

UNIVERSITE DE MONTPELLIER II

ORSTOM
(Institut Français de Recherche Scientifique
pour le Développement en Coopération)

Mémoire de DEA

DEA Sciences de l'eau dans l'environnement Continental

MODELISATION INTEGREE D'UN SYSTEME BASSIN
VERSANT AMENAGE DE LA CORDILLERE DES ANDES
(VALLEE DU ZONGO - BOLIVIE)

par Ivan CABALLERO

Soutenu le 25 septembre 1998 à Montpellier devant:

P.CHEVALLIER (ORSTOM) - Maître de stage
M.DESBORDES (UMII)
B.CAPPELAERE (ORSTOM)

Fonds Documentaire ORSTOM
Cote: Ax 15232 Ex: 2

Remerciements

Je tiens à remercier,

Pierre Chevallier pour sa disponibilité et son suivi rigoureux.

L'ensemble des membres du laboratoire d'hydrologie de La Paz, pour leur accueil et Robert Gallaire pour sa gentillesse.

Les membres permanents du corps administratif du laboratoire d'hydrologie de Montpellier et les membres temporaires de la salle des stagiaires pour m'avoir supporté.

J'adresse une pensée particulière à l'adorable Sarra Touzi.

Résumé

La vallée du Rio Zongo en Bolivie, située entre les hauts plateaux andins et le bassin amazonien sur le versant oriental de la Cordillère des Andes, est aménagée pour produire de l'électricité. Ces aménagements, étagés entre 6000 m et 1500 m d'altitude sur une distance d'environ 40 km, captent l'eau de fonte des glaciers "tropicaux" de petite taille, qui dominent la vallée.

Ces glaciers, sont d'excellents marqueurs de la variabilité climatique et représentent une des seules ressources en eau facilement exploitable dans les vallées andines d'altitude.

Les aménagements existants sur l'ensemble de la vallée, sont autant de points de contrôle de son comportement hydrologique et hydraulique. Sur cette base, le mémoire présente un inventaire des données disponibles, suivi d'une analyse de la fiabilité et de la représentativité des informations obtenues. En s'appuyant sur le schéma hydroélectrique et sur la hiérarchie naturelle des sous bassins versants de la vallée, un schéma hydraulique intégrant la variabilité hydrologique est construit avec le langage de simulation Vensim®. Il a permis d'évaluer l'impact de la gestion du système de production électrique et de la structure hydraulique des aménagements sur les processus hydrologiques naturels.

Cet outil dynamique très convivial est facilement modifiable grâce aux fonctionnalités de Vensim®: il intègre la gestion de la ressource pour la production électrique et il fixe des ordres de grandeur pour les écoulements naturels sur les versants.

Dans le futur un modèle plus complet, permettra d'optimiser la gestion des aménagements de la vallée dans le contexte d'une inquiétante évolution climatique et d'un accroissement de la demande énergétique.

Sommaire

1	Introduction	7
2	Contexte et objectifs	11
2.1	Objectifs de l'étude	11
2.2	Présentation générale de la zone d'étude	11
2.2.1	Situation géographique	11
2.2.2	Situation géologique	12
2.2.3	Situation climatique	12
2.2.4	Situation hydrologique	12
2.3	Présentation du système hydroélectrique	17
2.4	Éléments du système et données disponibles	19
2.4.1	Hypothèses de travail et récapitulatif des données	19
2.4.2	Éléments du système et options de calcul	22
3	La modélisation	30
3.1	L'outil de modélisation	30
3.1.1	Présentation du logiciel Vensim®	30
3.2	Méthodologie de construction du modèle	32
3.2.1	Structure hydraulique et hydrologique adoptée pour la vallée	32
3.2.2	Le modèle de production d'écoulement des versants	35
3.2.3	La production des glaciers	36
3.2.4	L'évaporation	36
3.2.5	La surface des retenues	37
3.2.6	Conclusion	38
4	Visualisation des systèmes et des résultats	39
4.1	Les systèmes hydrauliques de la vallée	39
4.1.1	Le système Zongo	40
4.1.2	Le système Tiquimani	42
4.1.3	Les systèmes Botijlaca et Liviñosa	44
4.1.4	Le système Viscachani	47
4.1.5	Le système Cuticucho	49
4.1.6	Le système Santa Rosa et Sainani	51
4.2	Commentaires	53
5	Conclusions	54

Bibliographie

Annexes

Liste des figures

Figure 1: Situation géographique de la vallée du Zongo.....	8
Figure 2: Situation topographique du bassin versant alimentant l'usine Sainani.....	9
Figure 3: Carte schématique de la vallée du Zongo.....	10
Figure 4 Variations de l'ITCZ.....	13
Figure 5 Précipitations mensuelles et écoulements sur le glacier Zongo.....	13
Figure 6: Pluviométries moyennes mensuelles dans la vallée du Zongo.....	14
Figure 7: Hauteurs d'eau mensuelles relevées sur les pluviomètres totalisateurs dans les vallées de Liviñosa et Taipi Khuchu (mm).....	15
Figure 8: Localisation schématique des 4 pluviomètres des vallées de Taipi Khuchu et Liviñosa.....	15
Figure 9: Hauteurs d'eau mensuelles relevées sur les pluviomètres totalisateurs dans la vallée de Coscapa (mm).....	16
Figure 10: Localisation schématique des 4 pluviomètres dans la vallée de Coscapa.....	16
Figure 11 Source de pied de versant localisée à la base d'un cône d'éboulis.....	23
Figure 12: Relations niveau-volume pour Hatilata, Guaraguarani, Taipicota, Sankayuni.....	27
Figure 13: Relation niveau-volume pour la retenue Zongo.....	27
Figure 14 :Relations niveau-volume pour Alto Viscachani et Liviñosa.....	28
Figure 15: Exemple d'utilisation des différentes variables sous Vensim®	31
Figure 16: Relation Surface - Volume. Cas de la retenue Zongo.....	37
Figure 17: Schéma global du système jusqu'à l'usine Sainani. Visualisation des variables reliant les systèmes.....	39
Figure 18: Modèle de fonctionnement du système Zongo.....	41
Figure 19: résultat de la simulation pour le système de la retenue Zongo.....	41
Figure 20: Modèle de fonctionnement du système Gua-Hati-Taipi	43
Figure 21: résultat de la simulation pour la retenue fictive Gua-Hati-Taipi.....	43
Figure 22: Schéma du système hydraulique de l'usine Botijlaca.....	44
Figure 23: Modèle de fonctionnement du système de Botijlaca.....	46
Figure 24: Modèle de fonctionnement du système de Liviñosa.....	46
Figure 25: Résultat de la simulation pour la retenue Liviñosa.....	47
Figure 26: Modèle de fonctionnement du système de Viscachani.....	48
Figure 27: Résultat de la simulation pour la retenue Alto Viscachani.....	48
Figure 28: Modèle de fonctionnement du système de Cuticucho.....	50
Figure 29: Débordement au niveau du dique et du canal Cuticucho.....	50
Figure 30: Modèle de fonctionnement du système de Sainani et Santa Rosa.....	52
Figure 31: Débordement à la prise du canal Sainani.....	52

Liste des Tableaux

Tableau 1: Tableau des caractéristiques des différentes usines du système, tiré du rapport de Reinhardt 1997.....	17
Tableau 2: Temps de transfert de l'eau entre la retenue Zongo et les usines.....	21
Tableau 3: Facteurs d'usines avant et après les travaux d'agrandissement, (Intendance des opérations Cobee, 1998).	25
Tableau 4: Coefficients d'écoulement pour chaque système hydraulique.....	54

Liste des Annexes

Annexe A: Listes et position des pluviomètres totalisateurs	
Annexe B: Schéma du système Cobee	
Annexe C: Schéma d'organisation des écoulements	
Annexe D: courbes et équations Surface Volume	
Annexe E: résultats des jaugeages dans le système Botijlaca - Liviñosa	

1 Introduction

Cette année encore, le monde entier a subi des événements climatiques exceptionnels, dont on ne sait pas véritablement déterminer l'origine. Pluies torrentielles, sécheresses, canicules ou au contraire, températures très basses pour la saison, sont des événements que la population sud-américaine et notamment celle de la région andine ont eu à vivre.

En hydrologie, ces phénomènes, qui ont été tout de suite attribués, parfois un peu vite, à l'activité très intense de l'événement El Niño dans le Pacifique, ont une fois de plus attiré l'attention sur l'impact que peut avoir la variabilité climatique sur les glaciers tropicaux, principale ressource en eau d'altitude.

En Bolivie, pays situé au cœur de l'Amérique du Sud, où la cordillère représente un quart du territoire national, il existe un bon nombre de ces glaciers dits "tropicaux" de par la latitude à laquelle on les trouve. Nous pouvons visualiser la position géographique de la région sur la figure 1.

L'eau de fonte de ces glaciers alimente les cours d'eau de la cordillère et notamment, ceux qui rejoignent le réseau hydrographique amazonien descendant le long des vallées abruptes du versant oriental, les Yungas, qui relie l'Altiplano au bassin Amazonien.

L'une d'elles, **la vallée du Rio Zongo**, a été choisie, par les chercheurs de l'Orstom, pour y mener un suivi des réactions des glaciers aux variations climatiques régionales. Une carte topographique de la vallée est proposée sur la figure 2. C'est dans ce cadre que s'inscrit le présent travail.

Cette vallée a été aménagée pour la production d'électricité, par la COBEE (Compagnie Bolivienne d'Énergie Électrique S.A.), qui alimente la ville de La Paz, en installant un réseau hydraulique de transport et stockage de l'eau. Nous pouvons voir son organisation sur la figure 3. Ceci a permis aux chercheurs, de superposer au réseau de captage de l'eau de fonte des glaciers, une série d'appareils de mesure permettant de quantifier les flux de fonte glaciaire. D'autres points de mesure existent dans la vallée, nécessaires à la gestion du système hydroélectrique, qui sont utilisables pour comprendre le fonctionnement hydrologique et hydraulique de la vallée.

Nous allons donc nous baser sur cette infrastructure, pour répertorier et analyser les données disponibles sur la vallée, étudier la dynamique des flux hydrologiques en identifiant et quantifiant les processus naturels en jeu et construire un schéma hydraulique dynamique représentatif, à l'aide du logiciel Vensim®. Ce travail permettra de proposer une méthodologie de modélisation qui intègre l'impact de la gestion d'un système hydroélectrique sur les écoulements naturels.

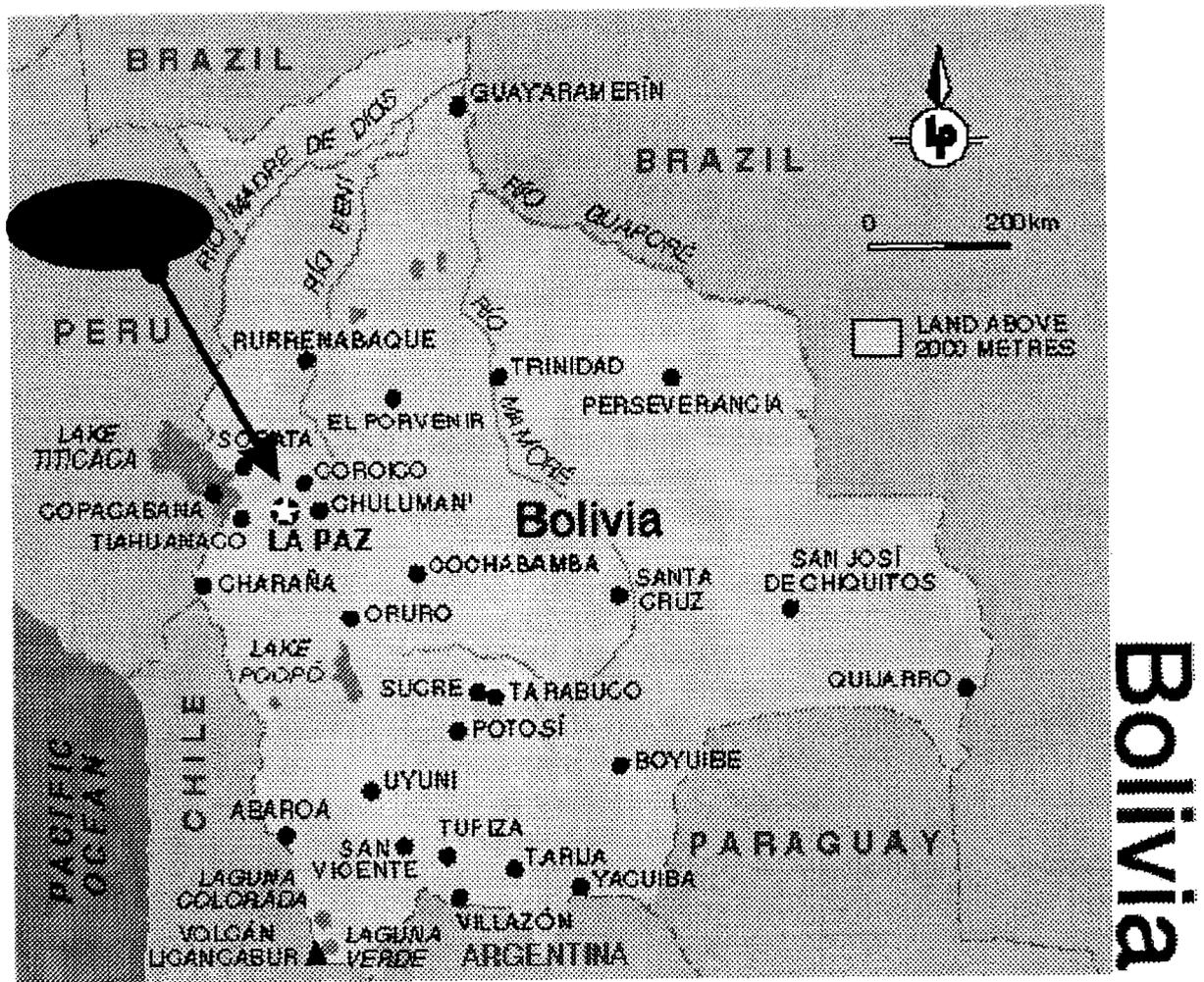


Figure1: Situation géographique de la vallée du Zongo.

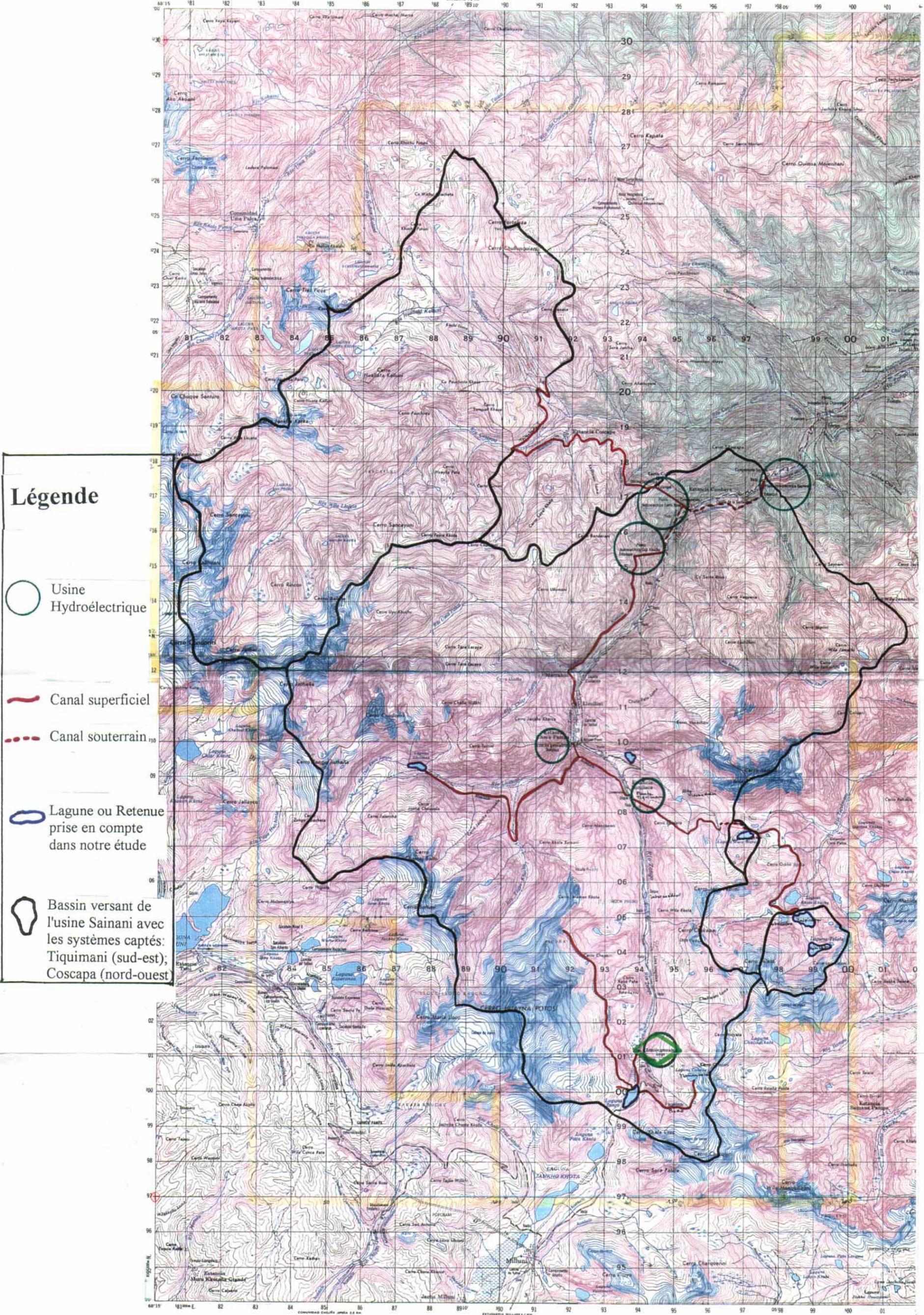


Figure 2: Situation topographique du bassin versant qui alimente l'usine Sainani, extraits des cartes 5945 I et II de l'Institut Géographique Militaire, La Paz, Bolivie. Echelle: 1 / 110 000ème.
 Nous avons localisé les différentes usines étudiées ainsi que les retenues sélectionnées. Le parcours des canaux est montré de façon à mieux comprendre l'impact des aménagements sur les écoulements naturels.

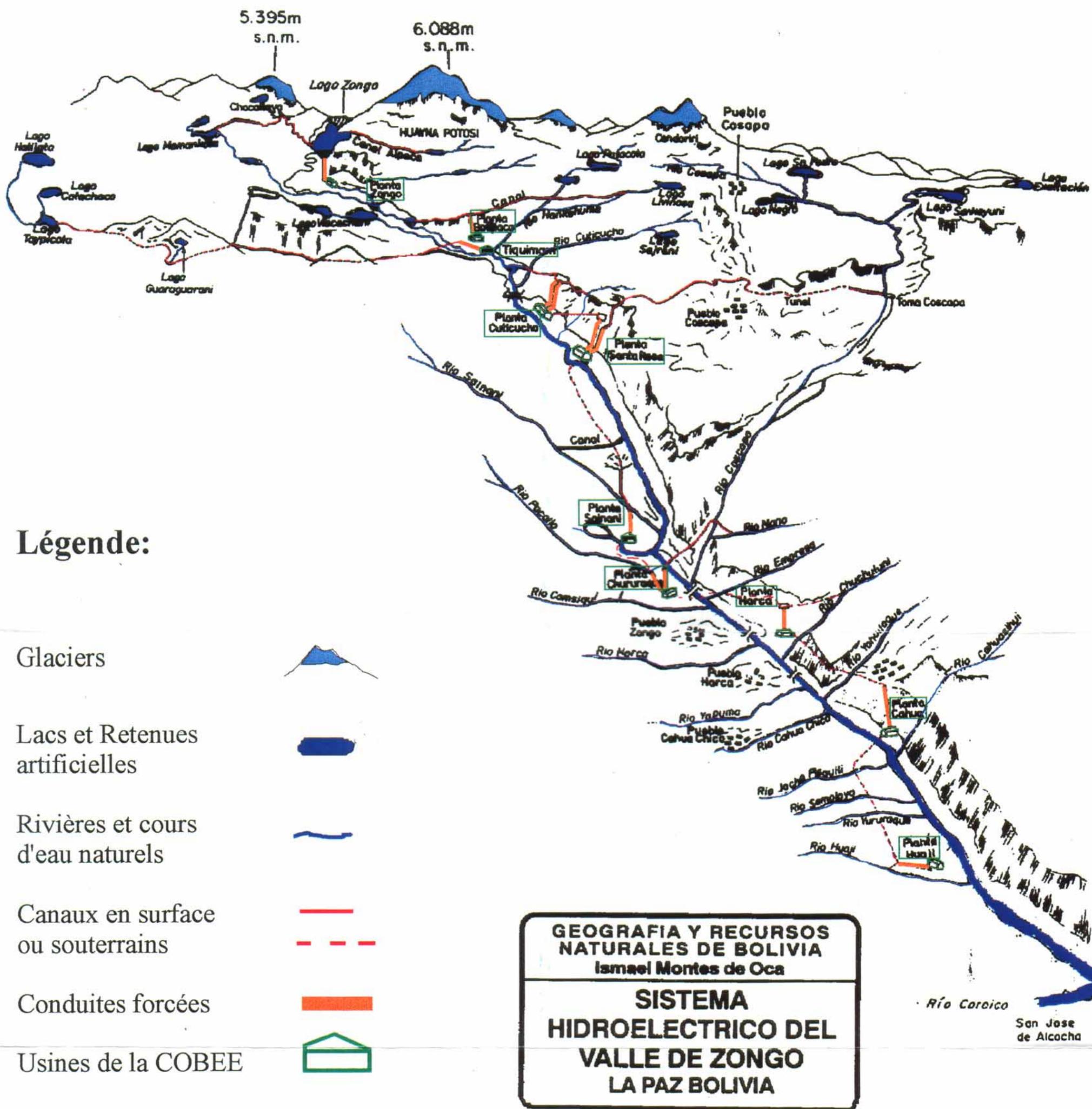


Figure 3: Carte schématique de la vallée du zongo. Mise en évidence du système hydroélectrique. Extrait de "Géografía y recursos naturales de Bolivia" - Ismael Montes de Oca; 1997.

Cette carte grossière contient une erreur importante sur le positionnement de l'usine Tiquimani qui devrait se trouver à l'amont de l'usine de Botijlaca. Elle présente tout de même l'intérêt de bien montrer l'organisation de la vallée.

2 Contexte et objectifs

2.1 Objectifs de l'étude

Nous souhaitons dans le cadre de ce travail, effectuer un bilan des processus hydrologiques et hydrauliques existants dans la vallée, comprendre la hiérarchisation des écoulements en visualisant l'ensemble des sous bassins versants, schématiser les différents flux hydrologiques, ainsi que les éléments de stockage que contient le système et y intégrer la dizaine d'usines hydroélectriques installées dans la vallée, qui modifient son fonctionnement naturel.

Nous utiliserons ensuite cette représentation pour modéliser, au pas de temps journalier, et à l'aide du langage de programmation Vensim®, les processus hydrologiques et hydrauliques qui s'y déroulent.

Nous obtiendrons, ainsi, un outil dynamique de simulation qui intègre la gestion de la production électrique, et qui fournira des ordres de grandeur pour les coefficients introduits dans le modèle. Il permettra de fixer des bases quantitatives et méthodologiques pour les travaux ultérieurs dans la vallée.

Ce travail constitue une approche préliminaire à l'établissement d'un modèle de production de bassins versants d'altitude, qui sera réalisé ultérieurement dans le cadre d'une thèse. Le but de ce modèle sera de pouvoir différencier les écoulements d'origine pluvio-nivale, des écoulements d'origine glaciaire, afin de mieux comprendre l'impact hydrologique des variations climatiques de grande ampleur sur les ressources en eau potentielles que représentent les glaciers tropicaux des Andes.

2.2 Présentation générale de la zone d'étude

2.2.1 Situation géographique

La vallée de la rivière Zongo (16° latitude Sud; 68° longitude Ouest) se situe dans la zone centrale de la Cordillère Royale (versant oriental de la chaîne andine bolivienne), à 20 km au nord de La Paz, capitale de la Bolivie,

Elle fait partie de l'ensemble des vallées fortement pentues qui relie "l'Altiplano", plateau sédimentaire d'altitude moyenne 4000 m, situé sur le versant occidental de la chaîne, aux "Yungas", zones tropicales du versant oriental, chaudes, humides et fortement boisées.

C'est un bassin versant d'une surface approximative de 400 km², orienté du sud-ouest vers le nord-ouest, contenant des sommets proches des 6000 m surplombant le bassin à l'ouest et au sud, et au sein duquel coule le Rio Zongo. Cette rivière, qui prend sa source au pied des glaciers, dévale la vallée principale vers le nord-est, et reçoit l'apport de rivières secondaires, (les Rios Liviñosa, Taypi Khuchu, Coscapa,...), qui donnent leur nom aux vallées dans lesquelles ils coulent et qui sont eux aussi d'origine glaciaire.

2.2.2 Situation géologique

La majeure partie de la vallée est constituée de roches métamorphiques de l'ordovicien, limitées, au Nord par des orthogranites hercyniens recoupés par des intrusions granodioritiques triasiques, et au Sud, par les formations "Cangalli" (sédiments fluvio-morainiques). (Curinier 1995)

Ce sont, d'une façon générale, des roches massives pouvant présenter une altération de surface importante mais généralement de faible épaisseur. Elles ne semblent pas présenter une fracturation qui permette l'infiltration profonde de l'eau, vers des nappes souterraines. Néanmoins, il semble que la frange d'altération de ces roches, les cônes d'éboulis fluvio-glaciaires que l'on rencontre au pied des versants, qui peuvent faire plus de 500 m de haut, et le fond plat et parfois marécageux des vallées, sont le siège d'écoulements qui peuvent être très importants et influencer énormément le fonctionnement hydrologique du système.

Nous considérerons donc, qu'il n'y a pas de pertes hors du bassin versant par infiltration profonde et que toute l'eau de pluie tombant sur le bassin se retrouve dans le Rio Zongo.

Cette supposition est renforcée par l'aspect morphologique des vallées glaciaires contenues dans ce bassin, étroites et escarpées, où le drainage semble bien organisé.

2.2.3 Situation climatique

Le climat est déterminé par l'alternance annuelle de la zone de convergence intertropicale (ITCZ), zone d'ascension constante de masses d'air humide poussées par les alizés, localisée là où les radiations solaires sont les plus intenses. Ses oscillations, décrites sur la figure 4, sont à l'origine d'une saisonnalité pluviométrique très marquée dans la région andine, (Ribstein et al. 1995):

- L'hiver austral: mai - septembre , la ITCZ se trouve au Nord de l'Equateur, le climat est contrôlé par les anticyclones du Sud : c'est la saison sèche et froide, au cours de laquelle il peut tout de même y avoir des précipitations ponctuelles importantes.
- L'été austral: novembre - mars , la ITCZ s'est déplacée vers sa position la plus méridionale et provoque l'arrivée de masses d'air chargées d'humidité en provenance de l'océan Atlantique et de l'Amazonie, qui, poussées par les alizés de Nord-est, remontent la plaine amazonienne, sont bloquées par les reliefs de la cordillère andine et donnent des précipitations importantes sur les versants orientaux. C'est la saison chaude et humide.

2.2.4 Situation hydrologique

Le Rio Zongo est un affluent du Rio Coroico, qui lui-même rejoint le Rio Beni, puis le Rio Madeira, l'un des principaux tributaires du fleuve Amazone. En saison sèche, ces eaux sont quasi exclusivement d'origine glaciaire. En effet, des glaciers tropicaux de taille moyenne (Huayna Potosi, Charquini, Condoriri, Kallhuani), dominent les sommets du bassin versant et alimentent les cours d'eau par la fonte des glaces. Ceci lui permet de maintenir un débit non négligeable même au cours de la saison sèche.

La saison des pluies, coïncide avec la saison chaude. Ses caractéristiques climatiques, (énergie radiative importante, températures élevées, albédo faible), font que cette période est aussi celle où l'ablation des glaciers est la plus intense. Les mois d'octobre à novembre, précédant les précipitations et ceux de mars-avril qui suivent la période humide, sont les mois de plus forte ablation. Ceci s'explique par la faible nébulosité, qui, alliée aux caractéristiques climatiques précédemment citées, permettent une ablation maximale des surfaces glaciaires.

De ce fait, le Rio Zongo peut atteindre des débits élevés, au cours de la saison des pluies, grâce au cumul des apports glaciaires et de l'importante pluviométrie de la saison.

La saison sèche et froide qui dure de mai à septembre, correspond à une période où les apports glaciaires sont les plus faibles de l'année (B. Francou, P. Ribstein 1995). En effet, les températures sont basses sur le glacier et le rayonnement est moins fort, par conséquent l'ablation diminue.

L'ensemble de ces facteurs provoquent une saisonnalité des écoulements, fortement influencée par les glaciers, visible sur la figure 5, qui diffère de celle habituellement imposée par les précipitations.

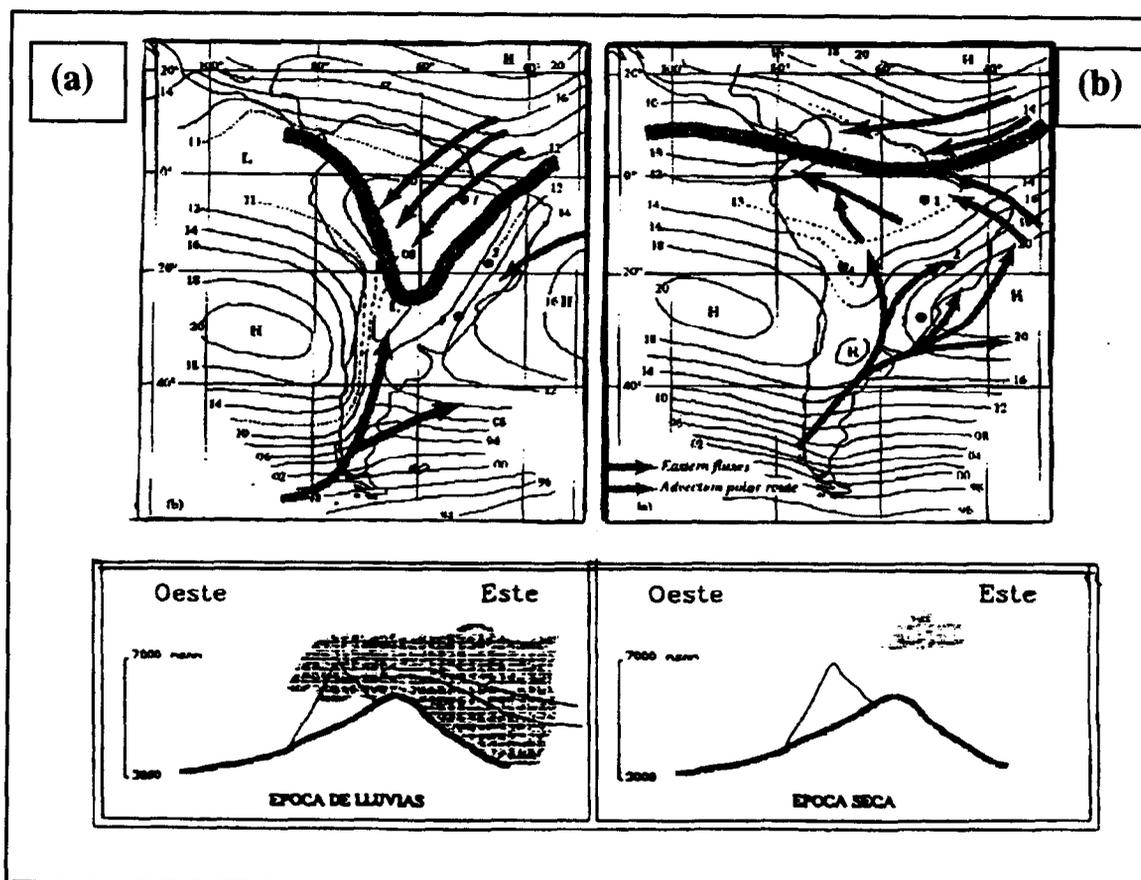


Figure 4: Variation de la position de l'ITCZ, pour les trois mois d'été (a), décembre, janvier, février et pour les trois mois d'hiver (b), juin, juillet, août. (Martin et al.1995, dans Macarez 1997 et Kaser 1995, extrait de Tamayo 1996)

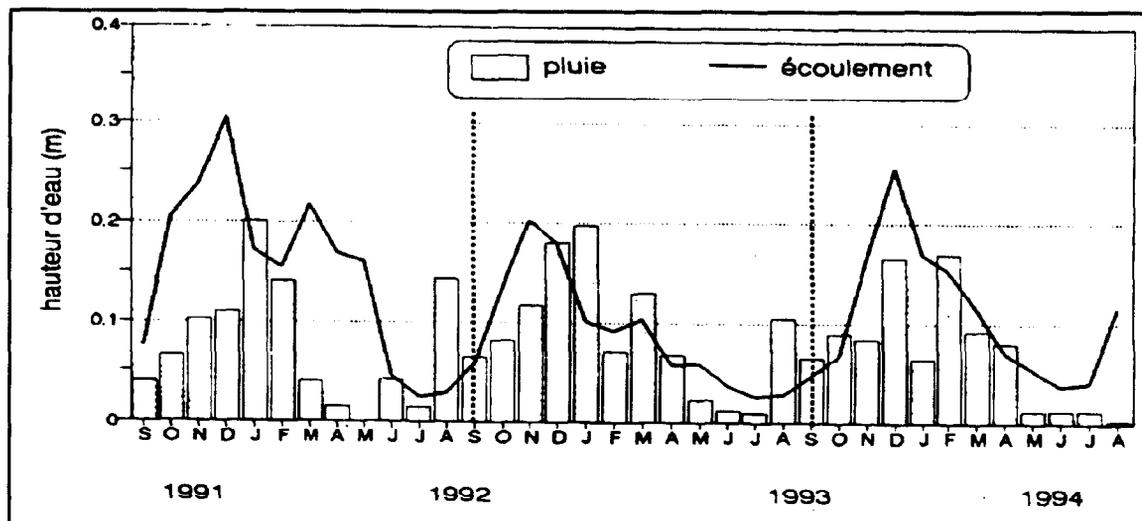


Figure 5: Précipitations mensuelles et écoulements sur le glacier Zongo pendant 36 mois (Francou, Ribstein 1995).

Ce saisonnalité présente une grande variabilité interannuelle, qui peut être accentuée par les phénomènes ENSO (El Niño Southern Oscillation). En effet, celui-ci provoque, lorsqu'il est en phase El Niño, un réchauffement important de la côte Ouest de l'Amérique du Sud. (Macarez 1997, Tamayo 1996). Lors de ces événements, des bilans de masse négatifs au niveau des glaciers (Francou, Ribstein 1995), ainsi qu'une augmentation des températures, couplée à des déficits pluviométriques importants, ont été observés au sommet de la vallée du Zongo. (Ribstein et al. 1995).

Néanmoins, il convient d'être prudent, et de ne pas généraliser les observations climatiques réalisées sur les sommets, à toute la vallée, car, notamment en terme de pluviométrie (Macarez 1997), l'influence d'un événement El Niño semble disparaître lorsque l'on perd de l'altitude.

La modélisation des écoulements dans la vallée permettra de préciser l'influence de ce phénomène sur le comportement des glaciers.

Le régime pluviométrique de la vallée est lié, d'une part, à la position du front de convergence intertropical, et d'autre part, à l'altitude. En effet, l'ensemble des données recueillies aux pluviomètres des différentes usines de production d'électricité, repartis le long de la vallée, permettent de mettre en évidence l'existence d'une saisonnalité importante des précipitations couplées à un gradient, fonction de l'altitude.

On peut le visualiser sur la figure 6, sachant que les stations sont classées par altitude décroissante ("Plataforma" la plus haute, et "Cahua" la plus basse):

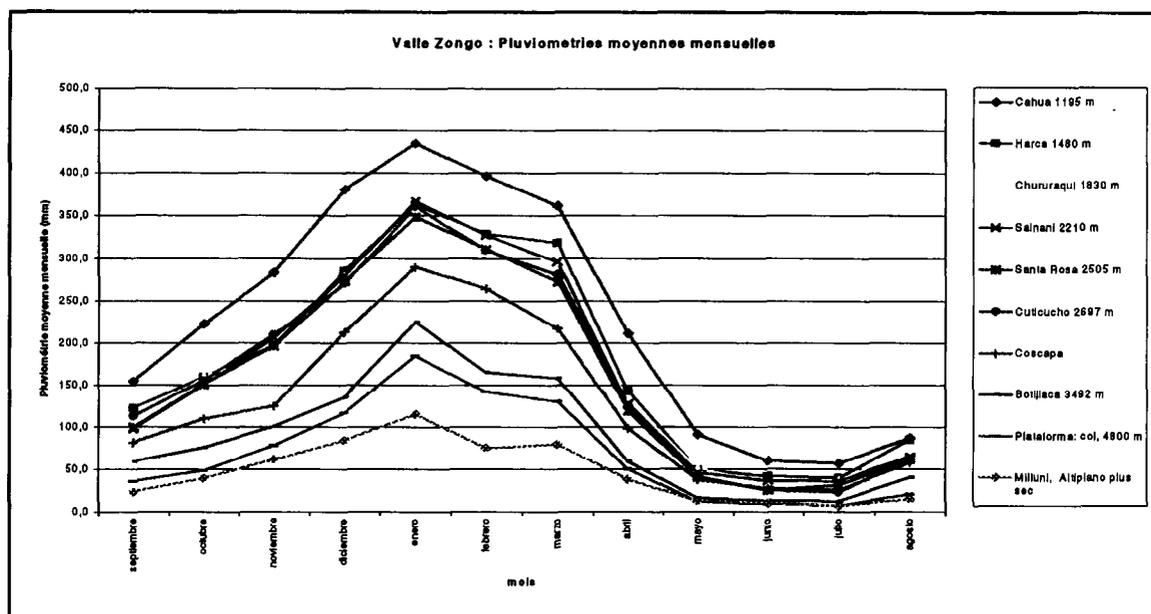


Figure 6: Pluviométries moyennes mensuelles dans la vallée du Zongo, mise en évidence de l'existence d'un gradient des précipitations en fonction de l'altitude. (B. Pouyaud 1998)

Des pluviomètres totalisateurs, installés conjointement par la Cobee (Compagnie Bolivienne d'Energie Electrique, propriétaire de la vallée et des usines) et l'Orstom en 1997, en d'autres points du bassin versant, et notamment dans des vallées n'ayant pas la même orientation que celle du Zongo, fournissent des valeurs mensuelles depuis octobre 1997. Nous pouvons voir les données obtenues à l'annexe A.

Les résultats provisoires que l'on peut en tirer sont peu significatifs, puisqu'il semblerait qu'un certain nombre d'appareils ont fait l'objet de dégradations (remplis de pierres ou partiellement vidés). Néanmoins, si on observe la pluviométrie dans les vallées latérales d'orientation différente de celle de la vallée principale, telles la vallée des rivières Liviñosa et Taypi Khuchu, (figure 7 et 8), ou celle de Coscapa (figure 9 et 10), on voit que la notion de gradient est présente mais que l'orientation de la vallée semble introduire un degré de variabilité supplémentaire.

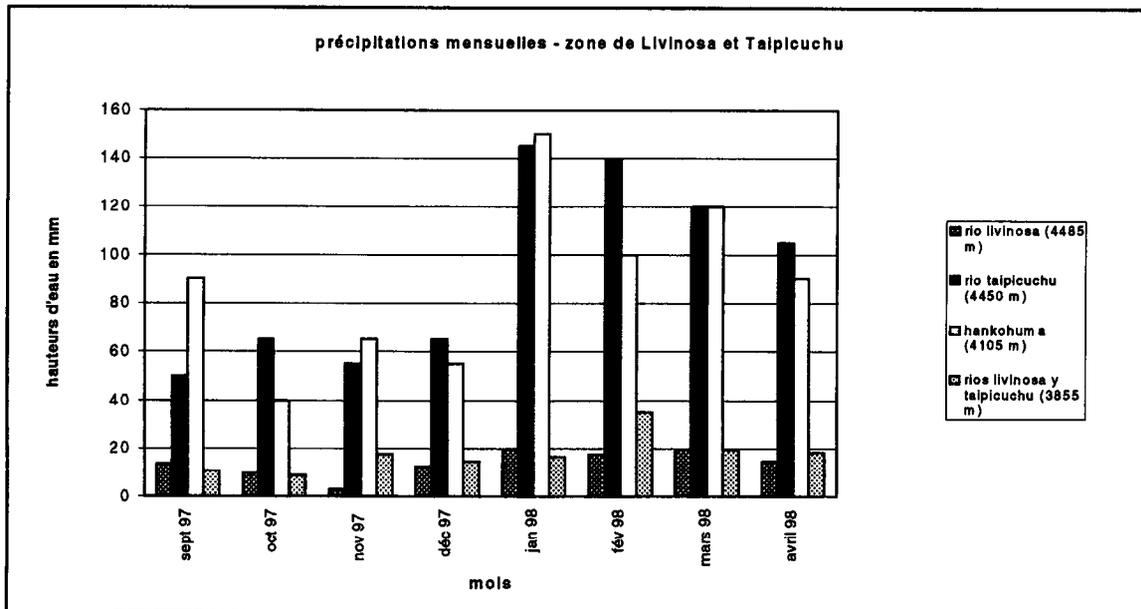


Figure 7: Hauteurs d'eau mensuelles relevées sur les pluviomètres totalisateurs dans les vallées de Liviñosa et Taypi Khuchu (mm).

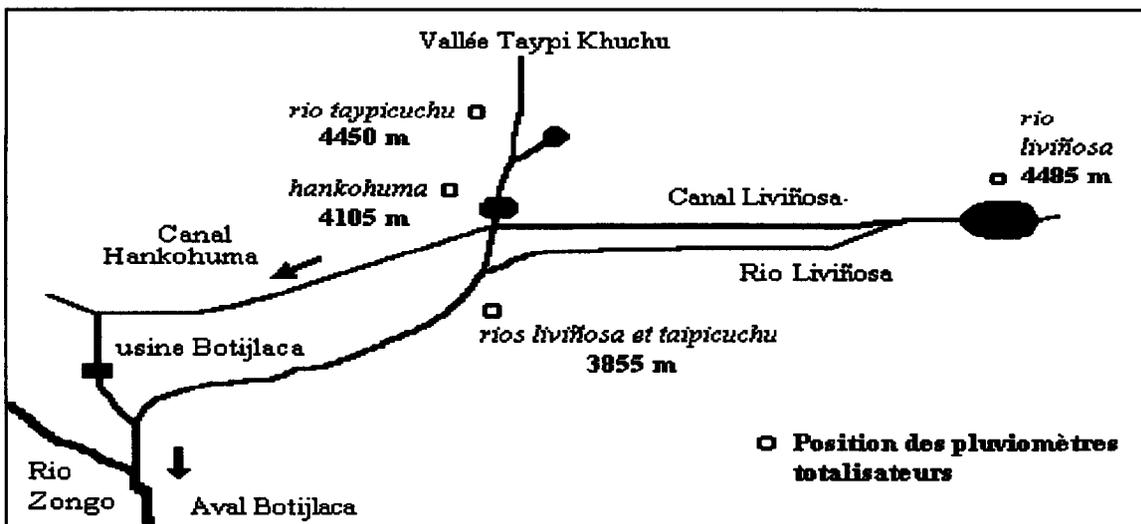


Figure 8: Localisation schématique des 4 pluviomètres des vallées de Taypi Khuchu et Liviñosa

On observe cet effet sur la figure 7, où les vallées de Taypi Khuchu et de Liviñosa, qui ont des orientations différentes, ne présentent pas, à altitudes égales, le même régime pluviométrique. Pourtant, lorsque l'on observe la série de mesures obtenues dans la vallée de Coscapa, reportées sur la figure 9, l'existence du gradient altimétrique semble mieux se vérifier.

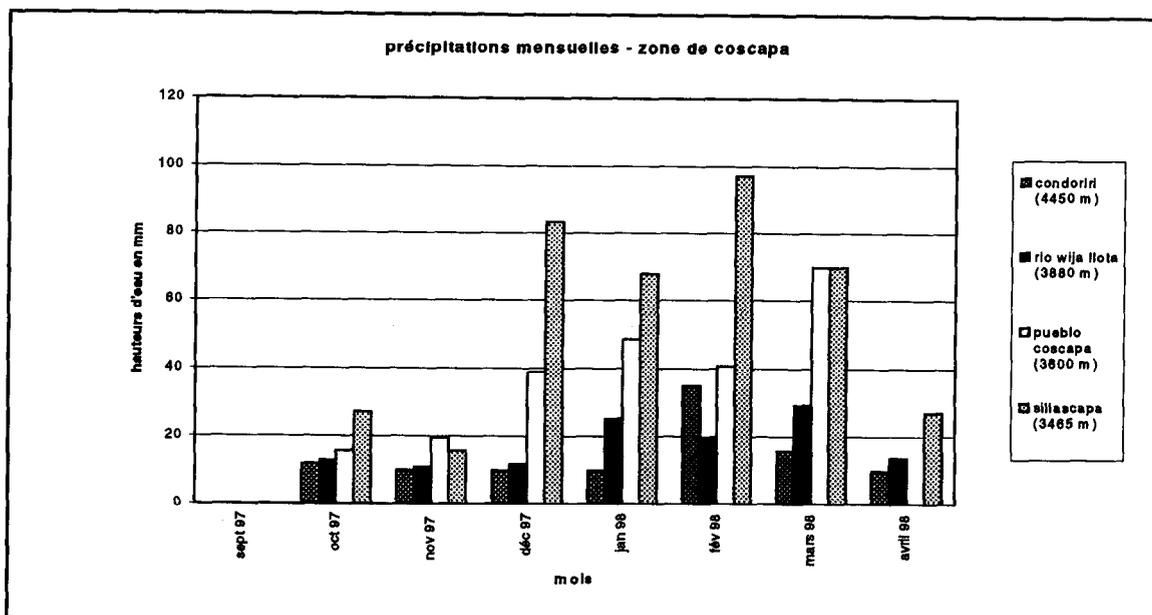


Figure 9: Hauteurs d'eau mensuelles relevées sur les pluviomètres totalisateurs dans la vallée de Coscapa (mm).

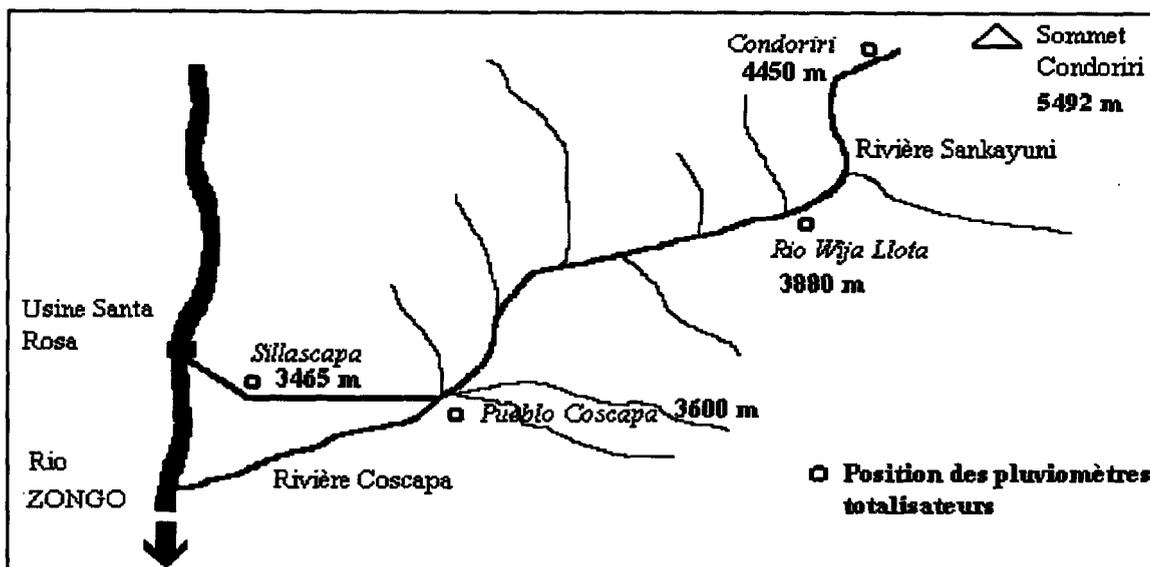


Figure 10: Localisation schématique des 4 pluviomètres dans la vallée de Coscapa.

Ces résultats montrent que l'orientation de la vallée, son exposition, son régime des vents, et peut-être d'autres facteurs ont une influence importante sur la pluviométrie.

On ne peut donc pas généraliser le gradient altimétrique des précipitations, mis en évidence dans la vallée centrale du Zongo, à tout le bassin.

Néanmoins, nous utiliserons provisoirement et faute d'information suffisamment complète, le gradient altimétrique pour le calcul des précipitations sur l'ensemble de la vallée. Ultérieurement, nous étudierons l'influence de l'orientation des vallées sur leur régime pluviométrique.

2.3 Présentation du système hydroélectrique

La morphologie de la vallée (3550 m de dénivelé sur une distance de 40 km seulement, soit une pente moyenne proche des 10%), a permis l'installation d'un système de production d'électricité qui exploite des eaux drainées sur une surface d'environ 400 km², et qui alimente une grande partie de la ville de La Paz dont la population dépasse le million d'habitants.

Ce système, géré par la Cobee, se présente sous la forme d'un ensemble de 9 centrales hydroélectriques, installées en cascade, avec une capacité totale de 123.3 MW, qui a été récemment augmentée à 146.6 MW, grâce à des travaux d'agrandissement effectués sur certaines usines (Zongo, Botijlaca, Cuticucho et Santa Rosa I).

Ces agrandissements, visant à augmenter la production en saison des pluies, sont poursuivis actuellement, notamment à travers la construction d'une nouvelle usine en fin de cascade, Huaji, à la suite de Harca, qui portera la capacité totale à 174.6 MW.

Les caractéristiques globales de ces usines sont exposées dans le tableau 1.

Usine	Altitude	Capacité installé (MW)		Capacité actualisée (Mw)		Hauteur de chute
		Nominale	Cumulée	Nominale	Cumulée	
Zongo	4264 m	4.4	4,4	10.0	10.0	378 m
Tiquimani	3889 m	9.6	14	9.6	19,6	560 m
Botijlaca	3492 m	3.5	17,5	6.6	26,2	382 m
Cuticucho	2697 m	8.4	25,9	20.0	46,2	668 m
Santa Rosa I	2505 m	3.2	29,1	6.2	52,4	185 m
Santa Rosa II	2505 m	6.8	35,9	6.8	59,2	835 m
Sainani	2210 m	10.4	46,3	10.4	69,9	291 m
Chururaqui	1830 m	24.0	70,3	24.0	93,6	375 m
Harca	1480 m	26.0	96,3	26.0	119,6	345 m
Cahua	1195 m	27.0	123,3	27.0	146,6	285 m
Huaji	En	Construc tion		28.0	174,6	En construction

Tableau 1: Tableau des caractéristiques des différentes usines du système, tiré du rapport de Reinhardt 1997.

La structure de ce système est insérée en annexe B.

Le captage et le stockage de l'eau pour la production, se fait grâce à des prises d'eau sur les rivières et sur des retenues artificielles ou naturelles, à partir desquelles l'eau est amenée vers des chambres de charge ("*forebays*"), servant à approvisionner les conduites forcées des usines. La hauteur de chute varie entre 185 m et 835 m, et fait fonctionner les turbines des usines qui produisent l'électricité.

Le manque d'eau durant la saison sèche pose des problèmes de production, exacerbés par la hausse de la demande électrique due à l'arrivée de l'hiver, qui obligent la Cobee à gérer au mieux la ressource stockée dans les retenues, ainsi que les apports glaciaires.

La stratégie de gestion de l'eau passe essentiellement par l'utilisation d'une dizaine de retenues de volumes supérieurs à 200 000 m³ situées dans la partie haute du système, qui permettent, d'une part, de récupérer les eaux de ruissellement et de fonte des glaces, et d'autre part, de contrôler les écoulements dans les canaux allant vers les chambres de charge. Le principe général de gestion annuelle consiste à remplir les retenues durant la saison des pluies (novembre à mars) et d'utiliser la ressource stockée, en combinant avec les apports glaciaires journaliers, pendant toute la durée de la saison sèche (mai à septembre) pour compenser le déficit en eau.

2.4 Eléments du système et données disponibles

2.4.1 Hypothèses de travail et récapitulatif des données

Notre but est de connaître, en fonction:

- du volume d'eau disponible dans les retenues,
- du débit turbiné par les usines,
- des données climatiques du jour,

le volume d'eau dont on peut disposer au niveau des différentes retenues, le lendemain.

Cette donnée est importante pour la gestion de la ressource, car la Cobee utilise la capacité de stockage des retenues pour maintenir une production relativement constante tout au long de la saison sèche, déficitaire en eau.

La modélisation aura le double intérêt de proposer, d'une part, une optimisation de la gestion de l'eau dans la vallée visant à améliorer la production d'électricité, par exemple en quantifiant les pertes par débordement, et d'autre part, de proposer un ordre de grandeur pour la production d'écoulement sur les versants.

Nous allons présenter les données disponibles et les conditions sous lesquelles nous les manipulons.

2.4.1.1 Choix du pas de temps de travail

La plupart des données dont nous disposons ont été obtenues grâce à des mesures journalières. C'est le cas de la pluviométrie et du niveau de la plupart des retenues, mesuré au mieux, 2 fois par jour.

On dispose du débit instantané dans les canaux, qui acheminent l'eau vers la retenue Zongo: Tubo, Alpaca, et Prado. Aucune mesure n'est faite pour le reste des canaux de la vallée.

Il serait intéressant, en termes de gestion de l'eau, de travailler au pas de temps horaire. Malheureusement, les données manquent et des approximations grossières seraient nécessaires pour obtenir des valeurs horaires, qui n'auraient aucun sens hydrologique. Ce serait le cas pour la pluviométrie qui serait constante sur toute la journée, ou bien pour l'évapotranspiration potentielle horaire, que l'on calculerait à partir d'une valeur moyenne mensuelle!

D'autre part, les temps de transfert au sein de la vallée sont tels, que si on lâche un volume d'eau au point le plus haut du système avant 8h du matin, celui-ci passera au niveau de l'usine la plus basse, Cahua, avant 8 heures du soir. Ainsi, la Cobee, en période d'étiage, ouvre les vannes des retenues le matin, de façon à ce que l'eau arrive aux usines les plus puissantes, situées en fond de vallée, vers 18h le soir, heure à laquelle la demande en électricité atteint ses valeurs maximales.

Par conséquent, les opérations de la Cobee imposent une dynamique hydraulique journalière à la vallée.

Pour toutes ces raisons, nous avons décidé de travailler au pas de temps journalier. L'approche simplifiée des processus hydrologiques qui sera réalisée au cours de ce travail, permettra peut-être ultérieurement, d'opter pour un pas de temps mieux adapté à l'étude de la dynamique hydrologique de la vallée.

2.4.1.2 Les données disponibles

Les données nécessaires à la réalisation de ce travail ont été, pour partie, extraites du rapport d'Igor Reinhardt (1997), contenant un grand nombre d'informations sur la période sèche, sur les rapports de Macarez (1998) et Berthier (1998), et pour le reste, acquises lors d'une campagne de terrain de 2 mois, sur le site bolivien.

D'une façon générale, notre étude porte sur la période du 1/1/97 au 31/4/98, et l'ensemble des valeurs recueillies concernent:

- les précipitations journalières le long du Zongo (stations de mesure des usines)
- les précipitations mensuelles (pluvio totalisateurs, fonctionnels depuis octobre 97)
- les débits instantanés et journaliers sur les canaux Tubo, Alpaca, Prado, situés en tête du système et qui acheminent l'eau de fonte des principaux glaciers vers la retenue principale de la vallée, la retenue Zongo.
- les niveaux journaliers des retenues Zongo, Mamankota, Guaraguarani, Hatilata, Taipicota, Viscachani Alto y Bajo, Patacota, Hankohuma, Liviñosa et Sankayuni. Certaines retenues seront négligées, du fait de leur dimension réduite.
- les niveaux horaires des retenues intermédiaires Botijlaca et Cuticucho, que nous ne pourrions intégrer dans la modélisation au pas de temps journalier, mais qui jouent un rôle fondamental sur lequel il faudra se pencher au pas de temps horaire.
- les valeurs moyennes d'évapotranspiration potentielle mensuelle mesurées à la station de La Paz (Aéroport - 3700 m).
- les productions électriques horaires à toutes les usines
- les rendements et facteurs de production des usines, actualisés, qui permettront de calculer les débits turbinés (Reinhardt 1997)
- les rapports d'opérations dans la vallée du Zongo édités chaque mois, par les ingénieurs chargés de la production, pour la Cobee.
- les différents travaux de modélisation réalisés par la Cobee, sur lesquels nous nous appuyerons notamment pour ce qui concerne les temps de transfert de l'eau entre les différentes unités du système.

Nous disposons par ailleurs de données de débit instantanés sur le ruisseau Taypi Khuchu, en amont de la retenue Hankohuma, depuis janvier 1998, ainsi que de cartes et des photos aériennes du bassin versant, faites par l'Institut Géographique Militaire Bolivien, datant de 1983. Un modèle numérique de terrain, réalisé par Chevallier (1996), à partir de la carte topographique au 1/50 000, avec une maille élémentaire de 100m, est aussi disponible.

Enfin, nous disposons d'un schéma de la hiérarchisation hydraulique de l'ensemble du système, (Pouyaud 1997), que nous avons placé en annexe C et qui, couplé à la représentation du système de production électrique de la Cobec, servira de base à l'organisation de notre modèle.

2.4.1.3 Le problème des heures de lecture

La plupart des données dont nous disposons concernant les retenues, sont recueillies par les techniciens de la Cobee, qui font généralement une mesure par jour, sauf pour la retenue Zongo, où 2 mesures sont réalisées, matin et soir, car il y a du personnel sur place pour mener à bien les opérations sur la retenue. Pour l'ensemble des autres retenues les mesures sont faites en période sèche, lorsque des manœuvres d'ouverture et fermeture des vannes sont nécessaires, ce qui peut être le cas deux fois par jour, (Liviñosa , Hankohuma, Sankayuni, Viscachani Bajo) ou bien tous les 2 à 7 jours. (Reinhardt 1997).

Ces mesures sont souvent décalées les unes par rapport aux autres. Le pas de temps de travail choisi, ne peut que minimiser l'erreur introduite par ce décalage, en prenant pour la retenue Zongo, la lecture du matin. En effet, elle marque le début du lâcher des eaux de la retenue, et, d'après la gestion journalière théorique, tout le système doit être synchronisé avec cette opération.

Pour les retenues sur lesquelles sont faites deux mesures par jour et qui peuvent contenir des erreurs vu leur difficulté d'accès, on choisira préférentiellement la série de données de meilleure qualité, comme par exemple, la série du soir dans le cas de Liviñosa qui est nettement plus complète que celle du matin.

Enfin, pour celles qui ne possèdent qu'une série de mesures par jour, nous nous contenterons des lectures disponibles.

Au niveau des usines, par contre, nous disposons de données horaires, ce qui nous laisse toute latitude pour décider sur quelle base horaire, nous voulons calculer nos débits turbinés journaliers. Pour réduire d'avantage l'erreur introduite dans les calculs par le décalage des heures de lecture sur les retenues, nous avons décidé de calculer les débits turbinés journaliers aux usines, de la manière suivante:

Nous partons du principe que l'eau de la retenue Zongo est lâchée dans le système à 8h du matin, puis, en prenant en compte le temps de transfert, par le réseau naturel, entre la retenue et chaque usine reportés dans le tableau 2, nous calculons l'heure d'arrivée de cette eau à chaque usine.

Ces temps de transfert sont bien connus, par expérience, du personnel de la Cobee.

Nous calculons alors le débit turbiné journalier pour chaque usine, en se basant sur la totalité de l'électricité produite pendant les 24 heures précédant l'heure d'arrivée à l'usine, de l'eau de la retenue Zongo.

Temps de transfert <u>approximatif</u> de l'eau, entre la retenue Zongo et:	Tiquimani	Botijlaca	Cuticucho	Santa Rosa	Sainani
	3h	3h	5h	7h	8h

Tableau 2: Temps de transfert de l'eau entre la retenue Zongo et les usines.

Le cas de Tiquimani est à part, puisqu'elle n'est pas alimentée par les eaux de la retenue Zongo, mais par celle des retenues Hatilata, Taipicota, Guaraguarani. Nous lui appliquons cependant la méthode de calcul décrite, pour connaître les volumes d'eau apportés par ce système au Dique Botijlaca, lors de l'arrivée de l'eau de la retenue Zongo.

2.4.2 Eléments du système et options de calcul

2.4.2.1 L'écoulement dans le bassin versant

2.4.2.1.1 *Écoulements non influencés par les aménagements*

▪ Le rôle de la morphologie des versants

La morphologie des versants du bassin, résultante de l'érosion fluvio-glaciaire, présente, en altitude, des vallées glaciaires à fond plat et parfois marécageux, relativement étroites et escarpées, qui deviennent plus étroites à mesure que l'on perd de l'altitude. Sur la partie haute du bassin, la plupart des versants sont formés d'importants cônes de matériaux d'érosion fluvio-glaciaire, de granulométrie hétérogène. Il n'est pas rare de trouver au pied de ceux-ci, des petites sources. Dans la vallée de Taypi Khuchu située au dessus de Botijlaca, par exemple, on peut observer de grands cônes d'éboulis fluvio-glaciaires, qui descendent sur 200-500 m ou plus, au pied desquels on trouve des sources ayant un débit de plusieurs litres par seconde (mesure grossière : 10 l/s). Nous pouvons le voir sur la figure 11. Il est très probable que l'eau de ruissellement s'infiltré dans ces formations, puisque on a pu constater que de petites cascades y disparaissaient. Ces formations constituent donc certainement des réservoirs de faible dimension, mais qui ralentissent considérablement les transferts.

Dans la partie basse du bassin versant, la présence d'une végétation tropicale abondante sur des sols organiques importants, sont favorables à l'infiltration de l'eau.

▪ Le rôle de la végétation

La végétation varie aussi avec l'altitude. On peut de façon grossière délimiter trois étages de végétation différente sur l'ensemble du bassin, de façon à la prendre en compte dans le calage de la production des versants:

- au dessus de 3500 m, on trouve des pâturages d'altitude et des surfaces de roche nue;
- entre 2000 et 3500 m, apparaît une végétation arborée tropicale éparse;
- au dessous de 2000 m, celle ci fait place à la forêt tropicale dense.

Ces différents étages n'auront pas le même comportement, en terme d'écoulement, lors d'un événement pluvieux.

▪ Les précipitations nivales

Les précipitations sur la partie haute de la vallée peuvent avoir lieu sous forme de pluie ou de neige. On considère que la limite pluie-neige se situe dans l'intervalle entre 4200 m et 4800m. Le comportement de la neige en terme d'écoulement diffère de celui de la pluie. Une partie est reprise par sublimation, le reste peut-être stocké sous forme solide pendant quelque temps, ou bien ruisseler relativement instantanément. Ceci rend la compréhension des écoulements nivaux très complexe. Nous ne ferons pas la distinction entre les deux types de précipitation.

▪ Conclusions sur les écoulements

Les mécanismes d'écoulement des versants sont complexes. Dans la partie haute de la vallée, les franges d'altération recouvrant la roche massive, ainsi que les formations coniques d'éboulis fluvio-glaciaires, induisent des écoulements hypodermiques.

Néanmoins, ils permettent le stockage rapide de l'eau, ce qui peut provoquer un ruissellement relativement important, lors d'un événement pluvieux intense.

Plus bas, il est probable que les fonds de vallée contiennent des petites nappes, qui vont intervenir dans l'alimentation des ruisseaux et rivières. Le type de végétation aura aussi une influence sur le ruissellement.

Dans le cadre de ce travail, le volume écoulé sera approché à l'aide d'un coefficient de ruissellement et un facteur de débit de base, que l'on calera en tenant compte des observations développées plus haut. Une étude plus approfondie sera menée ultérieurement, sur l'influence des cônes d'éboulis et l'intensité des précipitations, afin de proposer un modèle d'écoulement des versants d'altitude.

2.4.2.1.2 *Écoulements influencés par les aménagements*

▪ Les canaux.

- *Description et hypothèses de travail*

De façon générale, les débits dans les différents canaux, ne sont pas connus, exception faite de trois d'entre eux (Tubo vertedero, Prado, Alpaca) se trouvant en tête du système, qui récupèrent l'eau de fonte des glaciers pour les amener à la retenue Zongo, et qui sont équipés de limnigraphes enregistreurs CHLOE. (Rigaudière 1995)

Pour ceux-ci, nous disposons de valeurs journalières, récemment corrigées par Etienne Berthier, dans le cadre d'un stage réalisé en Bolivie, (Berthier 1998).

Ces canaux, construits à flanc de versant, transportent l'eau depuis les retenues ou les prises d'eau sur les rivières, jusqu'aux conduites forcées. La position de certains canaux par rapport à la pente du versant, les rend susceptibles de capter les eaux qui ruissellent. Néanmoins, au cours de leur trajet, ces canaux peuvent être aériens ou souterrains, ce qui rend difficile l'évaluation de la proportion d'eau qu'ils peuvent récupérer.

De façon générale, le bord des canaux est presque toujours surélevé par rapport au sol. De ce fait, si l'on considère que les écoulements sont hypodermiques, nous pouvons admettre que les canaux ne font qu'acheminer l'eau captée au niveau des prises, sans récupérer en cours de route l'eau de ruissellement des versants sur le flanc desquels ils ont été construits.

On considérera donc dans la suite que les canaux ne captent pas les eaux de ruissellement sur les versants où ils se trouvent. Le captage des petits ruisseaux par les prises d'eau en tête des canaux est un cas différent, car l'eau se trouve déjà dans le réseau hydrographique.

Nous n'avons pas de données sur les débordements des canaux au niveau des prises d'eau.

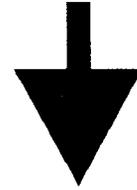
Nous espérons pouvoir obtenir un ordre de grandeur à l'aide du modèle.

Un autre problème lié à la présence de canaux, est celui des débordements qui peuvent subvenir à cause d'une fragilité de l'ouvrage ou d'un mauvais dimensionnement.

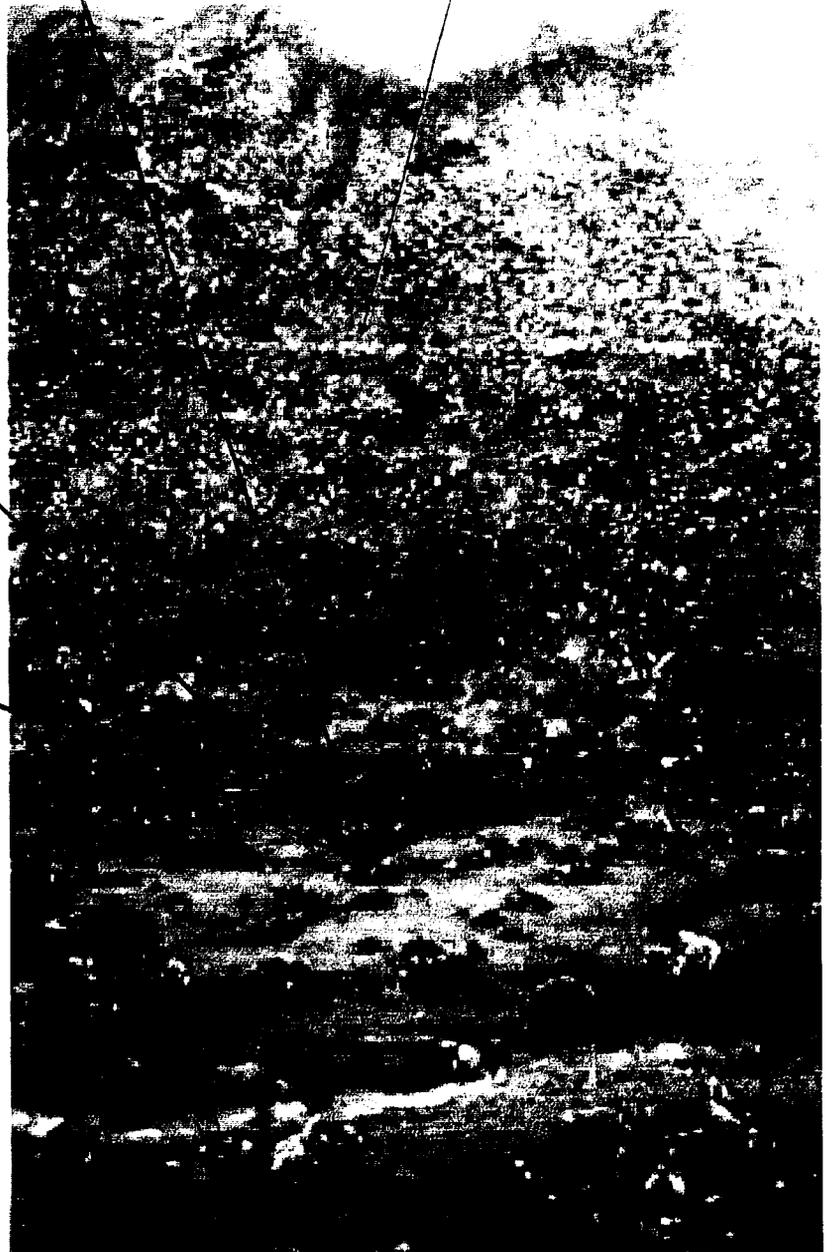
Les visites sur le terrain et des entretiens avec les responsables de la Cobee, montrent que ce sont des incidents ponctuels. De plus, des sacs de sable se trouvent répartis le long des canaux pour intervenir au plus vite sur les lieux d'éventuels dommages, et des travaux sont entrepris pour rehausser les canaux lorsque c'est nécessaire (Canal Alpaca en 1997). On peut donc considérer qu'il n'y a pas de débordement prolongé au niveau des canaux, sans intervention rapide de la Cobee. Nous ne les prendront pas en compte dans la modélisation.



Cône d'éboulis dont la base repose sur le fond plat de la vallée.



Canal Hankohuma



Source au pied du cône d'éboulis
Débit estimé: 10 l/s



Rio Taypi Khuchu



Figure 11: Source de pied de versant localisée à la base d'un cône d'éboulis et qui alimente le rio Taypi Khuchu. Entrée de la vallée de Taypi Khuchu.

2.4.2.2 Les usines hydroélectriques et les débits turbinés

2.4.2.2.1 Méthode de calcul des débits turbinés

Le calcul des débits turbinés est fait, pour chaque usine, à partir de la production d'électricité journalière. Celle-ci est calculée sur 24 heures, en fonction de l'heure d'arrivée à l'usine des flux d'eau provenant de la retenue Zongo (Cf. 2.4.1.3.). Ainsi, pour l'usine Zongo, la production sera calculée pour 8h, à Tiquimani et Botijlaca pour 11h, car elles sont très proches l'une de l'autre et le temps de transfert entre la retenue Zongo et Botijlaca est d'environ trois heures, (voir tableau 2), à Cuticucho pour 13 h, à Santa Rosa pour 15 h et enfin à Sainani pour 16h.

La Cobee a mis à notre disposition des fichiers contenant les relevés des puissances horaires en Mw, pour toutes les usines. Nous utiliserons ces informations pour calculer la production journalière, en Mwh. Ce calcul sera fait comme suit:

$$\text{Production journalière (Mwh)} = \frac{\sum_{24h} (\text{puissance horaire} * 3600)}{3600}$$

Puis on obtient les volumes turbinés journaliers en utilisant le Facteur d'usine, calculé en fonction du rendement de l'usine et de la hauteur de chute:

$$\text{Facteur d'usine (Mwh/m3)} = \text{rendement} * g * \text{hauteur de chute} / (3600 * 1000)$$

avec $g = 9.81 \text{ m}^2/\text{s}$ et le facteur 1000 utilisé pour la transformation en Mwh/m3.

Ces facteurs ont été déterminés pour chaque usine par la Cobee, en supposant le rendement d'une usine, constant au cours de la journée. Nous les avons reportés dans le tableau 3. Un calcul plus précis peut être effectué en prenant en compte l'influence de la variation de la puissance instantanée sur le rendement, (Reinhardt 1997), mais la correction apportée est négligeable au regard des erreurs introduites dans les calculs par les décalages des heures de lecture des retenues. Une telle précision ne sera donc pas appliquée au pas de temps journalier. Par contre elle sera incontournable au pas de temps horaire.

Facteurs	Zongo	Tiquimani	Botijlaca	Cuticucho	Santa Rosa 1	Santa Rosa 2	Sainani
d'usine Mwh/m3	0,72;0,77	1,02	0,76;0,78	1,33;1,37	0,36;0,38	1,63;1,70	0,57

Tableau 3: Facteurs d'usines avant et après les travaux d'agrandissement, (Intendance des opérations Cobee, 1998).

Les facteurs d'usine de 4 usines (Zongo, Botijlaca, Cuticucho, Santa Rosa 1 et 2) ont changé de valeur au cours de la période d'étude. Ceci est le fait des travaux d'agrandissements des usines visant à augmenter la capacité de production d'électricité de l'ensemble du système. Ces changements sont pris en compte dans les calculs des volumes turbinés.

Enfin, on obtient le volume turbiné comme suit

$$\text{Volume turbiné (m3/j)} = \frac{\text{Production journalière (Mwh)}}{\text{Facteur d'usine (Mwh/m3)}}$$

2.4.2.2.2 *Critère de calage*

Pour réaliser le calage de notre modèle, nous avons besoin de connaître le débit à l'exutoire du système. Celui-ci concerne l'ensemble du bassin versant situé à l'amont de l'usine Sainani. D'après l'expérience des gens de la Cobee, on peut considérer que en saison sèche, l'ensemble des débits de la rivière Zongo sont turbinés à Sainani (Reinhardt 1997), ce qui permet de les utiliser comme paramètres de calage sur la période mai - septembre.

2.4.2.2.3 *Suivi des opérations de production électrique*

Nous disposons de photocopies des rapports d'activités de la Cobee, qui nous permettent de vérifier si une anomalie du modèle, ne correspond pas tout simplement à une opération particulière réalisé par la Cobee, au sein du système de production. Exemple: Arrêt d'une turbine pour cause de maintenance, travaux sur des canaux, essai de nouvelles installations dégâts causés par une inondation ...etc.

2.4.2.3 Les retenues

La lecture des niveaux des retenues se fait une à deux fois par jour et parfois moins souvent en dehors des périodes d'opération des retenues. Nous comblerons donc les lacunes de données, en effectuant des approximations linéaires. La précision de la lecture est de l'ordre du millimètre. Celle-ci est suffisante en comparaison des volumes mis en jeu, mais aussi parce que les relations niveau-volume de toutes les retenues, ne sont pas toutes connues. Les seules que la Cobee a pu nous fournir sont celles de Hatilata, Taipicota, Guaraguarani, Sankayuni, reportées sur la figure 12, qui sont des retenues de grande taille. Il ne nous a pas été possible de connaître par quelle méthode celles ci ont été déterminées, donc nous pouvons difficilement quantifier l'erreur que nous introduisons en les utilisant.

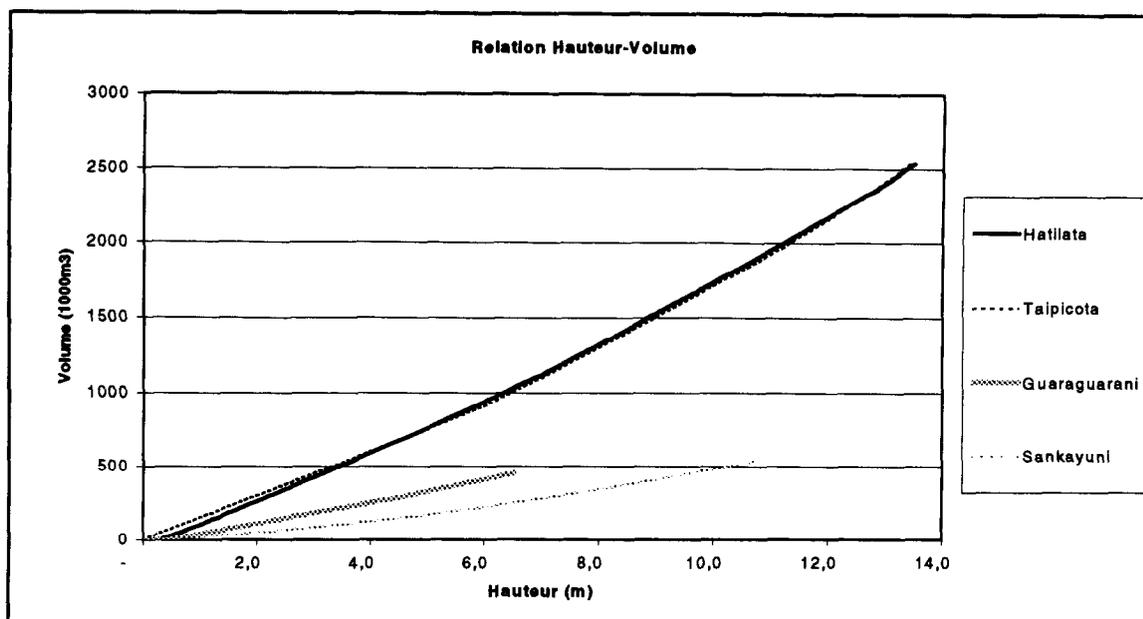


Figure 12: Relations niveau-volume pour Hatilata, Guaraguarani, Taipicota, Sankayuni.

Pour les retenues Zongo, Livinosa, et les deux Viscachani, la Cobee ne possédait pas de relation hauteur-volume. Nous avons donc utilisée la méthode mise au point par Igor Reinhardt dans son travail, qui assimile la forme des retenues à des calottes sphériques. (Reinhardt 1997)

Nous pouvons ainsi déterminer les relations manquantes pour ces quatre retenues, sur les figures 13 et 14.

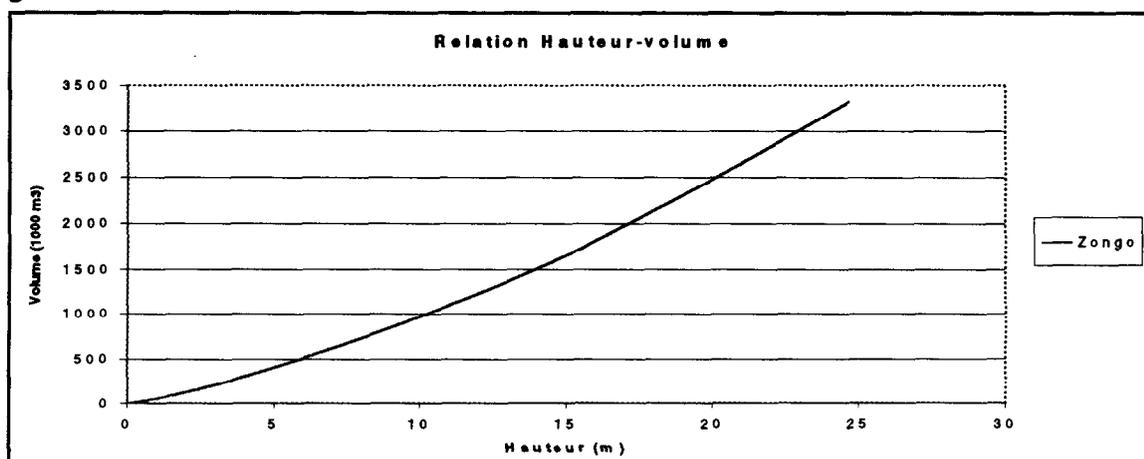


Figure 13: Relation niveau-volume pour la retenue Zongo

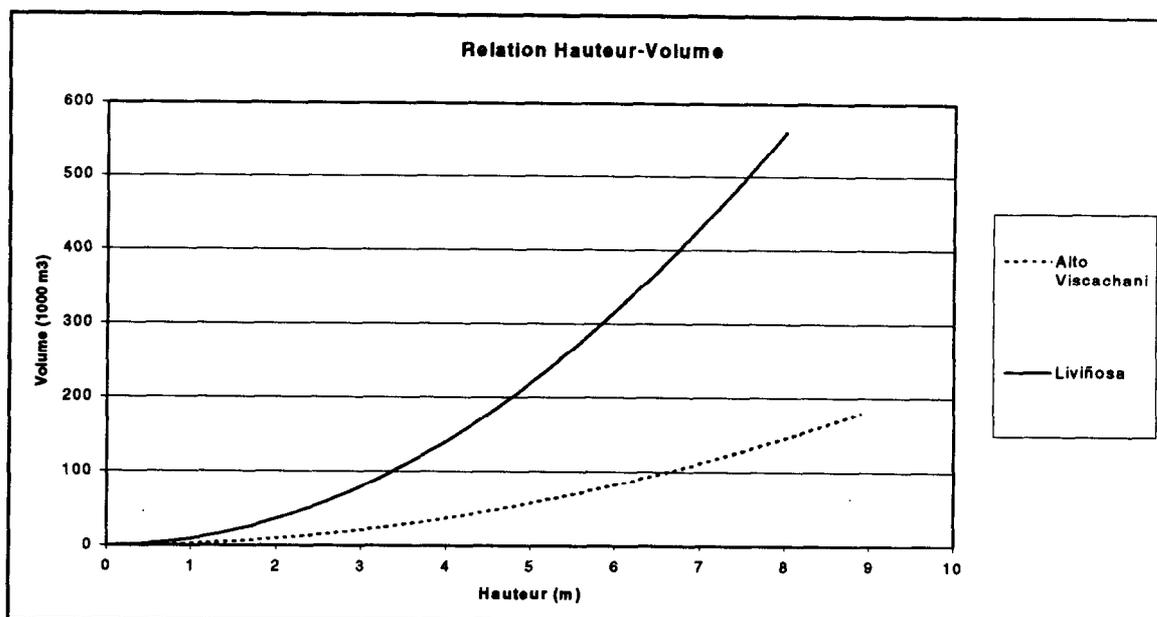


Figure 14 : Relations niveau-volume pour Alto Viscachani et Liviñosa

Nous disposons également des niveaux horaires aux Diques Botijlaca et Cuticucho qui sont des éléments essentiels de la gestion de l'eau. En effet on considère que la majeure partie de l'eau turbinée dans le système passe dans ces retenues, au cours de la journée. Ainsi on peut choisir de la stocker provisoirement, ou bien la laisser continuer son parcours en fonction des besoins de production.

Néanmoins, l'ensemble de ces manœuvres de stockage et déstockage, se réalisent durant la journée car ce sont des retenues de très petite taille: 16800 et 9400 m³ respectivement. Par conséquent nous ne nous intéresserons pas à ces variations. On considère que, au pas de temps journalier, la retenue est toujours à son niveau maximum.

La connaissance de la surface des retenues des plans d'eau est un élément important, car il intervient dans les processus d'évaporation, ainsi que dans l'interception des précipitations.

Nous avons donc déterminé pour toutes les retenues utilisées les relations surface-volume, pour suivre le plus précisément possible la variation de la surface au cours de l'année.

Les courbes et les équations obtenues sont insérées en Annexe D.

2.4.2.4 Stratégie de gestion

(selon V. Ticona (responsable des opérations))

L'objectif de la gestion concertée des ouvrages est, d'une part, de produire le maximum d'électricité possible au moment où la demande est la plus forte, c'est à dire vers 12h et entre 18h et 22h, et, d'autre part, de maintenir la production pendant toute la durée de la saison sèche, en utilisant les ressources stockées dans les retenues et l'apport des glaciers.

A l'échelle journalière, toutes les opérations sur les retenues sont effectuées, dans le but d'avoir un maximum d'eau disponible au niveau des usines de grosse capacité (usine de Sainani et usines à l'aval) aux heures de pointe. Pendant la saison sèche, on cherche à gérer le volume stocké dans les retenues au cours de la saison des pluies, de façon à avoir de l'eau jusqu'à la fin de la saison, tout en produisant le maximum possible chaque jour.

Il est important de noter que cette gestion n'intervient qu'en saison sèche. En effet, au cours de la saison des pluies, l'eau arrive en quantité suffisante, chaque jour pour les besoins de la production. Il arrive même très souvent que les débits générés par la pluie dépassent la capacité nominale des installations hydroélectriques.

La retenue Zongo est de façon générale utilisée pour alimenter l'ensemble du système, en commençant par le dique Botijlaca le matin. Son eau est lâchée relativement tôt (8h) pour arriver à Dique Botijlaca vers 11h. Ce "dique" reçoit aussi les eaux turbinées de l'usine Tiquimani, qui est approvisionnée par le système Guaraguarani - Hatilata - Taipicota, mais ce système est utilisé plus tard dans la journée. L'ensemble de l'eau est ensuite lâché vers le "dique" Cuticucho et le reste du système, en passant par l'usine Botijlaca ou en étant renvoyée dans la rivière. Jusqu'à présent la majeure partie de l'eau qui arrivait au dique Botijlaca était renvoyée dans la rivière, car la capacité de l'usine n'était pas très élevée. Pour cette raison des travaux d'agrandissement ont été entrepris, portant la capacité de l'usine à 6,6 Mw.

Les eaux du système Liviñosa sont aussi turbinées à Botijlaca. La retenue Hankohuma est ouverte à 8h et fermée à 19h tant que celle-ci peut se remplir au cours de la nuit, grâce aux apports glaciaires de la rivière Taypi Khuchu. Quand ce n'est plus le cas, on peut utiliser l'eau de Patacota mais ses réserves sont tellement faibles que l'opération ne dure que quelques jours. En fait c'est la retenue Liviñosa qui est la plus utilisée, en combinaison avec Hankohuma, car sa capacité est beaucoup plus importante. Le problème, c'est qu'elle ne bénéficie pas des apports glaciaires, ce qui explique que l'on retarde au maximum son utilisation, ou bien qu'on l'utilise de façon combinée avec Hankohuma:

On ouvre Hankohuma à 8h, puis Liviñosa à 9h et on retourne fermer Hankohuma, qui peut ainsi se remplir au cours de la journée. Une grande partie de cette eau est donc canalisée et turbinée à Botijlaca, mais il y a toujours des débordements au niveau des différents ouvrages de captage, qui vont alimenter le Rio Liviñosa.

De cette façon l'ensemble des eaux turbinées à Botijlaca, ainsi que celles se trouvant dans les rivières Zongo et Liviñosa, sont amenées à "Dique" Cuticucho.

Avant les agrandissements, les eaux de "Dique" Cuticucho, étaient lâchées vers 13 h dans la rivière, de façon à arriver au niveau de l'usine Chururaqui, aux alentours de 18h, en même temps que les eaux turbinées en amont: Cuticucho, Santa Rosa et Sainani.

Maintenant, les capacités de Cuticucho et Santa Rosa ont augmenté, donc on pourra augmenter la production en utilisant les mêmes eaux, sur ce parcours.

Nous voyons que les stratégies de gestion sont assez complexes et essentiellement basées sur l'expérience et la connaissance du système. Ce type de gestion, ne peut s'adapter qu'avec retard aux changements climatiques et hydrologiques subis par le système, comme le recul important des glaciers enregistré ces 10 dernières années. De ce point de vue un modèle relativement simple comme celui que nous allons mettre en place peut permettre de travailler davantage en prévision.

3 La modélisation

Nous allons, dans ce chapitre, présenter et justifier l'utilisation du logiciel Vensim®, expliquer la méthodologie de construction du modèle et conclure en décrivant les modules de calcul intégrés pour représenter les processus hydrologiques naturels.

3.1 *L'outil de modélisation*

3.1.1 Présentation du logiciel Vensim®

Vensim® (VENTANA SYSTEMS (1997)), disponible sous environnement Windows ou Macintosh, est un outil de modélisation de flux, qui permet de simuler un système dynamique. Son champ d'application n'est pas limité à l'hydrologie. Il permet de construire graphiquement le système étudié, par l'intermédiaire de flux (rates en anglais) reliés à des variables d'état (stocks, accumulations, "levels" en anglais), dépendantes du temps, mais qui peuvent aussi être influencées par des variables auxiliaires, au travers d'outils mathématiques qui permettent la construction d'équations et de fonctions complexes. (Covarrubias, 1996)

En hydrologie, la construction graphique permet de visualiser la dynamique du système modélisé, puis de mener une analyse de façon très flexible, en modifiant directement sur le diagramme, la valeur d'une variable, ou sa place dans le système et en s'appuyant sur des outils graphiques (tableaux, courbes) pour la visualisation des résultats de la simulation.

En outre, il oblige l'utilisateur à distinguer les flux, (apports/soustractions de volumes d'eau par pluviométrie/évaporation), des variables d'état, (stockages d'eau souterrains ou superficiels), souvent étroitement liés dans le système, ce qui aide à la conceptualisation du modèle et à bien définir les relations internes qui régissent son comportement. Cette caractéristique, couplée à la convivialité de son interface avec l'utilisateur, font de ce logiciel un bon outil pédagogique pour l'apprentissage de la modélisation, tout en étant très performant. (Jin Lee, 1993)

3.1.1.1 Intérêt de Vensim® pour la modélisation dans la vallée du Zongo

Dans le cas de la vallée du Zongo, où la gestion de l'eau peut être définie comme une "gestion intégrée", devant prendre en compte le climat, la gestion des volumes d'eau stockés, la demande en électricité de la ville, et l'organisation du personnel d'opérations dans la vallée, ce logiciel présente des intérêts multiples:

- Il permet de simuler l'évolution du niveau de l'eau dans les retenues de la vallée, en les définissant comme des variables d'état, dont le comportement est contrôlé par la pluviométrie, l'évaporation, la production d'écoulement des versants, les apports glaciaires et les productions électriques des usines qu'elles alimentent. Autant de facteurs qui seront définis à leur tour comme des variables auxiliaires, auxquelles on pourra affecter des valeurs externes importées dans le modèle (variables type *data*), ou des valeurs constantes connues ou arbitraires (variables type *constant*), ou qui seront le résultat d'un calcul utilisant d'autres variables du système (variables type *auxiliary*). Nous pouvons voir un exemple de ce type de construction sur la figure 145

- Les flèches seront utilisées pour mettre en relation l'ensemble des variables intervenant dans les calculs de celles nécessitant être calculées.

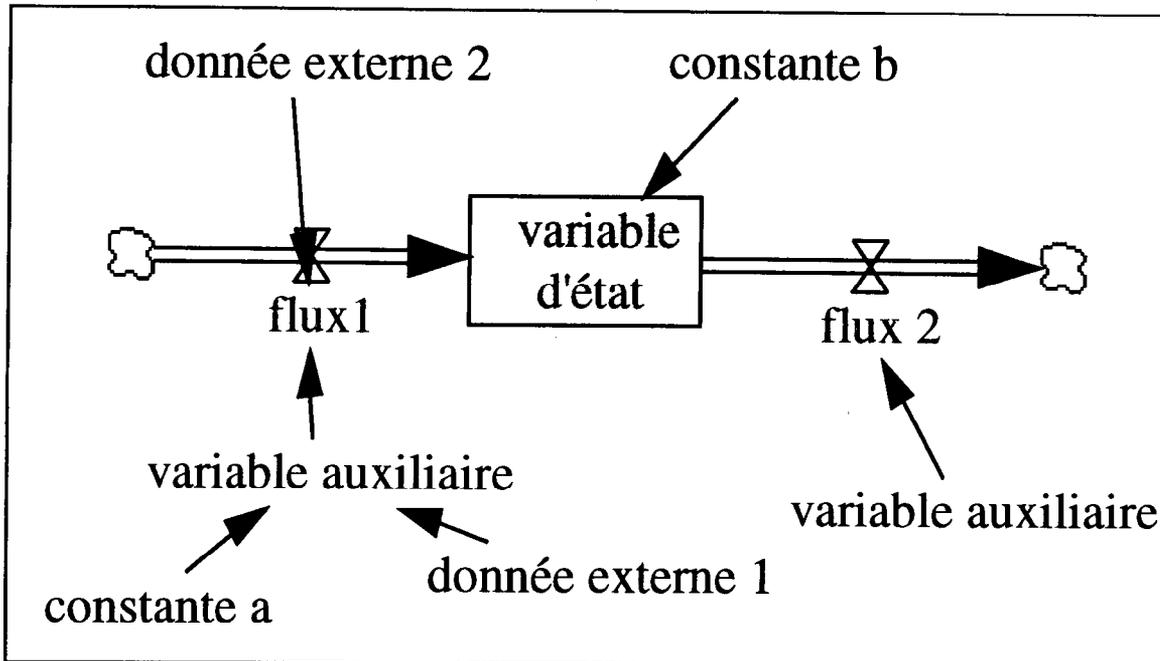


Figure 15: Exemple d'utilisation des différentes variables sous Vensim®

- Il permet de mettre en place des modèles simples pour la production des versants et de les caler, en comparant entre eux les résultats des simulations de façon flexible, sur graphique ou sur tableau, ou en exportant ces résultats sous forme de fichiers de type tableur, pour traiter ensuite les données avec toutes les possibilités offertes par ce tableur.
- La possibilité du choix du pas de temps, ainsi que du suivi de la simulation pas à pas, graphique ou numérique, permet de mettre en évidence l'influence d'une variable sur le comportement d'une autre, et de corriger les erreurs de conceptualisation du système.
- La construction graphique du modèle permet d'intégrer très facilement, et à n'importe quel niveau de son organisation, des variables "test", qui suivent un comportement particulier et permettent d'optimiser le modèle, sans le perturber, ni le modifier. D'autre part, on peut très facilement suivre l'évolution du système dans le temps, en changeant très rapidement la conformation de notre modèle, ou bien tester différents scénarios de façon simple, ce qui peut faire du modèle établi sous Vensim®, un excellent outil d'aide à la décision.

Vensim® est un langage de simulation dont l'application dans le domaine de l'eau n'est pas encore très développée. Sa très grande simplicité d'utilisation le dévalorise peut-être aux yeux des utilisateurs. Il existe d'autres outils similaires, tels que Stella® et Powersim®, eux aussi peu utilisés en sciences de l'eau.

Néanmoins, nous pensons que cet outil est performant et que les facilités qu'il fournit en terme de modélisation permettent, non pas d'aborder les problèmes d'une façon simpliste, mais d'avancer plus vite et plus agréablement dans la conceptualisation qu'avec les langages de programmation habituels.

3.2 Méthodologie de construction du modèle

3.2.1 Structure hydraulique et hydrologique adoptée pour la vallée

3.2.1.1 Notion de système hydraulique

Nous avons décidé de considérer la structure hydraulique de la vallée comme un assemblage de systèmes hydrauliques, se déversant les uns dans les autres, de l'amont vers l'aval, en partant des sommets glaciaires jusqu'à l'usine de Sainani.

Ces systèmes sont définis comme étant l'ensemble des sous-bassins versants captés pour alimenter une usine donnée, couplé aux aménagements hydroélectriques de la Cobee (canaux, retenues), nécessaires au transport et au stockage de la ressource. Ainsi, chaque usine induit un système hydraulique, que l'on va construire en se basant sur les documents de la Cobee et le schéma de la hiérarchisation hydraulique fait par Pouyaud, consultables en annexes B et C. Les systèmes hydrauliques se superposent à la hiérarchisation naturelle de la vallée et perturbent son fonctionnement hydrologique, en déviant et retardant les écoulements naturels.

Nous adopterons pour la suite de ce travail, le terme "hydraulique" pour tout écoulement capté ou transporté, par les aménagements de la Cobee (prise d'eau, canaux), et le terme "hydrologique" pour ceux qui suivent un parcours naturel. La complexité de cette terminologie réside dans le fait que des écoulements hydrologiques, comme le ruissellement des versants, sont captés par les retenues, ou bien à l'inverse, que l'eau turbinée est ensuite restituée à la rivière.

Pour éviter ce type d'ambiguïté, on convient de différencier les deux termes, à partir du moment où un retard est introduit dans le comportement naturel de l'écoulement qu'il qualifie.

3.2.1.2 Structure globale d'un système hydraulique

Nous avons construit 7 systèmes parmi lesquels, 3 concernent les usines de Zongo, Tiquimani, Cuticucho, 2 concernent l'usine de Botijlaca, (située à l'intersection entre deux vallées, celle du Rio Zongo d'une part, et celle du Rio Liviñosa d'autre part), les deux derniers concernant, les usines de Santa Rosa et Sainani pour l'un et le bassin versant des deux lacs Viscachani pour l'autre. Ce dernier système a été isolé, en tant qu'unité hydraulique car nous n'avons que très peu d'informations sur son fonctionnement. Il sera le seul qui sortira de la définition du système que nous avons adopté, car il n'est pas en relation directe avec une usine.

3.2.1.2.1 *Les systèmes contenant des retenues*

▪ Critères de construction

Si l'on excepte le système Viscachani, l'ensemble de ceux qui sont situés à l'amont de l'usine Botijlaca, contiennent les principales retenues (Zongo, Guaraguarani, Hatilata, Taipicota, Liviñosa), utilisées pour le stockage de l'eau, d'où partent les canaux alimentant directement les usines.

Pour ceux-ci, nous avons choisi de simuler les variations du volume d'eau dans la retenue, en réalisant un bilan volumique journalier des entrées et sorties. Nous les avons sélectionnées en fonction de leur capacité de stockage. La plus petite de ces retenues, Guaraguarani, a une capacité supérieure à 500 000 m³, ce qui nous conduit à négliger les retenues de capacité inférieure.

Les retenues "Dique" Botijlaca et Cuticucho, pourraient faire exception à la règle. Bien qu'ayant une capacité inférieure à 20 000 m³, elles ont un fonctionnement journalier et non pas saisonnier comme les autres et sont très utiles pour la production électrique journalière. Leur dynamique horaire (vidange la journée et remplissage la nuit), permet d'échelonner sur la journée l'alimentation des usines en aval et de suivre au mieux la demande en électricité. Néanmoins, leur variation journalière passe totalement inaperçue au pas de temps choisi. Par conséquent, nous calculerons uniquement l'ensemble de leurs entrées et sorties, sans faire de bilan volumique.

▪ La construction avec Vensim

Le volume de la retenue est considéré comme une variable d'état. Sa valeur au jour j est calculée à partir de sa valeur au jour j-1, à laquelle on rajoute les entrées et on soustrait les sorties et le débordement du jour.

$$\text{Volume (j)} = \text{Volume (j-1)} + \text{entrées (j)} - \text{sortie (j)} - \text{débordement (j)}$$

Le débordement est calculé en fonction du volume maximum de la retenue:

$$\text{débordement (j)} = \text{Volume (j-1)} + \text{entrées (j)} - \text{sortie (j)} - \text{Volume maximal retenue}$$

Pour cela nous calculons l'ensemble des entrées:

hydrologiques: production d'écoulement des versants, pluie sur la retenue;
hydrauliques: eaux canalisées de fonte des glaciers, eaux captées sur une rivière, (qui peuvent contenir les eaux issues des systèmes en amont), ou dans un bassin versant non connecté naturellement à la retenue, et acheminées par canal,

ainsi que les sorties:

hydrologiques: évaporation du lac;
hydrauliques: eau destinée à être turbinée, et débordements.

Le contexte local pourra influencer sur cette méthodologie générale et introduire des particularités qui seront explicitées lors de la description de chaque système.

L'ensemble de ces paramètres sera introduit en tant que variables auxiliaires, celles-ci pouvant être des constantes (surfaces de bassin versant, volumes maximum de retenues), des variables calculées (débits turbinés, pluviométrie sur une retenue, débordements) ou des données importées dans le modèle (pluviométrie, production électrique journalière, production glaciaire)

La comparaison de la variation du volume de la retenue simulé, avec celle observée par les opérateurs de la Cobee, permettra de caler les différents facteurs introduits dans la modélisation.

3.2.1.2.2 Les systèmes contenant des retenues négligeables

C'est le cas des systèmes concernant les usines de Cuticucho, Santa Rosa et Sainani.

L'usine de Cuticucho est alimentée par l'intermédiaire du Dique Cuticucho, mais celui-ci est utilisé de la même manière que Dique Botijlaca. Nous ne ferons donc pas de bilan sur cette retenue.

L'usine de Santa Rosa, reçoit une partie de son eau du bassin versant de Coscapa. Il y a dans ce bassin, plusieurs retenues de faible capacité dont une seule, Sankayuni, est gérée par les opérateurs de la Cobee. Le fonctionnement de ce bassin est assez compliqué et nous ne possédons que peu de données le concernant. Son influence ne devient incontournable que plus en aval dans la vallée.

Nous simplifierons l'apport de ce bassin à la part qui est turbinée à Santa Rosa 1, qui est la partie de l'usine Santa Rosa, alimentée uniquement par la vallée de Coscapa.

Ces systèmes ne contenant pas de retenues, nous ne pouvons pas utiliser leurs variation de volume, pour caler les coefficients du modèle. (Cf. 3.2.1.2.1)

Nous avons choisi d'utiliser les débordements au niveau des prises d'eau des usines comme critère de calage. Nous le calculons en soustrayant les volumes turbinés à l'ensemble des entrées au niveau des prises. Si on a un débordement positif, cela veut dire que les entrées sont supérieures au volume turbiné et que l'excédent repart par débordement dans le Rio Zongo. Par contre si le calcul fournit un volume négatif, nous devons revoir les mécanismes à l'amont pour obtenir des volumes supérieurs en entrée.

3.2.1.2.3 Les critères de calage

Chaque type de système possède un critère de calage. Celui-ci peut-être le volume des retenues observé ou bien le signe des débordements calculés au niveau des prises d'eau.

Le modèle global de la vallée que nous construisons s'appuie sur ces critères pour améliorer son adéquation à la réalité. Nous verrons dans la conclusion de ce chapitre, que nous utiliserons un troisième critère de calage, qui permettra de vérifier si les choix de gestion de l'eau intégrés dans le modèle sont cohérents avec la réalité.

3.2.2 Le modèle de production d'écoulement des versants

Faute de bien connaître les mécanismes de redistribution des précipitations et d'avoir pu identifier les "chemins de l'eau", le modèle d'écoulement que nous avons choisi est très simple. Ce choix se justifie par le but de notre travail, qui n'est pas d'établir un modèle d'écoulement, mais de construire le schéma hydraulique dynamique de la vallée. De ce fait nous considérerons que l'écoulement est fonction du ruissellement et du débit de base. L'équation décrivant ce modèle est la suivante:

$$P_v = (a \times P + b) \times S_v$$

Avec:

- P_v**: production d'écoulement du versant (m³/jour)
- P** : pluviométrie (m/jour)
- S_v**: Surface du versant (m²)

Et les coefficients à caler:

- a**: coefficient de ruissellement (sans dimension)
- b**: facteur de débit de base (m/jour), indique le volume d'eau apporté par jour et par m² de surface de versant.

Les deux niveaux de calage précédemment cités:

- Le volume d'eau dans les retenues (Cf. 3.2.1.1)
 - Le débordement au niveau des prises, (Cf. 3.2.1.2)
- vont permettre de caler ces deux coefficients.

Le calage de ces deux coefficients a été fait en admettant certaines hypothèses:

- On considère que la production d'écoulement est totale sur la journée, c'est à dire que pour une pluie donnée au jour j, toute l'eau de ruissellement, même hypodermique, s'écoulera ce même jour et qu'elle sera captée par la retenue ou la prise sans faire intervenir de retard qui reporterait cet apport au jour suivant. Cette hypothèse peut sembler forte au vu des surfaces considérées, mais l'importance des pentes des versants et leur nature géologique, la rendent vraisemblable.
- On considère que les vallées à alimentation glaciaire ont un coefficient de débit de base qui sera supérieur à celui des vallées à alimentation strictement pluvio-nivale. Cette hypothèse se justifie aisément du fait que les jours sans pluie, les glaciers continuent à fondre et à alimenter la vallée. Le coefficient de ruissellement étant lié à l'état de saturation du sol, il sera lui aussi un peu plus élevé pour ce type de vallée que pour les vallées pluvio-nivales.

3.2.3 La production des glaciers

Les glaciers tropicaux de Bolivie, font l'objet d'un important travail d'observation et d'analyse, dans le cadre du programme "neige et glaciers tropicaux" de l'Orstom.

Trois des plus importants glaciers qui couronnent la vallée (Zongo, Huayna Potosi, Charquini) sont suivis depuis plusieurs années à l'aide d'un dispositif de mesure qui fournit des données fiables. Une série de limnigraphes enregistreurs CHLOE, sont installés sur les canaux Alpaca, Prado et Tubo, pour mesurer les volumes d'eau récupérés par ces canaux et qui sont le produit de la fonte des glaciers. Ces trois glaciers alimentent la retenue Zongo de façon quasi exclusive. On peut donc considérer que la production glaciaire pour le système Zongo est connue.

Dans la vallée de Taypi Khuchu, le Rio Taypi Khuchu est alimenté par des eaux d'origine glaciaire. Un limnigraphe a été installé depuis janvier 1998. Nous avons reconstruit une série de données fictives mais vraisemblables à partir des mesures obtenues jusqu'à présent, que nous utilisons pour la période d'étude. Pour chaque mois nous avons créé des séries aléatoires centrées sur la moyenne des débits journaliers et bornées à l'aide de l'écart-type. Ainsi nous réduisons l'erreur introduite par cette manière d'intégrer les apports glaciaires dans le système.

Pour les autres systèmes en revanche, la production glaciaire est inconnue. Pour les vallées où elle semble vraiment importante, comme Coscapa et le système Tiquimani, elle sera incluse dans le facteur de débit de base.

Une meilleure connaissance des productions glaciaires fera l'objet d'investigations précises dans le futur.

3.2.4 L'évaporation

Les valeurs de l'évaporation dans la vallée du Zongo ne sont pas connues. Nous nous sommes servis de données mesurées sur l'Altiplano (station à 3700 m, ETP moyenne mensuelle entre 1968 et 1984, obtenues auprès de Y. l'Hôte), pour calculer des valeurs journalières d'évaporation. Le calcul du volume d'eau évaporé a été fait uniquement pour les retenues Zongo, Hatilata, Guaraguarani, et Taipicota, car ce sont les plus étendues. Elle est en moyenne de 1 à 3 mm par jour.

3.2.5 La surface des retenues

Nous disposons des données concernant, les relations niveau-volume des principales retenues de la vallée. Au vu des phénomènes qui se déroulent en surface des retenues (pluie directe sur la retenue, évaporation), il nous a semblé important de calculer la variation de leur surface en fonction du niveau de l'eau. Pour cela nous calculons la surface correspondant à une augmentation de volume $d(\text{Volume})$, faisant remonter le niveau de l'eau de $d(\text{Hauteur d'eau})$.

$$\text{Surface} = \frac{d(\text{Volume})}{d(\text{Hauteur d'eau})}$$

Ce calcul étant fait pour des $d(\text{Hauteur})$ de 0.1 m entre 0 et la hauteur maximale de la retenue, on en tire une relation entre la surface et le volume de la retenue, qui peut ensuite être exprimée par une équation. L'exemple de la retenue Zongo est visible sur la figure 16.

Ainsi, dans notre modèle, nous calculons la surface de la retenue en fonction de son volume du jour. Ce qui pouvait sembler au premier abord un détail, comparé à des erreurs introduites au niveau de la pluviométrie et des productions des versants, s'est avéré assez important pour le fonctionnement de la retenue.

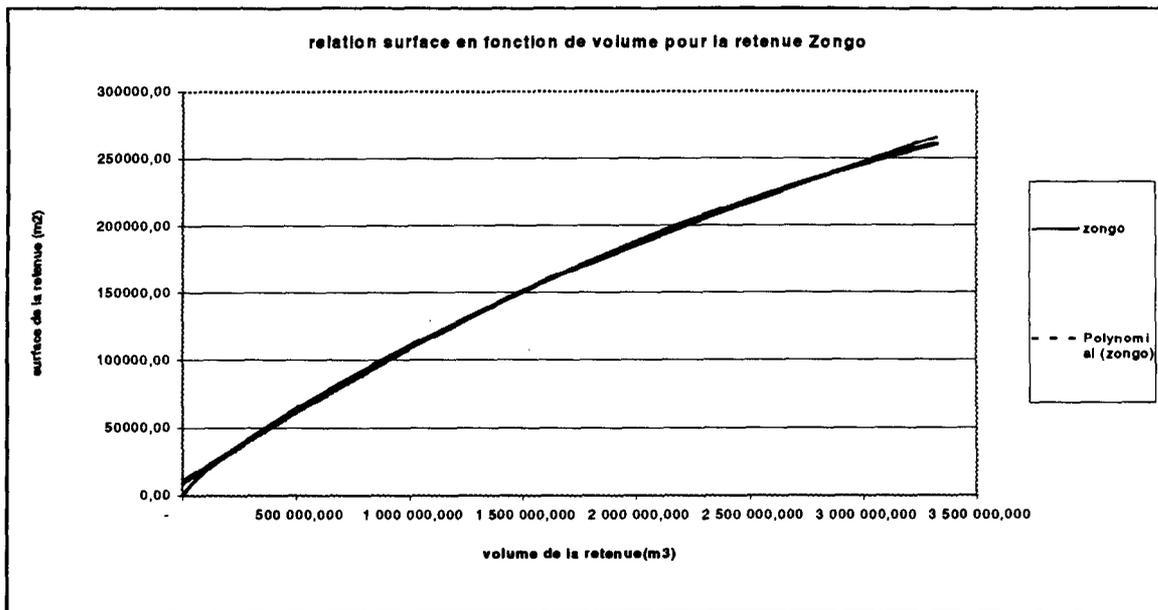


Figure 16: Relation Surface - Volume. Cas de la retenue Zongo.

De cette façon, nous obtenons des relations suivantes:

- Zongo: $\text{Surface} = -1E-08 * \text{Volume}^2 + 0,1093 * \text{Volume} + 9643,3$ $R^2 = 0,9989$
- Guaraguarani: $\text{Surface} = 0,0379 * \text{Volume} + 65294$ $R^2 = 0,587$
- Hatilata: $\text{Surface} = 1E-08 * \text{Volume}^2 + 0,0215 * \text{Volume} + 141996$ $R^2 = 0,9278$
- Taipicota: $\text{Surface} = 3E-09 * \text{Volume}^2 + 0,0322 * \text{Volume} + 149298$ $R^2 = 0,8445$

Dans le cas de Guaraguarani, la faible valeur du coefficient de corrélation s'explique par le fait que la relation hauteur - volume pour cette retenue, semble présenter beaucoup d'erreurs.

3.2.6 Conclusion

L'ensemble de ces éléments sont utilisés pour construire le modèle.

Le calage des différents paramètres se fait à l'aide des volumes observés dans les retenues et des débordements calculés au niveau des prises d'eau. (Cf. 3.2.1.2.1 et 2)

Une fois que le modèle sera construit, nous aurons besoin d'un critère de calage supplémentaire pour vérifier sa cohérence. Nous utiliserons pour cela, une information obtenue auprès des ingénieurs chargés des opérations de la Cobee.

Ils affirment que durant la saison sèche, l'ensemble de l'eau qui passe par le Rio Zongo est captée par la prise d'eau de Sainani, (Cf. 2.4.2.2.2), en d'autres termes, il n'y a pas de débordement au niveau de cette prise. Ce critère, approximatif par son manque de référence temporelle, sera celui que nous utiliserons pour parfaire notre calage. La mise en place ultérieure d'une station de mesure précise au niveau de ce débordement, permettra de disposer de données de bien meilleure qualité.

Nous pourrons donc utiliser ce critère pour vérifier, si la construction générale du modèle et les relations entre systèmes hydrauliques de ce bassin versant aménagé, est cohérente avec la réalité.

4 Visualisation des systèmes et des résultats

4.1 Les systèmes hydrauliques de la vallée

Nous allons présenter en détail les différents systèmes hydrauliques que nous avons construit, dans l'ordre qui les relie au sein du bassin versant. Un schéma général de la hiérarchisation des systèmes est présentée sur la figure 17. Nous y avons individualisé chaque système en indiquant les variables qui les relient entre eux. Ces variables sont souvent les apports du système situé en amont vers le système en aval.

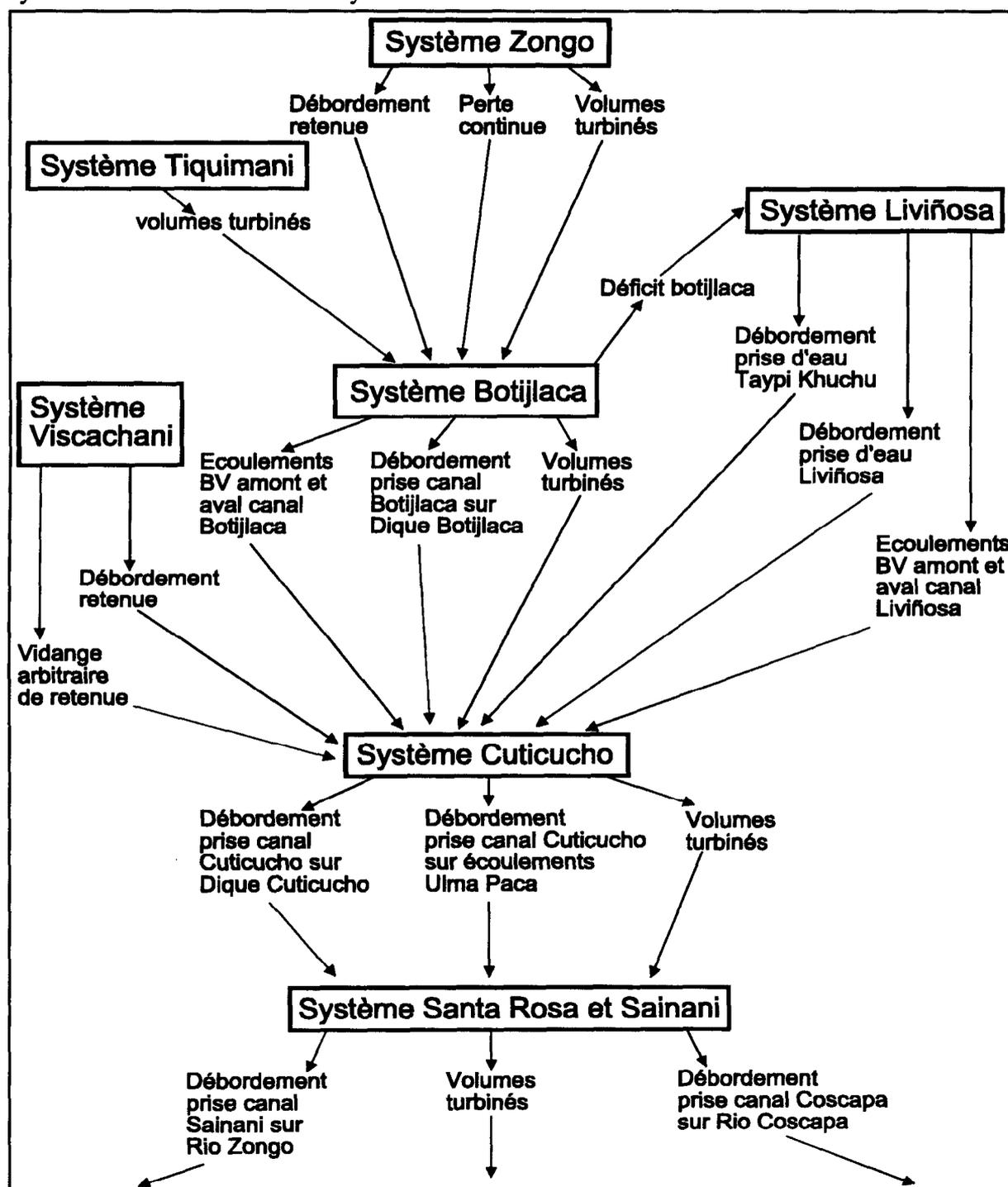


Figure 17: Schéma global du système jusqu'à l'usine Sainani. Visualisation des variables reliant les systèmes.

4.1.1 Le système Zongo

4.1.1.1 Description

Situé en tête de la vallée, ce système récupère principalement les eaux de fonte des glaciers. C'est le premier aménagement hydroélectrique réalisé dans la vallée. Il a subi de nombreux aménagements, qui en font un des systèmes qui utilise le mieux les ressources à sa disposition. Il est équipé d'un réseau de récupération des eaux de fonte des glaciers, qui capte même les eaux des glaciers comme Huayna Potosi situés sur un bassin versant non connectée à la retenue.

La retenue Zongo qui est la plus volumineuse de toute la vallée, récupère les eaux des glaciers Charquini, Zongo et Huayna Potosi. Le volume d'eau apporté directement par la pluie à la retenue, calculé en multipliant la pluie par la surface de la retenue du jour, est pris en compte dans les entrées. Les volumes turbinés, évaporés et les débordements seront les sorties du système.

A l'issue du calage, nous avons pu constater qu'un écart progressif par rapport aux données observées apparaissait sur notre courbe. Cet écart se produisait entre le début et la fin de la vidange du lac.

D'après les rapports d'opérations de la Cobee, cette période correspond à celle où des travaux ont été lancés pour l'installation de la nouvelle usine de Zongo d'une capacité de 10 Mw.

Nous avons fait l'hypothèse que ces travaux ont provoqué une perte continue à la retenue Zongo, que nous avons intégrée au modèle et qui représente un volume de 4266 m³/jour perdus entre le 1/6/97 et le 31/8/97, valeurs obtenues par calage.

4.1.1.2 Résultats

Par calage du modèle, la fonction d'écoulement des versants pour ce système ne contient pas de terme de débit de base. L'altitude à laquelle se situe la retenue ainsi que l'aspect massif des roches qui affleurent ne vont pas à l'encontre de ce résultat.

On obtient:

Coefficient de ruissellement $a = 0.1$

Nous pouvons voir sur la figure 18, le résultat de la construction graphique de notre modèle avec Vensim®.

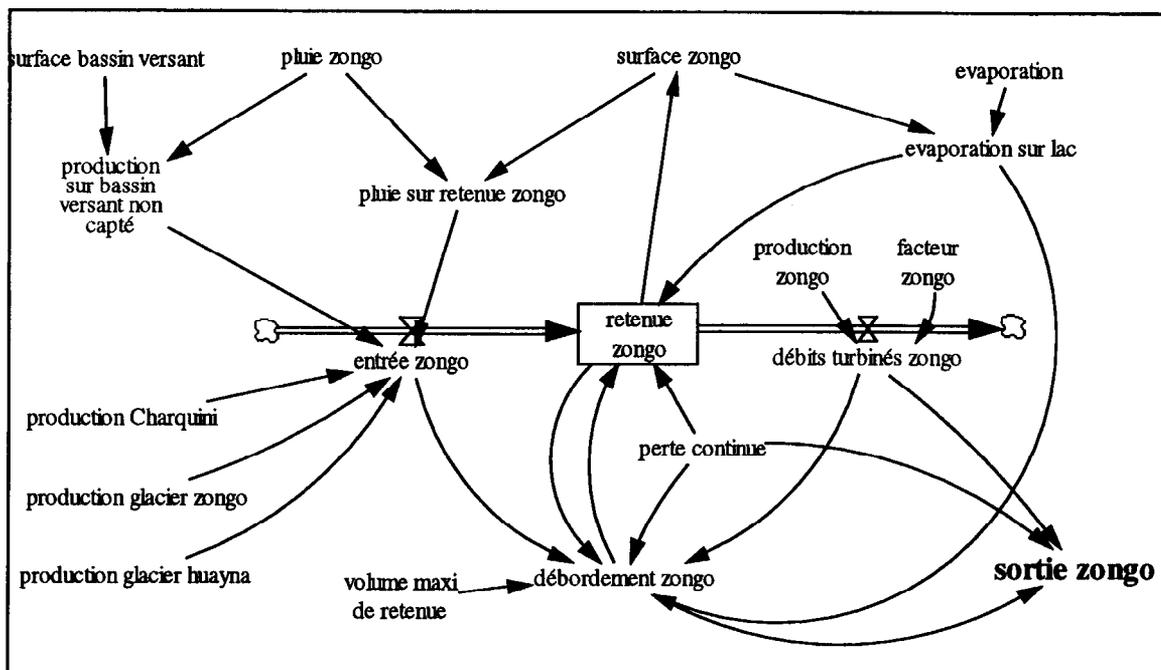


Figure 18: Modèle de fonctionnement du système Zongo

Nous voyons que nous aurons à la sortie du système la somme des apports des débits turbinés, de la perte continue et du débordement de la retenue. Ces apports s'additionnent en effet sur le terrain pour former le lit du Rio Zongo, en aval de l'usine Zongo.

Nous pouvons maintenant voir le résultat du calage sur la figure 19.

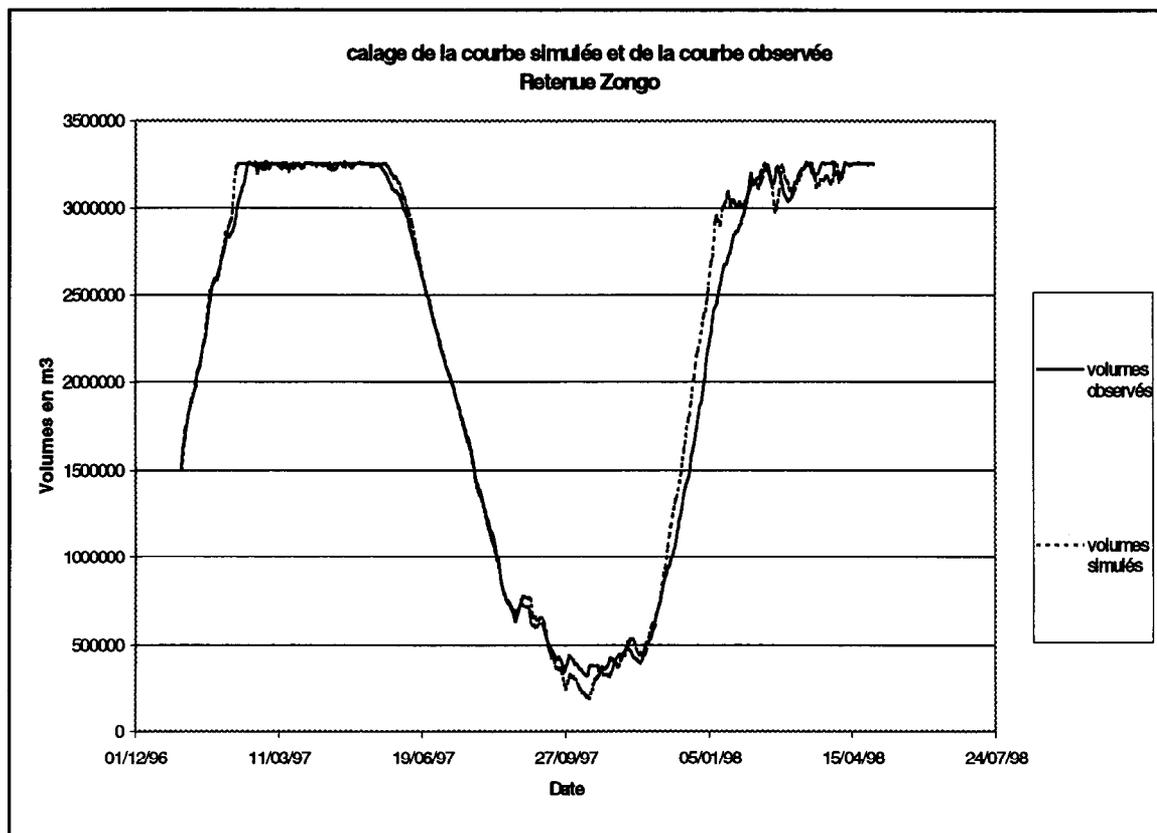


Figure 19: résultat de la simulation pour le système de la retenue Zongo.

L'adéquation des deux courbes est satisfaisante. Ceci n'est pas très étonnant car, comme nous l'avons expliqué précédemment, le système de la retenue Zongo est étudié depuis très longtemps et on le connaît relativement bien. De plus on dispose de beaucoup de données le concernant, ce qui permet d'atteindre une grande précision de calage.

4.1.2 Le système Tiquimani

4.1.2.1 Description

Nous désignons sous le nom de Tiquimani, l'ensemble des retenues Guaraguarani, Taipicota et Hatilata, situées en dehors du bassin versant de Rio Zongo, qui sont captées pour alimenter l'usine de Tiquimani. Pour simplifier le modèle et commettre le moins d'erreurs possibles nous considérons que les trois retenues se déversent l'une dans l'autre sans aucune perte. En terme de construction de notre modèle, ceci a été traduit par une retenue fictive, nommée Gua-Hati-Taipi, qui représente la somme des trois retenues.

Nous ne connaissons pas la valeur de la pluviométrie. Nous allons prendre les données de la pluviométrie du système Zongo, car les deux systèmes se situent à des altitudes équivalentes. Nous ne considérerons que des entrées à la retenue de type hydrologique, bien que sur le terrain il existe un petit réseau de canaux qui relie les différentes retenues.

Il existe, d'après le personnel de la Cobee, plusieurs points de débordement entre les retenues et l'usine de Tiquimani. Nous ne possédons d'informations sur aucun d'entre eux. Par conséquent, nous calculerons uniquement le débordement au niveau de la retenue fictive, selon le principe expliqué plus haut. (Cf. 2.1.2.1)

De plus, ce système ne fait pas partie du bassin versant du Rio Zongo. De ce fait, l'eau qui déborde en n'importe quel point de son réseau de captage (retenues, prises), ne rejoindra pas le système hydraulique global de la vallée. Par conséquent, la seule variable reliée au système global sera celle des volumes turbinés à l'usine Tiquimani, comme nous pouvons le voir sur les figures 17.

4.1.2.2 Résultats

Etant données les approximations que nous faisons sur la pluie et sur les retenues, nous n'avons pas cherché une trop grande précision pour le calage de la courbe des volumes simulée pour la retenue.

Le meilleure adéquation des deux courbes, a été obtenue en faisant intervenir un modèle d'écoulement sans débit de base.

Nous avons obtenu:

Coefficient de ruissellement $a = 0.1$

Nous pouvons visualiser le modèle proposé pour ce système sur la Figure 20.

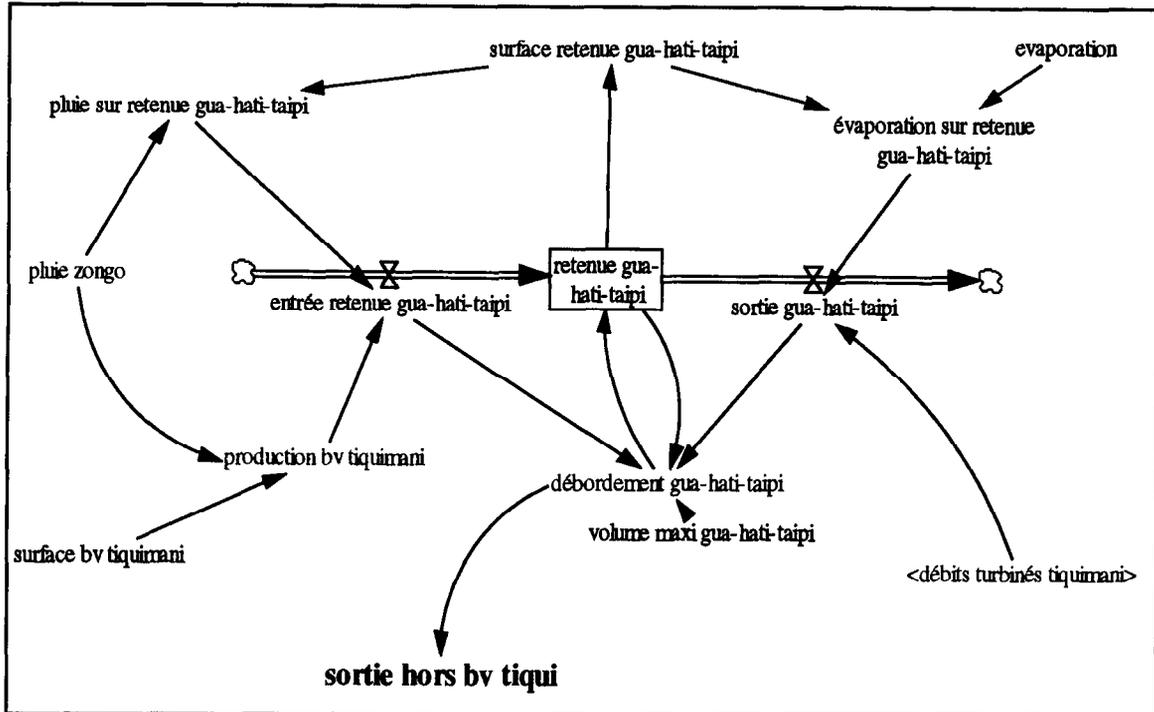


Figure 20: Modèle de fonctionnement du système Gua-Hati-Taipi

Nous obtenons alors la courbe visible sur la figure 21.

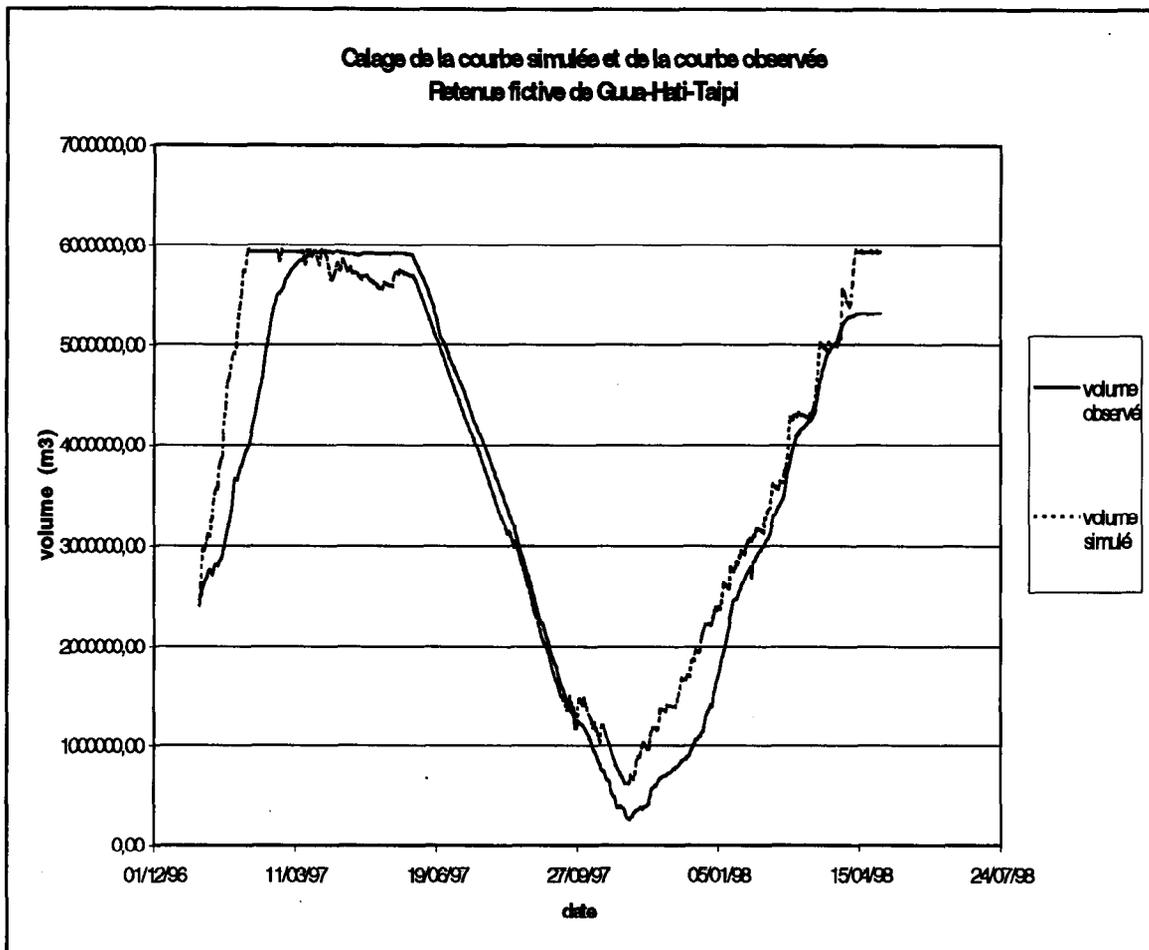


Figure 21: résultat de la simulation pour la retenue fictive Gua-Hati-Taipi

Cette simulation ne revêt pas une très grande importance pour la modélisation du fonctionnement de la vallée du Zongo. Comme nous l'avons souligné, ces lacs n'y sont pas naturellement reliés. Néanmoins elle nous permet de voir que même si l'approche de la modélisation est très simpliste, elle peut tout de même donner des résultats tout à fait acceptables.

4.1.3 Les systèmes Botijlaca et Liviñosa

4.1.3.1 Description

C'est la partie la plus complexe du modèle. En effet, l'usine de Botijlaca est alimentée par deux vallées distinctes: la vallée principale du Rio Zongo, d'une part, et la vallée du Rio Liviñosa d'autre part. Cette dernière se divisant en deux à son tour: la vallée du Rio Taypi Khuchu et la vallée de la retenue Liviñosa.

L'alimentation est gérée à l'aide de retenues d'importance différente. Le "Dique" Botijlaca, très important, mais dont l'influence au pas de temps journalier ne sera pas prise en compte, (Cf. 2.1.2.1 - les systèmes contenant des retenues), Hankohuma et Patacota, dont la faible capacité nous permet de les négliger en comparaison de la dernière, Liviñosa, la plus grande de ce système. La figure 22 nous montre un schéma simplifié de ce système.

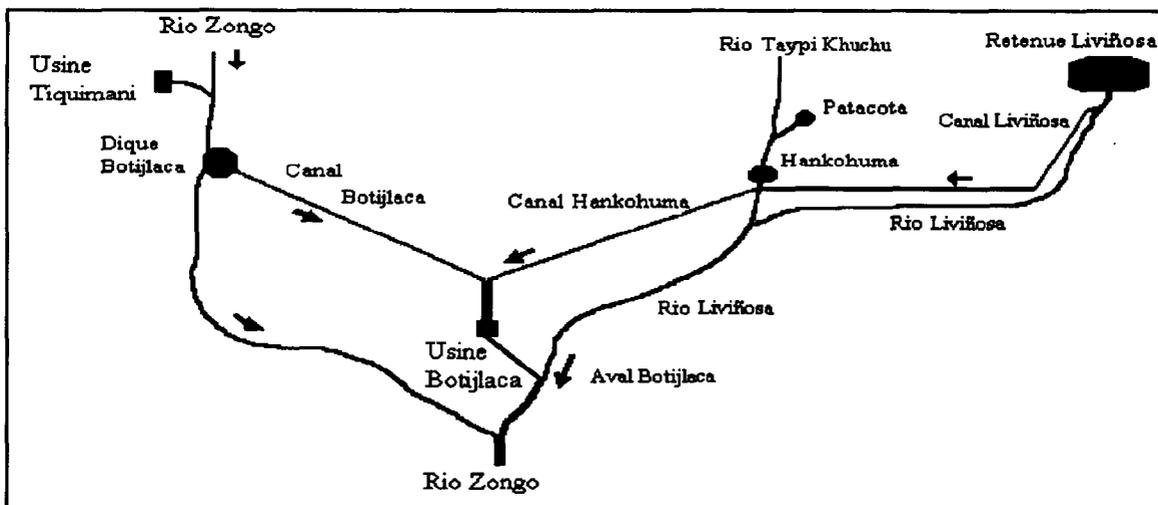


Figure 22: Schéma du système hydraulique de l'usine Botijlaca

La gestion de l'eau se fait à l'aide de l'expérience des opérateurs de la Cobee. La stratégie de gestion se base sur l'utilisation, pendant une courte période de la saison sèche, des retenues Hankohuma et Patacota. Lorsque leur apport n'est plus suffisant, elles sont relayées par la retenue Liviñosa. Par contre le Dique Botijlaca est utilisé en permanence au cours de la saison sèche. Au niveau de l'usine, il n'est pas possible de distinguer correctement la part d'eau venant de Dique Botijlaca de celle venant de la vallée de Liviñosa. Le même problème se pose au niveau de la prise d'eau du canal Hankohuma, pour la différenciation de l'écoulement provenant de chaque vallée.

La stratégie que nous avons adoptée pour modéliser ce système, consiste à utiliser au maximum les entrées d'eau arrivant au Dique Botijlaca. Si ces entrées sont inférieures à la demande de l'usine, ou si la demande est supérieure au débit maximum du canal Botijlaca, nous complétons le déficit par de l'eau venant de la vallée de Liviñosa. Celle-ci a été captée sur l'ensemble des deux vallées Taypi Khuchu et Liviñosa, il nous faut donc imposer des critères "a priori" pour différencier l'apport de chaque vallée.

Le canal Hankohuma, transporte l'eau captée dans les vallées de Taypi Khuchu et Liviñosa vers l'usine de Botijlaca. Pour les besoins de notre modélisation, nous représentons ce canal à l'aide de deux canaux distincts (Taypi Khuchu et Liviñosa), l'un captant l'eau du Taypi Khuchu et l'autre celle de Liviñosa.

Dans un premier temps, nous testons le premier canal pour voir si son apport, limité par son débit maximal, peut suffire à combler le déficit de l'usine de Botijlaca. Si ce n'est pas le cas, nous récupérons ce qui manque dans l'autre canal, c'est à dire dans la ressource stockée à la retenue Liviñosa.

Cette stratégie suppose une série de tests, au niveau des canaux. Ces tests comparent la ressource disponible chaque jour à la demande de l'usine d'une part et le débit que l'on voudrait faire passer dans un canal à son débit maximal d'autre part.

Cette démarche présente des faiblesses importantes, car nous ne connaissons pas précisément les valeurs des débits maximaux des canaux. Des jaugeages ont été faits par l'Orstom et la Cobee, dont les résultats sont insérés à l'annexe E, cependant les extrapolations sont difficiles à faire car nous ne connaissons pas précisément les dimensions des canaux.

Dans ce même système de Liviñosa, nous avons du aussi faire des approximations sur la pluviométrie puisque nous ne disposons pas de mesures. Nous avons choisi à nouveau les données de pluie du système Zongo, après comparaison des altitudes.

4.1.3.2 Résultats

Les différents tests effectués, combinés au calage de la variation de volume de la retenue Liviñosa ont conduit à faire intervenir un débit de base dans notre modèle de production, pour l'ensemble du système. Celui ci sera introduit sous la forme d'un facteur de débit de base (Cf. 2.1.2.2), qui sera calé en tenant compte du type de vallée (glaciaire ou seulement pluvio-nivale) concernée.

Pour la vallée de Taypi Khuchu, qui reçoit une alimentation glaciaire, on obtient un coefficient de ruissellement $a = 0.2$ et un facteur de débit de base $b = 0.002$ m/jour soit 2000 m³/jour /km²

Pour la vallée de Liviñosa, dont l'alimentation est essentiellement pluvio-nivale, on obtient: coefficient de ruissellement $a = 0.2$ et un facteur de débit de base $b = 0.00018$ m/jour soit 180 m³/jour/km²

Un des facteurs qui peut considérablement fausser le calage de ces coefficients, est la valeur choisie pour les débits maximaux des canaux. Ceux ci ont été extrapolés à partir des jaugeages, puis calés pour que l'alimentation de l'usine soit respectée.

Nous avons ainsi obtenu:

- Débit max canal Botijlaca = $67\ 000$ m³/jour
- Débit max canal Taypi Khuchu = $5\ 000$ m³/jour
- Débit max canal Liviñosa = $39\ 000$ m³/jour

La connaissance ultérieure des valeurs réelles de débit maximal des canaux permettra de trancher sur cette question.

En ce qui concerne la vallée de Botijlaca, le calage du modèle de production a donné:

coefficient de ruissellement $a = 0.2$

facteur de débit de base $b = 0.0016$ m/jour soit 1600 m³/jour/km²

Nous pouvons visualiser ces deux systèmes reliés sur les Figures 23 et 24.

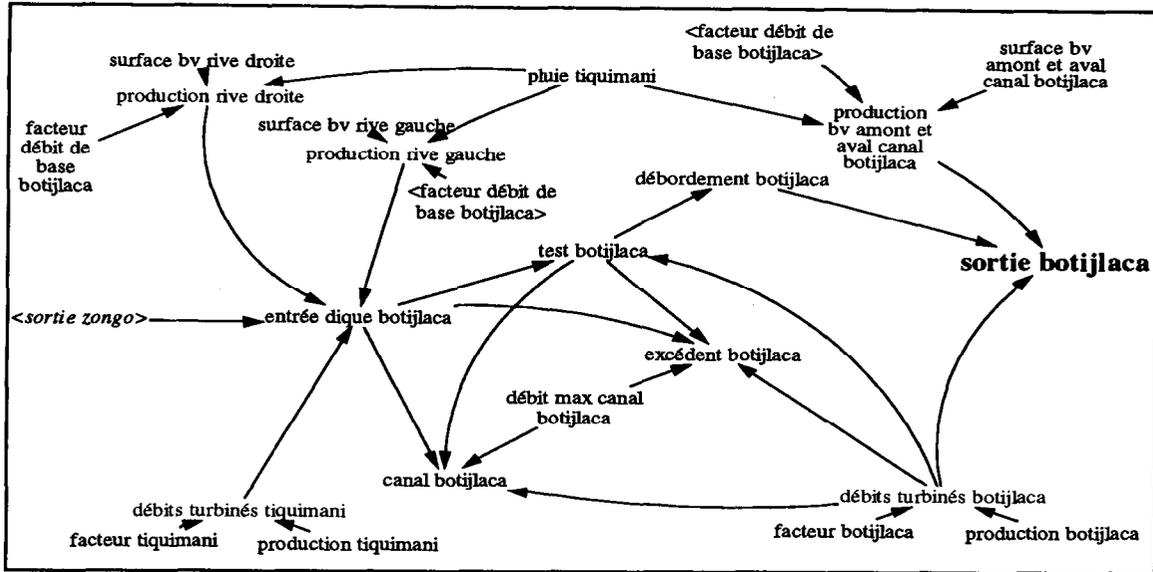


Figure 23: Modèle de fonctionnement du système de Botijlaca

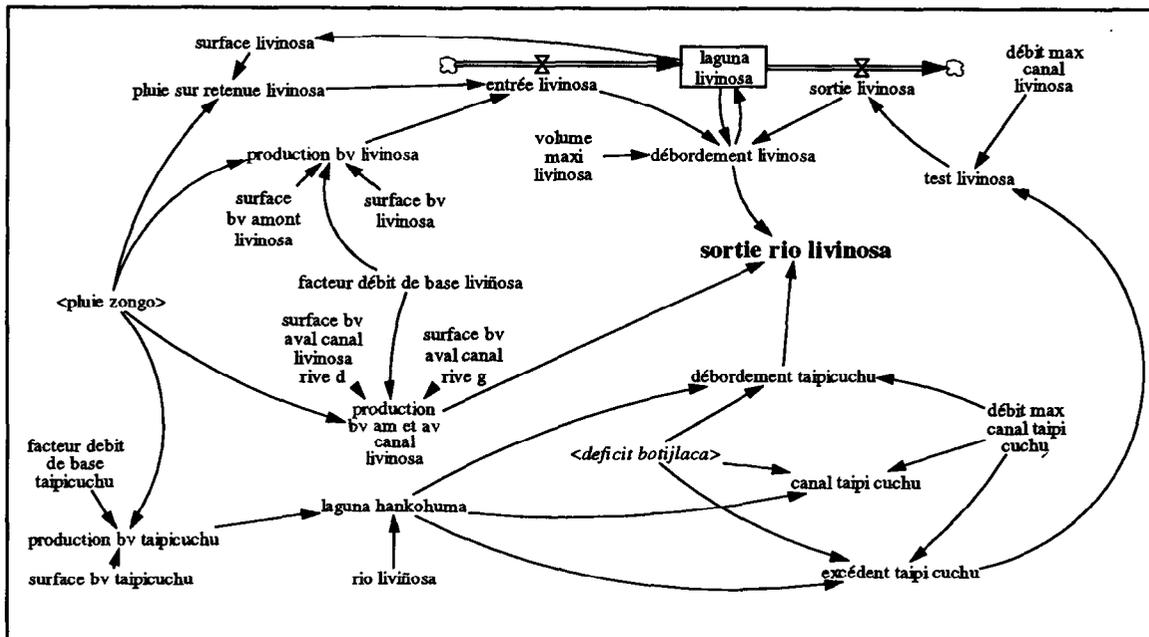


Figure 24: Modèle de fonctionnement du système de Liviñosa

Les sorties de ces deux systèmes se rejoignent dans le Rio Zongo, en aval de l'usine, comme nous l'avons vu dans la figure 22.

Le résultat du calage sur la retenue Liviñosa est visible sur la figure 25.

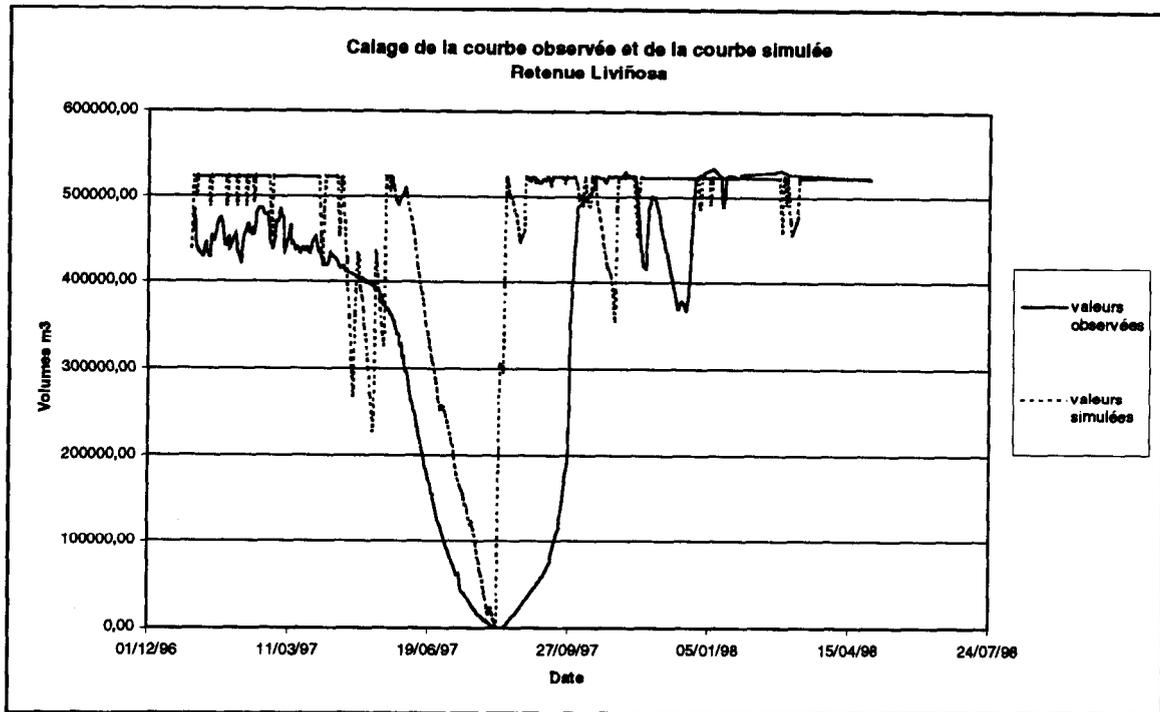


Figure 25: Résultat de la simulation pour la retenue Liviñosa.

Nous observons que le calage est assez approximatif. Cela est dû aux nombreuses approximations que nous avons introduit dans notre modèle. La méconnaissance de la pluie, des débits maximaux des canaux et de la gestion réelle de système, sont autant de facteurs qu'il faudra déterminer et qui devraient nous permettre d'améliorer sensiblement notre calage. Il ne faut pas oublier que la retenue Liviñosa se trouve en fin de chaîne dans la stratégie de gestion choisie et qu'un grand nombre d'erreurs ont pu être faites lors des calculs précédents. Par conséquent et au vu de l'allure générale de la courbe, nous estimons que le calage effectué est de relativement bonne qualité, surtout si l'on prend en compte les hypothèses non vérifiées introduites.

L'ensemble des débordements dans les deux systèmes, ainsi que les volumes turbinés à Botijlaca vont se retrouver dans le Rio Zongo. Ils seront rejoints par les apports du système Viscachani, décrit dans le prochain paragraphe, pour se retrouver ensuite stockés dans le Dique Cuticucho. Ils forment l'entrée principale du système hydraulique Cuticucho.

4.1.4 Le système Viscachani

4.1.4.1 Description

Situé à l'est de l'usine Botijlaca et de la vallée du Rio Zongo, la bassin versant de Viscachani a une alimentation glaciaire et pluvio-nivale. Deux retenues de tailles différentes, Alto et Bajo Viscachani, stockent l'eau de ce bassin. Le personnel de la Cobee mesure le niveau d'une seule des deux, Alto Viscachani, tous les 2 à 7 jours. Ces retenues, de capacité moyenne, ne jouent pas un rôle important dans le fonctionnement hydroélectrique de la vallée. Ceci explique le peu d'informations et de données qui existent sur ce système.

La capacité exacte de la retenue Alto Viscachani est inconnue et de ce fait la relation niveau-volume aussi. Nous avons donc appliqué, pour le calcul de celle-ci, la méthode des calottes sphériques mise au point par Reinhardt, (Cf. 1.4.2.1 - les retenues) qui permet d'utiliser les seules données disponibles sur ce système, les niveaux de la retenue. Nous ne connaissons, ni la pluviométrie, ni l'aspect de cette vallée ou je n'ai pu me rendre lors de la campagne de terrain. Nous utiliserons la pluviométrie mesurée à l'usine de Botijlaca. Nous pouvons visualiser la structure du modèle sur la figure 26:

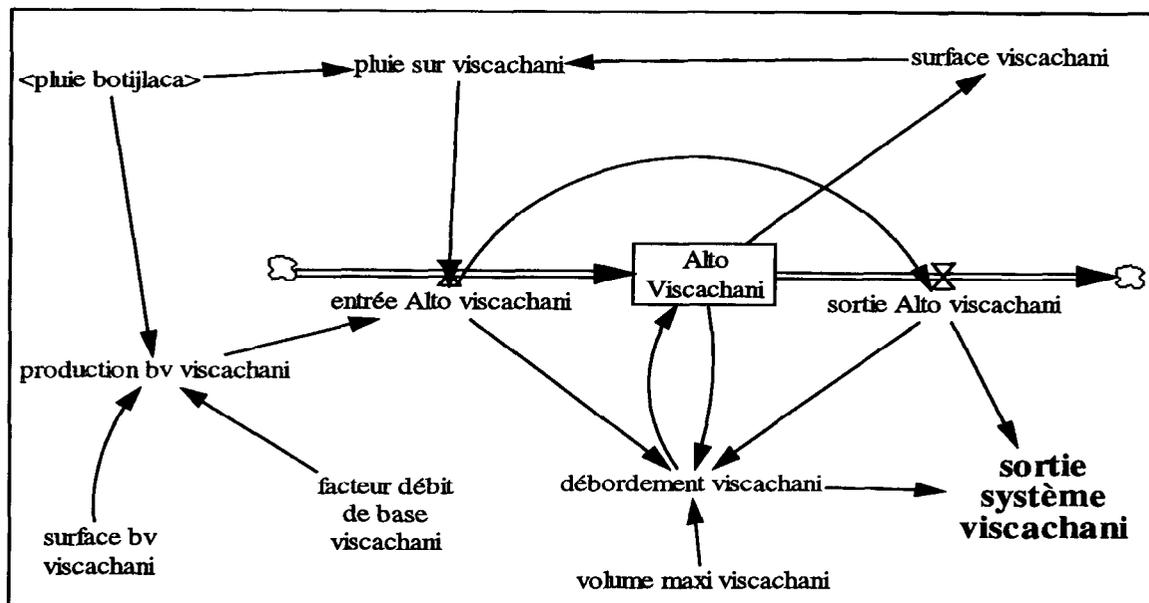


Figure 26: Modèle de fonctionnement du système de Viscachani.

4.1.4.2 Résultats

La difficulté principale posée par ce système, réside dans le fait qu'il n'est pas directement relié à une usine hydroélectrique. Nous n'avons donc pas d'autre moyen pour simuler les sorties de la retenue, que de créer une sortie fictive simple, fonction du temps, qui permette de le mieux possible compte du déstockage qui intervient pendant la saison sèche.

La solution qui a été choisie consiste à déstocker entièrement la retenue, puis à donner à la sortie la valeur des entrées pendant 3 mois, de façon à garder la retenue vide, puis d'annuler les sorties pour remplir à nouveau la retenue. Le résultat est visible sur la figure 27.

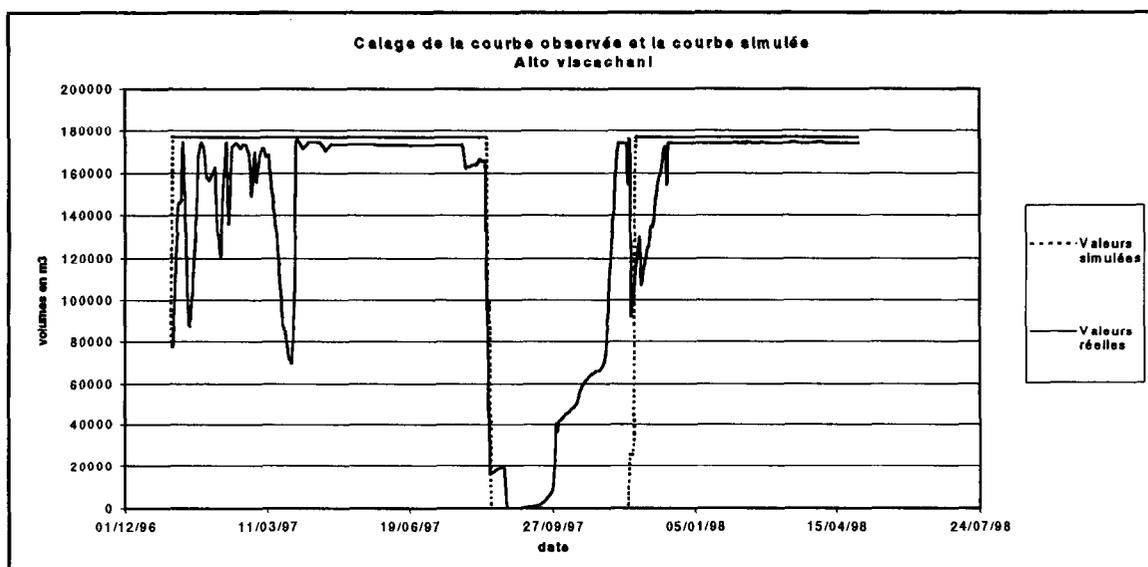


Figure 27: Résultat de la simulation pour la retenue Alto Viscachani

Cette situation particulière rend le calage du modèle de production, (pour lequel nous introduisons un débit de base, à cause de l'alimentation en partie glaciaire du bassin), particulièrement approximatif. On adopte:

coefficient de ruissellement $a = 0.2$

et un facteur de débit de base $b = 0.0001$ m/jour soit 100 m³/jour/km²

Comme nous l'avons déjà explicité, le débordement, ainsi que la sortie fictive de la retenue, constitueront les sorties du système et rejoindront les eaux sorties du système Botijlaca pour alimenter, en aval, le système de Cuticucho.

4.1.5 Le système Cuticucho

4.1.5.1 Description

Nous ne ferons pas de bilan sur le Dique Cuticucho qui alimente l'usine Cuticucho. Ce Dique a un fonctionnement journalier comparable à celui de Botijlaca (Cf. 3.1.2.1 - systèmes contenant des retenues négligeables).

Il récupère les apports de l'ensemble des systèmes précédents, ainsi que les écoulements produits par deux petits bassins versants situés en amont de l'usine, en captant l'eau du Rio Zongo. Dans notre modèle, tous ces apports seront stockés dans la variable "entrée Cuticucho". Un canal transporte ensuite l'eau nécessaire à l'alimentation de l'usine, en récupérant au passage l'eau captée dans le bassin d'Ulma Paca.

Ensuite nous comparons le volume total transporté par le canal à la demande de l'usine. Le résultat de cette comparaison est contenu dans la variable "débordement dique et canal Cuticucho". Il correspond à la somme des débordements qui, sur le terrain, ont lieu sur le canal et au niveau du Dique. Cette comparaison nous sert de critère de calage. (Cf. 3.2.1.2.2)

Les eaux turbinés rejoignent les eaux de débordement à l'aval de l'usine dans le lit du Rio Zongo.

4.1.5.2 Résultats

A partir de ce système, la vallée s'encaisse un peu plus et la végétation devient de plus en plus dense. Le bassin d'Ulma Paca n'a pas été visité, mais nous considérons que, comme pour le reste du système Cuticucho, il y a un débit de base. Ce bassin ayant une alimentation glaciaire, son facteur de débit de base sera du même ordre que celui du bassin de Taypi Khuchu.

On obtient, pour les deux petits bassins versants en aval de Botijlaca:

coefficient de ruissellement $a = 0.2$

et un facteur de débit de base $b = 0.001$ m/jour soit 1000 m³/jour/km²

et pour le bassin de Ulma Paca:

coefficient de ruissellement $a = 0.2$

et un facteur de débit de base $b = 0.002$ m/jour soit 2000 m³/jour/km²

Nous pouvons visualiser le modèle proposé sur la Figure 28:

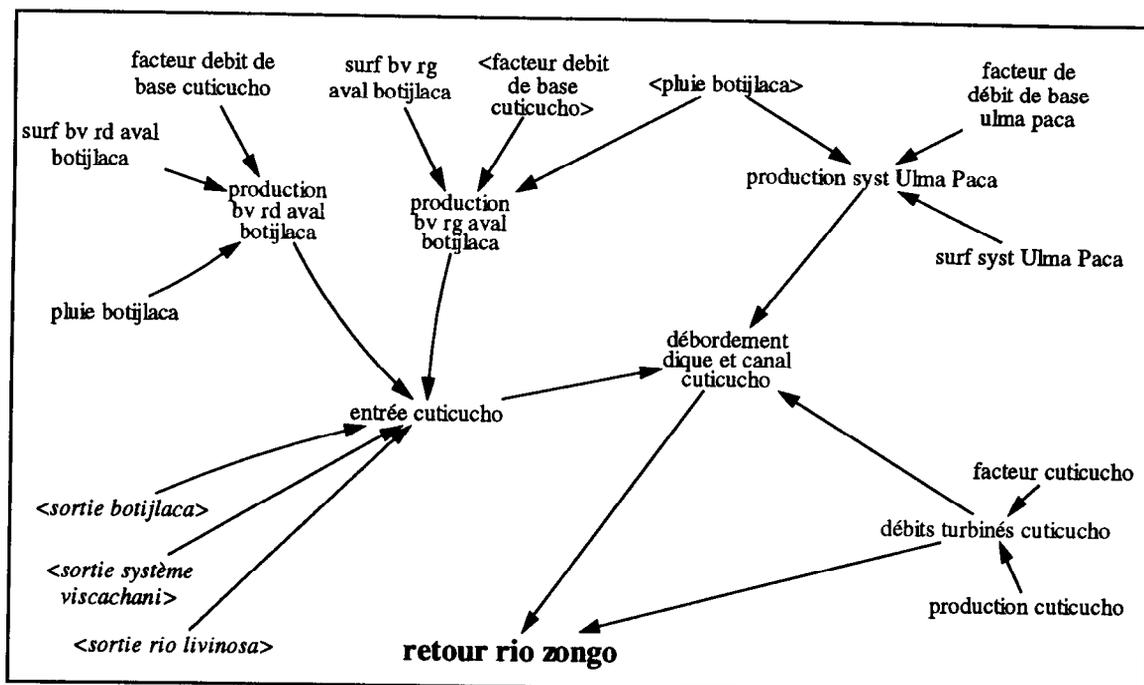


Figure 28: Modèle de fonctionnement du système de Cuticucho

Nous voyons ainsi le résultat du calage au niveau du débordement sur la figure 29:

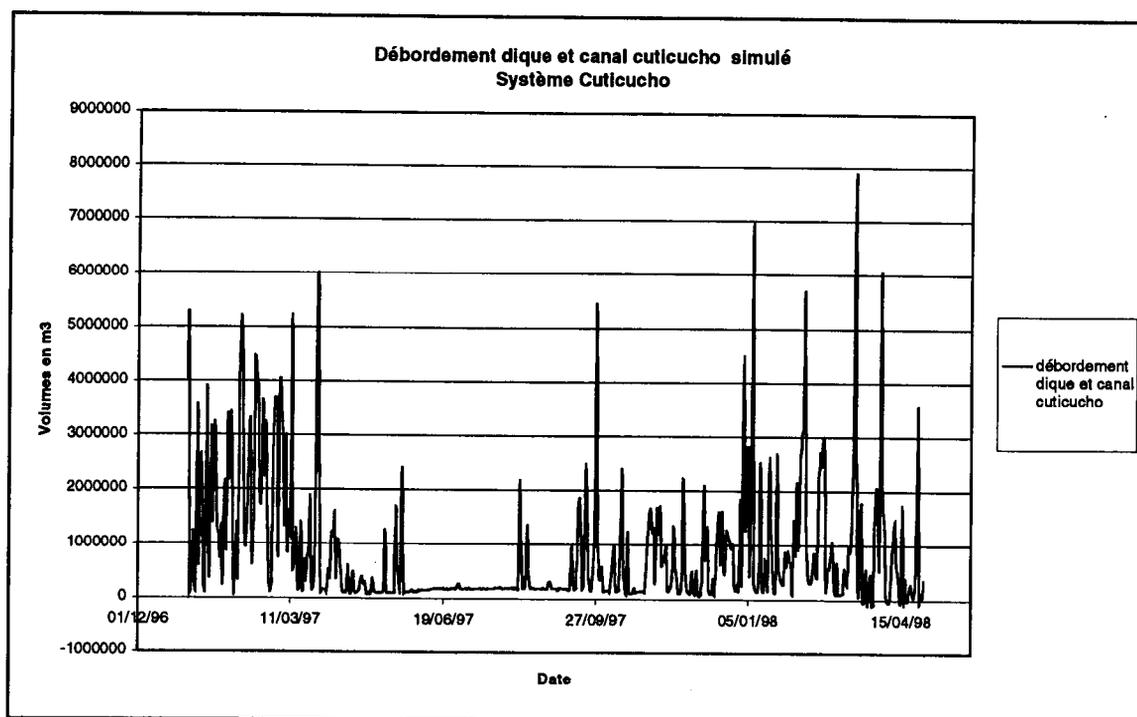


Figure 29: Débordement au niveau du dique et du canal Cuticucho.

On constate qu'à partir de début mars 1998, les débordements ont tendance à prendre des valeurs négatives les jours sans pluie. A la même période, l'usine de Cuticucho qui a subi des agrandissements, triple presque sa production. Cette période étant celle de la saison des pluies, l'alimentation de l'usine ne pose problème que les jours sans pluie. Il est très probable que le déficit observé dans le calcul du débordement, soit du au fait que notre modèle ne prend pas en compte les volumes stockés dans les Diques Botijlaca et Cuticucho, (Cf. 3.2.1.2.2). Le déficit observé lors du calcul du débordement n'est que de quelques dizaines de milliers de m3. Les capacités de stockage des deux Diques réunies atteignent 25 000 m3, (Cf.

annexe B). Une vidange des deux Diques les jours sans pluie peut suffire à combler le déficit d'alimentation de l'usine Cuticucho que nous observons. Ceci souligne l'importance de ces deux retenues intermédiaires et la nécessité de les prendre en compte dans nos travaux ultérieurs.

A partir de l'usine de Cuticucho, le captage pour l'usine suivante est fait directement sur le Rio Zongo, au niveau de l'usine. La prise, généralement composée d'un seuil qui barre le Rio et dirige l'eau vers un conduit dont l'accès est contrôlé par des vannes, se trouve à côté de l'usine. Ainsi l'eau turbinée, en sortant de l'usine, tombe directement dans le conduit et l'ensemble est dirigé vers la conduite forcée de l'usine suivante. Ce système se retrouve sur toutes les usines situées en aval, (Santa Rosa, Sainani, Chururaqui, Harca, Cahua).

Pour le dernier système que nous allons aborder, le critère de calage sera aussi la valeur des débordements calculés. Ces débordements ont lieu sur le terrain au niveau de ces prises.

4.1.6 Le système Santa Rosa et Sainani

4.1.6.1 Description

Ce système est le dernier que nous allons étudier dans la vallée. Il englobe les réseaux d'alimentation de deux usines, Santa Rosa 1-2 et Sainani. Santa Rosa 1 et 2 sont en fait deux turbines différentes situées dans la même usine, qui se différencient parce qu'elles sont alimentées par des bassins versants différents. Santa Rosa 1 est alimentée par les eaux du Rio Zongo et Santa Rosa 2 par les eaux captées sur le Rio Coscapa.

Pour la vallée de Coscapa, nous prendrons les valeurs de pluviométrie mesurées à la station de l'usine de Botijlaca. Nous allons caler les coefficients a et b de la production d'écoulement des versants en vérifiant que le débordement au niveau de la prise d'eau du canal Coscapa, qui amène l'eau à l'usine Santa Rosa 2, ne soit pas négatif.

Pour ce qui concerne l'usine Santa Rosa 1, l'eau qui l'alimente est captée dans le Rio Zongo, au niveau de l'usine de Cuticucho (comme nous l'avons expliqué dans le paragraphe précédent). Avant d'arriver sur la prise, les écoulements produits par la vallée située entre l'usine Cuticucho et le Dique, en aval du canal Cuticucho, sont captés dans le Rio Zongo.

Par conséquent ils participeront à l'alimentation de l'usine.

La prise d'eau du canal Sainani qui se trouve au niveau de l'usine Santa Rosa 1, alimente l'usine de Sainani et récupère les eaux turbinées à Santa Rosa 1, ainsi que celles turbinées à Santa Rosa 2. Dans notre modèle, l'ensemble de ces apports, auxquels s'ajoutent les écoulements produits par les versants adjacents, sont comparés à la demande de l'usine de Sainani lors du calcul du débordement à la prise Sainani. La construction du modèle pour ce système est visible sur la figure 30.

Le calcul du débordement au niveau de cette prise, nous permettra de juger de la cohérence de notre construction et de caler les coefficients de production d'écoulement des versants.

Le calage sera fait, comme auparavant, de façon à ne pas avoir de débordements négatifs, mais aussi, dans le but d'avoir des débordements quasi nuls au cours de la saison sèche. En effet cela constitue un paramètre de calage tiré de l'expérience des opérateurs de la Cobee, (Cf. 3.1.2.6 - Conclusion).

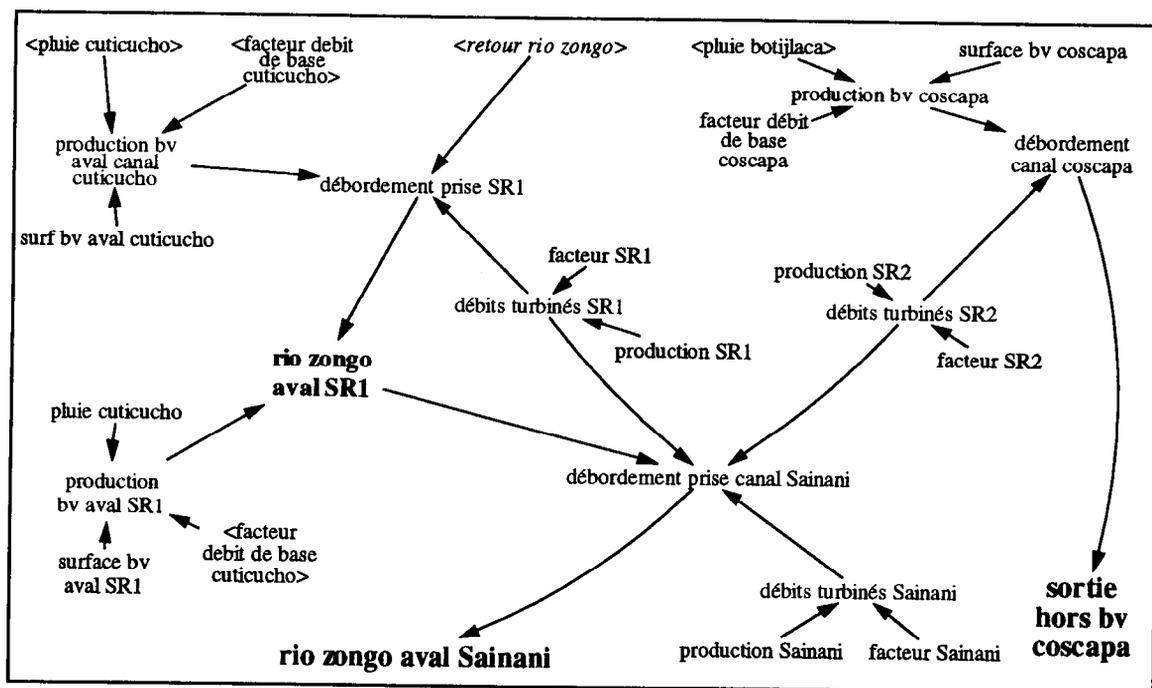


Figure 30: Modèle de fonctionnement du système de Sainani et Santa Rosa

4.1.6.2 Résultats

Dans la vallée de Coscapa, on obtient:

coefficient de ruissellement $a = 0.15$

facteur de débit de base $b = 0.0016$ m/jour soit 1600 m³/jour/km²

Pour la vallée du Rio Zongo, on obtient:

coefficient de ruissellement $a = 0.15$

facteur de débit de base $b = 0.001$ m/jour soit 1000 m³/jour/km²

Nous pouvons voir sur la figure 31, le débordement résultant:

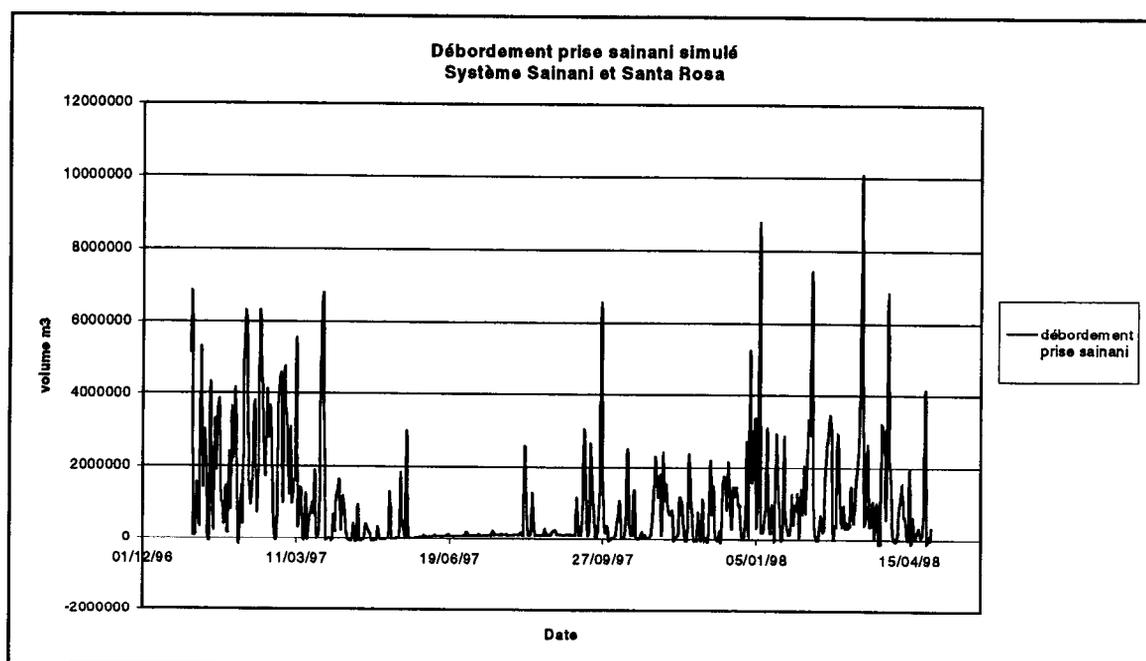


Figure 31: Débordement à la prise du canal Sainani

4.2 *Commentaires*

Nous constatons que, malgré les erreurs introduites par les différentes approximations (pluviométrie, calcul des débits turbinés, stratégies de gestion choisie), les résultats obtenus sont corrects.

La variation de volume des différents retenues, excepté celle de Viscachani par manque de données, semblent avoir été bien approchées.

Les quelques valeurs négatives observées au niveau des débordements en bas de la vallée, sont probablement dues aux volumes stockés dans les petits Diques intermédiaires que nous ne prenons pas en compte au pas de temps journalier, (Cf. 4.1.5.2).

La saison sèche est bien marquée par des débordements presque nuls. Le petit pic observé à la mi-juillet, s'explique certainement par un épisode pluvieux isolé dont l'extrapolation en dehors de son contexte réel, conséquent des approximations réalisées, crée un apport qui n'a pas forcément existé. Nous avons vu en effet, que le gradient altimétrique des précipitations peut être mis en défaut par l'orientation des vallées. Par conséquent, lorsque nous extrapolons la pluviométrie, rien ne prouve qu'il ait vraiment plu à l'endroit où nous appliquons l'extrapolation.

Nous considérons que la méthodologie de construction de ces systèmes hydrauliques est convenable.

5 Conclusions

Nous avons représenté le fonctionnement hydraulique et hydrologique de la vallée du Zongo, avec des hypothèses de travail et des coefficients d'écoulement vraisemblables, en construisant un modèle hydraulique dynamique qui s'appuie sur le langage de simulation Vensim®. Les coefficients d'écoulement retenus sont présentés dans le tableau 4:

Sous bassin	Système	Coefficient de Ruissellement	Débit de base (m ³ /jour/km ²)
Zongo	Zongo	0,15	0
Tiquimani	Tiquimani	0,10	0
Taypi khuchu	Botijlaca	0,20	2000
Liviñosa	Botijlaca	0,20	180
Botijlaca	Botijlaca	0,20	1600
Viscachani	Viscachani	0,20	100
Amont Dique	Cuticucho	0,20	1000
Ulma Paca	Cuticucho	0,20	2000
Coscapa	Sainani - SR	0,15	1600
Zongo	Sainani - SR	0,15	1000

Tableau 4: Coefficients d'écoulement pour chaque système hydraulique.

Les valeurs de ces coefficients ne prétendent pas être définitives puisqu'elles ont été fixées par tâtonnement en se basant sur des valeurs approximatives de pluviométrie. Elles permettent uniquement de fixer un ordre de grandeur et de caractériser grossièrement les différents sous-bassins de la vallée du Zongo entre le sommet et l'usine de Sainani.

La méthodologie appliquée pour intégrer dans la construction du modèle les facteurs de gestion du système hydroélectrique semble bien approcher la réalité. La validité de ce modèle sera testée dès que des séries de données fiables seront disponibles sur une période significative.

L'intérêt principal de l'utilisation de Vensim® se situe à ce niveau là. Ce langage permet de faire très rapidement des changements de fond dans la construction du modèle, s'ils s'avèrent nécessaires. Nous pourrions donc affiner la validité du modèle facilement.

Nous avons réalisé un inventaire de toutes les informations existantes sur la vallée et son aménagement. Ce travail nous a permis de préciser les points que nous tenterons de développer ultérieurement, pour améliorer la connaissance du système.

Nous avons constaté qu'il est important de mener une étude bien plus approfondie, sur les précipitations dans la vallée. Il serait intéressant par exemple d'installer des pluviographes dans les vallées de Liviñosa, Taypi Khuchu et Ulma Paca, pour connaître les intensités de précipitation. D'autre part il faudrait isoler un bassin en altitude, qui ait une alimentation strictement pluviale, pour pouvoir appréhender l'influence de l'alimentation glaciaire sur la production d'écoulement des versants.

Une étude plus approfondie, basée sur une période de mesures plus longue, des mesures de pluviométrie corrigées, l'installation de nouvelles stations pluviographiques et une campagne de mesure des caractéristiques du système hydroélectrique (débit nominaux des canaux, hauteur des seuils de débordement, la topographie des retenues, ...), sera menée à partir d'octobre 1998. Le but de ce travail sera d'établir un modèle de production d'écoulements pour les versants de très haute altitude de la Cordillère des Andes et fera l'objet d'une thèse à l'Orstom, sous la direction de Pierre Chevallier.

Ce travail sera effectué en parallèle avec un autre travail de thèse, qui sera réalisé par Jean Emmanuel Sicart, sous la direction de Pierre Ribstein, et qui visera à établir un modèle de fonte des glaciers de la vallée du Zongo. Ces deux modèles pourront ensuite être intégrés comme des modules de calcul dans le schéma hydraulique global que nous avons construit à l'aide de Vensim®, et constituer ainsi un excellent outil d'aide à la décision pour l'exploitation hydroélectrique de la vallée du Zongo. D'autres applications peuvent être envisagées en changeant de contexte: captage pour l'alimentation urbaine, irrigation.

Par ailleurs, il pourra permettre de mieux comprendre l'influence du phénomène ENSO sur les différents étages de la vallée et donc d'avancer dans l'étude de celui-ci, mais aussi, de façon plus générale sur les impacts de la variabilité climatique sur ce type d'environnement.

Bibliographie

- BERTHIER E., 1997, Reconstitution des débits de trois bassins englacés des Andes Boliviennes, *Mémoire de 2^{ème} année de Magistère, ENSP*, 44 p
- COVARRUBIAS A., 1996, Modélisation hydraulique et hydrologique d'un réseau de captage dans la cordillère des Andes, La vallée de Toconce, (2^{ème} région du Chili), *Mémoire de DEA, USTL*, pp:9-39
- CURINIER E., 1995 - Importance du recouvrement glaciaire sur les régimes hydrologiques: Etude du bassin versant du lac ZONGO, *Rapport de 3^{ème} année ISIM*, pp: 9-13; 35 - 42
- FRANCOU B., RIBSTEIN P., 1995 - Glaciers et évolutions climatiques dans les Andes Boliviennes; Glaciers Zongo et Chacaltaya, Cordillère royale, 16° S, *bulletin IFEA*, 24(1), pp: 23 - 36
- JIN LEE, octobre 1993, A formal approach to hydrological model conceptualization, *Hydrological science*, 28, 5, pp: 391 - 420.
- MACAREZ F., 1997, Impact du phénomène El Niño sur les événements de la vallée du Zongo, Cordillère Royale, Bolivie; *Mémoire de fin d'études, ISTOM*, 68 p.
- REINHARDT I., décembre 1997, Analyse des composantes naturelles et artificielles de la ressource en eau de la vallée de Zongo en Bolivie, Etude préliminaire et préparation d'une modélisation hydrologique, *Mémoire de diplôme postgrade en Hydrologie, EPFL*, 85 p.
- RIBSTEIN P.;TIRIAU E.;FRANCOU B.;SARAVIA R., 1995 - Tropical climate and glacier hydrology: a case study in Bolivia, *Journal of hydrology* 165, pp: 221 - 234
- RIGAUDIERE P., RIBSTEIN P.; B.FRANCOU, B.POUYAUD, SARAVIA R., Mars 1995, Un modèle hydrologique du glacier Zongo, *informe N° 44 Orstom*, Bolivie, 90 p.
- RIGAUDIERE P., RIBSTEIN P.; B.FRANCOU, B.POUYAUD, SARAVIA R., 1995, Mesures météorologiques, hydrologiques et glaciologiques sur le glacier Zongo, Année hydrologique 1993-1994, *Informe N°43, Orstom*, Bolivie,
- TAMAYO ALEGRE W., 1996, Influencia de los glaciares en el comportamiento hidrológico de cuencas de alta montaña: Estudio de casos en Perú y Bolivia, *Mémoire de fin d'études, UNASAM - Huaraz, Peru*, 152 p, pp: 23; 25

Annexe A

Liste et position des pluviomètres totalisateurs, (Macarez, 1997):

n°	NOM / type Profondeur pluviomètre	LIEU ALTITUDE approximative	POSITION GPS	Mise en service
1	Charquini / 2000 121.4 cm	Pied du glacier Charquini norte 4955 m	Pos : S 16°17'23.8" W 68°06'27.2"	18/09/97
2	Maman Kota / 2000 121.4 cm	Laguna Maman Kota ou Canada 4815 m	Pos : S 16°16'47.0" W 68°06'24.5"	18/09/97
3	Wara Warani / 2000 121.4 cm	Laguna Wara Warani 4630 m	Pos : S 16°11'50.0" W 68°06'53.6"	30/09/97
4	Bajo Viscachani / 200 200.5 cm	Versant Tiquimani 4190 m	Pos : S 16°11'09.0" W 68°07'31.2"	03/10/97
5	Rios Liviñosa et Taypi Khuchu/ 200 199.3 cm	Confluent Taypi Khuchu et Liviñosa 3855 m	Pos : S 16°12'09.9" W 68°09'19.1"	26/09/97
6	Rio Liviñosa / 200 201.3 cm	Laguna Liviñosa 4485 m	Pos : S 16°12'07.1" W 68°11'35.6"	26/09/97
7	Hankohuma / 2000 121.8 cm	Rio Taypi Khuchu 4105 m	Pos : S 16°13'20.7" W 68°09'06.0"	18/09/97
8	Taypi Khuchu / 2000 121.3 cm	Fin du vallon du Taypi Khuchu 4450 m	Pos : S 16°14'23.4" W 68°09'44.0"	26/09/97
9	Santa Rosa / 200 199.3 cm	Usine Sta Rosa 2505 m	Pos : S 16°07'55.8" W 68°06'29.5"	01/10/97
10	Silliscapa / 200 200 cm	Estanque Cerro Cohuisa 3465 m	Pos : S 16°07'34.4" W 68°07'08.7"	03/10/97
11	Pueblo Coscapa / 200 201.1 cm	Estancia Coscapa 3600 m	Pos : S 16°07'12.8" W 68°08'26.4"	07/10/97
12	Rio Wila Llojeta / 200 199.7 cm	Rio Wila Llojeta 3880 m	Pos : S 16°07'33.8" W 68°11'31.8"	06/10/97
13	Condoriri / 200 200.5	Fin de vallon, rio Sancayuni 4450 m	Pos : S 16°09'08.1" W 68°13'41.7"	06/10/97
14	Sainani / 200 201 cm	Usine Sainani 2210 m	Pos : S 16°07'24.5" W 68°05'21.5"	01/10/97
15	Rio Sainani / 200	Rio Choque Khuchu 3200 m	Pos : S 16°08'38.4" W 68°04'43.8"	30/10/97
16	Chururaqui / 200 200.5 cm	Usine Chururaqui 1830 m	Pos : S 16°06'20.7" W 68°04'05.5"	01/10/97
17	Pueblo Zongo / 200 200 cm	Pueblo Zongo 2030 m	Pos : S 16°06'06.3" W 68°03'01.9"	01/10/97
18	Rio Harca / 200	Rio Harca Jahuirá 3890 m	Pos : S 16°08'59.2" W 68°02'20.5"	30/10/97

Données du mois de octobre 1997:

#	Ubicación	H (cm.)	h1 (cm.)	h2 (cm.)	φ (cm.)
1	Rios Liviñosa y Taipicucho	200.0	190.0	10.0	50
2	Rio Liviñosa	203.5	191.5	12.0	50
3	Hankohuma	121.5	108.5	13.0	50
4	Rio Taipicucho	121.5	110.0	11.5	50
5	Charquini	121.3	107.0	14.3	50
6	Mamankota	121.3	108.6	12.7	50
7	Guaraguarani	121.3	112.3	9.0	50
8	Santa Rosa		s/l	s/l	
9	Sainani		s/l	s/l	
10	Chururaqui		s/l	s/l	
11	Pueblo Zongo		s/l	s/l	
12	Sillascapa	201.0	187.0	14.0	50
13	Bajo Viscachani	200.0	194.0	6.0	50
14	Pueblo Coscapa	201.0	193.0	8.0	50
15	Río Wila Llojeta	200.0	193.5	6.5	50
16	Condoriri	200.0	194.0	6.0	50
17	Río Harca	200.0	199.0	1.0	50
18	Río Sainani	200.0	199.0	1.0	50

Données du mois de novembre 1997:

#	Ubicación	H (cm.)	h1 (cm.)	h2 (cm.)	φ (cm.)
1	Ríos Liviñosa y Taipicucho	200.0	181.0	19.0	22
2	Río Liviñosa	121.5	108.0	13.5	50
3	Hankohuma	121.5	102.0	19.5	50
4	Río Taipicucho	121.5	104.5	17.0	50
5	Charquini	121.5	99.5	22.0	50
6	Mamankota	121.5	101.0	20.5	50
7	Guaraguarani	121.5	104.0	17.5	50
8	Santa Rosa	200.0	179.0	21.0	22
9	Sainani	200.0	173.9	26.1	22
10	Chururaqui	200.0	173.3	26.7	22
11	Pueblo Zongo	200.0	156.0	44.0	22
12	Sillascapa	200.0	178.0	22.0	22
13	Bajo Viscachani	200.0	190.0	10.0	22
14	Pueblo Coscapa	200.0	182.0	18.0	22
15	Río Wila Llojeta	200.0	188.0	12.0	22
16	Condoriri	200.0	189.0	11.0	22
17	Río Harca	200.0	174.0	26.0	22
18	Río Sainani	200.0	*	*	50

Données du mois de décembre 1997:

#	Ubicación	H (cm.)	h1 (cm.)	h2 (cm.)	φ (cm.)
1	Ríos Liviñosa y Taipicucho	200.0	173.5	26.5	22
2	Río Liviñosa	200.0	180.0	20.0	22
3	Hankohuma	121.5	96.5	25.0	50
4	Río Taipicucho	121.5	98.0	23.5	50
5	Charquini	121.5	90.5	31.0	50
6	Mamankota	121.5	91.5	30.0	50
7	Guaraguarani	121.5	93.8	27.7	50
8	Santa Rosa	200.0	152.0	48.0	22
9	Sainani	200.0	143.0	57.0	22
10	Chururaqui	200.0	136.0	64.0	22
11	Pueblo Zongo	200.0	110.0	90.0	22
12	Sillascapa	200.0	135.0	65.0	22
13	Bajo Viscachani	200.0	183.2	16.8	22
14	Pueblo Coscapa	200.0	162.0	38.0	22
15	Río Wila Llojeta	200.0	182.0	18.0	22
16	Condoriri	200.0	184.0	16.0	22
17	Río Harca	200.0	146.0	54.0	22
18	Río Sainani	200.0	185.0	15.0	22

Données du mois de janvier 1998:

#	Ubicación	H (cm.)	h1 (cm.)	h2 (cm.)	φ (cm.)
1	Rios Liviñosa y Taipicucho	200.0	165.0	35.0	22
2	Río Liviñosa	200.0	170.0	30.0	22
3	Hankohuma	121.5	81.5	40.0	50
4	Río Taipicucho	121.5	83.5	38.0	50
5	Charquini	121.5	69.0	52.5	50
6	Mamankota	121.5	69.0	52.5	50
7	Guaraguarani	121.5	74.5	47.0	50
8	Santa Rosa	200.0	136.5	63.5	22
9	Sainani	200.0	110.5	89.5	22
10	Chururaqui	200.0	106.5	93.5	22
11	Pueblo Zongo	200.0	136.0	64.0	22
12	Sillascapa	200.0	100.0	100.0	22
13	Bajo Viscachani	200.0	180.5	19.5	22
14	Pueblo Coscapa	200.0	137.0	63.0	22
15	Río Wila Llojeta	200.0	169.0	31.0	22
16	Condoriri	200.0	179.0	21.0	22
17	Río Harca	200.0	115.0	85.0	22
18	Río Sainani	200.0	.	.	22

Données du mois de février 1998:

#	Ubicación	H (cm.)	H1 (cm.)	h2 (cm.)	φ (cm.)
1	Rios Liviñosa y Taipicucho	200.0	147.0	53.0	22
2	Río Liviñosa	200.0	161.0	39.0	22
3	Hankohuma	121.5	71.5	50.0	50
4	Río Taipicucho	121.5	69.5	52.0	50
5	Charquini	121.5	53.0	68.5	50
6	Mamankota	121.5	52.0	69.5	50
7	Guaraguarani	121.5	58.5	63.0	50
8	Santa Rosa	200.0	111.0	89.0	22
9	Sainani	200.0	80.0	120.0	22
10	Chururaqui	200.0	71.3	128.7	22
11	Pueblo Zongo	200.0	30.0	170.0	22
12	Sillascapa	200.0	50.0	150.0	22
13	Bajo Viscachani	200.0	177.0	23.0	22
14	Pueblo Coscapa	200.0	116.0	84.0	22
15	Río Wila Llojeta	200.0	159.0	41.0	22
16	Condoriri	200.0	161.0	39.0	22
17	Río Harca	200.0	50.0	150.0	22
18	Río Sainani	200.0	96.0	104.0	22

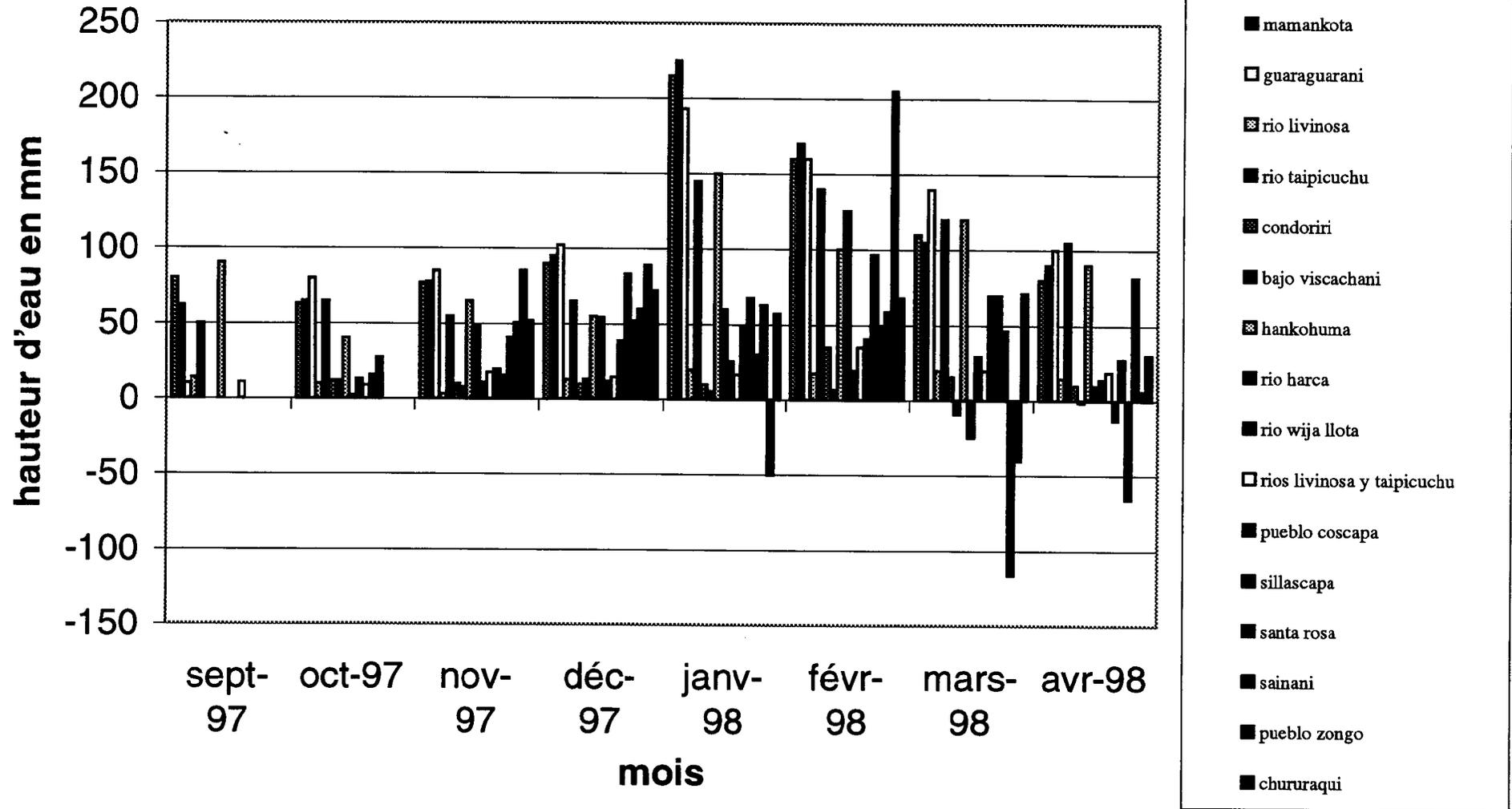
Données du mois de mars 1998:

#	Ubicación	H (cm.)	H1 (cm.)	h2 (cm.)	φ (cm.)
1	Rios Liviñosa y Taipicucho	200.0	137.0	63.0	22
2	Rio Liviñosa	200.0	151.0	49.0	22
3	Hankohuma	121.5	59.5	62.0	50
4	Rio Taipicucho	121.5	57.5	64.0	50
5	Charquini	121.5	42.0	79.5	50
6	Mamankota	121.5	41.5	80.0	50
7	Guaraguarani	121.5	44.5	77.0	50
8	Santa Rosa	200.0	87.0	113.0	22
9	Sainani	200.0	140.1	59.9	22
10	Chururaqui	200.0	34.5	165.5	22
11	Pueblo Zongo	200.0	51.0	149.0	22
12	Sillascapa	200.0	14.0	186.0	22
13	Bajo Viscachani	200.0	182.0	18.0	22
14	Pueblo Coscapa	200.0	80.0	120.0	22
15	Río Wila Llojeta	200.0	144.0	56.0	22
16	Condoriri	200.0	153.0	47.0	22
17	Río Harca	200.0	63.0	137.0	22
18	Río Sainani	200.0	*	*	22

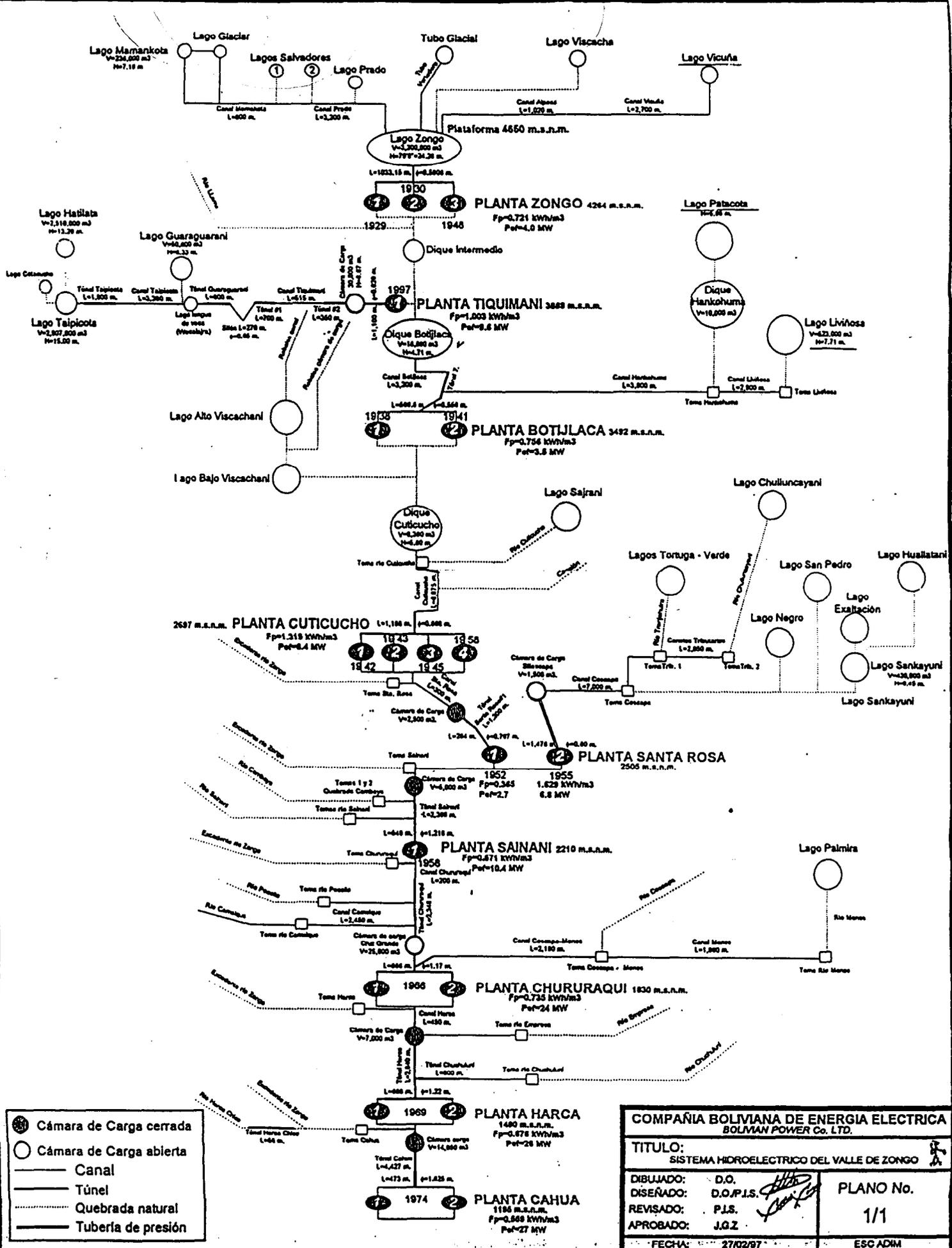
Données du mois de avril 1998:

#	Ubicación	H (cm.)	H1 (cm.)	h2 (cm.)	φ (cm.)
1	Rios Liviñosa y Taipicucho	200.0	127.5	72.5	22
2	Rio Liviñosa	200.0	143.5	56.5	22
3	Hankohuma	121.5	50.5	71.0	50
4	Rio Taipicucho	121.5	47.0	74.5	50
5	Charquini	121.5	34.0	87.5	50
6	Mamankota	121.5	32.5	89.0	50
7	Guaraguarani	121.5	34.5	87.0	50
8	Santa Rosa **	200.0	121.0	79.0	22
9	Sainani	200.0	98.0	102.0	22
10	Chururaqui	200.0	19.0	181.0	22
11	Pueblo Zongo	200.0	48.0	152.0	22
12	Sillascapa ***	200.0	200.0	0.0	22
13	Bajo Viscachani **	200.0	182.8	17.2	22
14	Pueblo Coscapa *	200.0	87.0	113.0	22
15	Río Wila Llojeta	200.0	137.0	63.0	22
16	Condoriri	200.0	148.0	52.0	22
17	Río Harca	200.0	58.0	142.0	22
18	Río Sainani	200.0	*	*	22

Hauteurs d'eau mensuelles en mm, classées par altitude décroissante



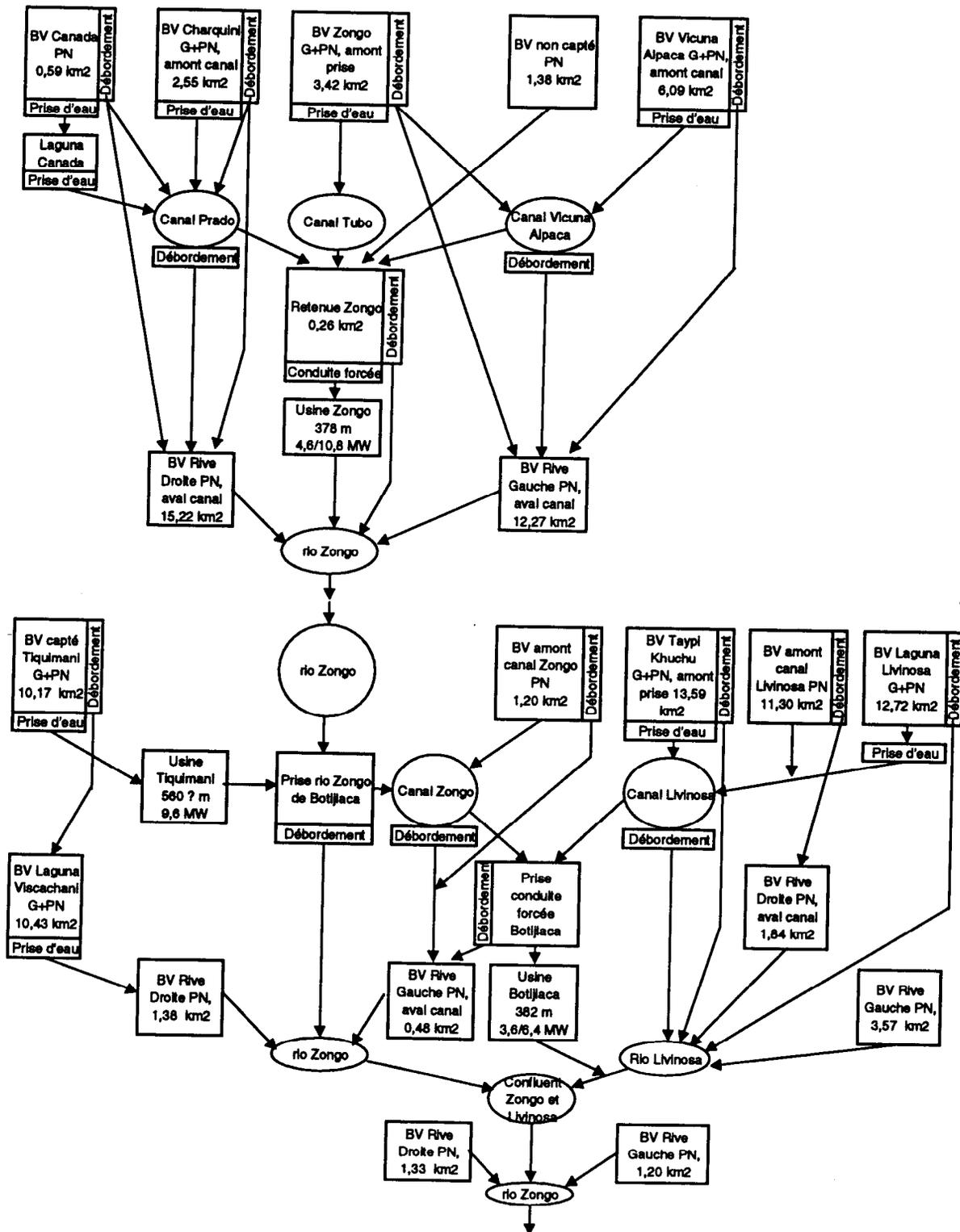
Annexe B

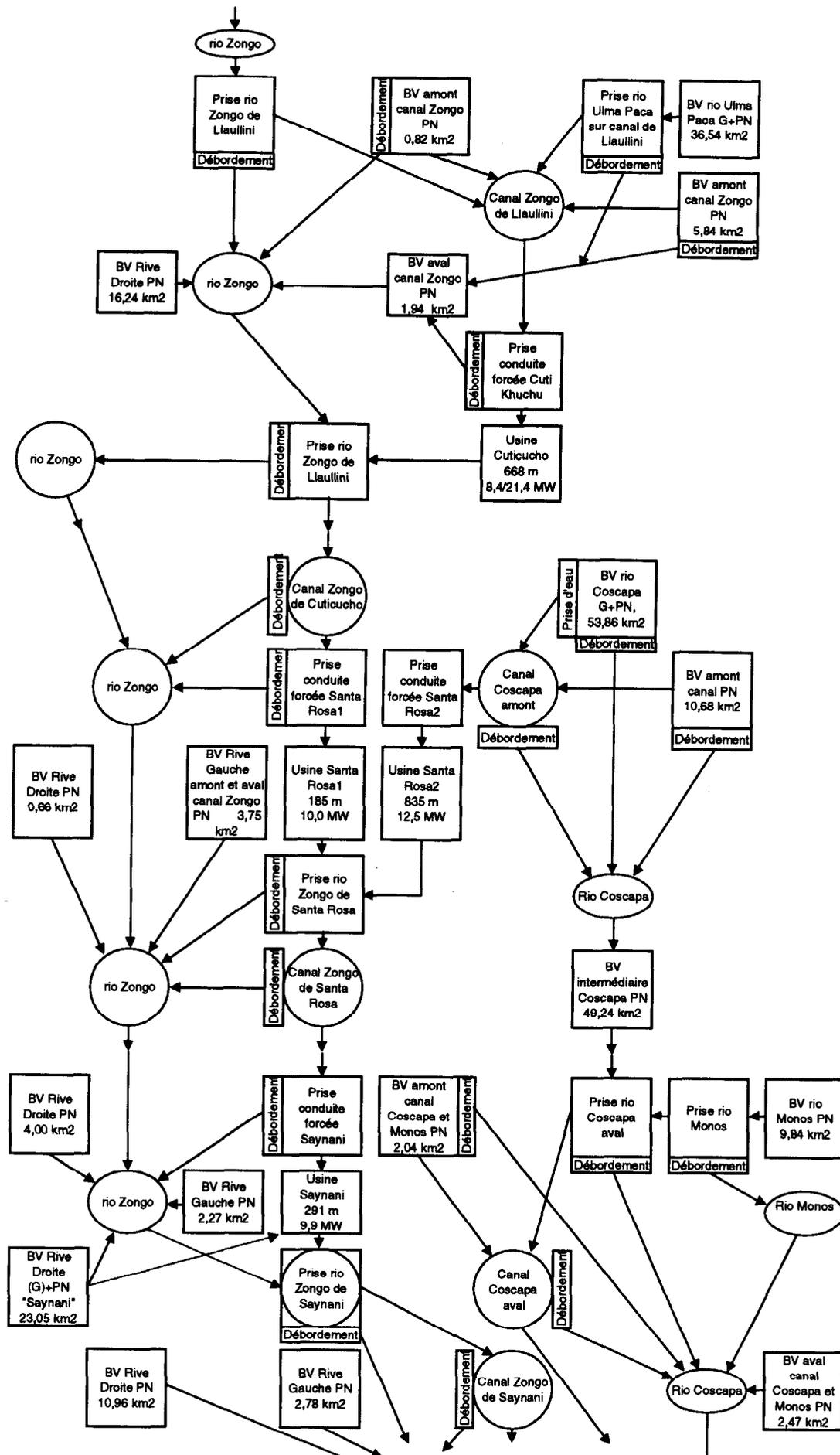


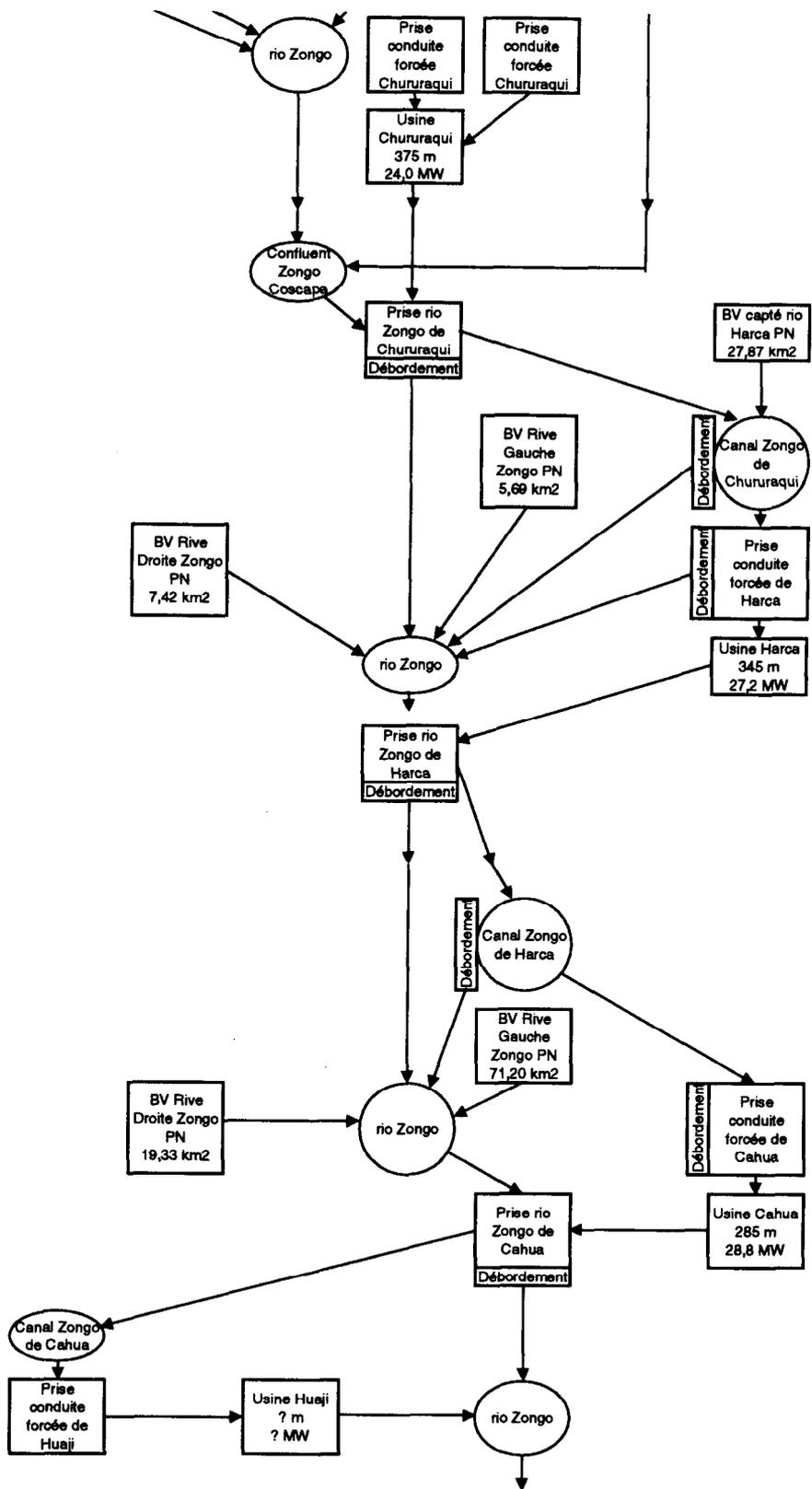
COMPAÑIA BOLIVIANA DE ENERGIA ELECTRICA BOLIVIAN POWER Co. LTD.	
TITULO: SISTEMA HIDROELECTRICO DEL VALLE DE ZONGO	
DIBUJADO: D.O.	PLANO No. 1/1
DISEÑADO: D.O./P.I.S.	
REVISADO: P.J.S.	
APROBADO: J.G.Z.	
FECHA: 27/02/87	ESC ADIM

Annexe C

Schéma d'organisation des écoulements dans le bassin versant du Rio Zongo (Pouyaud 1997):

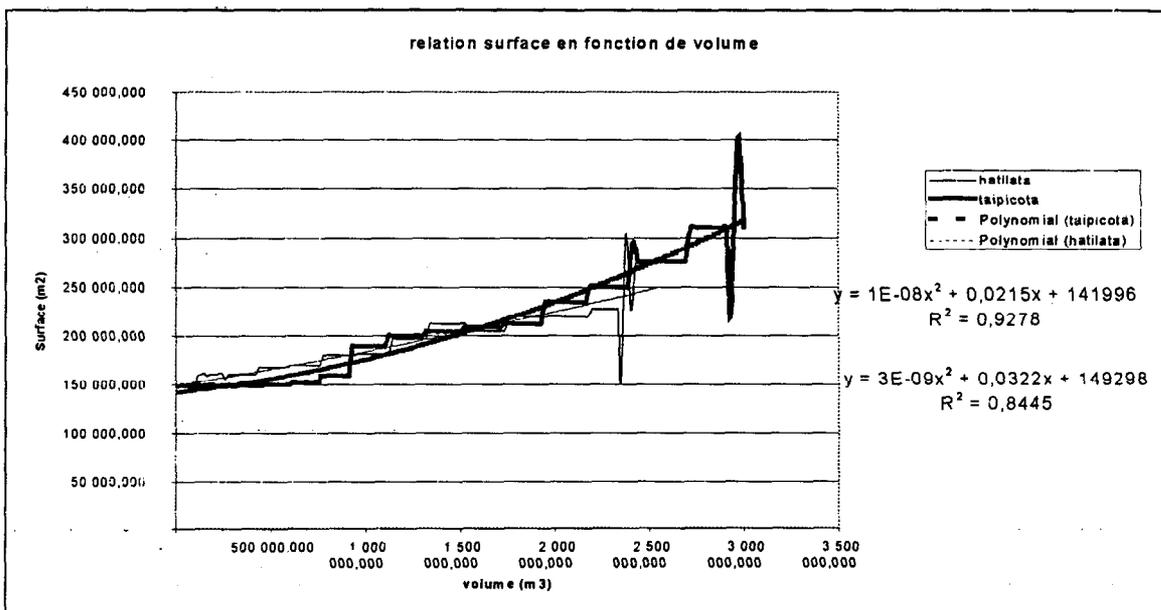
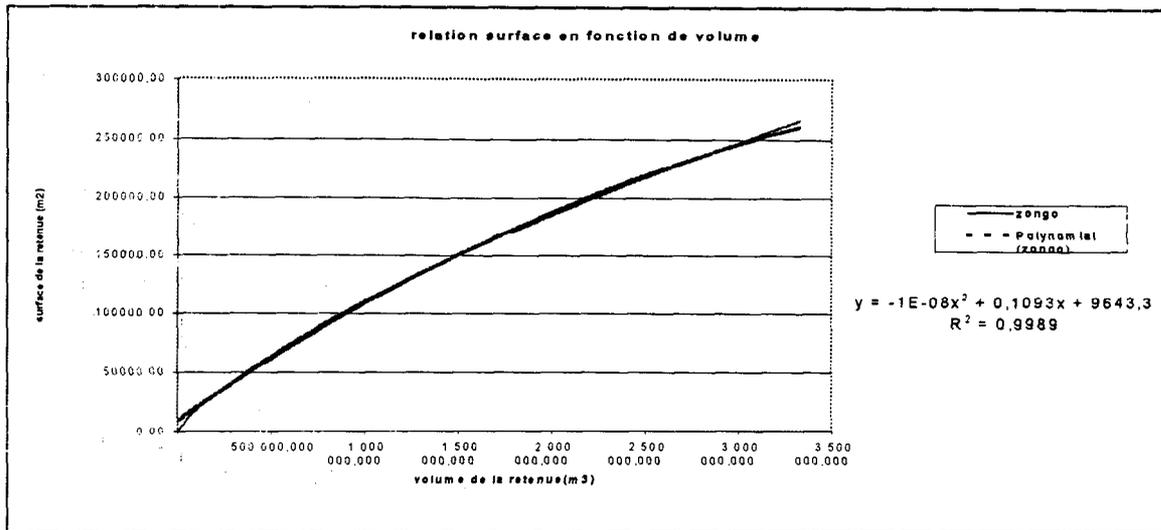
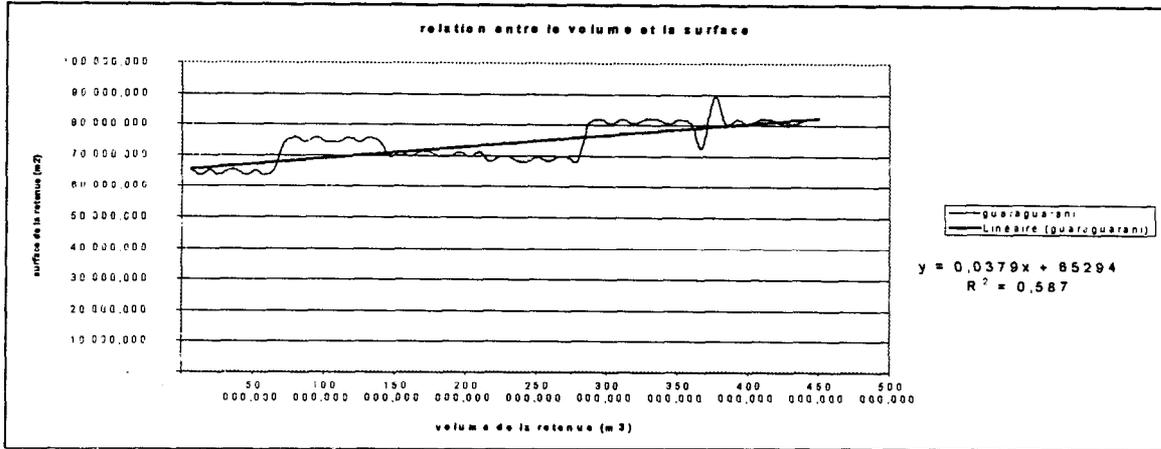


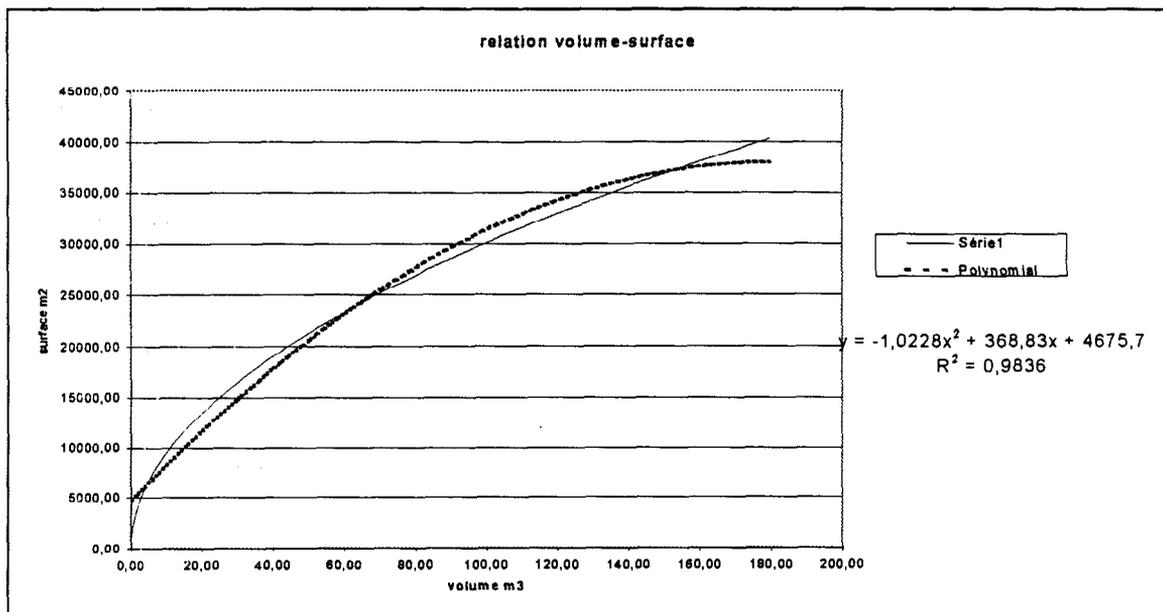
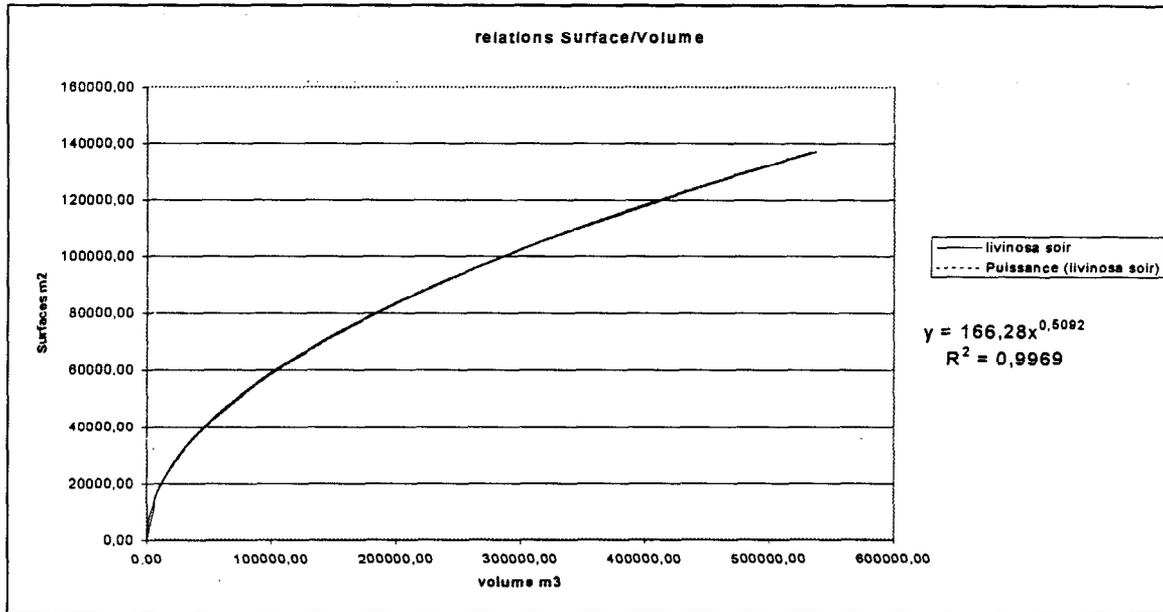




Annexe D

Courbes et équations Surface - Volume:



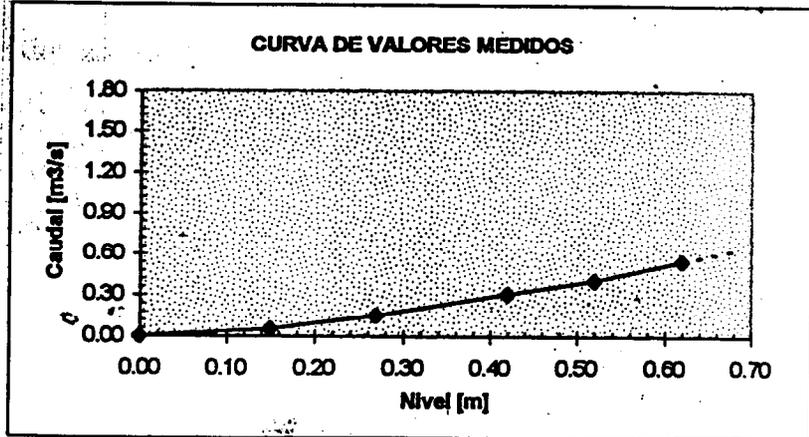


Annexe E

Résultats des jaugeages réalisés en août 1995 par l'Orstom:

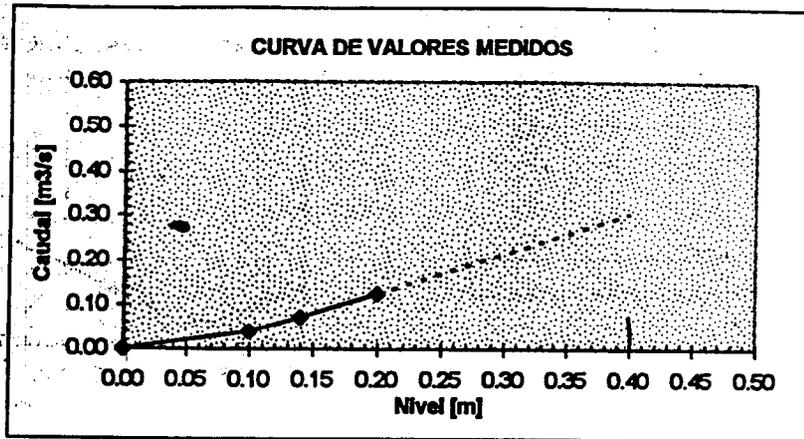
PLANTA BOTIJLACA - AFORO CANAL BOTIJLACA

DATOS AFORO 08/95	
NIVEL [m]	CAUDAL [m ³ /s]
0.00	0.000
0.15	0.053
0.27	0.152
0.42	0.304
0.52	0.404
0.62	0.548



PLANTA BOTIJLACA - AFORO CANAL LIVIÑOSA

DATOS AFORO 08/95	
NIVEL [m]	CAUDAL [m ³ /s]
0.00	0.000
0.10	0.038
0.14	0.071
0.20	0.125



PLANTA BOTIJLACA - AFORO CANAL HANKOHUMA

DATOS AFORO 08/95	
NIVEL [m]	CAUDAL [m ³ /s]
0.00	0.000
0.27	0.163
0.40	0.250
0.47	0.315

