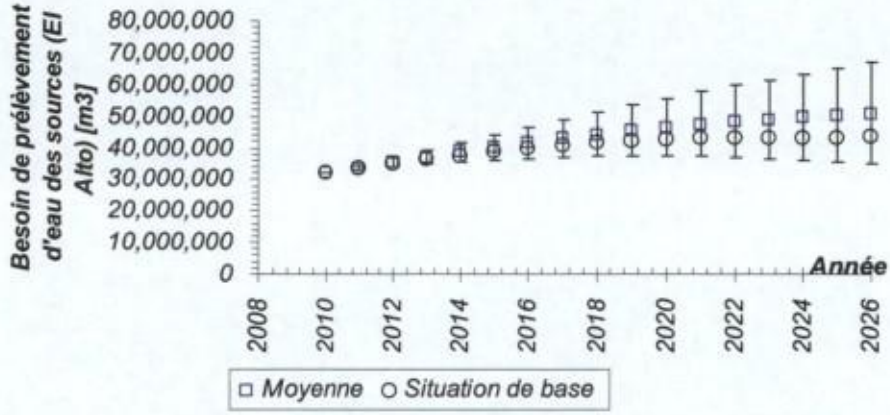
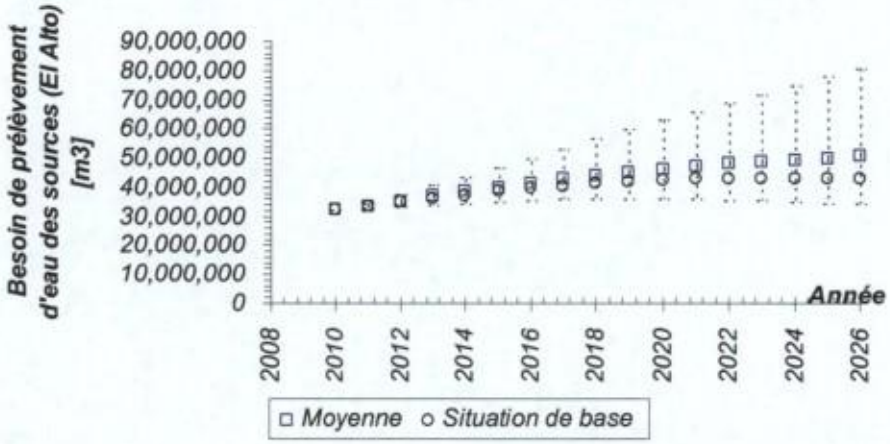


Figure 7.12 : Besoin de prélèvement d'eau aux sources (El Alto), (Max et min)



Ce qui attire le plus notre attention dans l'analyses de ces figures, c'est la variation du besoin de prélèvement d'eau aux sources, en fonction des différents scénarios : l'ordre de grandeur entre le scénario le plus optimiste et le plus pessimiste est de presque 46.10^6 m^3. Un autre aspect important à remarquer, est le fait que plus les besoins en eaux augmentent (du aux différents scénarios), plus les écarts-types deviennent importants. Ceci est sans doute du à la croissance de la population combiné à la possible augmentation de la CJE.

Ces deux situations nous montrent la nécessité de faire une étude plus approfondie de toutes ces variables.

7.6 Conclusions

Pour conclure, nous répondons aux questions guides posées en début de chapitre :

Quelle est la demande en eau des villes de La Paz et d'El Alto?

Les demandes indispensables d'eau ont été estimées à chaque étape du processus de potabilisation de l'eau, sur la base de la demande de la population ***(Demande au réseau)*** et des pertes qui correspondent à chaque étape. (Figure 7.6, Figure 7.7 et Figure 7.8). Les valeurs estimées relatives à ces calculs sont résumées dans le Tableau 7.8

Selon nos estimations, la quantité d'eau qui devrait être puisée à la source pour répondre aux besoins du système d'El Alto en 2026, augmentera de 45% (29.82 à 43.36 hm^3) (Tableau 7.8). En ce qui concerne Pampahasi, elle aura une hausse de 13% et diminuera de 2 à 3% pour le système d'Achachicala.

Quelques réflexions concernant le processus d'estimation des demandes:

- Incertitudes de l'estimation de la population dues à :
  - l'information de base démographique
  - l'application des taux de croissance
- Hétérogénéité de la consommation journalière en eau (CJE) et valeur faible de la CJE d'El Alto
- Influence des pertes dans les valeurs des demandes.

Il faut aussi prendre en compte les aspects présentées aux Figure 7.10 vers 7.12, dont nous réalisons, la sensibilité du besoin en eau face aux possibles scenarios de changement des valeurs soi de la CJE, de la couverture du réseau ou de diminution des pertes.

Incertitudes

Nous concluons qu'il existe deux sortes d'incertitudes en relation à l'estimation de la population :

- l'information de base démographique
- l'application des taux de croissance

Pour l'estimation des demandes, il aurait fallu procéder à une estimation et une projection de la population à long terme basées sur les trois recensements des années 1976, 1992 et 2001. D'autre part, le manque de statistiques intermédiaires directes a porté préjudice pour calibrer les estimations. Les données de références de l'Institut National de Statistiques sont aussi des estimations élaborées pour l'ensemble de de la population des villes de La Paz et Alto, avec également des taux de croissance globaux.

Malheureusement, ces informations trop générales ne permettent pas d'élaborer un calcul de la population plus atomisé par secteurs et même au niveau des quartiers qui sont desservis par les systèmes d'eau potable.

L'application des taux de croissance constitue une autre source d'incertitude. Il est impossible de se prononcer sur une tendance qui soit fiable, sur son augmentation ou diminution, à partir des trois données de recensement comme référence. Selon l'INE *(2001)*, il y aura une tendance à l'atténuation des taux de croissance mais cette publication ne donne pas de précisions sur cette atténuation. Finalement, nous avons choisi comme référence un calcul de CIESS *(2006)*, bien qu'il présente aussi des incertitudes sur le sujet.
. Il ne faut pas oublier toutes ces incertitudes afin de ne pas perdre l'objectivité nécessaire pour faire les analyses de la gestion.

Le fait que la population est l'une des trois variables pour le calcul de la demande au réseau, implique que les incertitudes soient extrapolables aux résultats des calculs de demandes. Les analyses qui suivent devront donc tenir compte des conditions suggérées pour effectuer le calcul de la population.

Incertitudes sur le besoin de prélèvement d'eau

Les possible scenarios qui peuvent se présenter a future, nous montrent qu'une variation de plus de $40x10^6$ m^3, dans le besoin de prélèvement d'eau des sources est possible (équivalent à une quantité majeur a celle qui est disponible dans les basins versant sources d'El Alto actuellement ~ $32 x10^6$ m^3).

La CJE comme indicateur et sa probable augmentation

Il est intéressant de remarquer que dans une même agglomération urbaine conformée par les villes de La Paz et El Alto, la consommation en eau potable par habitant (CJE) est aussi élevée que dans certains pays européens, et quand même temps, elle peut être comparable à d'autres pays moins développés que la Bolivie.

En établissant un rapport entre les CJE estimés et les consommations des pays développés et en voie de développement, il est possible d'utiliser la CJE comme indicateur de développement de la population de nos villes selon la perspective suivante :

D'une part, la consommation domestique par habitant de la ville de La Paz, supérieure à 110 l/hab-jour, est comparable à celle de la Belgique et d'autres pays européens ***(Eurostat 2005)***. D'autre part à El Alto, la consommation se rapproche de celles des villes africaines et elle atteint environ 40 l/hab-jour ***(Ballong S. 2007)***.Citons le cas particulier de la ville nigérienne de Katarko qui avait en 90 une consommation domestique d'environ 50 l/hab-jour ***(Fig 4 in Kanaroglou N. 1999)***.

L'Indice de développement humain a été choisi pour mettre en relation les aspects et valeurs mentionnés. C'est un indice statistique composite, créé par le Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD) en 1990 afin d'évaluer le niveau de développement humain des pays du monde. Selon le ***(PNUD 2007)***, les indices de développement humain des pays mentionnés sont : ***Belgique : 17, Bolivie : 117 Nigéria : 158.***

Dans ce contexte, la différence entre la valeur de la CJE d'El Alto et les deux autres systèmes, permet de formule l'hypothèse suivante:

> *Si El Alto est une ville en développement et en expansion, qui se consolide et tend à améliorer sa qualité de vie* ***(Poupeau F. 2009)*** *et si ses progrès sont proportionnels à l'augmentation de la consommation d'eau), alors :*
>
> *Est-ce que nous devrions nous attendre à une augmentation de la CJE à El Alto ?*

Cette possibilité n'est pas éloignée de la réalité, vu son développement accéléré : en 1950, El Alto n'était qu'un nouveau quartier de la ville de La Paz, et elle est devenue une ville en 1985 ***(Albo X. 2008;Laruta C. 2006)***. Cela signifie qu'en moins de 40 ans, l'agglomération d'El Alto s'est transformée en ville, qui a surpassé la population de La Paz.

En conclusion cette possibilité de croissance de la CJE devra alors être prise en compte dans les scénarios probables de la gestion future.

Pertes et demandes

Selon les Figure 7.6, 7.7 et 7.8, les pertes ont une grande influence sur les valeurs de la demande dans les différentes étapes de la potabilisation. Ces différences sont notables à El Alto (Figure 7.6) où les pertes dans le réseau provoquent un décalage entre la consommation de la population ***(Dréseau)*** et la demande aux sources ***(Drsources)***, en concordance avec le fait que pour remettre un litre d'eau à la population on doit prélever plus d'un litre et demi d'eau des sources. (Tableau 6.8 du chapitre 6).

A El Alto, à cause des pertes, une consommation ou réseau ***(Dréseau)***, estimée pour l'année 2026 à 25.45 hm^3 (Tableau 7.8), peut atteindre une consommation en eau des sources ***(Drsources)*** de 43.36 hm^3.

Nous concluons que la diminution des pertes au réseau pourrait être une mesure à prioriser parce que sa baisse de 1% représente la diminution de 0.5% de la demande de prélèvement d'eau du bassin versant. S'il était possible de réduire les pertes de 50%, les ressources des bassins du système d'El Alto qui fournissent actuellement 32.20 hm^3, (Tableau 6.2), pourraient satisfaire la demande de la population pour l'année 2026. (Scénario (-50% Pert. Rés : 32.46 hm^3 Figure 7.9))

8 BILAN DE L'OFFRE ET DE LA DEMANDE EN EAU – BASES DE LA GIRE

8.1 Bilan de l'offre et de la demande en eau

Sur base des valeurs calculées tout au long de ce travail, nous formulons le bilan de l'offre et la demande en eau, jusqu'à l'année 2026.

L'offre est caractérisée par la capacité d'apport en eau du bassin versant, cet apport, comme il a été expliqué dans le chapitre 4, provient des précipitations (Tableau 6.2) et de l'apport glaciaire (sous-titre 4.5, Apport en eau des glaciers, Tableau 4.4) (dans les bassins où des glaciers sont présents). Bien que cette capacité ne soit pas constante dans le temps, nous considérerons toutefois pour ce bilan, une valeur moyenne associée à une probabilité de 50%. (Tableau 6.2)

La demande est caractérisée par les variables décrites dans le chapitre 7 (population, CJE, couverture de service et pertes lors du processus de potabilisation) (Tableau 7.8). Nous avons calculé pour chaque étape du processus, une demande correspondante. Pour les bilans d'offre et de demande de ce chapitre nous utilisons la demande d'eau au niveau des bassins versants ou des barrages ***(Dsources)***.

Le bilan de l'offre et de la demande est la mise en rapport des ces deux variables à travers les courbes cumulées (Figure 8.1) En hydrologie cette courbe est dénommée « courbe de Ripple » ***(Shahin M. 2007;Villón M. 2002)***, elle constitue un outil pour les projets de barrages ou pour le bilan des ressources et des demandes où il existe des structures de régulation ***(Villón M. 2002)*** comme dans le cas des bassins de Hampaturi Incachaca, Tuni et Milluni.

En employant cette méthode, nous pourrons déterminer le moment où la demande surpassera l'offre.

Pour interpréter les graphiques, on remarque que le point d'intersection des deux courbes est le point d'équilibre entre l'offre et la demande. Une situation de déficit en eau est rencontrée lorsque la courbe de la demande surpasse celle de l'offre. La variation des deux courbes produit plusieurs points d'intersections. On considère qu'il existe un déficit en eau lorsque la demande dépasse nettement l'offre et ne descend plus sous celle-ci.

Dépassement de la capacité de l'usine de traitement d'eau

Pour compléter l'analyse des résultats, nous comparerons également la demande à la sortie de l'usine ***(Dout usine)*** (Tableau 7.8) avec la capacité de l'usine de traitement. (Tableau 1.2)

Scénarios du bilan d'offre et de demande

Pour déterminer l'importance des variables en jeu dans la gestion tant du côté de la demande que de l'offre en eau, on a procédé à une étude de sensibilité au moyen de 6 scénarios :

1. Le premier scénario (code 0) correspond à la situation actuelle, ainsi que la projection à l'horizon 2026 selon les tendances actuelles. Cette simulation sera celle de référence ou « situation de base » permettant la comparaison entre les différents scénarios.

2. Le second scénario (code 1) simule:

i) la diminution des précipitations respectivement de 1 et 5% avec pour effet une diminution quasi proportionnelle de l'offre en eau du bassin;

ii) l'augmentation de la précipitation en 1 et 5%.

3. Le troisième scénario (code 2) simule une baisse de l'offre en eau en raison d'un recul glaciaire. Deux situations pour l'horizon 2026 seront envisagée: la disparition totale des glaciers et une réduction de moitié de l'apport glaciaire ;

4. Le quatrième scénario (code 3) simule une diminution progressive des pertes du réseau de distribution jusqu'en 2026, de 25 et 50% par rapport aux valeurs actuelles ;

5. Le cinquième scénario (code 4) est établi en modifiant le taux initial de croissance de la population (taux de croissance qui décroît avec le temps), cette variation affecte la demande de manière directe :

i) en utilisant un taux de croissance constant sur toute la période d'analyse.

ii) en utilisant un taux de croissance moyen entre le taux constant et le taux qui décroit avec le temps.

6. Le sixième scénario (code 5) est structuré à partir de l'hypothèse d'une augmentation de la CJE, de 50 et 100%.

En résumé, les scénarios de bilans offre – demande en eau ont été déterminés sur la base des critères suivants:

1. Simulation de la situation dans le cas où chaque variable atteindrait sa valeur maximale ou moyenne, valeurs définies dans les chapitres précédents.

2. Utilisation d'un pas des temps mensuel permettant de déterminer quand le déficit en eau apparaitra.

Situation de Base

L'offre de la situation de base a été calculée employant les valeurs de précipitation qui ont une probabilité associée de 50% (Tableau 6.2). Cela représente en moyenne une année d'apport. La valeur de l'apport glaciaire a été prise comme un pourcentage de l'apport du bassin en utilisant comme référence l'influence des glaciers estimée dans le chapitre 4 (Tableau 4.4). Ces valeurs sont résumées dans le Tableau 8.1

La demande de la situation de base a été calculée à un rythme mensuel selon les critères présentés dans le chapitre 7. Les valeurs sont présentées dans le Tableau 7.8.

Tableau 8.1 : Valeurs de l'offre pour la situation de base (hm^3)

Apport Bassin versant (Q)

Mois	Tuni	Milluni	Choqueyapu	Incachaca	Hampaturi
janvier	7.13	5.97	2.66	2.58	5.54
février	5.11	4.26	2.23	1.91	4.80
mars	4.76	3.09	2.51	1.29	3.49
Avril	2.87	1.62	1.13	0.38	1.38
Mai	1.46	0.76	0.59	0.14	0.47
Juin	0.70	0.30	0.40	0.04	0.45
Juillet	0.29	0.46	0.41	0.14	0.64
Août	0.31	0.43	0.43	0.31	0.72
Septembre	0.65	0.33	0.50	0.35	0.80
Octobre	1.14	0.57	0.74	0.27	1.00
Novembre	1.98	0.98	0.95	0.26	1.08
Décembre	3.79	2.16	1.44	0.47	1.59
	30.20	20.92	14.01	8.15	21.95

Apport Glacier

Tuni	Milluni	Choqueyapu	Incachaca	Hampaturi
+ 0.11 Q	+ 0.11 Q	0.00	0.00	0.00

Application

Pour le système d'El Alto, tous les scénarios ont été envisagés. Pour Achachicala, les cinquième (code 4) et sixième (code 5) bilans n'ont pas été simulés, en raison des faibles variations démographiques (stagnation ou légère diminution). Pour Pampahasi, le scénario de retrait glaciaire (code 2) n'a pas été envisagé étant donné l'absence de glacier dans le bassin versant source.

Le résumé des scénarios simulés est présenté dans le Tableau 8.2. La Figure 8.1 indique les premiers bilans de chaque système, les autres étant repris dans les Annexes.

Tableau 8.2 : Résumé des paramètres des scénarios de bilan de l'offre et de la demande en eau

No	Code	Offre		Demande					Capacité des usines de traitement d'eau	Apport du bassin dépassé en: (valeur du bilan 2026 [Hm³])	Date de dépassement (Bilan negatif)	Capacité de UTE déppasé	
		P et Q	Glacier	Pertes Réseau	Population	i	CJE [l/hab-jour]	Couverture				Besoin d'ampliation de capacité en [l/s]	Date de dépassement
Système El Alto (Barrage Tuni)													
1	0-EA-a	T 9.1	+0.11 Q	T 6.8	T 7.2	T 7.2	T 7.4 (A)	T 7.3		-13.16	juil-12		
2	0-EA-b	T 9.1	+0.11 Q	T 6.8	T 7.2	T 7.2	T 7.4 (A)	T 7.3	T 1.2			380	janv-10
3a	1-EA-a1	-1% ; -5%	+0.11 Q	T 6.8	T 7.2	T 7.2	T 7.4 (A)	T 7.3		-13.46; -14.67	juil11 ; janv 10		
3b	1-EA-a2	+1% ; +5%	+0.11 Q	T 6.8	T 7.2	T 7.2	T 7.4 (A)	T 7.3		-12.86; -11.65	juin13 ; juin 16		
4	2-EA-a1	T 9.1	+ 0 Q	T 6.8	T 7.2	T 7.2	T 7.4 (A)	T 7.3		-21.37	mai-12		
5	2-EA-a2	T 9.1	+0.055 Q	T 6.8	T 7.2	T 7.2	T 7.4 (A)	T 7.3		-17.26	mai-12		
6a	3-EA-a1	T 9.1	+0.11 Q	-50%	T 7.2	T 7.2	T 7.4 (A)	T 7.3		-2.26	juin-14		
6b	3-EA-a2	T 9.1	+0.11 Q	-25%	T 7.2	T 7.2	T 7.4 (A)	T 7.3		-7.24	juin-13		
7	3-EA-b	T 9.1	+0.11 Q	-50%	T 7.2	T 7.2	T 7.4 (A)	T 7.3	T 1.2			290	janv-11
8a	4-EA-a1	T 9.1	+0.11 Q	T 6.8	Pop= f(i cte)	4.57%	T 7.4 (A)	T 7.3		-44.98	juin-11		
8b	4-EA-a2	T 9.1	+0.11 Q	T 6.8	Pop= f(i var)	2.25-4.57%	T 7.4 (A)	T 7.3		-27.02	juin-12		
9	4-EA-b	T 9.1	+0.11 Q	T 6.8	Pop= f(i cte)	4.57%	T 7.4 (A)	T 7.3	T 1.2			1454	janv-09
17a	5-EA-a1	T 9.1	+0.11 Q	T 6.8	T 7.2	T 7.2	100	T 7.3		-71.82	juil-10		
17b	5-EA-a2	T 9.1	+0.11 Q	T 6.8	T 7.2	T 7.2	75	T 7.3		-46.32	juil-12		
18	5-EA-b	T 9.1	+0.11 Q	T 6.8	T 7.2	T 7.2	100	T 7.3	T 1.2			2400	janv-09
Système Achachicala (Barrage Milluni, Rivière Choqueyapu)													
10	0-AA-a	T 9.1	+0.11 Q	T 6.8	T 7.2	T 7.2	T 7.4 (A)	T 7.3		*	*		
11	0-AA-b	T 9.1	+0.11 Q	T 6.8	T 7.2	T 7.2	T 7.4 (A)	T 7.3	T 1.2			*	*
12	1-AA-a	-1% ; -5%	+0.11 Q	T 6.8	T 7.2	T 7.2	T 7.4 (A)	T 7.3		*	*		
13	2-AA-a1	T 9.1	+ 0 Q	T 6.8	T 7.2	T 7.2	T 7.4 (A)	T 7.3		-0.4	août-26		
14	2-AA-a2	T 9.1	+0.055 Q	T 6.8	T 7.2	T 7.2	T 7.4 (A)	T 7.3		*	*		
15	3-AA-a	T 9.1	+0.11 Q	-50%	T 7.2	T 7.2	T 7.4 (A)	T 7.3		*	*		
16	3-AA-b	T 9.1	+0.11 Q	-50%	T 7.2	T 7.2	T 7.4 (A)	T 7.3	T 1.2			*	*
Système Pampahasi (Barrages Incachaca et Hampaturi)													
19	0-PP-a	T 9.1	+0.11 Q	T 6.8	T 7.2	T 7.2	T 7.4 (A)	T 7.3		*	*		
20	0-PP-b	T 9.1	+0.11 Q	T 6.8	T 7.2	T 7.2	T 7.4 (A)	T 7.3	T 1.2			*	*
21	1-PP-a	-1% ; -5%	+0.11 Q	T 6.8	T 7.2	T 7.2	T 7.4 (A)	T 7.3		*	*		
22	3-PP-a	T 9.1	+0.11 Q	-50%	T 7.2	T 7.2	T 7.4 (A)	T 7.3		*	*		
23	3-PP-b	T 9.1	+0.11 Q	-50%	T 7.2	T 7.2	T 7.4 (A)	T 7.3	T 1.2			*	*
24	4-PP-a	T 9.1	+0.11 Q	T 6.8	Pop= f(i cte)	1.37%	T 7.4 (A)	T 7.3		-0.2	nov-26		
25	4-PP-b	T 9.1	+0.11 Q	T 6.8	Pop= f(i cte)	1.37%	T 7.4 (A)	T 7.2	T 1.2			80	janv-19
26	5-PP-a	T 9.1	+0.11 Q	T 6.8	T 7.2	T 7.2	180	T 7.3		-11.3	juil-20		
27	5-PP-b	T 9.1	+0.11 Q	T 6.8	T 7.2	T 7.2	180	T 7.3	T 1.2			320	janv-14

Données de base: 2001-2007
Simulation: 2008-2026

**** Bilan encore positive***

Code de la simulation du bilan (2008-2026)

0: *Situation actuelle : Calculée dans ce travail*
1: *Diminution de l'apport du bassin à cause de diminution des précipitations*
2: *Diminution de l'apport glacier à l'horizon 2026*
3: *Diminution linéaire de pertes au réseau à l'horizon 2026*
4: *Croissance de la population constante, sans atténuation*
5: *Croissande du BJE progressive jusqu'au 2026*

i: *Taux de croissance de la population*
P et Q: *Précipitation et volume d'apport annuel du bassin Prob. 50%*
BJE: *Besoin journalier en eau*
Glacier: *Apport du glacier*

EA: *Système El Alto*
AA: *Système Achachicala*
PP: *Système Pampahasi*

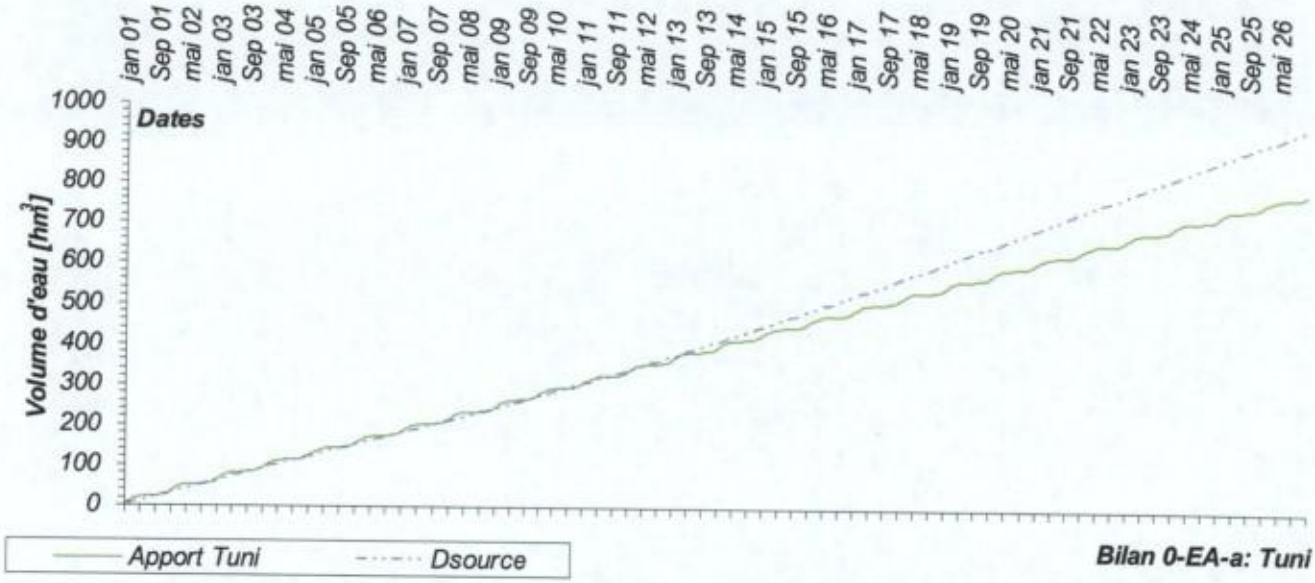
ST: *Sous-titre*
T: *Tableau*
F: *Figure*

a: *Bilan du besoin en eau, avec les ressources qui arrivent au barrage*

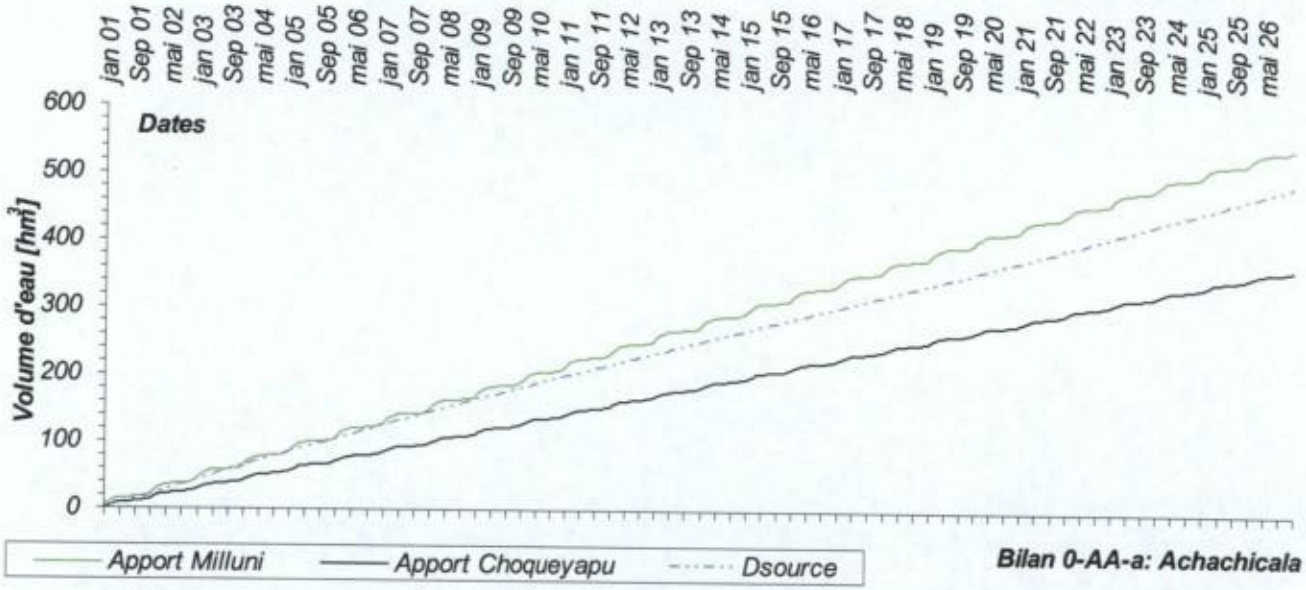
b: *Bilan du besoin en eau, avec capacité de l'usine de traitement d'eau*

Barrage: *Besoin en source (Barrage et Rivière)*
UTE: *Usine de traitement d'eau*

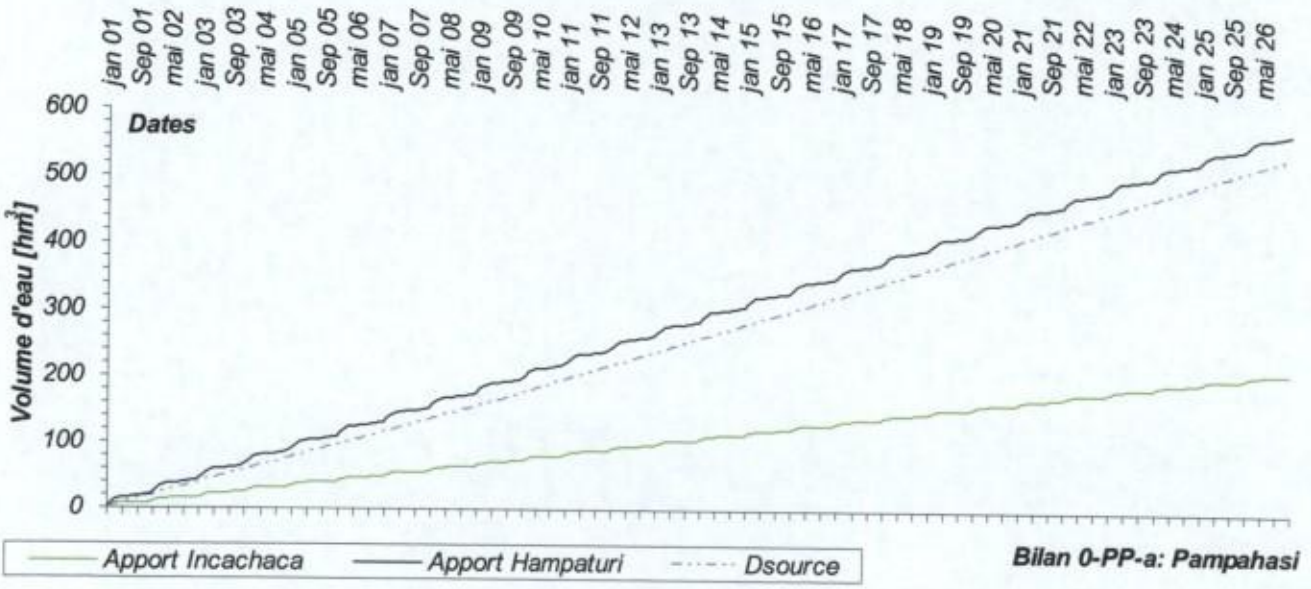
Figure 8.1 : Bilans de l'offre et de la demande en eau pour les différents systèmes pour la période 2001–2026



Bilan 0-EA-a: Tuni



Bilan 0-AA-a: Achachicala



Bilan 0-PP-a: Pampahasi

Les bilans résumés dans le Tableau 8.2 visent à répondre aux objectifs qui avaient été fixés dans le modèle descriptif présenté au chapitre 2 (Figure 2.10). Nous l'avons intitulé : « conclusions nécessaires pour la mise en œuvre de la GIRE » c'est-à-dire :

a) ***vulnérabilité initiale des systèmes***
b) ***« temps de la gestion »*** *(dates clés de la gestion)* ***et***
c) ***le mode de la gestion.***

Diagnostic des systèmes grâce au bilan entre l'offre et la demande en eau (vulnérabilité initiale)

Comme évoqué plus haut, la simulation du bilan de l'offre et de la demande en eau dans le scénario 0 (Figure 8.1), peut être considéré comme diagnostic de l'état actuel des systèmes et de leur évolution jusqu'en 2026 en supposant que la situation actuelle se maintienne.

Selon nos estimations, El Alto est un système vulnérable, son bilan devenant négatif dès 2010 et 2011. Celui-ci ne devient négatif qu'à partir de Juillet 2012 car les précipitations d'été compensent temporairement la demande pour les deux années précédentes. L'usine de traitement d'eau s'avère déjà insuffisante pour couvrir la totalité de la demande en eau potable du système.

Nous avons commenté ces résultats avec les techniciens d'EPSAS Ils partagent notre analyse des résultats de la simulation ***(Communication Personnelle Quisbert T, EPSAS, 2009).***

Le système Achachicala présente une situation qui n'est pas préoccupante : une seule de ses sources (Milluni) suffit pour couvrir la demande de son système. Les eaux de la rivière Choqueyapu servent également d'apport en eau pour le bassin.

La demande du système Pampahasi peut être couverte par l'une de ses sources: Hampaturi, les eaux du bassin voisin d'Incachaca étant également disponibles. Bien que sa demande soit croissante, ses sources peuvent couvrir sans problème la demande jusqu'en 2026.

En résumé, El Alto constitue un système vulnérable tandis que les deux autres possèdent des ressources suffisantes pour répondre à l'évolution de la demande jusqu'en 2026.

Temps de la Gestion

Les résultats concernant le temps de la gestion sont présentés ci-dessous:

El Alto qui est un système déjà vulnérable nécessitant des mesures d'urgence résoudre son problème de déficit. Les prises de décision, ainsi que la mise en œuvre des infrastructures devront prendre cours entre 2010 et 2012.Toutefois, comme la gestion administrative de ces décisions est un long processus, nous pouvons déjà affirmer que nous sommes en retard pour agir. Il faudra donc trouver d'autres solutions alternatives et d'émergence.

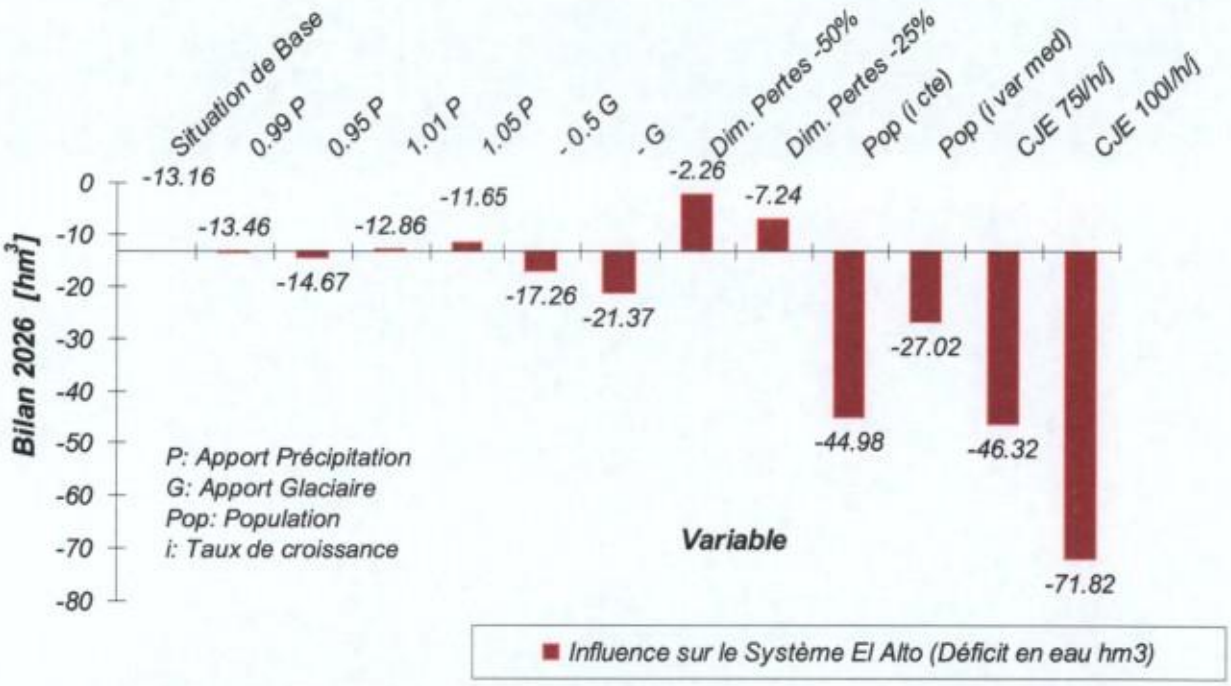
En ce qui concerne le système Achachicala, seule une fonte accélérée de ses glaciers jusqu'en 2026 pourrait conduire à un bilan négatif pour l'année 2026. Même dans l'éventualité d'un recul important des glaciers du système, l'apport en eau provenant du Choqueyapu permettrait de pourvoir la demande.

Dans le système Pampahasi, si la croissance de la population se maintient, la demande en eau pourrait dépasser l'offre en 2026. Le même problème se poserait en cas d'accroissement de la CJE. Si ces deux derniers paramètres manifestaient une augmentation, les dates limites seraient dépendantes de l'ampleur de leur augmentation.

Influence de chaque variable sur le bilan d'offre et de demande en eau

Considérant le système d'El Alto et sa situation de vulnérabilité actuelle comme référence par rapport aux autres scénarios de bilan d'offre et de demande simulés, il est possible de déterminer l'influence de chacune des variables en jeu. Figure 8.2.

Figure 8.2 : Estimation de l'influence de chaque variable sur le bilan de l'offre et de la demande (Bilan pour l'année 2026)



La Figure 8.2 traduit l'influence relative de chaque variable par rapport au bilan prévu pour l'année 2026. La situation de base rapporte un déficit de -13.16 hm^3 pour cet horizon. Nous prenons cette situation comme base de comparaison avec les autres scénarios (axe d'abscisses fixé en -13.16 hm^3), en remarquant les aspects suivants :

Tous les résultats des bilans sont négatifs, ce qui veut dire que tous les scénarios conduisent à un déficit dans le système d'El Alto.

Les valeurs estimées représenteraient ainsi le volume en eau d'apport que le système d'El Alto devra chercher en dehors de ses sources actuelles pour couvrir la demande de la population en 2026, selon les conditions simulées dans chaque scénario.

La diminution de pertes constitue un scénario positif. Elle conduit à une atténuation du déficit.

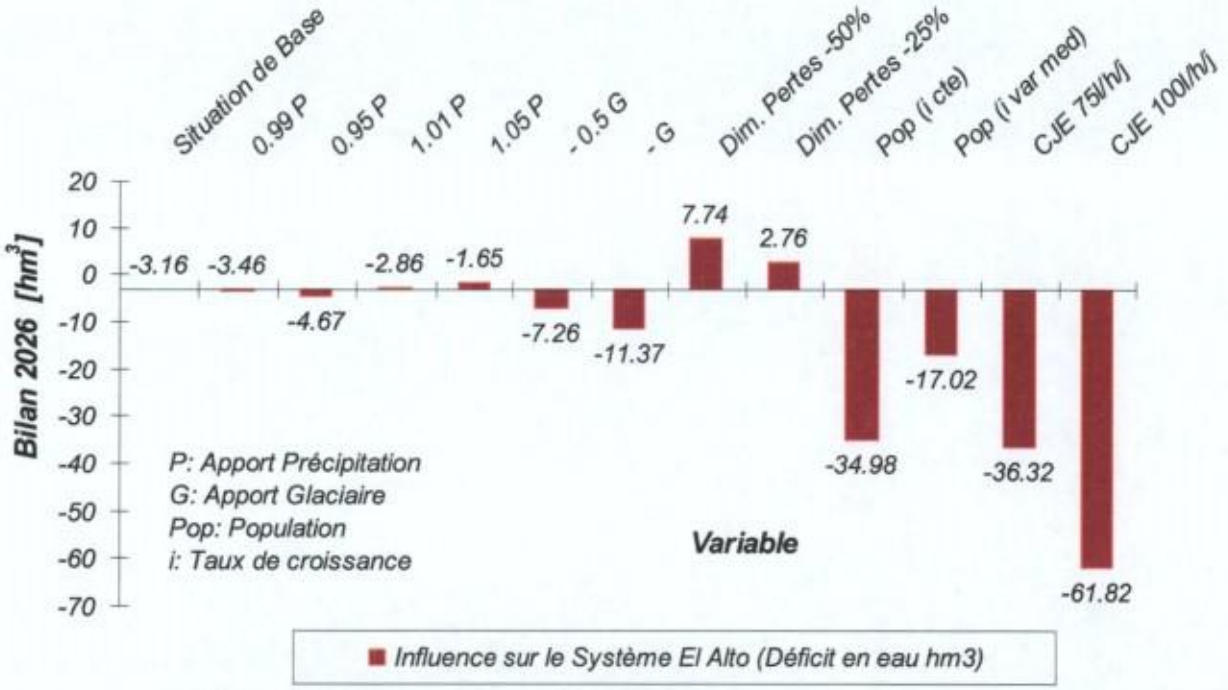
Dans une moindre mesure, une augmentation des précipitations aura un effet positif sur la réduction du déficit.

Les scénarios démographiques (croissance de la population sans atténuation ou légèrement atténuée et augmentation de la consommation en eau de la population, CJE), se présentent comme les plus négatifs pour la gestion de l'eau.
La diminution des précipitations de 1 et 5% exprime aussi des scénarios négatifs par rapport aux tendances actuelles. Cependant, par rapport aux autres variables son influence est moindre.

Nous rappelons que pour notre zone à la figure 4.15, nous avons montré que, par rapport à la diminution de l'écoulement, une diminution de 1% des précipitations est équivalente à une augmentation de 2.5·C de la température.

Bien que la capacité d'apport de l'aquifère soit encore inconnue, l'EPSAS ambitionne de prélever environ 10 hm^3/an d'eau d'origine souterraine supplémentaires grâce aux projets en développement ***(Quisbert 2010, Communication personnel)***. En tenant compte de cette donnée, les résultats exposés dans la Figure 8.2 pourraient prendre la forme suivante :

Figure 8.3 : Scenarios de bilan d'offre et demande d'eau d'El Alto en tenant en compte un possible apport de la nappe



Notons que ce possible apport des nappes ne suffira pas à renverser la tendance au déficit en eau à El Alto, même dans les cas d'une augmentation de la précipitation.

La Figure 8.3 dénote que, pour atteindre une situation d'équilibre entre offre et demande, le développement de nouvelles sources (comme l'eau souterraine) devra être combiné à une réduction des pertes au cours du processus de traitement de l'eau.

Dans le cadre des situations présentées ci-dessus, les variables sont classées sont classées par ordre croissant selon leur influence sur le bilan dans notre zone d'étude :

1. *Pertes dans le processus de traitement d'eau (des barrages jusqu'au réseau)*
2. *Influence démographique sur la consommation d'eau (Augmentation de la population ou de la CJE).*
3. *Recul des glaciers*
4. *Diminution des précipitations (scénario climatique)*

Nous situons les pertes en tête de la liste car elles constituent une variable clé pour diminuer le déficit en eau, et représentent donc une clé stratégique pour la gestion de l'eau. Un meilleur contrôle de celles-ci offrirait un sursis pour résoudre de manière structurelle le problème d'eau que connaîtra la population d'El Alto.

Par rapport aux valeurs calculées, les scénarios démographiques sont sans doute les plus importants.

Il est également évident que la priorité pour El Alto consisterait à découvrir de nouvelles sources. Nous considérons que les scénarios présentés montrent l'ensemble des valeurs probables pour El Alto vers 2026.

Le mode la gestion

Le mode de la gestion est le résultat de la prise en considération :

a) des aspects actuels de vulnérabilité ou de suffisance des systèmes d'eau potable
b) de la disponibilité des ressources
c) de la vision holistique posée par la GIRE et proposée dans cette recherche
d) de l'importance relative de chaque variable dans la gestion.
e) des temps de la gestion
f) de l"infrastructure qui peut être proposée

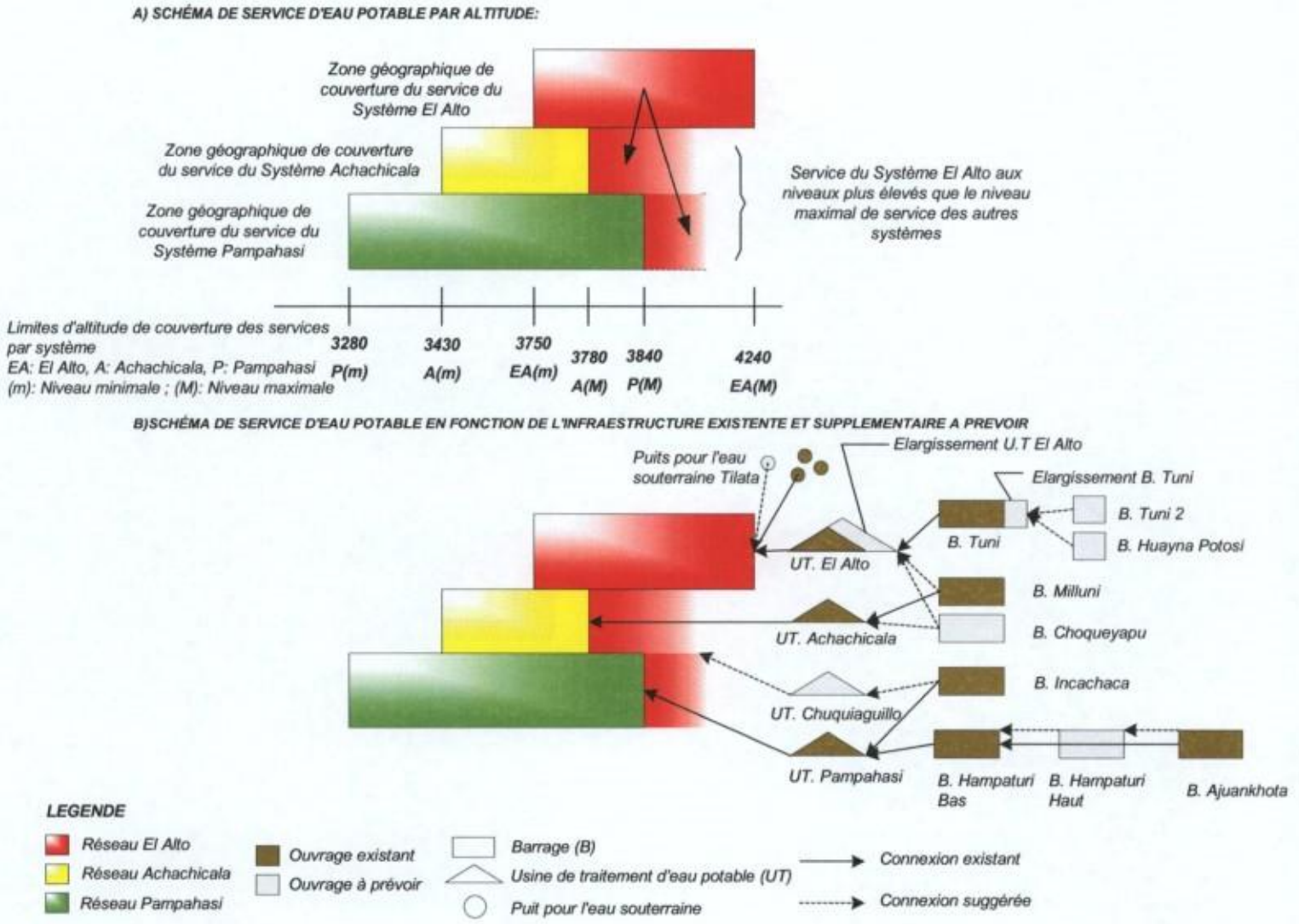
Les 4 premiers aspects sont considérés dans l'analyse présentée ci-dessous et tout au long de cette étude.

Les ***temps de la gestion*** dépendent des décisions de l'EPSAS en relation aux aspects de vulnérabilité que nous avons identifiés grâce à l'analyse de bilan d'offre et demande et aussi des infrastructures à prévoir pour diminuer la vulnérabilité de leurs systèmes particulièrement celle d'El Alto. ***(Voir Tableau 8.2, colonne « date de dépassement »).***

La Figure 8.4 offre une proposition de mise en œuvre de la gestion en fonction de ***l'infrastructure nécessaire*** dans le but:

- *de résoudre le problème d'El Alto où la demande en eau surpasse l'offre ;*
- *d'assurer le service futur dans les trois systèmes considérés ;*
- *de diminuer la vulnérabilité de tous les systèmes en les interconnectant.*

Figure 8.4 : Proposition de mise en œuvre de la gestion en fonction de l'infrastructure nécessaire



Puits pour l'eau souterraine: la mise en service de nouveaux puits de captage d'eau souterraine est dépendante de la prospection sur l'aquifère d'El Alto.

Agrandissement de l'usine d'El Alto: Comme il a été évoqué plus haut, il est nécessaire d'augmenter la capacité de l'usine de traitement d'El Alto afin de couvrir la demande en eau de la ville. Une modification du schéma de traitement de l'usine serait également bénéfique pour que l'usine puisse recevoir les eaux du barrage Milluni. En raison de la charge solide importante de ces eaux, il conviendrait néanmoins de prévoir une étape de sédimentation plus avancée qu'actuellement dans le processus de traitement de l'eau.

Augmentation de la capacité du Barrage Tuni: elle serait possible au regard de la topographie du lieu d'implantation du barrage en forme de cuvette. Sa capacité de régulation augmenterait car il pourrait stocker une réserve d'eau plus importante pendant les années pluvieuses.

Barrage Huayna Potosí: on suggère la construction de ce barrage en amont du barrage Tuni sur le bassin Huayna Potosí et non parallèlement comme il a été proposé dans le projet. De cette façon, les barrages assumeront une partie du rôle de régulation que les glaciers jouent actuellement, celui-ci ayant tendance à disparaître à cause de la fonte des réserves glaciaires

Barrage Tuni 2: la construction d'un petit barrage en amont du barrage Tuni sur le bassin de Tuni, serait souhaitable. Elle se justifierait de la même manière que celle du barrage Huayna Potosí.

Barrage Choqueyapu: il serait construit dans le bassin du même nom et desservirait les usines d'El Alto et Achachicala. Conjointement avec Milluni, les deux barrages serviraient aux usines de traitement afin : a) d'assurer un plus grand apport en eau, b) d'offrir une plus grande capacité de régulation des apports et, c) d'augmenter la résilience entre ces deux systèmes.

Usine de traitement d'eau de Chuquiaguillo: elle serait construite en aval du barrage d'Incachaca et traiterait les eaux provenant de ce barrage. On profiterait de l'alimentation du système Pampahasi par les eaux provenant du barrage d'Hampaturi, pour permettre à l'usine de Chuquiaguillo de desservir certaines zones situées au-dessus de la limite d'altitude de service du système Pampahasi. Cela soulagerait l'usine de traitement d'El Alto (qui rend actuellement ce service).

Barrage Hampaturi haut : il serait construit entre les barrages d'Hampaturi (en bas) et Ajuankhota, dans le but de profiter de la totalité de l'apport du bassin et d'améliorer d'environ 100% la régulation de l'apport de son bassin via une augmentation des réserves en eau accumulées essentiellement durant les années pluvieuses.

Plan de diminution de pertes : cet aspect est primordial afin d'améliorer l'efficacité des systèmes. Son importance sur le bilan en eau a été suggérée plus haut (Figure 8.2)

Les extensions du réseau correspondent à l'interaction entre EPSAS et les demandes de la population, qui sont implicites dans les projections de la demande.

8.2 Bases de la GIRE

A travers les analyses et estimations qu'elle présente, cette thèse contribue à établir les bases de la GIRE des villes de La Paz et El Alto dans les cadres suivants :

- *évaluation des ressources hydriques*
- *création et suggestions d'instruments de gestion*
- *planification de la GIRE*
  - *planification stratégique globale*
  - *plan d'infrastructure nécessaire*
  - *planification du temps*
- *gestion de la demande*
- *résolution des conflits*

8.2.1 Évaluation des ressources hydriques : Création et suggestions d'instruments de gestion

Ces deux aspects sont analysés ensemble puisqu'ils résultent tous les deux d'études effectuées au long de cette recherche. Alors dans ce cadre, on procède à une récapitulation structurée de ces analyses.

Cette récapitulation est une synthèse de la contribution de cette thèse à la construction de la GIRE. Elle tient compte des connaissances approfondies dans le cadre de cette thèse sur l'apport en eau des bassins versants, des instruments créés pour contribuer à la gestion et de l'analyse des variables représentatives de l'offre et de la demande en eau potable à La Paz et à El Alto.

Ressources en eau disponible actuellement:

Les valeurs moyennes d'apport des bassins versants, des précipitations et de l'écoulement ont été calculées précédemment (Analyse des variables dans les Chapitres 3 et 4 et les valeurs de P et E associes a une probabilité sont dans Tableau 6.2).

Perspective d'évolution des ressources :

- *Quantité de précipitations* → Perspectives ambiguës d'augmentation ou diminution, (+/-5%) (Chapitre 3).

  Afin de déterminer les conséquences les plus négatives pour la gestion, une diminution des précipitations (-1 et -5%) a été envisagée plus haut dans un scénario de bilan d'offre et de demande.

- *Quantité de précipitation nécessaire pour répondre aux besoins en eau des systèmes d'eau potable de La Paz et El Alto* → (Tableau 3.5).

- *Retrait des glaciers* → les glaciers représentent entre 8-11% du volume total d'apport en eau des bassins de Tuni, Condoriri, Huayna Potosi (Système El Alto) et Milluni (Système d'Achachicala) (Tableau 4.4 : G_o/ToT). Le stock glaciaire et son apport vont progressivement diminuer. (Chapitres 4 et 5)

  Un scénario du bilan de l'offre et de la demande en eau, a été considéré à partir de deux situations : *a)* La perte de tout l'apport glaciaire à l'horizon 2026 et *b)* la perte de la moitié de l'apport glaciaire à l'horizon 2026

Outils pour la gestion de l'eau et pour la prise de décisions portant sur l'utilisation des ressources en eau et l'opération des barrages

- *Courbe de décharge :* méthode suggérée pour déterminer la concentration de précipitations et son délai d'arrivée (Chapitre 3). Il s'agit d'un outil pour l'analyse de l'influence de la concentration des précipitations sur la gestion de l'eau et des années particulières dont la concentration en pluies a joué un rôle sur l'apport du bassin versant.

- *Estimation des précipitations :* méthode suggérée pour estimer la valeur des précipitations totales annuelles qui, conjointement avec le calcul de la quantité de précipitations nécessaires, constitue un outil pour la prise des décisions portant sur l'opération des barrages (Chapitre 3).
- *Balance Hydrologique :* méthode suggérée permettant de décrire la dynamique du bassin versant et de modéliser ses apports en termes d'écoulement et de volume total des ressources disponibles. (Chapitre 4).

  Cette méthode nous a permis de déterminer l'apport glaciaire pour les bassins versants

Demandes en eau provenant de la consommation en eau de la population

- *Quantité d'eau du bassin versant nécessaire à la base pour qu'un litre d'eau parvienne au réseau (étant donné l'efficacité des systèmes,* Tableau 6.8)
- *Estimation des quantités d'eau demandées dans les différentes étapes de potabilisation de l'eau pour les 3 systèmes d'eau potable de La Paz et d'El Alto (*Tableau 7.8 *et* Figure 7.6, *7.7 et 7.8).*

On a mentionné les contraintes existantes concernant les sources potentielles.

Dans le cas des eaux souterraines, il existe des contraintes relatives au manque de connaissance concernant la capacité de l'aquifère et son régime. Malgré à cela, l'EPSAS a prévu une possible exploitation de l'aquifère additionnelle à ce sous système Tilata de 10 hm^3 de plus.

Dans le cas de l'eau superficielle, les contraintes proviennent de la gestion sociale, politique et des conflits potentiels entre ville et campagne liés à l'utilisation des ressources en eau. D'une part, on trouve les habitants de la campagne (communautés défavorisées et autres en développement) vivant au sein du bassin versant où sont localisées les ressources en eau et qui voient dans l'eau une possibilité de développement et, d'autre part, la population des villes qui a également besoin de cette ressource. (Chapitre 1).

Nous avons également mentionné la sensibilité des citoyens boliviens concernant les décisions liées à l'eau. Ils ont des droits protégés par la loi bolivienne.

Par ces aspects, nous insistons sur l'importance de la variable sociale sur les décisions concernant l'eau et sa gestion.

Outils pour l'opération des barrages

- proposition d'utilisation du concept de temps de résidence comme outil pour l'opération des barrages, par rapport à la demande (sous-titre 6.1).
- utilisation du concept de temps de résidence pour diagnostiquer la capacité de régulation actuelle de nos barrages. (Figure 6.2)

Détermination de l'efficience des systèmes

L'efficience se concrétise grâce à

- l'estimation des pertes entre barrages et usines de traitement de l'eau (Tableaux 6.5)
- l'estimation des pertes à l'intérieur de l'usine de traitement (Tableaux 6.6)
- l'estimation des pertes au sein des réseaux. (Tableaux 6.7)
- la détermination de l'efficience totale de chaque système. (Tableau 6.8)

Détermination du besoin supplémentaire de capacité de mobilisation de l'eau

On propose l'établissement de bilans d'offre et de demande en eau comme méthodologie pour déterminer la nécessité de multiplier les capacités techniques de mobilisation de l'eau disponible actuellement, principalement pour des barrages et des usines de traitement. (Tableau 8.2, Figure 8.1, Annexe).

- Barrages: bilan entre offre des ressources du bassin versant et demande en source ***(Dsources)*** pour satisfaire la consommation en eau des villes.
- Usines de traitement d'eau: mise en rapport de la demande de traitement en eau nécessaire pour satisfaire la consommation des villes ***(Dout_usines)*** avec la capacité de production d'eau potable de l'usine de traitement d'eau.

Planification préliminaire du besoin supplémentaire de capacité de mobilisation de l'eau

En concordance avec le dernier point, on suggère également le type d'élément d'infrastructure nécessaire pour créer une gestion de l'eau intégrée couvrant les besoins de tous les systèmes considérés, y compris les besoins actuels urgents en eau d'El Alto. Cette proposition vise à :

- *résoudre le problème d'El Alto où la demande en eau surpasse l'offre ;*
- *assurer le service futur dans les trois systèmes considérés ;*
- *diminuer la vulnérabilité de tous les systèmes en les interconnectant. (Figure 8.4)*

Influence des éléments d'infrastructure au sein des bassins

On a montré que l'agencement des différents éléments d'infrastructure dans les bassins versants est important pour optimiser l'exploitation des ressources, le traitement et la distribution de l'eau et donc maximiser l'apport en eau.

Les barrages pourraient jouer le rôle régulateur des glaciers *(mais pas leur rôle dans l'apport d'eau au bassin)* dans le cas où ceux-ci auraient disparu (Chapitre 4). Dans le nouveau schéma d'infrastructure, on propose la construction de deux barrages (Tuni 2 et Huayna Potosí) pour pallier à la diminution du pouvoir régulateur des glaciers. (Figure 8.4).

Population

On a présenté les taux de croissance de population pour chaque système et les incertitudes introduites dans le calcul à partir de l'hypothèse d'un taux de croissance donné ou d'un modèle de projection de population. (Sous-titre 7.2). On a estimé l'évolution de la croissance de la population de manière indépendante dans chaque système et on a pu démontrer que la croissance est hétérogène entre ceux-ci. (Figure 7.1). Cet aspect d'hétérogénéité de la croissance de la population rend également compte de l'hétérogénéité de la population et des quartiers de l'agglomération urbaine de La Paz et d'El Alto.

Couverture du service d'eau potable

Cette variable dépend de l'administrateur/gestionnaire du réseau d'eau et des demandes de consommation au réseau venant de la population Nous avons présenté ses projections (Sous-titre 7.3)

CJE

Nous avons proposé une méthodologie de détermination de la CJE au moyen d'une analyse prenant en compte la globalité du processus de potabilisation de l'eau (Sous-titre 7.4)

Par ailleurs, l'estimation de la CJE et de la consommation domestique par personne a été réalisée pour chaque système. Nous avons comparé ces valeurs entre systèmes et avec les consommations de la même nature des autres pays. Cela nous a permis de mettre en évidence une forte hétérogénéité des consommations existantes dans l'agglomération urbaine La Paz - El Alto. (Sous-titre 7.4)

Demande en eau de chaque système

Elle a été estimée pour les différentes étapes du processus de potabilisation de l'eau (sous-titre 7.5, Tableau 7.8).

Sensibilité de la consommation totale et de la demande aux différentes variables considérées

Nous avons déterminé la vulnérabilité actuelle des systèmes de provision d'eau potable par rapport aux valeurs de la demande en eau de la population. Tableau 8.2, Figure 8.1, Annexe).

L'influence des différentes variables sur la consommation en eau et le bilan d'offre et de demande (Figure 8.2) a été analysée en établissant leurs importances relatives dans la gestion de l'eau.

Analyse et Identification de l'importance relative des variables jouant un rôle dans la gestion de l'eau

Nous avons fait une analyse comparative des variables par rapport à leur importance relative dans la gestion de l'eau (Chapitre 8, sous-titre 8.1).

On a mis en rapport les variables de type climatique (précipitation et apport glaciaire) avec des variables de type social comme l'augmentation de la population et de la consommation d'eau (totale et par habitant).

D'autres variables ont également été prises en compte comme les pertes du réseau inhérentes à l'efficacité de l'infrastructure.

Dans nos cas particuliers, nous remarquons l'importance des variables sociales et de la diminution des pertes par rapport aux variables climatiques. Ceci va à l'encontre de la pensée dominante en Bolivie qui stipule que les problèmes d'eau de La Paz et El Alto sont liés aux changements climatiques (diminution de l'apport glaciaire ou des précipitations).

Variables qui devront être analysées prioritairement dans la gestion de l'eau de La Paz et d'El Alto

Nous avons remarqué que la diminution des pertes et la mise en place d'une stratégie qui tient compte du côté social de la demande en eau (croissance de la population et augmentation de sa consommation) sont absolument nécessaires pour parvenir à une meilleure gestion de l'eau de notre zone d'étude.

Les variables climatiques sont importantes pour la disponibilité en eau. Dans une société toujours plus consommatrice d'eau, il est nécessaire d'en tenir compte dans nos bilan.

8.2.2 Planification de la GIRE

A partir des résultats obtenus du bilan d'offre et de demande (sous-titre 8.1), cette thèse apporte sa contribution à trois volets de la planification de la GIRE,

Planification stratégique: elle répond aux politiques de développement régional et national. Les conflits ville-campagne concernant l'utilisation de l'eau trouveraient leur origine dans un manque de planification stratégique entre régions et dans une mauvaise utilisation des instruments de planification. Nous présentons dans la Figure 8.5 une proposition d'utilisation de ces instruments pour la planification de la GIRE et la résolution des conflits.

Pour analyser cette proposition, il est important de signaler qu'il existe en Bolivie trois instruments de planification concernant la thématique de l'eau, la gestion des ressources et la planification stratégique ***(Bolivie R. d. et al. 2006;Ley No 1551: Participación Popular, 1993;République de Bolivie, 2009)***

- ***Le Plan d'aménagement du territoire : Niveau national, départemental et municipal (PAT)***

  Ce plan présente la vision de développement et les priorités de l'état, du département ou de la municipalité. Il tient compte du niveau social et économique de ses habitants afin de leur offrir des options de développement réelles.

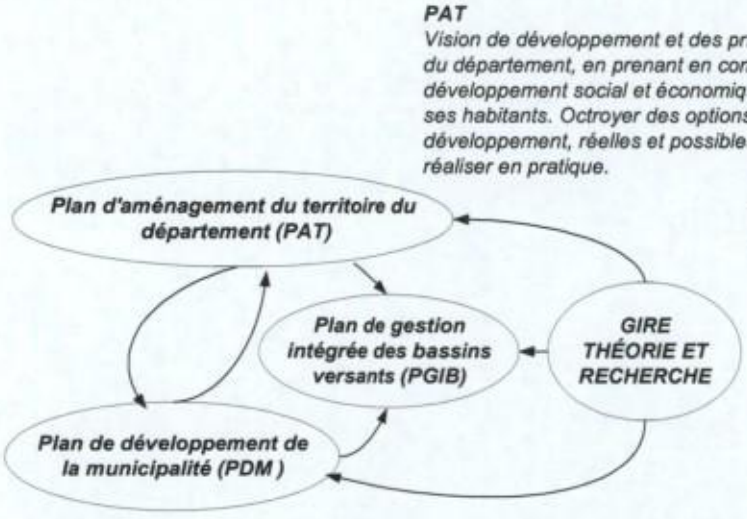
- ***Plan de développement de la municipalité. (PDM)***

  Ce plan propose la façon dont la municipalité pourrait prospérer en fonction des ressources de son territoire ou en association avec d'autres municipalités. Il devra inclure des mesures concrètes proposées par la municipalité.

- ***Plan de gestion intégrée des bassins versants (PGIB) :***

  Ce plan offre les modalités de l'utilisation durable des ressources du bassin versant en fonction de ses usagers, principalement ceux de l'eau.

Figure 8.5 : GIRE comme une proposition de construction d'une stratégie de planification de l'eau



La Figure 8.5 montre, notre proposition d'utilisation de la théorie de la GIRE et principalement de la recherche qu'il est possible de faire dans son cadre Il s'agit d'un outil qui peut fournir des connaissances aux instruments de planification boliviens dans les domaines décrits dans la figure et analysés dans cette thèse (voir sous titre 8.2.1).

Sur ce sujet, nous soulignons les aspects suivants :

Les instruments de planification sont déterminés par des institutions étatiques qui, bien qu'agissant à un niveau local, devront tenir compte du concept de planification à plus grande échelle (régionale).

Les instruments de planification devront être coordonnés par les autorités régionales. Elles sont supposées assurer la coordination des instruments de planification régionale et de développement des entités limitrophes.

D'autre part, les instruments de planification nécessitent des connaissances approfondies de la disponibilité des ressources et de leur utilisation durable. L'implication de la recherche est donc nécessaire.

Le rôle des institutions de planification (principalement gouvernementales) et l'impact qu'elles ont dans la gestion de l'eau doivent être clairs. Elles doivent avoir une connaissance approfondie de la disponibilité en eau des bassins versants.

La recherche de nouvelles sources d'eau superficielle engendre une problématique de type social à résoudre. En effet, il ne s'agit pas uniquement d'une problématique de type technique. La planification devra tenir compte de ces deux aspects.

Il est donc clair que la participation sociale pour les décisions relative à l'eau est nécessaire au-delà du fait que la loi bolivienne déclare la participation de la société comme indispensable pour les décisions sur n'importe quelle type de projet.

Planification d'éléments d'infrastructures nécessaires: la possibilité d'exploitation d'une ressource en eau est liée à la capacité de mobilisation de celle-ci et à son efficience. Une proposition de mise en place d'infrastructure a été présentée à la Figure 8.4. Elle provient de l'analyse de bilan d'offre et demande présentée au début de ce chapitre.

Planification de temps: celle-ci résulte directement du bilan de l'offre et de la demande en eau au niveau du bassin et du bilan entre le volume d'eau nécessaire et la capacité des usines de traitement. (Tableau 8.2, Figure 8.1, Annexe).

Les moments de dépassement de l'offre de ressources en eau ou de la capacité des usines de traitement d'eau, sont des points de repère pour la gestion de l'eau. En effet, au delà de ceux-ci, la planification devra prendre en compte des délais comme les délais de financement, délais administratifs, délai de projet, temps de construction et durée de mise en fonctionnement des infrastructures. La somme de tous ces délais devra être considérée à l'avance des dates qui proviennent des bilans d'offre et demande.

8.2.3 Gestion de la demande

Ce travail de recherche suggère à la fois une réponse et une proposition pour la gestion de la demande. Nous proposons que les connaissances sur l'influence de chaque variable constituent la base de la GIRE. L'ensemble des aspects analysés dans cette thèse permet d'assurer que la demande soit satisfaite, en remarquant les vulnérabilités des systèmes ou les variables qui représentent un risque pour cette gestion.

8.2.4 Autres concepts pour l'application de la GIRE

Reconnaissons que cette étude n'approfondit que le côté urbain de la problématique. Pour prendre des décisions plus complètes, il va falloir soumettre le milieu rural à une analyse similaire afin d'estimer correctement la demande en eau des communautés rurales. On suggère que la méthodologie suivie lors de cette analyse soit semblable celle présentée dans ce travail

Pour établir les bases de la Gestion de l'eau et pour son application ultérieure à notre cas d'étude, nous voudrons ajouter deux critères qui provient aussi de la théorie de la GIRE et qui sont adaptées pour notre cas d'étude: la valorisation de l'eau comme ressource sociale et économique et la valorisation du service environnemental.

Pourquoi attribuer une valeur au service environnemental ?

L'eau disponible des bassins souffre actuellement d'une diminution étant donné, la perte de masse des glaciers présents en son sein. Cette diminution de la taille des glaciers se traduit aussi par une perte de la capacité naturelle de régulation de l'apport en eau au bassin versant,

La disparition des glaciers entraine également la perte de la capacité d'humectage du bassin préparant la surface du sol pour l'écoulement.

Si nous considérons la capacité naturelle de régulation d'eau et l'apport des glaciers comme un service environnemental du bassin versant, nous pouvons dire que ce service diminue.

Comme le niveau de service environnemental du bassin diminue, le processus de conversion d'une goutte d'eau entrant dans le bassin (précipitations, apport glaciaire, input du bassin) en une goutte d'eau utilisable (output du bassin : eau douce), se complique. Si nous attribuons une valeur à ce processus de conversion, nous pourrions dire qu'actuellement l'obtention d'une goutte d'eau douce « coûte plus cher » d'un point de vue environnemental qu'il y a quelques années.

Cette situation se traduit d'un point de vue technique par une diminution de la valeur du coefficient d'écoulement (Cesc).

Pourquoi attribuer une valeur à l'eau comme ressource sociale et économique ?

Il s'avère tout d'abord nécessaire de souligner que ce concept d'attribution de valeur ne signifie pas d'attribuer une valeur en argent à l'eau dans le but éventuel de récupérer les coûts de traitement, de service ou d'investissement. On explique ci-dessous le bien-fondé d'un tel concept à travers l'analyse de la problématique.

On a reconnu qu'actuellement la demande en eau du système d'El Alto et les apports de sa source Tuni sont pratiquement équivalents. On a également reconnu qu'il reste un volume moyen par année d'à peu près de 2 hm^3, volume qui pourrait potentiellement être utilisé, mais qui dans les faits constitue une réserve d'eau dans le lac de barrage pour les années sèches.

D'autre part, on observe un souhait des communautés rurales implantées au sein du bassin de pouvoir disposer de ces ressources en eau pour permettre le développement de leur région.

Or, si nous estimons que ces 2 hm^3 d'eau sont disponibles pour être utilisés (ce qui est bien évidemment discutable), la valeur attribuée à ce volume d'eau est importante vu la rareté du bien en regard de la demande provenant de deux régions :(El Alto et les communautés de Pucarani).

Ce volume de 2 hm^3 d'eau possède dès lors une valeur plus grande, que le même volume d'eau présent dans une autre partie du pays où les ressources en eau sont abondantes. La rareté de la ressource et son intérêt stratégique la rendent plus précieuse.

À travers cette analyse nous pouvons donc conclure que cette zone d'étude est une zone où la valeur de la ressource en eau est probablement l'une des plus élevées de toute la Bolivie. Voilà le sens qu'il convient d'attribuer au concept de « valeur » de la ressource en eau.

8.3 Conclusions

Bilan de l'offre et de la demande en eau

Le bilan de l'offre et de la demande en eau est le résultat des recherches et des analyses effectuées dans les 7 premiers chapitres de cette recherche.

Il met en relation tous les aspects et variables analysés, ce qui nous permet d'émettre quatre conclusions principales :

- Vulnérabilité actuelle des systèmes :
  - El Alto est un système vulnérable nécessitant des solutions immédiates.
  - Pas de vulnérabilité particulière des autres systèmes
- « Temps de la gestion » *(dates clés de la gestion)*
  - Les années 2010 -2012 s'annoncent décisives pour la planification de la gestion d'El Alto puisque c'est pendant cette période que sa vulnérabilité se manifestera. La demande surpassera l'offre des ressources des bassins sources d'El Alto ainsi que la capacité de traitement de son usine de traitement de l'eau.
  - L'offre pourra satisfaire la demande à Achachicala lorsque les glaciers auront disparu.
  - Á Pampahasi, situation similaire à cause des variables démographiques. (Population et CJE).
- Importance de l'influence des variables sur la gestion de l'eau à El Alto

  Nous classifions les variables selon l'importance de leur influence sur le bilan d'offre et de demande de la façon suivante:

  1. Pertes dans le processus de traitement d'eau (des les barrages jusqu'au réseau)
  2. Influence démographique sur consommation d'eau (Augmentation de la population ou de la CJE).
  3. Recul des glaciers
  4. Diminution des précipitations (scénario climatique)

  Nous considérons que la détermination de l'importance de l'influence relative des variables de l'eau sur le bilan d'offre et de demande est un apport important pour la gestion de l'eau de cette ville dû au fait que la planification des solutions pour diminuer sa vulnérabilité et son éventuel déficit en eau pourrait être élaborée en fonction de cette classification.

- Le mode de la gestion

  Nous proposons l'aménagement d'infrastructures afin que les systèmes de La Paz et El Alto soient plus solidaires entre eux (Figure 8.4).

  Cet aménagement ainsi que les conclusions sur (a) les temps de la gestion, (b) l'analyse des ses variables principales et (c) ce qui ressort des analyses de cette thèse constitueraient les bases pour la planification de la gestion de l'eau.

  La prise de décisions stratégiques en fonction de ces trois conclusions déterminera le mode de la gestion de l'eau et de sa planification

Cet ensemble devient alors notre proposition de base pour la GIRE ou modalité de la gestion de l'eau pour les villes de La Paz et El Alto.

Bases de la GIRE

Nous considérons que notre apport principal à la GIRE constitue l'ensemble des connaissances, analyses et outils que nous avons élaborés dans cette thèse. Cet apport permettra la planification de l'utilisation durable de l'eau pour les villes de LP et EA soit dans les cas les plus vulnérables comme celui d'El Alto ou soit dans les cas plus simples comme ceux des deux autres systèmes.

Une meilleure connaissance des variables qui jouent un rôle dans la gestion de l'eau permet que les décisions stratégiques se basent sur des connaissances solides. Par conséquent, les décisions prises pour la gestion des eaux seront probablement meilleures.

La connaissance du temps dont nous disposons pour la gestion de l'eau (bilan d'offre et de demande), nous permet aussi de prioriser les décisions dans les cas les plus vulnérables et d'agir sur les variables primordiales que nous avons identifiées.

Signalons que les connaissances acquises sont aussi applicables pour la résolution de conflits et pour leur prévention.

Les connaissances exposées dans cette thèse ainsi que les aspects susmentionnés nous conduisent vers une meilleure gestion de l'eau. Il s'agit d'un des objectifs principaux de la GIRE. Notre contribution consiste à promouvoir une gouvernance de l'eau favorable aux villes de La Paz et d'El Alto.

9 CONCLUSIONS

La gestion de l'eau potable des villes de La Paz et d'El Alto est un sujet complexe, dans le sens où elle dépend de nombreuses variables : climatiques, économiques, sociales, démographiques, mais également des aspects relatifs à l'infrastructure utilisée pour produire et distribuer l'eau potable.

Actuellement, il existe de nombreuses incertitudes sur ces variables, notamment la disponibilité en eau des sources et la demande en eau de la population. La projection dans le futur de ces deux aspects est également une inconnue. Pour pouvoir entamer une planification durable de l'eau, il s'avère, donc, nécessaire de résoudre ces incertitudes et ces inconnues.

La capacité de l'apport en eau des bassins sources, l'importance de la contribution des glaciers, la durabilité de l'exploitation des ressources hydriques dans les conditions actuelles et dans celles qui pourraient se présenter dans le futur (soit par l'augmentation de la demande, soit par la diminution de la disponibilité en eau) sont les incertitudes que nous avons essayé de résoudre au cours de cette recherche.

La GIRE est prise comme point de repère théorique permettant d'organiser la planification durable de la gestion de l'eau puisqu'elle apporte un cadre qui intègre tant les aspects économiques, sociaux et techniques que les incertitudes mentionnées aux paragraphes précédents. La GIRE considère le développement des connaissances et la diminution des incertitudes sur l'offre et la demande en eau comme une des premières étapes de cette planification.

Cette thèse aborde cet aspect de la GIRE, une recherche permettant d'approfondir la connaissance de certaines variables considérées comme les variables principales pour la mise en œuvre de la gestion intégrée de l'eau des villes de La Paz et d'El Alto.

Les précipitations, la dynamique hydrologique actuelle et son évolution possible (sur base des changements envisageables dans le régime des précipitations et des températures), l'apport en eau des bassins versants et son évolution ainsi que l'importance de l'apport en eau des glaciers sont les sujets analysés dans cette thèse.

Nous avons, également, traité la demande en eau en étudiant ses deux composantes : la population et sa consommation d'eau ainsi que les pertes dans les processus de production et de distribution de l'eau potable.

Les analyses faites nous ont amenés à établir des limites de variation pour chaque variable, à créer des outils pour la gestion et à formuler des recommandations pour l'application de certains modèles.

Les conclusions générales pour la mise en œuvre de la GIRE ont été obtenues par l'intermédiaire du bilan de l'offre et de la demande en eau comme un outil pour déterminer les temps de la gestion (les dates clés de la gestion) et les exigences futures en eau.

Le bilan de l'offre et de la demande en eau apparaît comme un outil efficace tant pour obtenir des diagnostics des systèmes qui fournissent l'eau aux villes de La Paz et d'El Alto, que pour identifier l'importance relative de chaque variable analysée pour la gestion de l'eau de ces deux villes.

Nous avons conclu que les variables démographiques (évolution de la population et consommation d'eau) sont celles qui détermineront principalement le mode de planification de la gestion selon les valeurs qu'elles pourraient prendre dans le futur. La diminution des pertes est également une tâche indispensable à mener à bien dans le cadre d'une gestion durable de l'eau.

L'apport en eau glaciaire pour les bassins sources, qui est considéré par les autorités boliviennes comme la variable la plus importante et décisive dans la gestion de l'eau vient en deuxième ordre d'importance selon nos analyses. En effet, la diminution potentielle de l'apport en eau glaciaire dans le futur devra être compensée par d'autres sources que les gestionnaires devront trouver ailleurs.

Quant aux variables climatiques, les changements possibles du régime des précipitations et des températures amèneraient aussi des changements dans la quantité et la répartition annuelle de l'écoulement. Selon nos conclusions, elles viennent au troisième ordre d'importance pour la gestion de l'eau en tant que diminution de l'offre des ressources hydriques.

Les conclusions que nous venons de résumer et les analyses réalisées pour les obtenir constituent l'apport de cette thèse pour la mise en œuvre de la gestion de l'eau dans les villes de La Paz et d'El Alto.

La méthodologie que nous avons utilisée constitue en soi un autre apport de la thèse, en tant que référence pour d'autres cas d'étude similaires dans la région.

Le modèle descriptif

La construction d'un modèle descriptif de la gestion de l'eau potable des villes de La Paz et d'El Alto (Figure 2.10), a été la première étape que nous nous sommes fixée pour orienter notre réflexion. Tout au long de cette recherche, nous avons constaté que ce modèle est un outil très utile, puisqu'il nous a permis de mettre en rapport les variables analysées. Le modèle a également facilité la vision holistique de la gestion de l'eau dont nous avions besoin pour élaborer cette recherche : ***Les bases de la GIRE pour l'eau potable des villes de La Paz et El Alto.***

Analyse des variables :

Les précipitations

Les changements des quantités de précipitations dans le futur s'avère être l'une des principales incertitudes des chercheurs dans le domaine des impacts des changements climatiques. En ce qui concerne la zone étudiée, il existe plusieurs analyses qui nous présentent des résultats et des tendances opposés pour les changements dans la moyenne annuelle des précipitations.

Les scénarios qui prédisent une augmentation des quantités de précipitations sont positifs pour la gestion de l'eau. Par contre, des prédictions comme celles de l'IPCC *(2007)* annoncent une possible diminution de la quantité des précipitations annuelles.

Comme il est difficile de prévoir la tendance climatologique dans le futur, nous avons conclu que, pour la planification de la gestion de l'eau, il serait préférable d'élaborer des plans dans les deux éventualités, en donnant toutefois la priorité au cas des tendances négatives.

Pour nos analyses du bilan de l'offre et de la demande, nous avons donc préparé un scénario qui prévoit tant la diminution que l'augmentation des précipitations d'ici l'année 2026, afin de déterminer les conséquences de ces changements sur la gestion de l'eau potable des villes de La Paz et d'El Alto.

L'application de ce scénario a montré que l'influence relative de cette variable par rapport aux autres telles que les facteurs démographiques ou le retrait des glaciers est faible.

Pour suivre l'impact des changements éventuels dans le régime des précipitations, nous proposons une méthode que nous appelons « la courbe de décharge ». Elle se base sur la détermination du jour de l'année***(J)*** où l'on note une proportion déterminée ***(S)*** des précipitations totales annuelles avec comme base de référence 1961-1990. A partir de cette courbe et à l'aide de l'analyse d'anomalies par rapport à la référence, il est possible de déterminer la concentration des précipitations et l'arrivée tardive des précipitations d'une année quelconque à une échelle journalière. Sa formulation est présentée dans le chapitre 3.

Notre méthode nous a permis de conclure qu'il n'existe pas, au niveau historique, une tendance linéaire claire de la concentration des précipitations. Par contre, nous avons détecté une tendance de concentration cyclique, avec une période de l'ordre de 15 à 25 ans (pour des moyennes mobiles de 5 ans) (Figure 3.18), correspondant à une proportion des précipitations de 25 et 30% des précipitations totales annuelles (Si[%] = [25 et 30]).

Cette tendance cyclique est visible depuis les années 50. A partir de cette époque, on voit se succéder des périodes d'environ 8 à 13 ans pendant lesquels on constate un retard des précipitations ainsi qu'une concentration de celles-ci, et des périodes équivalentes de dispersions et d'arrivée précoce des précipitations.

Les proportions de Si[%]=[25 et 30] correspondent aux jours ***(J)*** du mois de décembre (10 et 20 respectivement). Ce mois est important pour les précipitations dans notre zone d'étude puisqu'il correspond à l'époque de l'année où débute la période des fortes précipitations (décembre-janvier, Figure 3.7 et Figure 3.8).

Actuellement, nous nous trouvons dans la partie du cycle où la tendance est aux concentrations et aux retards des précipitations depuis l'année 1995. Ceci va dans le sens d'une partie des conclusions du PNCC. Cependant, il est trop tôt pour annoncer une tendance attribuable aux changements climatiques, car il peut s'agir de tendances cycliques.

La méthode de la courbe de décharge sert également à l'analyse des années particulières comme celles des « Niños » 1982-1983 et 1998 (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) ou encore 2005, année importante pour la gestion, car il a été possible d'analyser la situation lorsque les barrages de La Paz et d'El Alto étaient presque vides.

Nous avons dès lors proposé une expression pour déterminer la quantité des précipitations totales de l'année quand nous disposons des valeurs des précipitations cumulées correspondant aux jours J_i***min*** et J_i***max*** (Figure 3.22 et Figure 3.23) où l'on attend à n'importe quelle proportion ***(S)*** des précipitations (Equation 8, Chapitre 3). Cette méthode a une précision d'environ 5 à 10%.

Ce pronostic, couplé aux estimations des précipitations nécessaires pour couvrir la demande en eau de la population (Tableau 3.5), est un instrument utile pour la gestion des ressources hydriques de La Paz et El Alto. La méthode permettrait d'estimer les quantités de précipitations pour l'année, et il serait ainsi possible de planifier la gestion de l'eau et la gestion des barrages dans les bassins sources.

Nous présentons la méthode de la « courbe de décharge », ses concepts et ses applications pour l'analyse des années particulières et importantes pour la gestion de l'eau et pour la prédiction des précipitations totales annuelles comme une conclusion en soi et un outil qui sert à l'application de la GIRE dans le cas de l'eau potable des villes de La Paz et El Alto.

Bassin versant

Nous avons cherché une méthodologie pour caractériser la réponse hydrologique du bassin versant aux précipitations (l'écoulement) qui devrait prendre en compte la limitation des disponibilités des données d'EPSAS dans la zone d'étude (niveaux des barrages et enregistrement des précipitations quotidiennes).

En premier lieu, nous avons constaté que le rapport entre les précipitations et l'écoulement n'était pas linéaire (Figure 4.4). Ce dernier dépend en effet d'autres facteurs inhérents au fonctionnement du bassin versant comme l'évapotranspiration et/ou le stockage temporaire de l'eau dans le sol.

Nous avons aussi remarqué que le rapport direct E/P appelé coefficient d'écoulement ***(Cesc)***, tout en étant un paramètre de type linéaire, représente un outil pour les estimations approximatives de l'écoulement.

Notre proposition pour caractériser la réponse hydrologique du bassin versant est un modèle de bilan hydrologique qui a comme variables d'entrée les précipitations ***(P)*** et la température ***(T)*** et qui donne comme résultat l'écoulement ***(E)***. Nous avons inclus une étape de calcul dans le modèle qui consiste en un "forçage" des précipitations pour trouver une valeur ***fo***, représentant l'apport d'un élément de régulation (comme les glaciers ou les barrages) en amont du point de contrôle.

Par ailleurs, nous suggérons une manière d'interpréter les résultats en prenant également en compte « l'architecture du bassin versant » ce qui nous conduit à déterminer l'influence de l'apport glaciaire ou des barrages dans l'apport du bassin versant.

Cette manière d'interpréter les résultats a été validée par la comparaison des résultats du modèle de bilan hydrique avec les valeurs de bilan de masse des glaciers de Chacaltaya, Tuni et Zongo, et aussi par les débits du barrage Ajuankhota (Figure 4.8 à Figure 4.11).

Le bassin d'Incachaca, qui ne présente pas de glaciers ou de barrages importants à l'amont du point de contrôle, a été un autre élément essentiel pour tester l'interprétation des résultats du modèle de bilan.

Comme résultat, nous avons trouvé une influence de 8 à 11% de l'apport glaciaire pour le bassin versant de Tuni, et de 11% pour Milluni. L'influence du barrage d'Ajuankhota, en amont du barrage de Hampaturi où se situe notre point de contrôle, a été estimée entre 15 à 22%.

Les incertitudes ont été évaluées entre 2 et 5% pour les 5 bassins sources auxquels nous avons appliqué cette méthode.

Le modèle proposé sert aussi à simuler des situations futures telles que des changements de valeurs des paramètres climatiques comme la température et les précipitations. Nous avons simulé des variations de la température et des précipitations dans plusieurs scénarios et trouvé qu'une diminution des précipitations de 1% est équivalente à une augmentation de la température de 2.5°C en ce qui concerne la diminution de l'écoulement.

Nous proposons dès lors un modèle pouvant servir d'outil de gestion de l'eau adapté aux conditions de nos bassins qui puisse servir à :

- simuler la dynamique et la réponse hydrologique du bassin versant ;
- simuler divers scénarios de variation de l'écoulement en fonction de la variation des paramètres climatiques (P et T) ;
- déterminer l'influence de l'apport des éléments de régulation comme les glaciers et les barrages en amont du point de contrôle ;
- proposer des concepts pour l'aménagement de « l'architecture » du bassin versant.

Les résultats obtenus sur la valeur de l'influence de l'apport glaciaire à Tuni et Milluni et sur celle du barrage d'Hampaturi sont des conclusions que nous présentons, ainsi que les résultats sur la modélisation de la variation possible de l'écoulement et sur l'équivalence des scénarios d'augmentation de la température et de la diminution des précipitations.

Glaciers

Nous présentons l'utilisation d'un modèle qui sert à simuler la dynamique glaciaire et qui a été calibré et appliqué sur les glaciers de nos bassins sources.

Grâce à l'étalonnage du modèle, nous sommes arrivés à reconstruire le processus de recul du glacier de Chacaltaya. L'influence de l'orientation locale des versants sur ce processus a été soulignée. Nous avons également remarqué que la prise en compte du glissement basal est négligeable pour la modélisation des glaciers étudiés.

A travers l'application de ce modèle, il a été possible d'estimer la diminution potentielle de l'apport en eau provenant des glaciers sur base de l'hypothèse d'un comportement homogène des glaciers et en fixant pour nos analyses une ELA (Equilibrium Line Altitude) moyenne de 5300 m (±100 m). De cette façon, à l'horizon 2026, nous avons estimé que la diminution de l'apport en eau glaciaire sera de près de 50% (±12%) de son apport actuel aux bassins sources des villes de La Paz et d'El Alto.

Afin d'estimer le stock glaciaire des bassins sources, nous avons utilisé 3 méthodes :

1) la modélisation Farinotti *(2009)* ;
2) l'interpolation des valeurs de « Driving stress » calculées à partir des mesures directes des épaisseurs de glace sur le terrain et des pentes de la surface glaciaire ;
3) l'estimation du volume glaciaire à partir des expressions surface/volume (V=f(S)), parmi lesquelles nous avons proposé une équation formulée à partir de la reconstruction du recul du glacier Chacaltaya.

Ces trois méthodes procurent des résultats relativement proches. Chacune présente des avantages et des inconvénients dans leur application aux glaciers (ceux-ci ont été évalués au chapitre 5).

Les réserves en eau calculées pour chaque glacier oscillent entre 4 x 10^5 m^3 et 33 x 10^6 m^3. Les plus grandes réserves se trouvent dans les bassins sources d'El Alto.

Nous estimons que ce système contient une réserve en eau glaciaire d'environ 136 x 10^6 m^3 (± 20 x 10^6 m^3), ce qui équivaut à la consommation annuelle actuelle d'eau d'El Alto de 3 à 5 ans, ce qui n'est pas négligeable. Dans le cas d'Achachicala nous estimons une réserve encore importante d'environ 26 x 10^6 m^3 (± 11 x 10^6 m^3). (1.5 an de consommation d'eau pour le système). Quant au système Pampahasi, son stock glaciaire est faible (~1 x10^6 m^3) par rapport à la consommation annuelle d'eau de la population desservie.

Les résultats et conclusions des chapitres 4 et 5 montrent que dans le bilan hydrologique global, l'influence glaciaire n'est pas forcément déterminante et, qu'en outre, elle tendra à diminuer dans le temps. Toutefois à cause de la disparition progressive des glaciers, nous devrons trouver une source équivalente pour compenser la diminution dans l'apport du bassin versant. Nous remarquons que pour El Alto cette influence glaciaire traduite en volume d'eau représente 2.5 x10^6 m^3 à 3.5 x10^6 m^3 par an.

Les résultats obtenus constituent la première référence de l'influence glaciaire dans la gestion de l'eau en Bolivie. Les estimations faites représentent également une référence utile pour la planification de l'eau à court et à moyen terme. Cependant, l'utilisation de ces valeurs devra être prudente et il faudra tenir compte de la marge d'erreur sur les résultats obtenus.

Capacité de mobilisation de l'eau

Nous avons pu vérifier qu'il existe des pertes non négligeables dans tout le processus de production et de distribution de l'eau potable (Tableau 6.8). Les systèmes qui présentent les pertes les plus importantes sont Achachicala et El Alto.

Nous avons déterminé que pour qu'un litre d'eau arrive aux robinets des réseaux, il faut, actuellement, prélever des bassins versants :

du système El Alto	1.48 l
du système Achachicala	1.53 l
du système Pampahasi	1.34 l.

Dans l'acheminement de l'eau des barrages jusqu'aux usines de traitement, les pertes les plus importantes proviennent des canaux (17.5% à Milluni et 12% à Incachaca) alors que les conduites ne provoquent que des pertes minimes.

Au niveau des usines de traitement de l'eau, les pertes ont été réduites (< 1.5%) grâce au processus de recyclage qu'EPSAS a implanté à El Alto et Pampahasi. Par contre, les pertes sont plus élevées à Achachicala (9%) à cause du type de traitement nécessaire.

Les pertes les plus importantes au niveau de l'ensemble du processus de production et de distribution de l'eau potable sont observées dans les réseaux El Alto (44.03 %), Pampahasi, (25.11 %) et Achachicala (19.59 %). On pourrait penser que l'ampleur de ces pertes est due au vieillissement des canalisations du réseau. Mais, ce n'est pas le cas, puisque les pertes les plus faibles sont observées dans le système Achachicala où les conduites sont les plus anciennes.

Selon EPSAS ces pertes sont dues, d'une part, aux connexions clandestines et, d'autre part, aux fortes variations de pression à l'intérieur des conduites entre le jour et la nuit.

La quantité des pertes dues aux connexions clandestines correspond à des consommations de la population qui ne sont pas prises en compte dans le bilan des besoins en eau. Celles-ci devraient être quantifiées pour planifier plus précisément les besoins.

Les pertes dues à la variation de pression ou au vieillissement des réseaux devraient justifier des investissements de renouvellement des conduites ou d'installation de dispositifs de réduction de pression pour le consommateur.

Nous estimons que ce problème est prioritaire pour la planification de la distribution de l'eau. Puisque le but consiste à exploiter l'eau de manière durable, des pertes de cette ampleur ne sont pas acceptables et justifient des mesures de rénovation même si elles peuvent déranger la population.

Nous considérons que la conclusion à laquelle nous sommes arrivés suite à l'analyse de la capacité technique de mobilisation de l'eau est fondamentale pour déterminer les bases de la gestion. Nous connaissons ainsi l'état d'origine de nos systèmes et les failles susceptibles d'être éliminées. Diminuer les pertes, même si elles sont considérables, est une tâche réalisable qui peut aider à optimiser les services et la gestion de l'eau.

En ce qui concerne les barrages et les besoins de régulation, nous proposons un critère de gestion des barrages, basé sur le temps de stockage de l'eau à l'intérieur du barrage ***(Tres)*** et le temps de stockage indispensable pour couvrir la demande en eau de la population ***(Tbes)***. La différence entre les deux temps est le temps nécessaire de régulation du stock d'eau du barrage, selon les critères présentés au chapitre 6.

Ce critère permettra aux responsables des barrages de prendre les décisions adéquates lorsque l'apport prévu du bassin versant est minimal en fonction des prévisions de précipitations et du stock d'eau présent dans le barrage. Les prévisions de précipitations et d'apport en eau du bassin pourraient être faites avec la méthodologie de pronostic que nous proposons.

Le technicien aura comme information les prévisions de l'apport du bassin versant et le temps nécessaire pour réguler l'eau du barrage. Il pourra donc prendre les décisions appropriées alors qu'actuellement, la gestion des barrages faite par EPSAS, est basée uniquement sur l'expérience du technicien.

Demande : Population et Consommation Journalière en Eau (CJE)

La variation de la population dans les trois systèmes est hétérogène. Tandis que celle d'El Alto peut être considérée comme importante (+ 4% par an), Achachicala présente une décroissance de sa population comme nous l'avons exposé au chapitre 7.

L'estimation de la population et de sa variation est une des incertitudes majeures que nous avons relevée dans notre recherche. Les données démographiques les plus récentes datent de 2001 et la dynamique de la population n'est pas facilement prévisible, principalement dans une ville aussi active qu'El Alto. D'une part, elle est le lieu d'une migration rurale importante et, d'autre part, elle se développe et se transforme progressivement comme une ville avec des exigences précises au niveau des services.

Malgré que, nous considérons un taux de croissance de population qui va en diminuant jusqu'en 2026, la population d'El Alto sera équivalente à 5 fois celle du système Pampahasi et à 10 fois la population desservie par le système Achachicala.

Nous avons également calculé les valeurs de la consommation journalière en eau (CJE) de la population des villes de La Paz et d'El Alto et avons constaté que la CJE est aussi hétérogène que la population.

Tandis que dans le système Achachicala, la CJE est près de 213 l/hab-jour, à El Alto nous avons constaté une consommation beaucoup plus faible de l'ordre de 50 l/hab-jour. Dans le premier cas, la consommation peut être comparée à celle d'un pays européen comme l'Allemagne. Par contre, dans le second cas, elle est équivalente à la consommation d'un pays africain comme le Niger. Notre zone d'étude présente, donc, une hétérogénéité marquée au niveau de la consommation d'eau et nous avons également remarqué, que cette hétérogénéité est présente au sein d'une même agglomération urbaine.

Nous nous sommes également interrogés sur la croissance possible de la CJE parce que, comme nous l'avons constaté, la CJE d'El Alto est très faible. Or, si nous considérons que la ville d'El Alto est en train de se transformer en une ville qui a des besoins importants au niveau des services (l'eau incluse) parce que la qualité de vie s'y améliore, nous pourrions avoir un scénario de double croissance (population et CJE). Dans ce cas, la consommation d'eau augmentera d'une façon considérable.

La consommation totale en eau du réseau dépend de la croissance démographique, de la CJE et de la couverture du service d'eau potable. Le troisième aspect est lié à la planification d'EPSAS, mais les deux premiers sont sources d'incertitudes car proviennent d'estimations.

A cause de ces incertitudes, nous avons estimé la consommation d'eau d'une façon conservatrice : la croissance de la population a été calculée avec un taux atténué dans le temps et nous avons maintenu la CJE constante jusqu'en 2026. Ce contexte a constitué une première approche pour envisager la situation actuelle et un possible scénario de la gestion jusqu'en 2026.

A partir de l'estimation de la consommation du réseau et des pertes du système, nous avons aussi calculé la demande à chaque étape du processus de distribution de l'eau potable. Les résultats qui correspondent à la demande au niveau des sources et de l'usine de traitement servent à déterminer le bilan de l'offre et de la demande.

Un aspect à souligner est l'incertitude de l'estimation de la demande du fait des différents scenarios possibles qui peuvent influencer l'évolution de la consommation d'eau et de la croissance démographique. Cet aspect s'est reflété dans les marges où les besoins de prélèvement d'eau des sources peuvent se trouver pour l'année 2026 (Figure 7.10 à Figure 7.12). On remarque alors une incertitude qui est aussi importante pour la planification de la gestion de l'eau.

Bilan de l'offre et de la demande

Le bilan de l'offre et de la demande est la mise en rapport de l'ensemble des variables étudiées afin de déterminer leur importance relative dans le contexte de la gestion de l'eau potable des villes de La Paz et d'El Alto.

Nous avons évalué les variables de la gestion de l'eau pour les cas de La Paz et d'El Alto par rapport à une situation de base qui représente l'évolution du bilan de l'offre et de la demande de 2008 à 2026 et qui suit les tendances actuelles identifiées.
Nous les présentons ci-dessous selon leur ordre d'importance:

- *Diminution des pertes*
- *Augmentation de la consommation journalière en eau (CJE)*
- *Croissance démographique*
- *Recul des glaciers*
- *Diminution des précipitations*

Nous avons estimé que la diminution des pertes est un point prioritaire pour la gestion de l'eau. En effet, si on arrive à réduire les pertes de 50%, on pourrait faire face à la diminution de l'apport des glaciers (Figure 8.2) avec les ressources dont on dispose dans les bassins ou on pourrait affronter l'augmentation de 50% de la CJE d'El Alto (Figure 7.9). Il est donc primordial de diminuer ces pertes dans l'optique d'une gestion durable de l'eau.

L'augmentation de la CJE et la croissance de la population représentent des paramètres extrêmement négatifs pour la planification de la gestion de l'eau. Mais, nous sommes tenus de les prendre en compte car la probabilité que ces événements se produisent est loin d'être nulle.

Dans la situation actuelle, vu l'accroissement de la population, la demande en eau est devenue équivalente à l'offre des ressources pour El Alto. Quant à la CJE d'El Alto, celle-ci reste faible pour le moment, ce qui permet de maintenir l'équilibre entre l'offre et la demande. Cet équilibre est néanmoins fort instable et nous avons dès lors décidé de considérer la croissance démographique et l'augmentation de la CJE comme une deuxième priorité dans la gestion de l'eau.

En ce qui concerne les réserves glaciaires, celles-ci sont encore actuellement importantes et leur apport dans la production de l'eau est considérable. Mais, nous devons nous attendre à une diminution d'environ 50% de ces réserves d'ici 2026. Cette diminution sera progressive et devrait donc laisser le temps de prendre des mesures d'adaptation.

Quant à la diminution des précipitations suite aux changements climatiques, celle-ci est probable mais pas certaine. Actuellement, on constate plutôt une variabilité interannuelle (succession d'années sèches et humides).

A partir des conclusions du bilan de l'offre et de la demande et des conclusions de l'analyse de chaque variable, nous élaborons un diagnostic par système d'eau potable avec quelques alternatives et observations :

Système El Alto

Le Système d'El Alto est déjà vulnérable à cause de la croissance de la population. L'offre des ressources en eau du bassin est sur le point d'être dépassée par la demande de la population. Cette situation est atténuée par une CJE faible. Tant la croissance de la population que l'augmentation probable de la CJE constituent des menaces qui peuvent conduire à une situation de pénurie d'eau.

L'apport glaciaire est appréciable (entre 8 et 11%) et son stock en glace aussi (il est équivalente à près de 3 à 5 ans de la consommation en eau). On s'attend, pour 2026, à une diminution de 50% de cet apport due au recul des glaciers, mais ce processus sera progressif et il y a, donc, une marge de manœuvre qui permettrait de compenser cette baisse. Nous considérons que la réduction des pertes du réseau est une bonne alternative.

L'estimation du bilan entre l'offre et la demande ne donnera que des valeurs négatives (demande > offre) à partir de 2012. L'usine de traitement de l'eau sera également surpassée dans sa capacité de production d'eau potable dès 2010.

Les pertes du réseau sont appréciables (près de 50%). Il faut que la réduction des pertes soit un objectif prioritaire puisque cette mesure peut compenser l'effet du recul des glaciers ou l'augmentation probable de la CJE.

Les nouvelles sources probables d'eau superficielle sont conditionnées à un processus de négociation entre EPSAS et les habitants du bassin versant. Il faudrait chercher des médiateurs à un haut niveau de décision comme le gouvernement central pour résoudre les conflits et rendre possible l'utilisation de l'eau en fonction d'objectifs stratégiques de développement de la région et du pays.

Les ressources potentielles d'eau souterraine sont jusqu'à présent inconnues. Il serait souhaitable de les repérer à court terme. Les résultats préliminaires des recherches ébauchées devraient être connus afin de procéder à une évaluation exploratoire des possibilités d'exploitation. Ces nouvelles ressources permettraient de résoudre le problème de déséquilibre entre l'offre et la demande.

Un apport des sources existantes et qui servent aux autres systèmes serait souhaitable. La Figure 8.4 décrit la proposition de nouvelles infrastructures que nous considérons comme importantes à concrétiser et qui prennent aussi en compte la planification d'EPSAS.

Dans cette région, l'eau et le service environnemental du bassin versant représentent une valeur précieuse puisque les ressources qui seront disponibles au delà des usages actuels sont peu abondantes.

Système Achachicala

Achachicala est un système qui présente une tendance de diminution de la demande en eau. Cette situation est due à une concurrence d'espace entre l'administration publique et la population de la zone desservie par ce système.

Les pertes sur le canal d'adduction et lors du traitement de l'eau sont les principaux problèmes de ce système. Les pertes sur le canal pourraient être limitées sans difficulté. Par contre, au niveau du traitement de l'eau la réduction des pertes n'est pas évidente et devrait être étudiée en détail.

L'influence combinée des glaciers et du barrage Jankho Khota apporte du bassin versant environ 11%.

Système Pampahasi

Pampahasi est un système où il existe une abondance d'eau, surtout dans le bassin de Hampaturi qui est capable de couvrir, à lui seul, la demande en eau du système. Il existe deux menaces pour le dépassement de l'offre par la demande à partir de l'année 2026 : Si le taux de croissance de la population se maintient et si sa CJE augmente vers une valeur de 180 l/hab-jour.

Il faut noter l'influence importante du barrage Ajuankhota sur l'apport du bassin.

Notre contribution rassemble les bases de connaissances et d'informations indispensables pour prendre les décisions afin de définir les stratégies indispensables pour la gestion de la ressource.

Bases de la GIRE

Les données présentées au bilan de l'offre et de la demande, les analyses des variables intervenant dans la gestion de l'eau, les conclusions et les diagnostics des systèmes sont les bases que nous apportons à la GIRE et plus précisément, les bases pour mettre en route la gestion de l'eau potable des villes de La Paz et El Alto dans les cadres suivants:

Évaluation des ressources hydriques
Création et suggestions d'instruments de gestion
Plans pour la GIRE
- *Planification stratégique globale*
- *Plan d'infrastructure nécessaire*
- *Planification de temps*

Gestion de la demande
Résolution des conflits

Les incertitudes analysées pour chaque variable, les diagnostics effectués, les conclusions et la mise en rapport ces aspects dans le contexte holistique de la gestion sont les bases dont nous avons besoin pour mettre en route la Gestion de l'eau potable des villes de La Paz et d'El Alto.

Grâce à ces connaissances, nous soutenons la gouvernance de l'eau, l'un des objectifs principaux de la GIRE. Notre apport a consisté à fournir les bases pour que la GIRE soit mise en œuvre dans les villes de La Paz et d'El Alto.

Perspectives

L'analyse des variables, des processus et des aspects liés à la gestion de l'eau a été une tâche qui a exigé des approfondissements de concepts sur les thématiques particulières de chacune d'entre elles, qui parfois sont complètement différentes, mais qui jouent un rôle dans le contexte de la gestion. Nous avons également dû appliquer des outils tels que la modélisation pour obtenir des résultats qui puissent servir de références ou de points de repère à la gestion de l'eau.

Ce travail a impliqué une recherche de type « appliqué », c'est-à-dire une recherche dans le cadre d'une problématique à résoudre. Nous considérons que ce type d'étude est nécessaire dans un pays comme la Bolivie où l'on doit résoudre des problèmes de développement. Dans le cas particulier de cette thèse, nous avons appliqué cette idée pour la détermination de bases pour la planification de l'eau qui est un élément fondamental pour le développement.

Selon Turton ***(2007)***, la gouvernance de l'eau est le produit d'un trialogue entre le gouvernement, la société et la science. Dans le cas de cette recherche *« nous avons voulu jouer un peu le rôle de la science »* en essayant toutefois de prendre en compte les deux autres perspectives.

Pour passer de la théorie à la pratique, nous avons besoin de ce trialogue. Toutes les analyses présentées dans cette thèse constituent notre apport.

10 BIBLIOGRAPHIE

(Norma Boliviana NB 689, 1996) (Norma Boliviana NB 689, 1996). Norma técnica de diseño para sistemas de Agua Potable. Bolivia, Dirección Nacional de Saneamiento Básico, Statute.

(République de Bolivie, 2009) (République de Bolivie, 2009). Constitución Política del Estado. Bolivia, República de Bolivia, Asamblea Constituyente. 160, Statute.

(Ako Ako A. et al. 2009) Ako Ako A., G. Eneke, T. Eyong and G. Elambo (2009). "Water Resources Management and Integrated Water Resources Management (IWRM) in Cameroon." Water Resources Management **24**(5): 871-888, Journal Article.

(Albo X. 2008) Albo X. (2008). "El Alto, La Vorágine de Una Ciudad Única." Journal of Latin American Anthropology **11**(2): 329-350, Journal Article.

(Alurralde J. 2008) Alurralde J. (2008). Conflicto latente frente al reto de una nueva Agenda: Estudio de Caso, agua. Informe Temático sobre Desarrollo Humano en Bolivia, Documento de Trabajo. PNUD, Book Section.

(Andrade M. 2009) Andrade M. (2009). Validación del Modelo regional PRECIS para Bolivia. Primer Congreso Latinoamericano de Climatología. Cochabamba - Bolivia, Conference Paper.

(Ardoin S. 2004) Ardoin S. (2004). Variabilité Hydroclimatique et Impacts sur les Ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone Soudano – Sahélienne. Maison des sceinces de l'eau, Thèse PhD, Université Montpellier II, Thesis.

(Bahr D. et al. 1997b) Bahr D., M. Meier and S. Peckman (1997b). "The physical basis of glacier volumen-area scaling." Journal of Geophysical Research **102**(B9): 20,355 - 20,362, Journal Article.

(Bahr D. 1997a) Bahr D. (1997a). "Width and lenght scaling of glaciers." Journal of Glaciolocy **43**(145): 557-562, Journal Article.

(Ballong S. 2007) Ballong S. (2007). L'eau sera-t-elle potable pour tous ? Le Monde Paris, Le Monde, http://www.pseau.org/outils/biblio/resume.php?docu_document_id=755 Newspaper Article.

(Baral D. et al. 2001) Baral D., K. Hutter and R. Greve (2001). "Asymptotic theories of large-scale motion, temperature, and moisture distribution in land-based polythermal ice sheets: A critical review and new developments." Applied Mechanics Reviews **54**(3): 215-256, Journal Article.

(Baral D.R. & Hutter K. 1999) Baral D.R. & Hutter K. (1999). "An Iterative Solution Procedure for Shallow Stokes Flows. The Shallow Ice Approximation Revisited." Advances in Cold-Region Thermal Engineering and Sciences **533/1999**, Journal Article.

(Benito G. et al. 2010) Benito G., R. Rohde, M. Seely, C. Külls, O. Dahan, Y. Enzel, S. Todd, B. Botero, E. Morin, T. Grodek and C. Roberts (2010). "Management of Alluvial Aquifers in Two Southern African Ephemeral Rivers: Implications for IWRM." Water Resources Management **24**(4): 641-667, Journal Article.

(Burton J. 2001) Burton J. (2001). La gestion Intégrée des ressources en eau par bassin: 240, ISBN 2–89481–010–5, Book.

(Caballero Y. 2001) Caballero Y. (2001). Modélisation des Écoulements d'origine Pluvio – Nivo – Glacière en Contexte de Haute Montagne Tropicale – Application à la haute vallée du Zongo (Bolivie) Maison des Sciences de l'eau, Montepellier. Montpellier, Thèse, Université Montpellier II, Thesis.

(CAF 2010) CAF (2010). Metodología para la Gestion Integral de Cuencas aportantes de recursos Hídricos, para la identificación de requerimientos de inversión considerando amenazas del Cambio Climático; Caso de Análisis La Paz Bolivia" Corporación Andina de Fomento, (CAF) La Paz, 1,2, CAF, Bolivia. 58, Report.

(Calizaya A. et al. 2010) Calizaya A., O. Meixner, L. Bengtsson and R. Berndtsson (2010) Multi-criteria Decision Analysis (MCDA) for Integrated Water Resources Management (IWRM) in the Lake Poopo Basin, Bolivia. Water Resources Management **Ciencias Medioambientales y de la Tierra**, Electronic Article.

(Centro Agua 2008) Centro Agua. (2008). "Proyecto GIRH." Centro Andino para la Gestión y el Uso del

agua. Retrieved. Access in, from www.centro-agua.org/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=36&Itemid=64, Web Page.

(CES-CGL-J&S 1997) CES-CGL-J&S (1997). Diseño Final de Sistemas de Agua Potable, La Paz. Subsecretaria de Inversión Pública y Financiamiento Externo. La Paz, Varios, Consulting Engineers Salzgitter (CES) - Consultores Galindo (CG), Johnson & Selaya (J&S),, Government Document.

(CGIAB 2002) CGIAB. (2002). "CGIAB." Comisión para la Gestión Integral del Agua en Bolivia (CGIAB). Retrieved. Access in, from http://aguabolivia.org/, Web Page.

(CGIAB 2009) CGIAB. (2009). "Justicia Ambiental y Sustentabilidad Hídrica." Comisión para la Gestión Integral del Agua en Bolivia (CGIAB). from http://aguabolivia.org/, Electronic Book.

(CIESS 2006) CIESS (2006). Modelo de proyección de la demanda de agua en las ciudades de La Paz y El Alto.El Centro de Estudios Económicos y Sociales, (CIESS) La Paz, CIESS-Aguas del Illimani S.A, Report.

(Consultora Pirámide 2009) Consultora Pirámide (2009). Manejo Integral de la Cuenca Huayna Potosí, Revisión del Diseño de la Presa Huayna PotosíLa Paz, El Alto, Estudio Social (Perez JL.) y Estudio de Hidrología, (Olmos C.), Report.

(Cortez R. 2009) Cortez R. (2009). Investigación de la Capacidad del Acuífero de El Alto (SERGEOTECMIN, Cooperación Catalana), Report.

(Davila R. 2008) Davila R. (2008). Au-dessous des volcans, Bolivie 2002- 2006, Audiovisual Material.

(De Smedt B. & F. Pattyn 2003) *De Smedt B.* and *F. Pattyn* (2003). "Numerical modelling of historical front variation and dynamic response of Sofiyskiy glacier, Altai mountains, Russia." Annals of Glaciology **37**: 7, Journal Article.

(Delcourt C. et al. 2008) Delcourt C., F. Pattyn and M. Nolan (2008). "Modelling historical and recent mass loss of McCall Glacier, Alaska, USA." The Cryosphere **2**: 23-31, Journal Article.

(Duran A. 2009) Duran A. (2009). Estrategia para la Gestión Integral de Recursos Hídricos en Bolivia (GIRH). Primer Congreso Latinoamericano de Climatología. Cochabamba - Bolivia, Conference Paper.

(Ecosociosystemes 2004) Ecosociosystemes. (2004). "Bilan hydrique - Bilan hydrologique." Pierre Davoust Retrieved. Access in, 2008, from http://www.ecosociosystemes.fr/bilan_hydrique_hydrologique.html, Web Page.

(El Diario - La Prensa - La Razón 2007-2009) El Diario - La Prensa - La Razón (2007-2009). Plusieurs articles de press (97 articles). El Diario, La Prensa, La Razón. La Paz, El Alto (Circulación Nacional), Newspaper Article.

(Eurostat 2005) Eurostat (2005). Measuring progress towards a more sustainable Europe – Proposed indicators for sustainable development. Luxembourg, Office for Official Publications of the European Communities: 167, Book.

(FAO 2007) FAO (2007). The State of Food and Agriculture, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)978-92-5-205750-5, Book.

(Farinotti D. et al. 2009) Farinotti D., M. Huss, A. Bauder, M. Funk and M. Truffer (2009). "A method to estimate the ice volume and ice-thickness distribution of alpine glaciers." Journal of Glaciology **55**(191): 422-430, Journal Article.

(Francou B. & B. Pouyaud 2004) Francou B. and B. Pouyaud (2004). Métodos de Observación de Glaciares en los Andes Tropicales, Book.

(Francou B. et al. 2004) Francou B., M. Vuille, V. Favier and B. Cáceres (2004). "New evidence for an ENSO impact on low-latitude glaciers: Antizana 15, Andes of Ecuador, 0°28'S." Journal of Geophysical Research **109**(D18106), Journal Article.

(Gellibert A. 2009) Gellibert A. (2009). Avenir des ressources en eau de la Cordillère Royale. Tolouse et La Paz, IRD-IHH-ENSEEIHT, Unpublished Work.

(Gioda A. et al. 2004) Gioda A., J. Ronchail, Y. L'Hôte and B. Pouyaud (2004). Analyse et Variabilité

temporelle d'une longue série de pluie des Andes en Relation avec l'Oscillation Australe (La Paz, 3658 m, 1891-2000). International Conference on Tropical Climatology, Meteorology and Hydrology : Climate-Related Risk Analysis and Sustainable Development in Tropical Areas, Bruxelles (BEL) ; Bruxelles : RMI ; ARSOM, , G. Demarée, M. De Dapper, J. Alexandre, Conference Proceedings.

(GMLP 2001) GMLP (2001). Plan de Desarrollo Municipal 2001 - 2005. La Paz, Gobierno Municipal de La Paz (GMLP). 315, Government Document.

(GMLP 2005) GMLP (2005). Dossier Estadístico. La Paz, Gobierno Municipal de La Paz (GMLP) Dirección de Planificación y Control, Director de Planificación y Control - Coordinación General, Unidad de Investigación y Estadística Municipal: 592, 99905 - 47 - 02 - 5, Book.

(GMP 2006) GMP (2006). Plan de Desarrolllo Municipal de Municipio de Pucarani 2006-2010. L. Paz. Pucarani, Gobierno Municipal de Pucarani (GMP). 354, Government Document.

(GWP 2007) GWP. (2007). "Toolbox for IWRM." Global Water Partnership (GWP). from www.gwptoolbox.org/, Electronic Book.

(GWP 2009) GWP (2009). Manuel de Gestion Intégrée des Ressources en Eau par Bassin, Global Water Partnership (GWP) et Reseau International des Organismes de Bassin: 112, 978-91-85321-73-5, Book.

(Hastenrath S. 1990) Hastenrath S. (1990). "Diagnostics and Prediction of Anomalous River Discharge in Northern South America." Journal of Climate **3**: 1080-1096, Journal Article.

(Hooke R. 1981) Hooke R. (1981). "Flow law for polycrystaline ice in glaciers: comparison of theretical predictions, laboratory data, and field measurements." Reviews of Geophysics and Space Physics **19**(4): 664-672, Journal Article.

(Hufty A. 2001) Hufty A. (2001). Introduction à la Climatologie. Quebec, De boeck: 542, DBU 2-8041-3711-2, Book.

(Hutter K. 1983) Hutter K. (1983). Theoretical Glaciology. Japan, TERRAPUB/KTK. 1978-90-277-1473-2, Book.

(Huybrechts P. et al. 1989) Huybrechts P., P. de Nooze and H. Decleir (1989). "Numerical Modelling of Glacier d'Argentière ans its Historioc front variations." In Oerlemans, J ed. Glacier fluctuations and climatic change(Dordrecht, Kluwer academic Publishers): 373-289, Journal Article.

(Huybrechts P. & T. Payne 1995) Huybrechts P. and T. Payne (1995). "The EISMINT benchmark for testing ice-sheet modelos." Annals of Glaciology **23**: 1-12, Journal Article.

(Icefield Instruments Inc 2000) Icefield Instruments Inc (2000). Ice penetrating radar, Instructions for use. http://www.icefield.yk.ca/. 10, Generic.

(INE 2001) INE (2001). Bolivia: Censo de Población y Vivienda 2001. INE, Planificación y Desarrollo,. Población boliviana en su totalidad, Instituto Nacional de Estadísticas (INE), Planifiación y Desarrollo, Government Document.

(IPCC 2007) IPCC (2007). IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007, Intergovernmental Panel Of Climate Change; (GIEC: Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat) (IPCC), Book.

(IRC 2006) IRC (2006). La gestion intégrée des ressources en eau. Delft, Pays Bas, Centre International de l'Eau et de l'Assainissement (IRC). **9-F**, Book.

(IRD-Bolivia 1995-2008) IRD-Bolivia (1995-2008). Mesures Meteorologiques, Hydrologiques et Glaciologiques, Glaciers Zongo - Chacaltaya - Charquini Sud. I.-I. Bolivia.IRD La Paz, Institut de Recherche pour le Développement (IRD), Report.

(IRD-Bolivia 2007) IRD-Bolivia (2007). Mesures Meteorologiques, Hydrologiques et Glaciologiques, Glaciers Zongo - Chacaltaya - Charquini Sud. I.-I. Bolivia.IRD La Paz, Institut de Recherche pour le Développement (IRD), Report.

(Jaen E. 2004) Jaen E. (2004). Oferta y Demanda del Servicio. ANESAPA, Capacitación para la EPSA Boliviana No1, ANESAPA,, Asociación nacional de Empresas de Servicio de Agua Potable y Alcantarillado, Generic.

(Jaffrain J. 2007) Jaffrain J. (2007). Les extrêmes de migration de la Zone de la Zone de Convergence Intertropicale en Amerique du Sud, Étude de la variabilité spatio-temporelle des précipitations en Amerique du Sud tropicale sur les dérnières decennies, Ecole Nationale de la Météorologie Météo France - Meteo France - Universite de Montpellier 2. 102, Report.

(Jaloobayev A. 2007) Jaloobayev A. (2007). IWRM Financial, Economic, and Legal aspects: The example of the "IWRM-FERGHANA" project. Implementing Integrated Water Resources Management in Central Asia, Springer Netherlands. **77:** 45-53, 978-1-4020-5730-4 (Print) 978-1-4020-5732-8 (Online), Book Section.

(Jeffrey P. 2006) Jeffrey P. (2006). The human dimensions of IWRM: Interfaces between knowledges and Ambitions. **2006:** 11-18, 978-1-4020-4683-4, Book.

(Jouravlev A. 2001) Jouravlev A., Ed. (2001). Administración del agua en América Latina y el Caribe en el umbral del siglo XXI. Santiago de Chile, CEPAL, Naciones Unidas, Edited Book.

(Kalnay E. et al. 1996) Kalnay E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, A. Leetmaa, R. Reynolds, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K. Mo, C. Ropelewski and J. Wang (1996). The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. Bulletin of the American Meteorological Society. AMS, AMS, Magazine Article.

(Kanaroglou N. 1999) Kanaroglou N. (1999). "Domestic Water Use in Rural Semiarid Africa: A Case Study of Katarko Village in Northeastern Nigeria " Human Ecology **27**(4): 537-555, Journal Article.

(Kaser G. 2001) Kaser G. (2001). "Glacier-climate interaction at low latitudes." Journal of Glaciology **47**(157): 195-204, Journal Article.

(Khattabi A. 2008) Khattabi A. (2008). The Proposal of IWRM in the Bouregreg Basin and How it Fits with the UNESCO/HELP Policy Program Integrated Water Management. S. Netherlands, Springer Netherlands. **80:** 179-187, 978-1-4020-6550-7 (Print) 978-1-4020-6552-1 (Online), Book Section.

(La Razón 2008) La Razón (2008). 40% de La Paz sufre por el corte de agua y EPSAS pide tiempo La Razón. La Paz, La Razón, Journalier, Newspaper Article.

(Lahmeyer International - GITEC - TECNOSAN-SICO 1994) Lahmeyer International - GITEC - TECNOSAN-SICO (1994). Plan Maestro del Sistema de Agua Potable, Ciudad de La Paz. Ministerio de Hacienda y Desarrollo Económico. La Paz y El Alto, Varios, Government Document.

(Laruta C. 2006) Laruta C. (2006). La conquista de la ciudadanía. CIPCA Regional La Paz, Centro de Investigaciones y Promoción del Campesinado. 20, http://cipca.org.bo/index.php?option=com_docman&task=doc_view&gid=111&Itemid=33 Generic.

(Lasserre F. 2007) Lasserre F. (2007). Conflits hydrauliques et guerres de l'eau : un essai de modélisation. Revue internationale et stratégique, L'or blue nouvel enjeux politique. Dalloz/I, R, I and S. **66:** 200, 9782247074105, Book Section.

(Le Meur E. et al. 2004) Le Meur E., O. Gagliardini, T. Zwinger and J. Ruokolainen (2004) Glacier flow modelling: a comparison of the Shallow Ice Approximation and the full-Stokes solution. Comptes Rendus Physique **5**, 709-722 Electronic Article.

(Legrand C. 2008) Legrand C. (2008). "AGuAndes." AguANDES Retrieved. Access in, 2009, from www.mpl.ird.fr/divha/aguandes/ -- www.g-eau.net/index.php?option=content&task=view&id=153&Itemid=140&limit=1&limitstart=0, Web Page.

(Leonardini G. 2010) Leonardini G. (2010). Análisis mensual de los balances de masa glaciológico e hidrológico del glaciar de Zongo (Bolivia). Facultad de Ciencias Puras y Naturales. La Paz, Memoire licence, Universidad Mayor de San Andrés. 144, Thesis.

(Loi No 1551: Participación Popular 1993) Loi No 1551: Participación Popular (1993). Bolivia, Art. No 7, Government Document.

(MacAyeal D.R. 1997) MacAyeal D.R. (1997). EISMINT: Lessons in Ice-Sheet Modeling. Chicago, Department of Geophysical Sciences, University Of Chicago. 429, Unpublished Work.

(Martinec - Rango & Roberts 2008) Martinec - Rango & Roberts (2008). SRP, Snowmelt Runoff Model,

User's Manual, New Mexico University: 180, Book.

(Matz M. 2008) Matz M. (2008). Rethinking IWRM Under Cultural Considerations Water Politics and Development Cooperation. S. B. Heidelberg. **2:** 176-201, 978-3-540-76706-0 (Print) 978-3-540-76707-7 (Online), Book Section.

(Mehtonen K. et al. 2008) Mehtonen K., M. Keskinen and O. Varis (2008). The Mekong: IWRM and Institutions Management of Transboundary Rivers and Lakes, Springer Berlin Heidelberg: 207-226, 978-3-540-74926-4 (Print) 978-3-540-74928-8 (Online), Book Section.

(Montes de Oca I. 2005) Montes de Oca I. (2005). Geografía y Recursos Naturales de Bolivia, EDOBOL, Book.

(Muhamedzhanov Sh. 2007) Muhamedzhanov Sh. (2007). Water productivity increase - The main goal of IWRM and ways to overcome poverty. Implementing Integrated Water Resources Management in Central Asia, Springer Netherlands. **77:** 95-103, 978-1-4020-5730-4 (Print) 978-1-4020-5732-8 (Online), Book Section.

(Murad A. et al. 2006) Murad A., H. Al Nuaimi and M. Al Hammadi (2006). "Comprehensive Assessment of Water Resources in the United Arab Emirates (UAE)." Water Resources Management **21**(9): 1449-1463, Journal Article.

(Noilhan J. & S. Planton 1989) Noilhan J. and S. Planton (1989). "A simple parametrization of Land Surface Processes for meteorological Models." Monthly Weather Review **117**: 536-549, Journal Article.

(Oerlemans J. 2008) Oerlemans J. (2008). Minimal Glacier Models, Igitur, Utrecht Publishing & Archiving Services, Universiteitsbibliotheek Utrecht978-90-6701-022-1, Book.

(ONEMA 2008) ONEMA. (2008). "Système d'information sur l'eau (SIE) " Office National de l'eau et des milieux aquatiques (ONEMA) , Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de la Mer (MEEDDM) , France Le Nadar - Hall C - 5 square Felix Nadar – 94300 Vincennes. Retrieved. Access in, 2009, from http://www.eaufrance.fr/spip.php?rubrique158&id_article=434, Web Page.

(Oporto J. - LA RAZON 2010) Oporto J. - LA RAZON (2010). El deshielo de los glaciares, en cuenta regresiva e irremediable. LA RAZON. La Paz, Newspaper Article.

(OXFAM 2009) OXFAM (2009). Bolivia, Cambio climático, pobreza y adaptación, Book.

(Paterson W.S.B. 1994) *Paterson W.S.B.* (1994). The Physics of Glaciers, PERGAMON: 480, Book.

(Paterson W. S. B. 1981) *Paterson W. S. B.* (1981). The Physics of Glaciers, PERGAMON: 480, 0-08-024005-4, Book.

(Pattyn F. 2002) Pattyn F. (2002). "Transient glacier response with a higher-order numerical ice-flow model." Journal of Glaciolocy **48**(160): 467-477, Journal Article.

(Pattyn F. 2003a) Pattyn F. (2003a). "A new three-dimensional higher-order thermomechanical ice sheet model: Basic sensivity, ice stream development, and ice flow across subglacial lakes." Journal of Geophysical Research **108**(B8), Journal Article.

(PHI 2006) PHI (2006). Guía metodológica para la elaboración del mapa de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas de América Latina y l Acribe. La Serena Chile, Programa Hidrológico Internacional, UNESCO (PHI): 58, Book.

(PNCC-PRAA 2007) PNCC-PRAA (2007). Programa Regional Andino de Adaptación al Cambio Climático. La Paz, Ministerio de Medio Ambiente y Agua, Programa Nacional de Cambio Climático (PNCC), Programa Nacional de Cambio Climáticos Bolivia (PRAA). 67, Government Document.

(PNCC 2007) PNCC (2007). Vulnerabilidad y Adaptación al Cambio Climático en las Regiones del lago Titicaca y los Valles Cruceños de Bolivia. Ministerio de Planificación del Desarrollo, Programa Nacional de Cabio Climáticos, Bolivia (PNCC). 138, Government Document.

(PNUD - Bolivia 2007) PNUD - Bolivia (2007). Informe Nacional sobre el Desarrollo Humano 2007, United Nations Development Programme (PNUD)978-99905-860-6-0, Book.

(PNUD 2005) PNUD (2005). Bolivia - Atlas estadístico de Municipios 2005, United Nations Development Programme (PNUD): 697, 99905-63-10-1, Book.

(PNUD 2006) PNUD (2006). Human Development Report 2006/2007, United Nations Development Programme (PNUD), Book.

(PNUD 2007) PNUD (2007). Human Development Report 2007/2008, Fighting climate change: Human solidarity in a divided world, United Nations Development Programme (PNUD). **Fighting climate change: Human solidarity in a divided world**, Book.

(Pouget J. et al. 2008) Pouget J., R. Calvez, P. Le Goulven, P. Lloret and M. Villacis (2008) Challenges of water resources planning in the Andes - The case of Quito in Ecuador. AGu Andes, IRD, Electronic Article.

(Poupeau F. 2002) Poupeau F. (2002). La guerre de l'eau. Agone, 26/27, AGONE, BP 2326, F-13213 Marseille cedex 02. 133-140, Magazine Article.

(Poupeau F. 2009) Poupeau F. (2009). De la Migración Rural a la Movilidad Intraurbana. Propuesta de Artículo (In revision), Magazine Article.

(Pouyaud B. et al. 2007) Pouyaud B., E. Cadier, R. Gallaire, M. Zapata, E. Ayabaca, C. Olmos, J. Gómez, W. Suárez, M. Villacis, L. Maisincho, P. Ribstein and A. Coudrain (2007). The impact of glacier retreat on water resources. In: Is it the end of snowy heights? Glaciers and climate change in the Andean community., The General Secretariat of the Andean Community, the French Institute of Research for Development, the United Nations Environmental Programme (UNEP) and the Spanish International Cooperation Agency., Conference Proceedings.

(Pouyaud B. et al. 2005) Pouyaud B., M. Zapata, J. Yerren, J. Gomez, G. Rosas, W. Suarez and P. Ribstein (2005). "Avenir des ressources en eau glaciaire de la Cordillère Blanche." Journal des sciences hydrologiques **50**(6): 24, Journal Article.

(Quintanilla J. 2009) Quintanilla J. (2009). Conflictos Ambientales en la Gestión de los Recursos Hídricos. Primer Congreso Latinoamericano de Climatología. Cochabamba - Bolivia, Conference Paper.

(Rabatel A. 2005) Rabatel A. (2005). Chronologie et interpretation paleoclimatique des fluctutions des glaciers dans les Andes de Bolivie (16°S) depuis le maximun du petit age glaciaire (17 eme siecle). Laboratoire de Glaciologie et Geophysique de l'environnement UMR5183. Grenoble, Doctorat, l'Université Joseph Fourier – Grenoble I. 196, Thesis.

(Ramírez E. 2003) Ramírez E. (2003). Interprétation de la variabilité climatique enregistrée dans les carottes de glace à partir des isotopes stables de l'eau: cas des Andes tropicales. París, Doctorado, Université Pierre et Marie Curie (Paris VI). 163+62, Thesis.

(Ramírez E. et al. 2001) Ramírez E., P. Francou, P. Ribstein, M. Descloitres, R. Guerin, J. Mendoza, R. Gallaire, B. Pouyaud, E. Jordan and (2001). "Small glaciers disappearing in the tropical Andes: a case-study in Bolivia: Glacier Chacaltaya (16°)." Journal of Glaciology **47**(157): 187-194, Journal Article.

(Ramírez E. & C. Olmos 2007) Ramírez E. and C. Olmos (2007). Deshielo de la Cuenca del Tuni Condoriri y su Impacto sobre los Recursos Hídricos de las Ciudades de La Paz y El Alto. La Paz y El Alto, IHH, UMSA - IRD - ULB - IAI (Proyecto auspiciado por: Embajada de los Países Bajos en Bolivia - PNCC): 120+70, Book.

(République de Bolivie 2006) République de Bolivie (2006). Plan Nacional de Desarrollo. Decreto supremo No 297272. R. d. Bolivie. Gaceta Oficial de Bolivia. 229, Legal Rule or Regulation.

(Ribstein P. 2003) Ribstein P. (2003). Climat et Glaciers des Andes Tropicales, Impacts Hydrologiques, (Habilitation à diriger des récherches), Institut de Recherche pour le développement, IRD, Report.

(Ribstein P. et al. 1999) Ribstein P., B. Pouyaud, J. E. Sicart, P. Wagnon, E. Ramirez, B. Francou and (1999). Variabilité climatique et fonctionnement hydrologique d'un glacier tropical. XXII Assemblée Général de l'Union Géodésique et Géophysique Internationale,, Birmingham - UK,, Conference Proceedings.

(Rigaudière P. et al. 1995) Rigaudière P., P. Ribstein, B. Francou, B. Pouyaud and R. Saravia (1995). Un modèle hydrologique du glacier du Zongo, ORSTOM., Unpublished Work.

(RIOCC 2008) RIOCC. (2008). "Impactos y Vulnerabildiad." Red Iberoamericana de Oficinas de Cambio Climático (RIOCC). Retrieved. Access in, 2008, from

www.lariocc.net/riocc_principal/es/cc_iberoamerica/impactos_vulnerabilidad.htm, Web Page.

(Rivera & Añez 2009) Rivera & Añez (2009). Diseño Final Represa Hampaturi AltoLa Paz, Estudio Social (R. Añez), Estudio Hidrológico (Olmos C.), FPS-EPSAS. 325, Report.

(Roche A. 1991) Roche A. (1991). Estudio de la climatologia e hidrologia de Bolivia.ORSTOM, Report.

(Ronchail J. 1988) Ronchail J. (1988). Variabilidad del tiempo en Bolivia y la anomalia climatica de invierno, ORSTOM - SENAMHI., Report.

(Ronchail J. et al. 2005) Ronchail J., L. Bourrel, G. Cochonneau, P. Vauchel, L. Phillips, A. Castro, J.-L. Guyotb and E. de Oliveira (2005). "Inundations in the Mamore's basin (south-westernAmazon—Bolivia) and sea-surface temperature in the Pacific and Atlantic Oceans." Journal of Hydrology **302**: 223–238, Journal Article.

(Schäfer M. 2007) Schäfer M. (2007). Modélisation de l'écoulement des glaciers tempérés Laboratoire de Glaciologie et Geophysique de l'environnement. Grenoble, Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier (Grenoble 1). 384, Thesis.

(Schuler T. 1997) Schuler T. (1997). Hydrology of a tropical glacier: case study of Zongo Glacier, Cordillera Real, Bolivia., Institute for Hydrology. Freiburg, University of Freiburg, Germany: . 48, Unpublished Work.

(SENAMHI-PNCC 2007) SENAMHI-PNCC (2007). Cambios Climáticos Observados y los Desastres Naturales en Cochabamba., Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), Programa Nacional de Cambios Climáticos (PNCC), Plan Quinquenal (PQ), Government Document.

(SENAMHI-PNCC 2008) SENAMHI-PNCC. (2008). "Escenarios Climáticos Bolivia." Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), Programa Nacional de Cambios Climáticos (PNCC). from www.minagua.gov.bo/pncc/index.htm, Electronic Book.

(Shahin M. 2007) Shahin M. (2007). Water Storage. Water Resources and Hydrometeorology of the Arab Region. S. Netherlands. **59:** 489-517, 978-1-4020-4577-6 (Print) 978-1-4020-5414-3 (Online), Book Section.

(Sicart J.-E. 2002) Sicart J.-E. (2002). Contribution a l'étude des flux d'energie, du bilan de masse et du debit de fonte d'un glacier tropical: Le zongo, Bolivie. Géosciences et Ressources Naturelles. Paris, Doctorat, Université Paris VI - Pierre et Marie Curie, Thesis.

(Simalabwi A. 2007) Simalabwi A. (2007). National Perspectives on Water Governance: Lessons from the IWRM Planning Process in Malawi and Zambia. Governance as a Trialogue: Government-Society-Science in Transition, Springer Berlin Heidelberg: 39-57, 978-3-540-46265-1 (Print) 978-3-540-46266-8 (Online), Book Section.

(Soruco A. 2008) Soruco A. (2008). Etude du retrait des glaciers depuis cinquante ans dans les bassins hydrologiques alimentant en eau lea ville de La Paz - Bolivie (16°S). Laboratoire de Glaciologie et Geophysique de l'environnement. Grenoble, Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier (Grenoble 1). 235, Thesis.

(Soruco A. et al. 2009) Soruco A., C. Vincent, B. Francou, P. Ribstein, T. Berger, J.-E. Sicart, P. Wagnon, Y. Arnaud, V. Favier and Y. Lejeune (2009). "Mass balance of Glaciar Zongo, Bolivia, between 1956 and 2006, using glaciological, hydrological and geodetic methods " Annals of Glaciology **50**(50): 1-8, Journal Article.

(Suarez W. et al. 2008) Suarez W., P. Chevallier, B. Pouyaud, P. Lopez and (2008). "Modelling the water balance in the glacierized Parón Lake basin (White Cordillera, Peru)." Hydrological sciences journal **53**(1): 266-277, Journal Article.

(Thompson & Turk 1995) Thompson & Turk (1995). Earth Sciences and the Environment, Saunders College: 622, 0-03-005219, Book.

(Torrico E. & K. Herrera 2007) Torrico E. and K. Herrera (2007). Representaciones y Reacciones Mediáticas sobre el Proceso Electoral Boliviano de 2005La Paz, Centro de Competencia en Comunicación para Latinoamérica. 17, Report.

(Toussaint E. 2005) Toussaint E. (2005). "Sous la pression populaire, le président bolivien met fin à la présence de Suez en Bolivie." CADTM, Comité pour l'annulation de la dette du tiers monde CADTM, Comité pour l'annulation de la dette du tiers monde. Retrieved. Access in: 2008, from http://www.cadtm.org/Sous-la-

pression-populaire-le?quot%3B%20target=&quot%3B_blank, Web Page.

(Turton A. et al. 2007) Turton A., H. Hattingh, G. Maree, D. Roux, M. Claassen and W. Strydom (2007). Towards a Model for Ecosystem Governance: An Integrated Water Resource Management Example. Governance as a Trialogue: Government-Society-Science in Transition. S. B. Heidelberg: 1-28, 978-3-540-46265-1 (Print) 978-3-540-46266-8 (Online), Book Section.

(UNESCO 2006) UNESCO (2006). 2do Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo. El Agua, una responsabilidad compartida, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), Report.

(UNESCO 2009) UNESCO. (2009). "Wolrd Water Assesment Program." United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). Retrieved. Access in, from http://www.unesco.org/water/wwap/, Web Page.

(UNESCO 2009b) UNESCO (2009b). 3er Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo. Water un a Changing World, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), Report.

(UNESCO/ROSTLAC 1982-2006) UNESCO/ROSTLAC (1982-2006). Guía Metodológica para la Elaboración del Balance Hídrico de América del Sur, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), Book.

(USDI 1987) USDI (1987). Desing of Small Dams, United States Deparment of the Interior, Bureau of reclamation (USDI), Book.

(van der Keur P. et al. 2008) van der Keur P., H. J. Henriksen, J. C. Refsgaard, M. Brugnach, C. Pahl-Wostl, H. Dewulf and A. Buiteveld (2008). "Identification of Major Sources of Uncertainty in Current IWRM Practice. Illustrated for the Rhine Basin " Water Resources Management **22**(11): 1677-1708, Journal Article.

(Ven Te Chow 1994) Ven Te Chow (1994). Hidrología aplicada, MC Graw Hill (Feb 1994): 584, ISBN 10-9586001717, Book.

(Villón M. 2002) Villón M. (2002). Hidrología. Lima - Perú, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Book.

(Vimeux F. et al. 2005) Vimeux F., R. Gallaire, S. Bony, G. Hoffmann and J. C. Chiang (2005). "What are the climate controls on delta D in precipitation in the Zongo Valley (Bolivia)? Implications for the Illimani ice core interpretation." Earth and Planetary Science Letters **2**(240): 205-220, Journal Article.

(Vuille M. 1999) Vuille M. (1999). "Atmospheric circulation over the bolivian Altiplano during dry and wet periods and extreme phases of the Southern Oscillation." Journal of Climatology **19**: 1579-1600, Journal Article.

(Vuille M. et al. 1999) Vuille M., R. Bradley and F. Keimig (1999). "Climate Variability in the Andes of Ecuador and its relation to Tropical Pacific and Atlantic Sea Surface Temperature Anomalies." Journal of Climate: 1-12, Journal Article.

(Vuille M. et al. 2000) Vuille M., R. Bradley and F. Keimig (2000). "Climate Variability in the Andes of Ecuador and Its Relation to Tropical Pacific and Atlantic Sea Surface Temperature Anomalies." Journal of Climate **13**: 2520-2535, Journal Article.

(Vuille M. et al. 2003) Vuille M., R. Bradley, M. Werner and F. Keimig (2003). "20th Century Climate Change in the Tropical Andes: Observations and Model Results " Climatic Change **59**(1-2): 75-99, Journal Article.

(Vuille M. & F. Keimig 2004) Vuille M. and F. Keimig (2004). "Interannual Variability of Summertime Convective Cloudiness and Precipitation in the Central Andes Derived from ISCCP-B3 Data." Journal of Climate **17**: 3334-3348, Journal Article.

(Wagnon P. et al. 2001) Wagnon P., P. Ribstein, B. Francou and J. E. Sicart (2001). "Anomalus heat and mass budget of Glacier Zongo, Bolivie during the 1997/98 El Niño year." Journal of Glaciology **47**(156): 21-28, Journal Article.

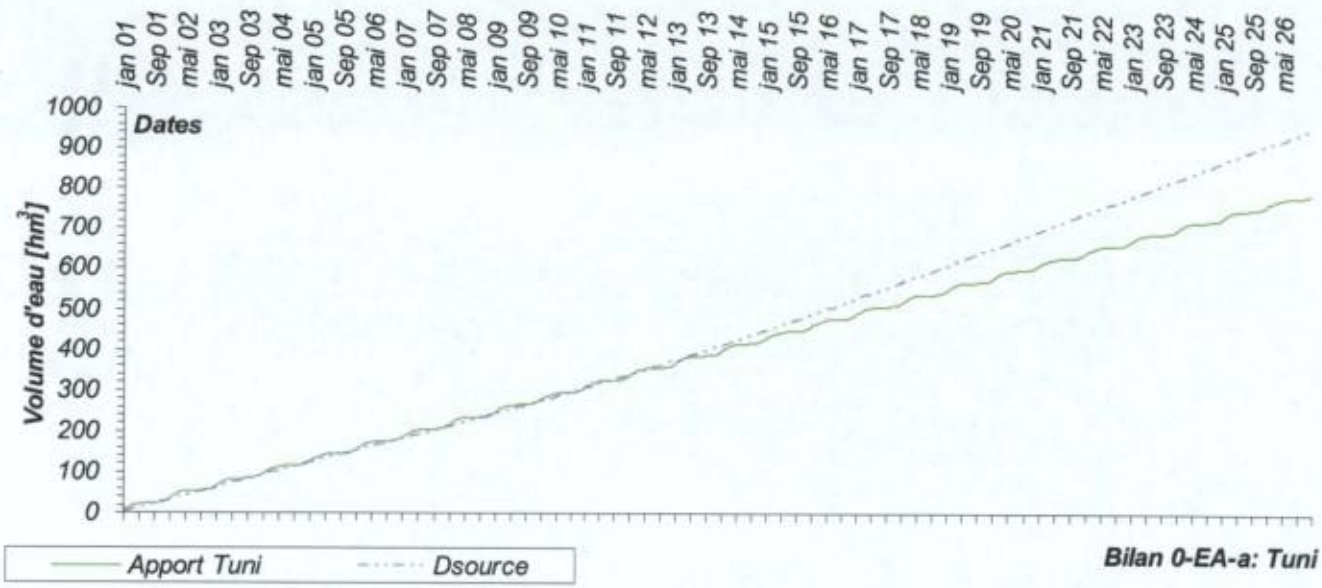
(WBGU 2007) WBGU (2007). Climate Change as a Security Risk. London, Berlin, German Advisory Council on Global Change (WBGU)978-1-84407-536-2, Book.

(Webber J. 2005) Webber J. (2005). Left-Indigenous Struggles in Bolivia: Searching for Revolutionary Democracy. Monthly Review, 57, Magazine Article.

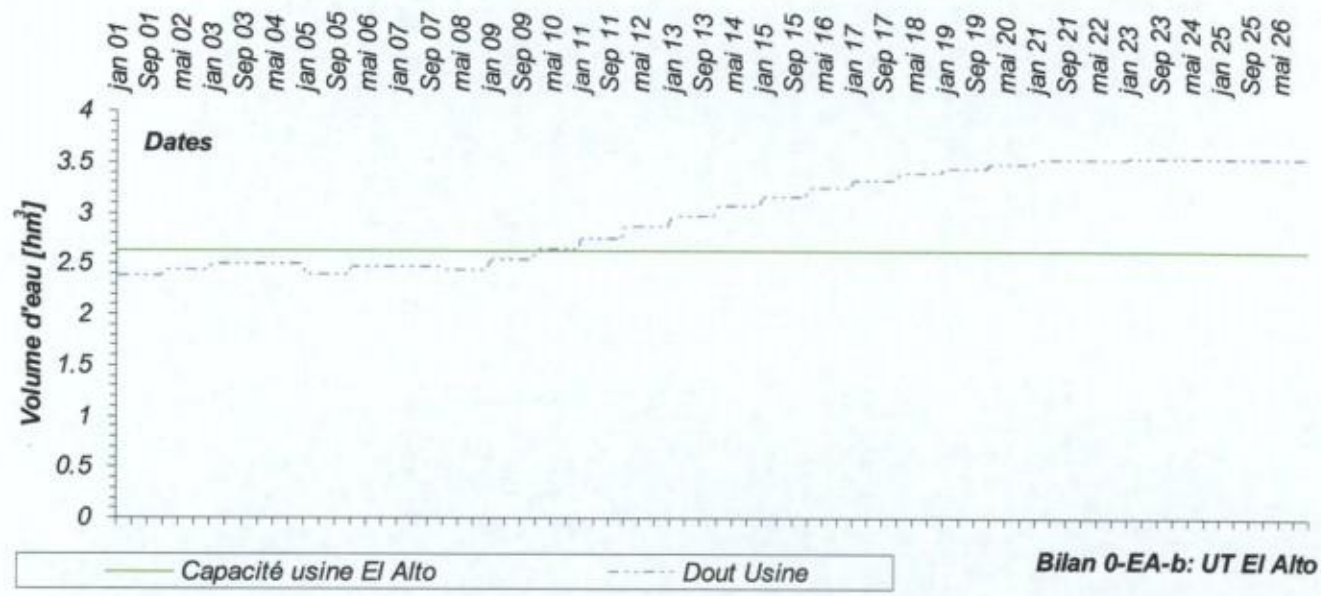
(WGMS 2009) WGMS (2009). Glacier Mass Balance Bulletin No. 10 (2006-2007). W. Haeberli, I. Gärtner-Roer, M. Hoelzleet alZurich, World Glacier Monitoring Service (WGMS). 96 pp, Report.

ANNEXE

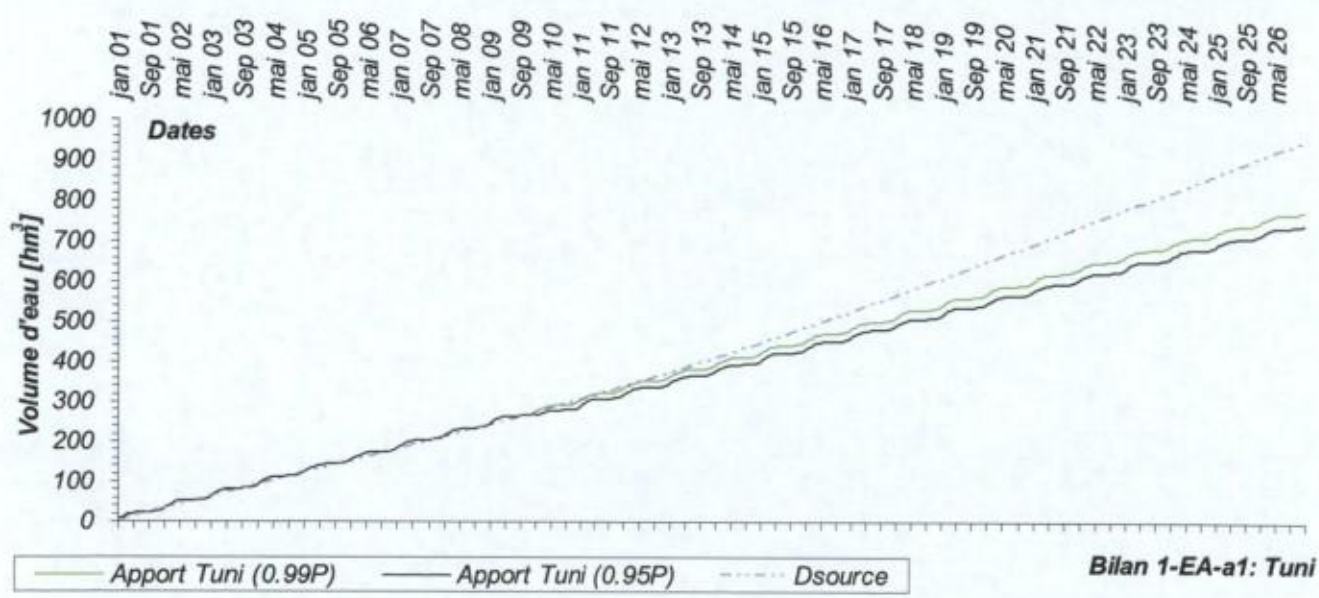
Système El Alto



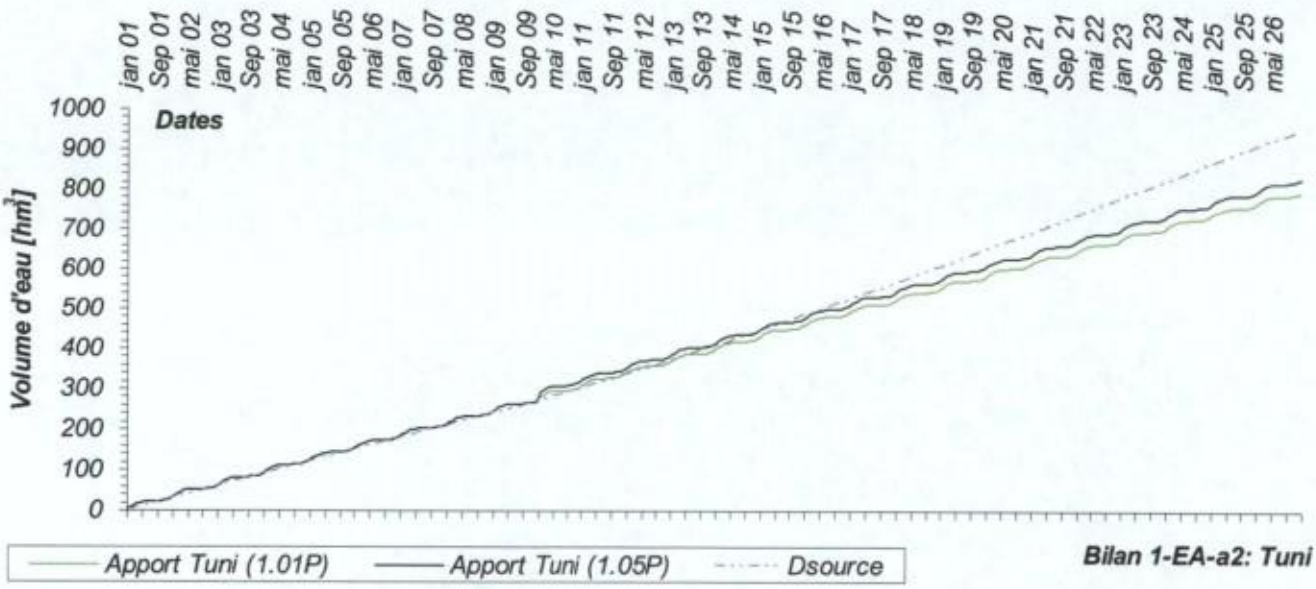
Bilan 0-EA-a: Tuni



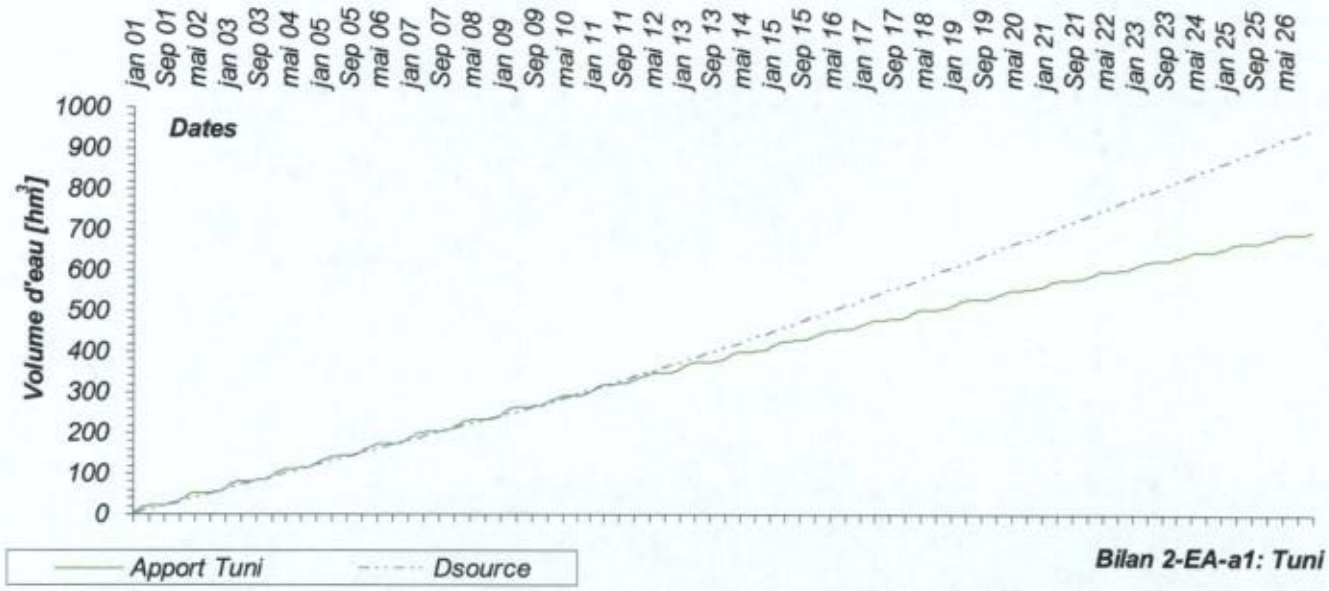
Bilan 0-EA-b: UT El Alto



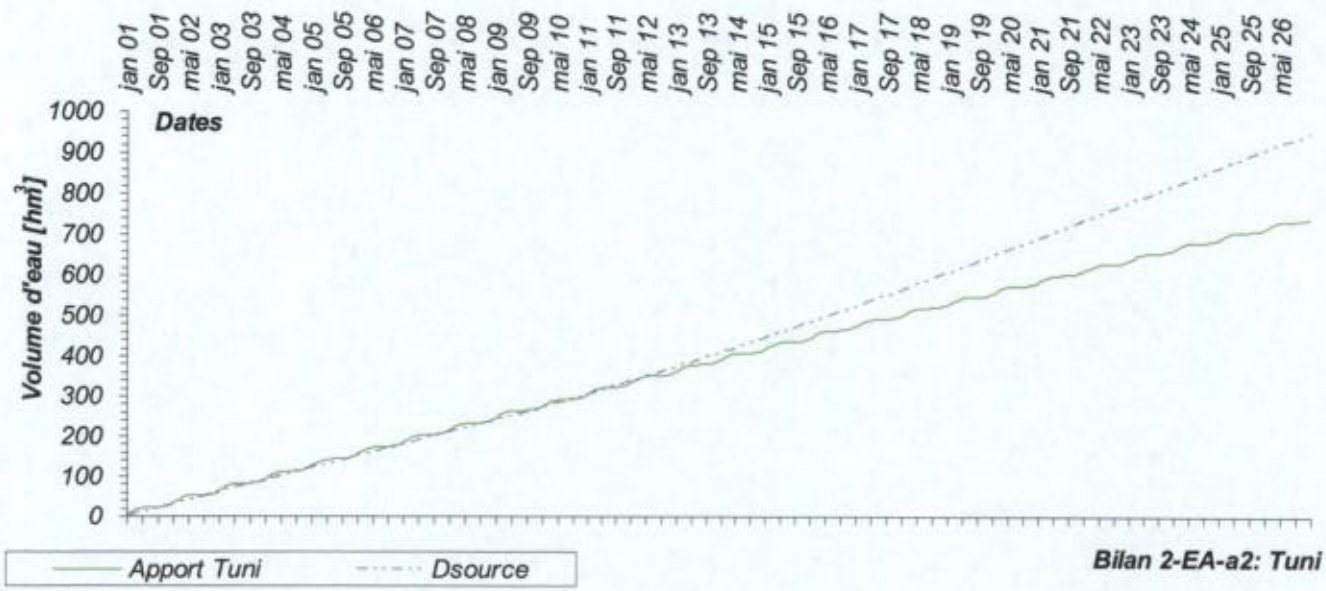
Bilan 1-EA-a1: Tuni



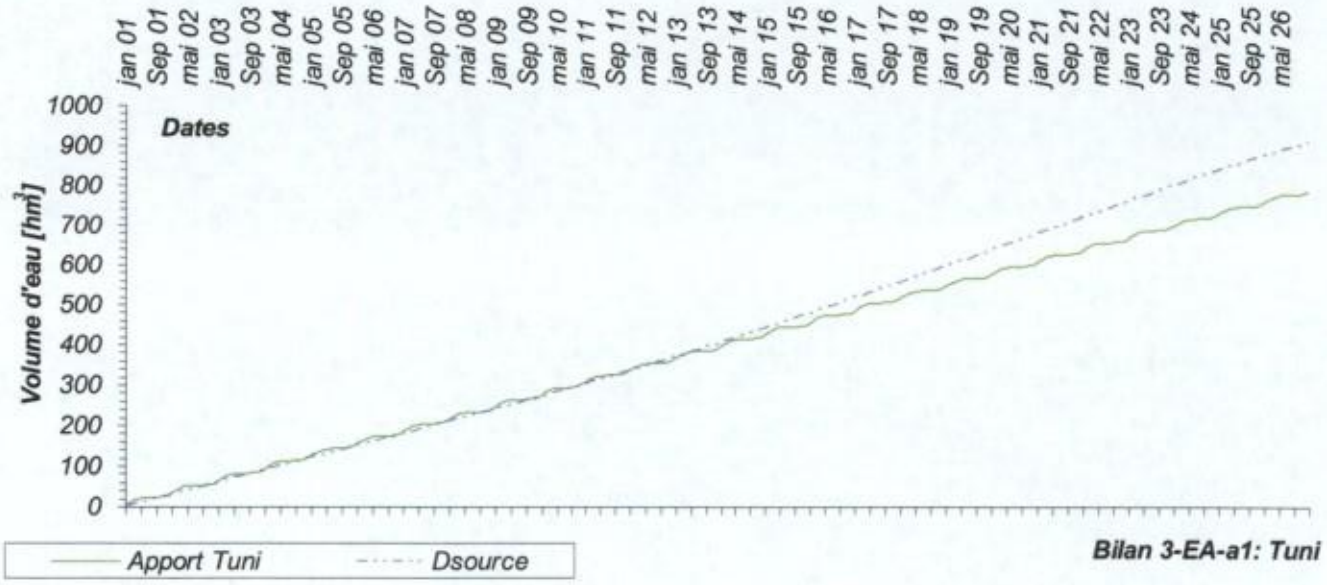
Bilan 1-EA-a2: Tuni



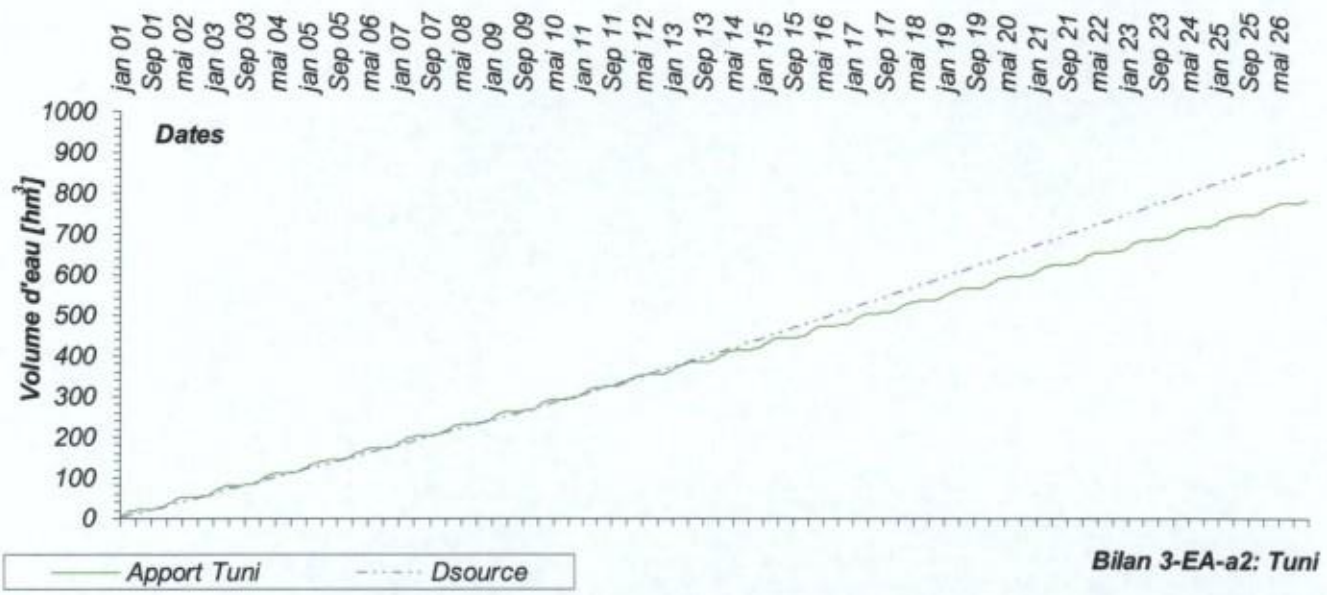
Bilan 2-EA-a1: Tuni



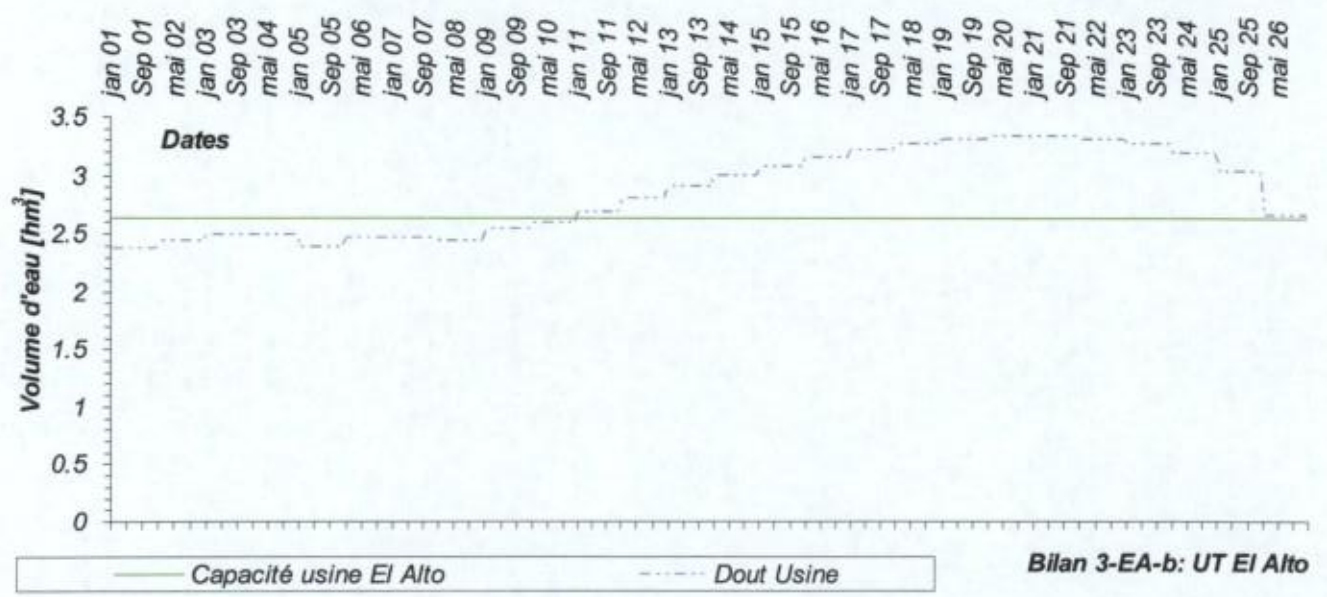
Bilan 2-EA-a2: Tuni



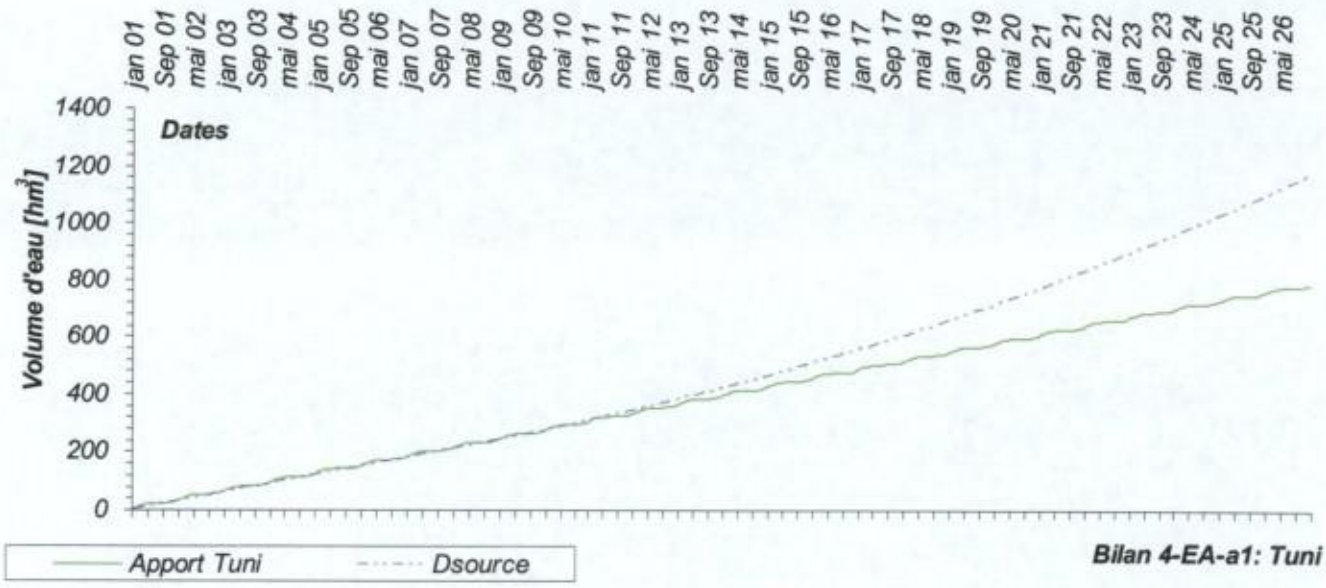
Bilan 3-EA-a1: Tuni



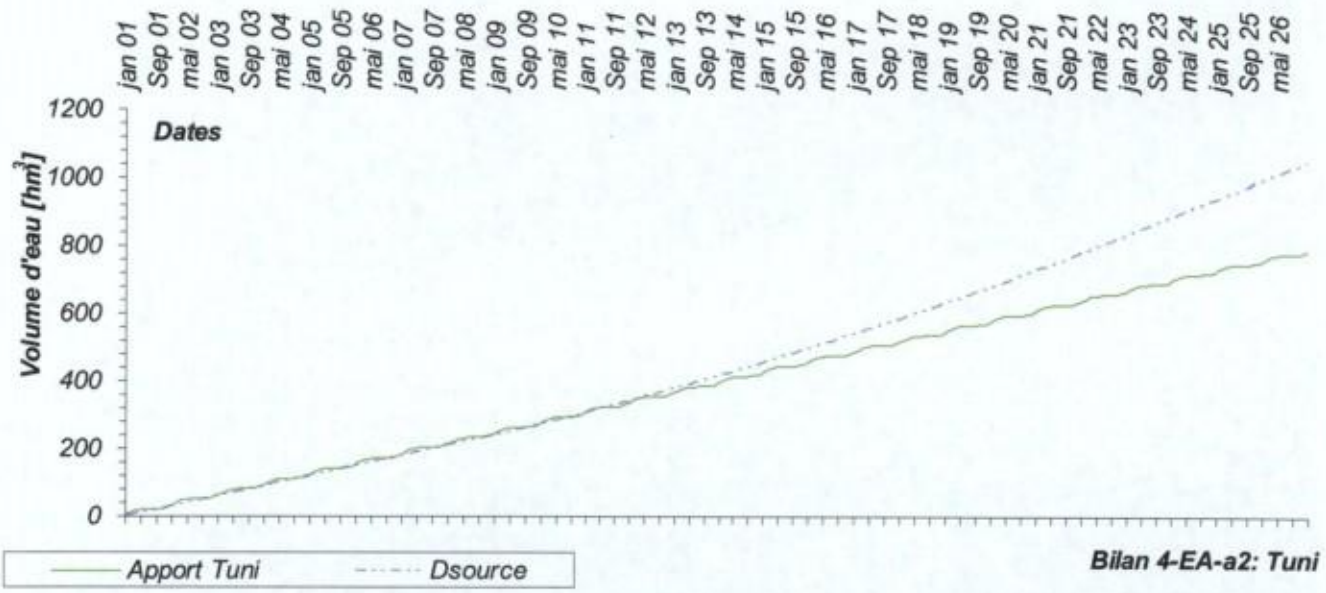
Bilan 3-EA-a2: Tuni



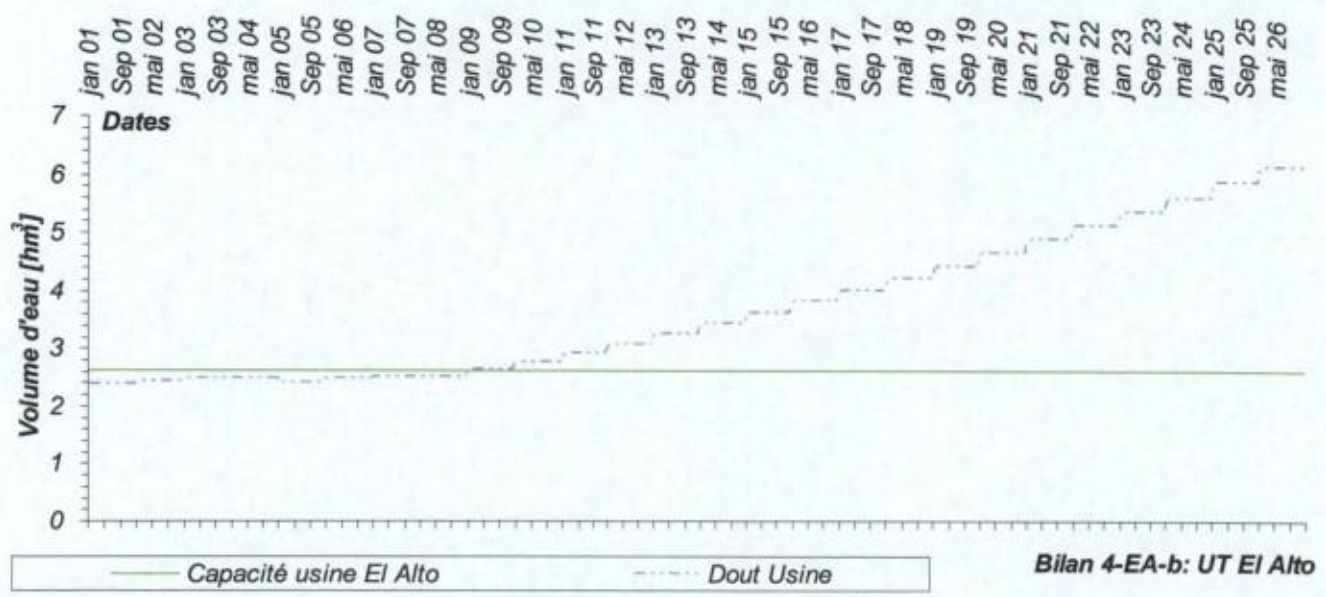
Bilan 3-EA-b: UT El Alto



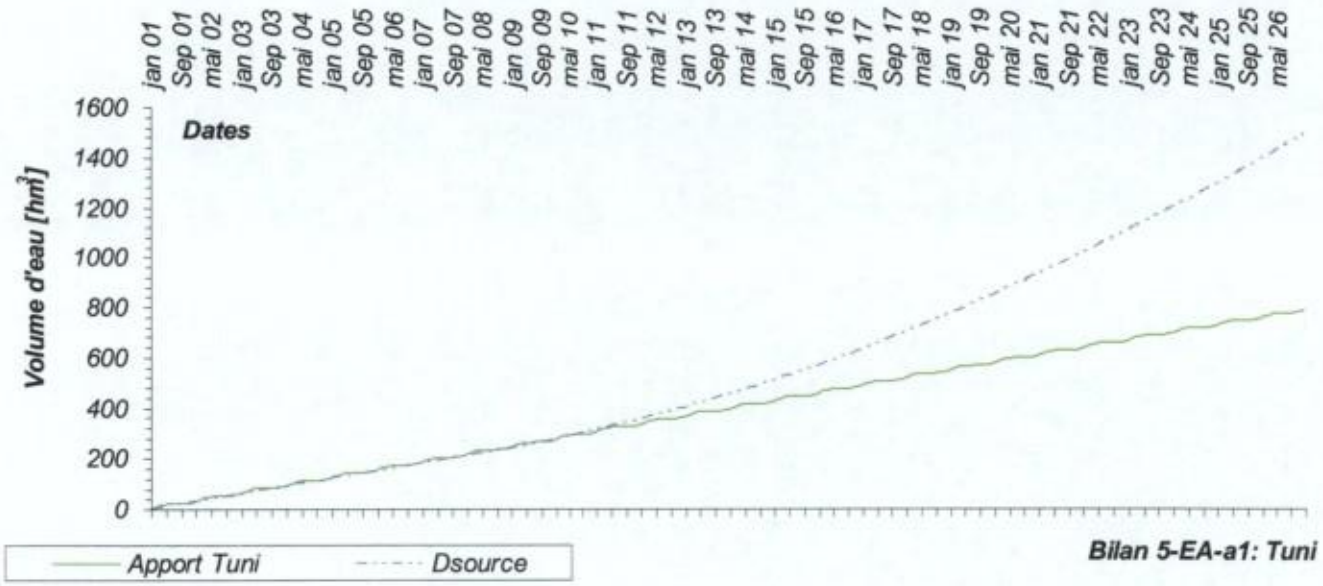
Bilan 4-EA-a1: Tuni



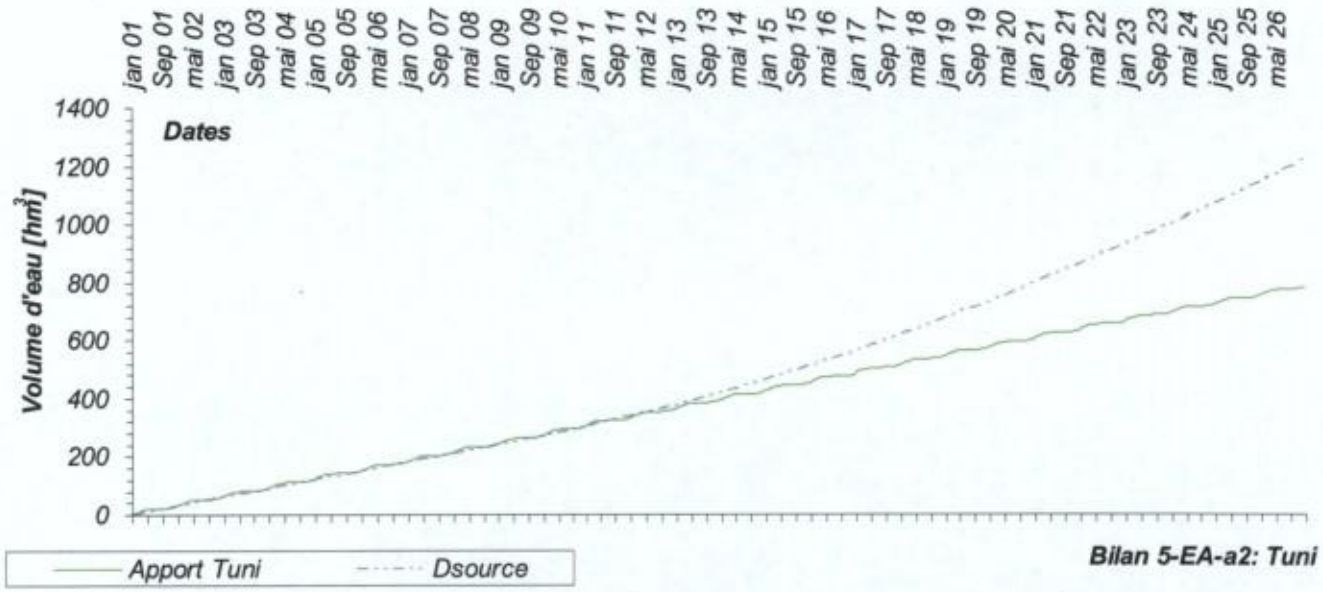
Bilan 4-EA-a2: Tuni



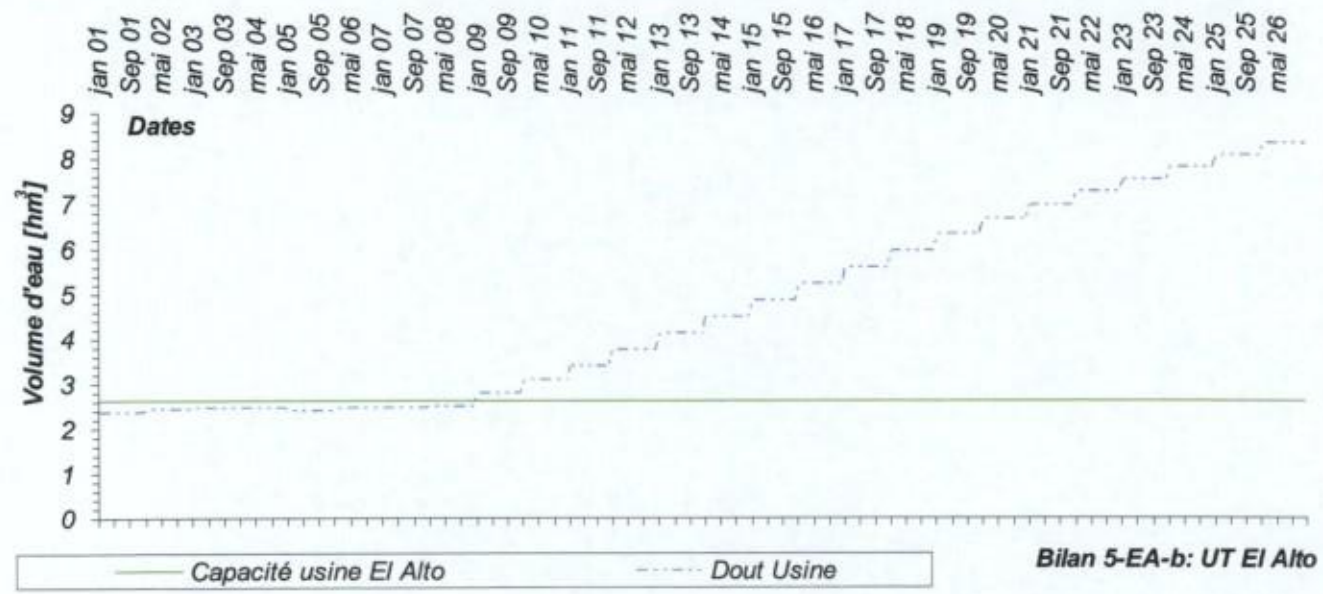
Bilan 4-EA-b: UT El Alto



Bilan 5-EA-a1: Tuni

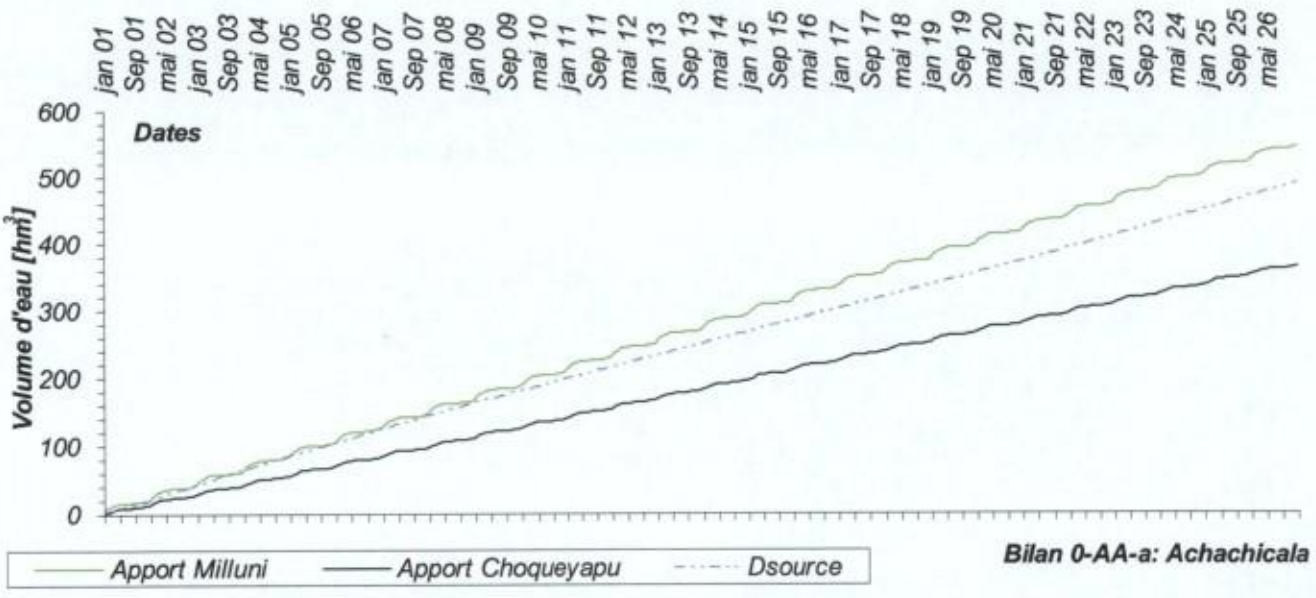


Bilan 5-EA-a2: Tuni

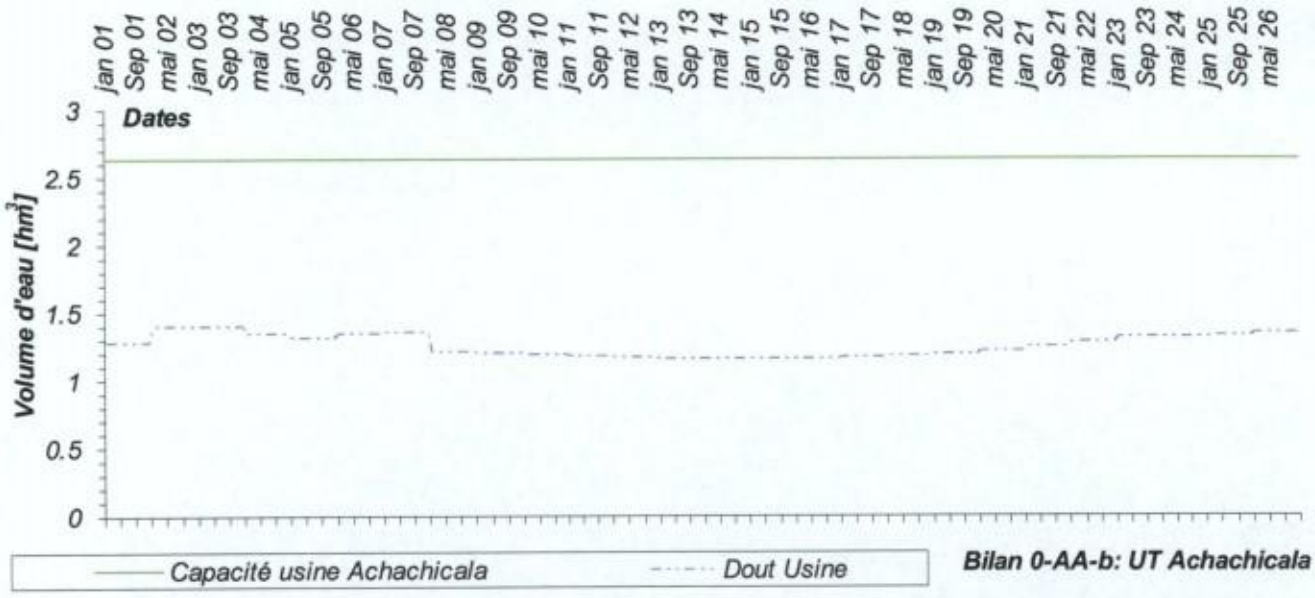


Bilan 5-EA-b: UT El Alto

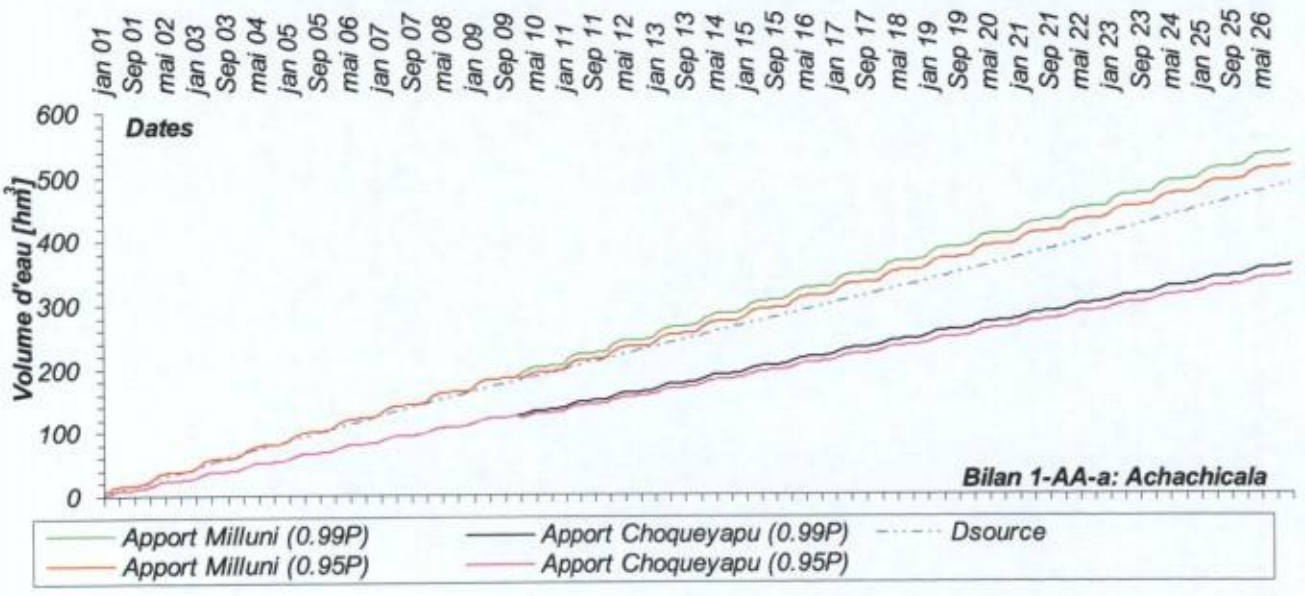
Système Achachicala



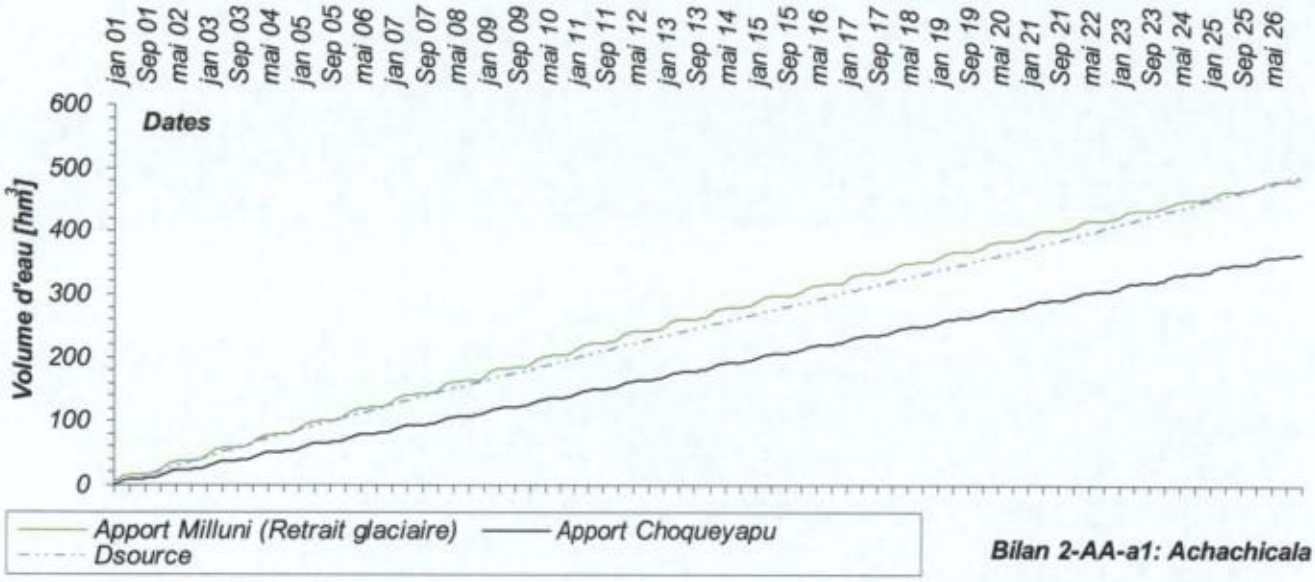
Bilan 0-AA-a: Achachicala



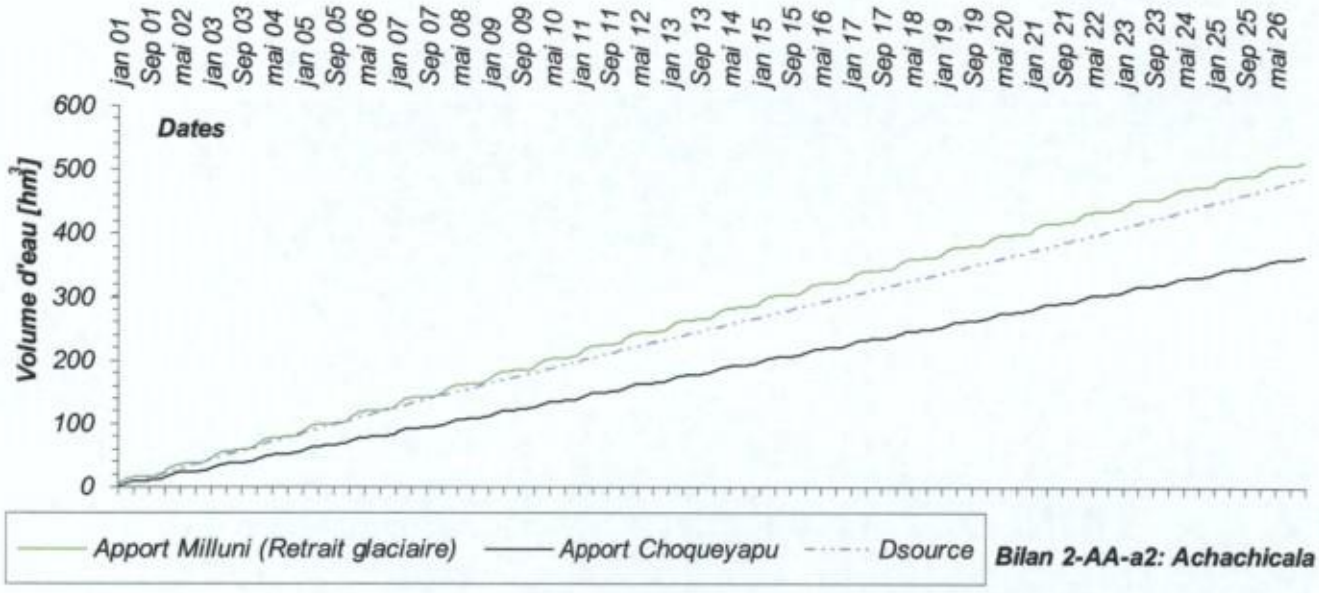
Bilan 0-AA-b: UT Achachicala



Bilan 1-AA-a: Achachicala

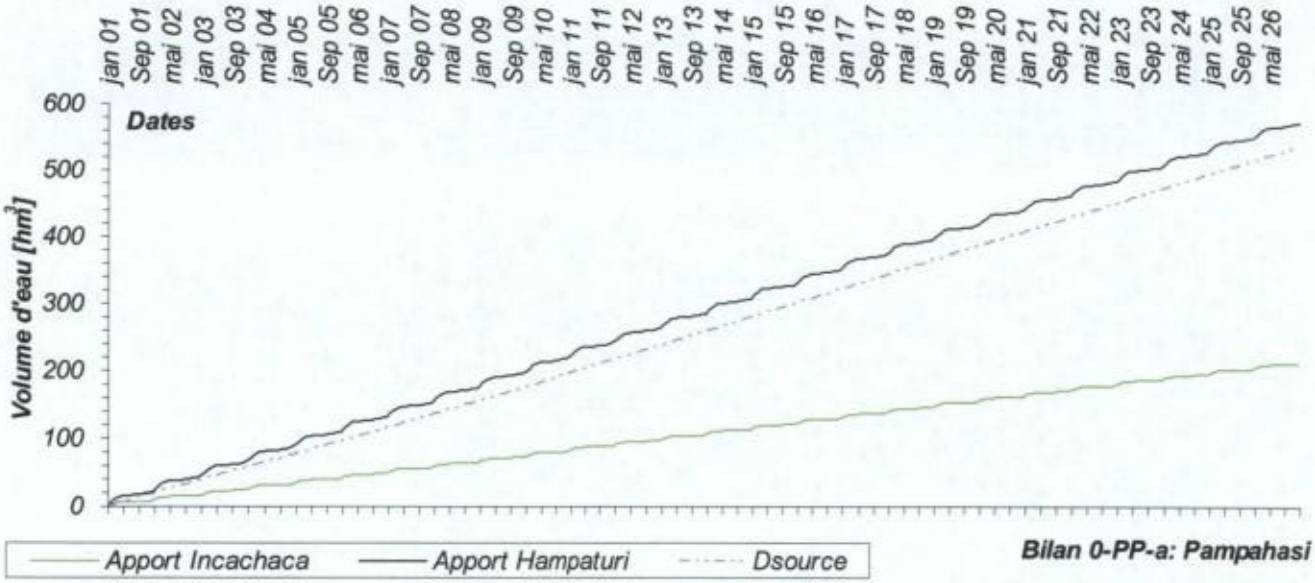


Bilan 2-AA-a1: Achachicala

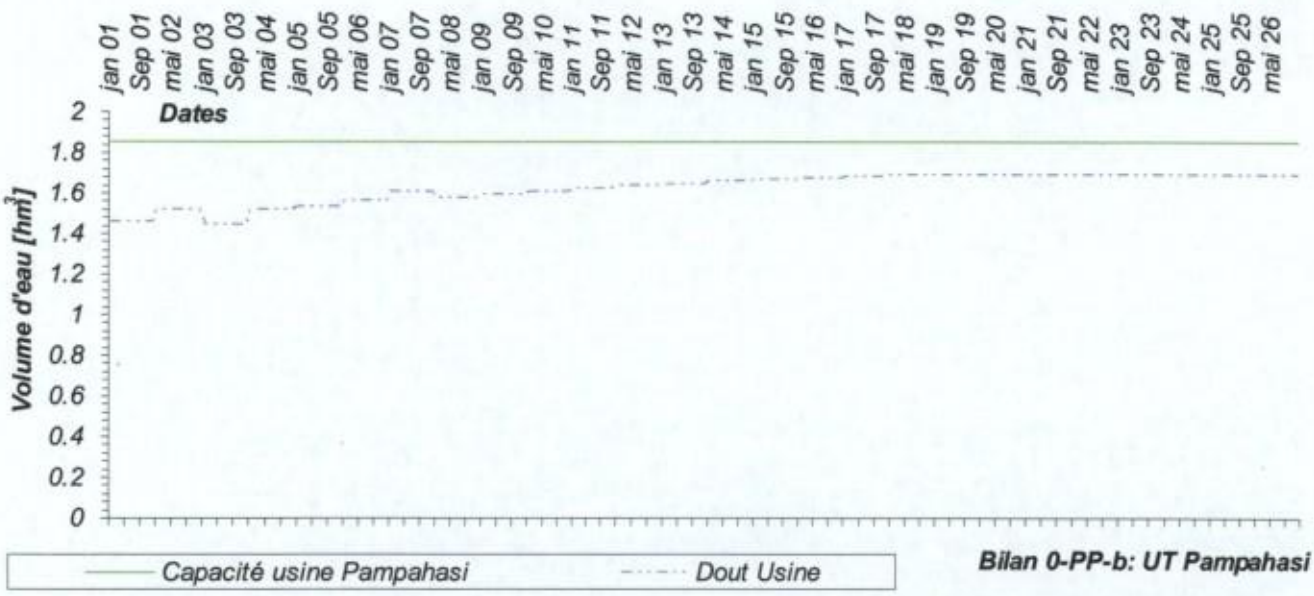


Bilan 2-AA-a2: Achachicala

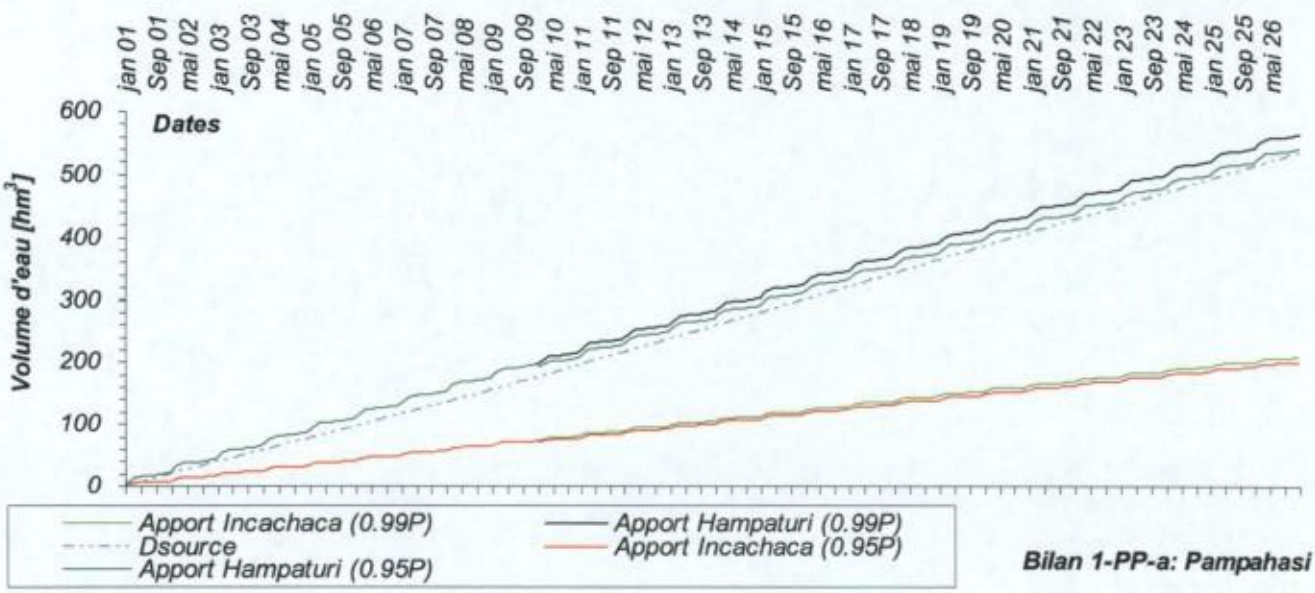
Système Pampahasi



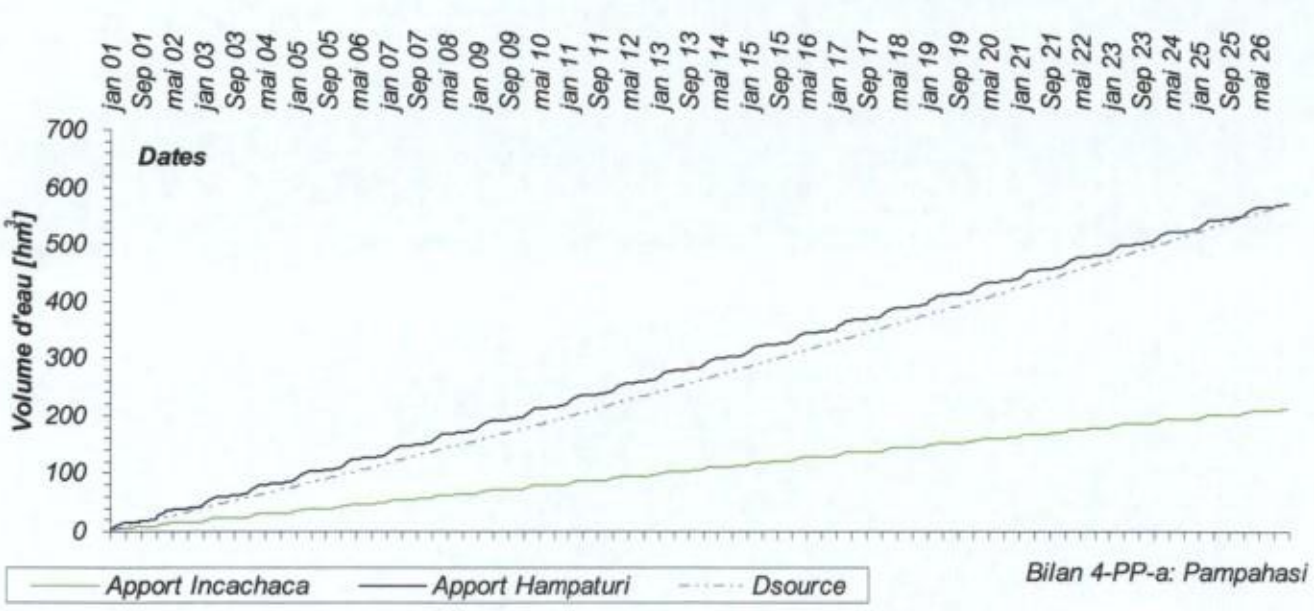
Bilan 0-PP-a: Pampahasi



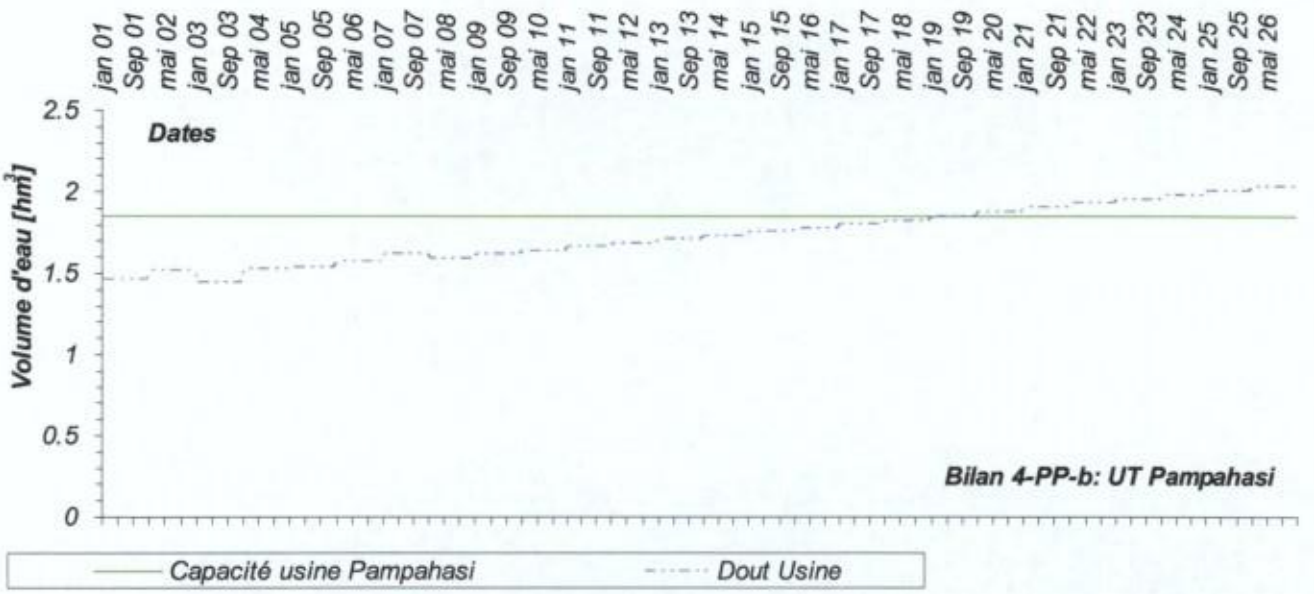
Bilan 0-PP-b: UT Pampahasi



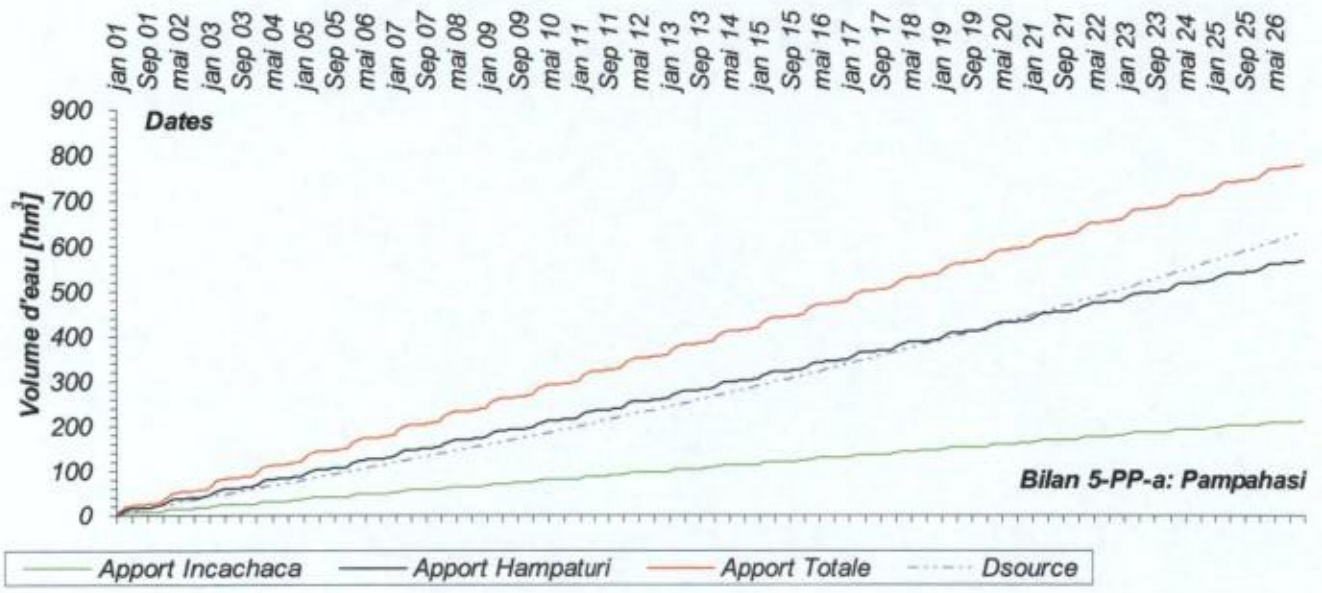
Bilan 1-PP-a: Pampahasi



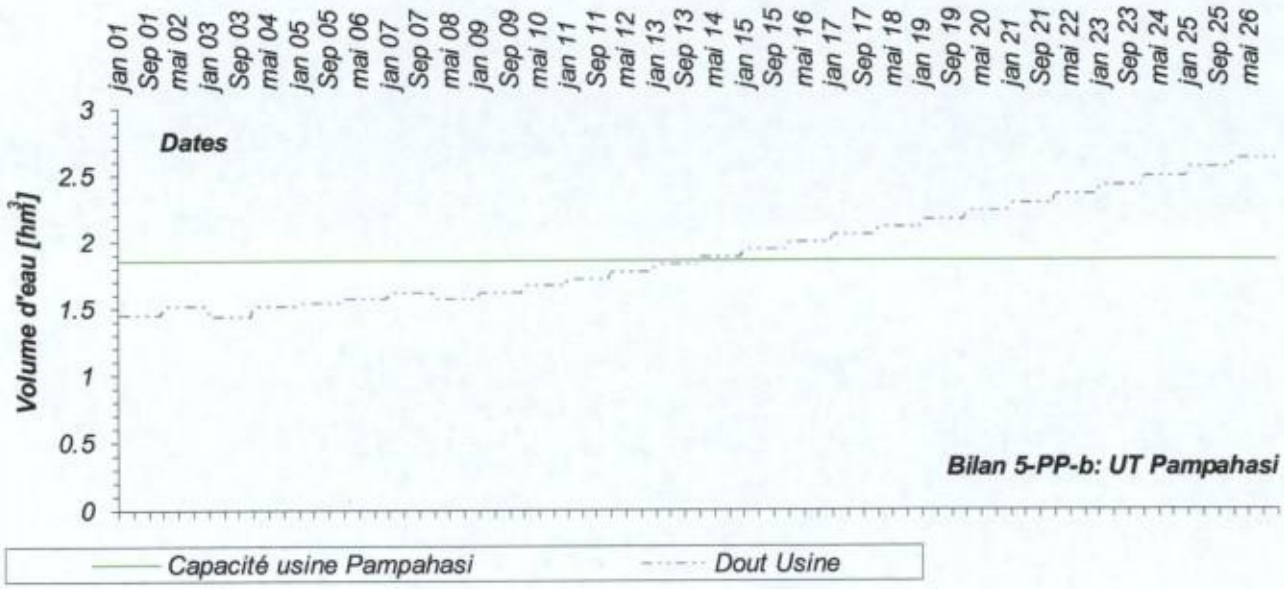
Bilan 4-PP-a: Pampahasi



Bilan 4-PP-b: UT Pampahasi



Bilan 5-PP-a: Pampahasi


jan 01
Sep 01
mai 02
jan 03
Sep 03
mai 04
jan 05
Sep 05
mai 06
jan 07
Sep 07
mai 08
jan 09
Sep 09
mai 10
jan 11
Sep 11
mai 12
jan 13
Sep 13
mai 14
jan 15
Sep 15
mai 16
jan 17
Sep 17
mai 18
jan 19
Sep 19
mai 20
jan 21
Sep 21
mai 22
jan 23
Sep 23
mai 24
jan 25
Sep 25
mai 26
Dates
Volume d'eau [hm³]
3
2.5
2
1.5
1
0.5
0
Bilan 5-PP-b: UT Pampahasi
Capacité usine Pampahasi
Dout Usine