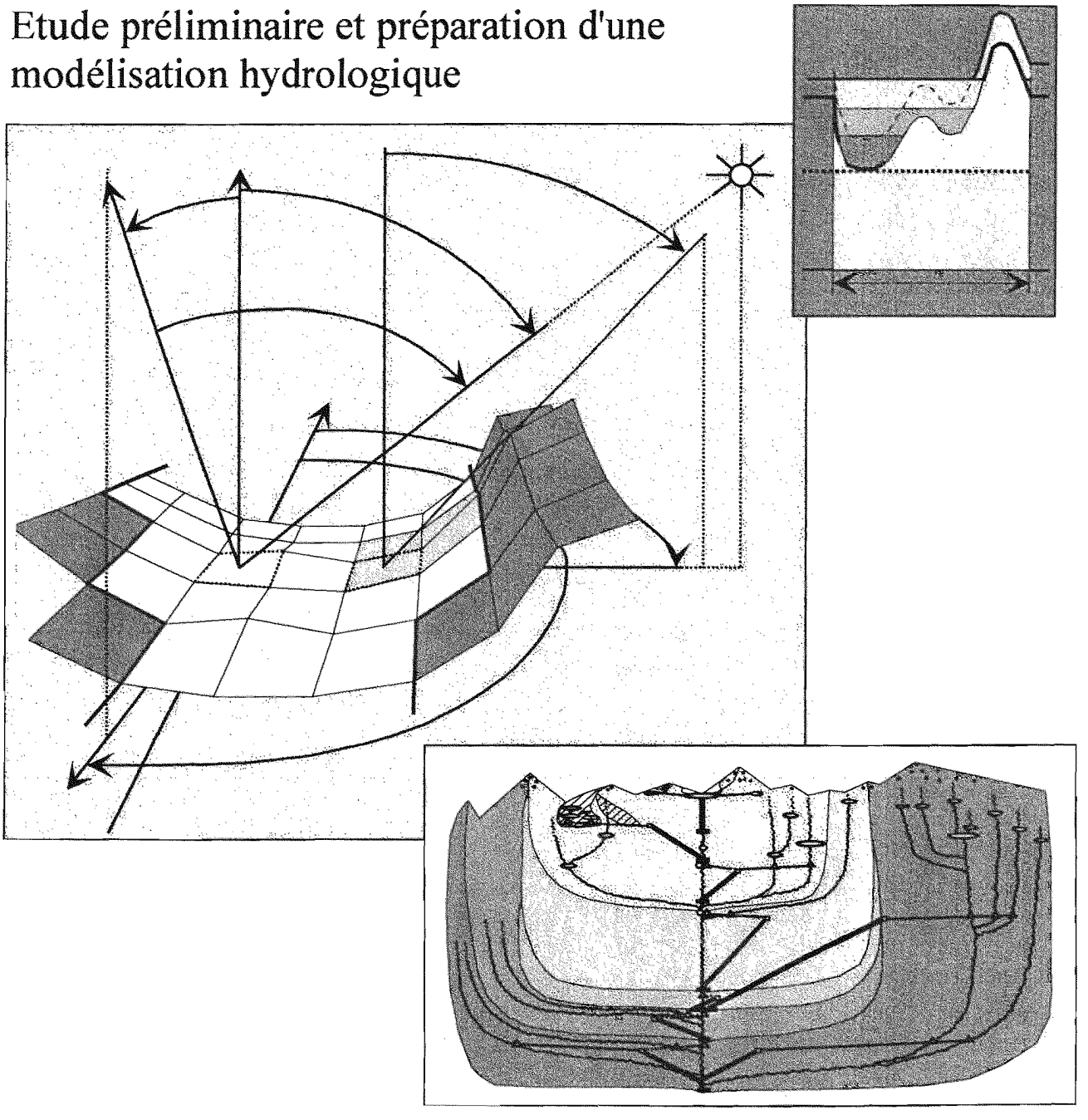
Analyse des composantes naturelles et artificielles de la ressource en eau de la vallée du Zongo en Bolivie

Etude préliminaire et préparation d'une modélisation hydrologique



Igor Reinhardt

Montpellier et La Paz, Décembre 1997

ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Mémoire de diplôme postgrade en hydrologie et aménagements encadré par Pierre Chevallier et Bernard Pouyaud (ORSTOM)

ORSTOM

Remerciements

Je voudrais remercier les personnes suivantes pour leur contribution à ce travail :

Pierre Chevallier, mon directeur de diplôme, qui a organisé mon stage à l'ORSTOM et qui a révisé (partiellement) le français du manuscrit. Sans ses suggestions et ses conseils ce rapport n'aurait pas sa forme actuelle.

Victor Ticona de la COBEE, de qui j'ai obtenu la plupart des données qui sont à la base de ce travail, et qui a consacré beaucoup de temps à répondre à mes questions. Sans sa contribution ce travail n'aurait pas pu être réalisé.

Yves Arnaud, avec qui j'ai passé des heures sur l'analyse des MNT. Son expérience en la matière et son aide généreuse ont permis l'ébauche de la modélisation de la fonte des glaciers.

Pablo Iturri de la COBEE, qui m'a assisté pour l'estimation des rendements des usines hydroélectriques.

Bernard Pouyaud, qui m'a généreusement reçu à La Paz et qui m'a donné quelques bons conseils pour ce travail.

Bernard Francou, qui a aimablement relu et corrigé une partie du manuscrit.

Tout les gens qui m'ont aidé dans des problèmes quotidiens, en particulier les employés de l'ORSTOM et de la COBEE en Bolivie, qui se sont montrés très aimables et hospitaliers.

Et finalement l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, qui a financé ce travail et mes études avec une bourse.

Table des matières

1. Introduction

1.1 Objectifs de l'étude

1.1.1 Le cadre du projet

Cette étude s'inscrit dans le cadre du programme «Neige et Glaciers Tropicaux » (NGT), qui cherche à évaluer l'impact de la variabilité climatique sur les systèmes hydrologiques dans les Andes tropicales. Ces systèmes hydrologiques sont très sensibles à la variabilité climatique (cf. FRANCOU, B. ET RIBSTEIN, P. (1995)). Leur fonctionnement est en effet souvent lié au régime des glaciers dans les hautes parties des Andes. Bien que ces glaciers tropicaux soient petits par rapport aux surfaces des bassins, leur rôle est important. Le climat dans ces régions tropicales est caractérisé par une saison des pluies relativement chaude et une saison sèche plus froide. En saison des pluies la contribution des glaciers aux écoulements des rivières peut être importante, mais c'est surtout en saison sèche ou dans les intersaisons que la fonte des glaciers devient le facteur principal du régime hydrologique. Jusqu'à présent les travaux réalisés dans le cadre du programme NGT se sont attachés surtout à l'étude du fonctionnement des glaciers. Depuis le début du programme en 1990, on est arrivé à assez bien comprendre le fonctionnement de ces glaciers. Un modèle à base physique pour la modélisation des débits de fonte des glaciers a été élaboré et donne des résultats probants (RIGAUDIERE, P., *et al*, 1995). Grâce à ces connaissances du fonctionnement des glaciers, on peut maintenant étendre la recherche aux hydrosystèmes immédiatement liés à leurs régimes. C'est souvent de ces hydrosystèmes que dépendent les activités de l'homme qui les influencent à leur tour. Les conséquences de la variabilité climatique sont donc d'un intérêt primordial pour la poursuite des activités humaines.

Les glaciers étudiés se trouvent dans la Cordillère Royale des Andes Boliviennes. Le glacier Zongo, dont le fonctionnement est le mieux étudié, couvre un flanc du massif du Huayna Potosi qui couronne la vallée du Zongo, et son écoulement alimente le cours d'eau principal de la vallée, la rivière Zongo. Sur les premiers quarante kilomètres de ce cours d'eau sont installés plusieurs usines hydroélectriques qui exploitent une chute de plus de 3000 m sur la courte distance. C'est ce qui a présidé au choix du bassin versant du Zongo pour cette étude, les activités de l'homme et les systèmes naturels s'y trouvant étroitement liés.

1.1.2 Buts généraux et buts de l'étude

Afin de pouvoir étudier les impacts de la variabilité climatique sur le régime hydrologique de la vallée du Zongo et les conséquences sur l'exploitation de la ressource en eau, on doit être capable de faire des prédictions sur le comportements des glaciers et sur la production des versants non glaciaires sous différents scénarios climatiques. Tant le développement d'un modèle hydrologique que son application lors d'une étude du fonctionnement de l'ensemble des systèmes naturels et du système hydraulique dédié à la production hydroélectrique rendent nécessaire d'éclairer les liaisons entre ces systèmes. Elles se manifestent principalement au travers des écoulements de la rivière Zongo, dans laquelle se répercutent les influences du régime des glaciers, de la production des versants non glaciaires et du système hydraulique dédié à la production d'électricité.

Le but principal de ce travail est de trouver une méthode de déconvolution selon leur origine des écoulements du Zongo à un pas de temps journalier. On cherche d'abord à reconstituer les débits naturels de la rivière Zongo, qui ne sont pas influencés par les systèmes hydrauliques de production d'électricité et qui ne contiennent pas les apports de la fonte des glaciers. Ces débits naturels reconstitués serviront ensuite au calage d'un modèle hydrologique pour la modélisation de la production des versants non glaciaires.

La démarche suit deux voies. Premièrement, il s'agit de développer une méthode de reconstitution des débits naturels du Zongo y compris les apports de la fonte des glaciers, et deuxièmement, de montrer comment on peut modéliser la fonte de l'ensemble des surfaces glaciaires dans la vallée à partir des connaissances acquises sur leur fonctionnement.

1.1.3 Méthodologie de l'étude

La méthode générale adoptée dans cette étude est d'aller du général vers le particulier. C'est-à-dire qu'on analyse une composante du système en étudiant d'abord son influence sur l'ensemble, et que, selon le résultat obtenu, on s'intéresse plus au détail. Ce principe a surtout été appliqué pour le premier objectif : la reconstitution des débits naturels y compris les apports des glaciers. A partir d'une estimation de l'importance des influences du système hydraulique sur les débits naturels, on a réalisé une analyse préliminaire des composantes du système hydraulique dont l'importance paraissait prépondérante (Chapitre 2). En interprétant le résultat de cette analyse, on a ensuite établi une méthode de reconstitution des débits naturels de l'ensemble des glaciers et des versants non glaciaires (Chapitre 3). Les connaissances acquises durant l'analyse préliminaire et le développement de la méthode ont permis de dégager l'influence d'autres composantes du système hydraulique qu'il a fallu analyser avant de reconstituer les débits naturels sur une période d'observation en 1997 (Chapitre 4).

La structure de ce mémoire suit la chronologie de notre recherche, elle nous a été imposée par la disponibilité des données. En effet le système hydraulique a subit des changements importants dans les mois qui ont précédé ce travail. Comme il était essentiel d'inclure ces changements dans notre raisonnement, il a fallu attendre la fin de la saison sèche 1997 afin de disposer des données suffisantes pour pouvoir appliquer et évaluer notre méthode.

Quant à l'objectif de modéliser la fonte de l'ensemble des glaciers, on a pu commencer l'analyse sur une échelle plus détaillée. La topographie des glaciers est le terme qui semble être le facteur principal à considérer dans une modélisation ; il a été analysé en détail (Chapitre 5).

1.2 Description de la zone d'étude

1.2.1 Le bassin versant

Le bassin versant de la rivière Zongo est schématisé sur la Figure 1. Sa surface est d'environ 400 km^2 à l'exutoire de la dernière usine hydroélectrique à Cahua. C'est à l'exutoire de la deuxième usine en remontant le cours d'eau, à Chururaqui, que le bassin versant contient toutes les surfaces glaciaires dont l'eau de fonte alimente les écoulements de la rivière Zongo. Le schéma représente le bassin versant de la rivière Zongo à Chururaqui. L'usine de Sainani, à l'amont de Chururaqui, devait être équipée d'un limnigraphe à la fin de l'année 1997. La

plus grande part de l'eau qui alimente l'usine de Sainani est captée par une prise sur le cours d'eau principal, juste en aval des usines Santa Rosa I et II. En supposant qu'il n'y a pas de débordement de la prise de Santa Rosa et des deux prises sur le canal d'adduction à l'usine de Sainani, le bassin versant qui alimente l'usine correspond à celui d'un exutoire au droit de l'usine Sainani, à l'exception d'un petit sous-bassin d'environ 2 km^2 dont l'écoulement ne passe pas par l'usine (Figure 1). C'est la raison pour laquelle, en absence de séries de débits mesurés, on a choisi le bassin versant de Sainani comme unité de base de cette étude.

En anticipant un résultat de ce travail, on estime le total des surfaces glaciaires dans le bassin versant du Zongo à 18.3 km^2, ce qui fait 5.8% de la surface du bassin à Chururaqui. Si on néglige les apports de l'usine Santa Rosa II à l'écoulement de la rivière Zongo à Sainani qui comprennent des eaux de fonte des glaciers de la vallée de Coscapa, le bassin versant à Sainani comprend 11.5 km^2 de surfaces glaciaires, soit 6.6% de la surface totale de 172.6 km^2. Le point le plus élevée du bassin versant est le sommet du massif du Huayna Potosi, à 6050 m, tandis que l'exutoire de Sainani se trouve à une altitude de 2210 m. Cela donne globalement des pentes extrêmement raides.

Les sous-bassins présentés dans la Figure 1 correspondent à l'état du bassin versant non influencé par le système hydraulique dédié à la production d'électricité. Les prises d'eau et les canaux qui alimentent les usines hydroélectriques altèrent considérablement cette représentation, particulièrement en saison sèche lorsque les écoulements sont faibles. En effet une grande part des écoulements des sous-bassins est captée par le système hydraulique et détournée dans d'autres sous-bassins, correspondant en général à des sous-bassins situés en amont des sous-bassins d'origine. De plus un petit sous-bassin d'une surface totale d'environ 10 km^2 est capté à l'extérieur du bassin versant naturel, dans la vallée de Tiquimani. Le système hydraulique de production d'électricité est décrit plus en détail dans le deuxième chapitre de ce travail. Le paragraphe suivant décrit brièvement les usines hydroélectriques.

1.2.2 Les usines hydroélectriques

Dans la vallée du Zongo, la Companie Bolivienne d'Energie Electrique (Compania Boliviana de Energia Electrica, COBEE) fait fonctionner actuellement neuf usines hydroélectriques, avec une capacité totale installée de 123.3 MW. La plus récente de ces usines est l'usine Tiquimani, qui a été mise en service en février 1997. Toute l'énergie produite est utilisée pour alimenter la ville de La Paz. Pendant les heures de pointe, à midi et le soir, la production n'est pas suffisante pour satisfaire la demande de la ville, et la COBEE doit importer de l'électricité ailleurs. Jusqu'en 1998, la capacité totale va être augmentée de 42 % de la capacité actuelle par des ampliations des usines existantes et par une nouvelle usine (Huaji), la portant à 173.6 MW (Tableau 1). Cette augmentation se fait surtout afin de mieux utiliser le potentiel de ressource en eau en saison des pluies. En effet la capacité actuelle des usines est adaptée au potentiel de la ressource en saison sèche. En saison des pluies, ce potentiel est beaucoup plus grand que la capacité installée les usines produisant à la capacité maximale et la plupart des prises débordent. En saison des pluies, l'augmentation de la capacité permettra non seulement de satisfaire la demande des heures de pointe, mais aussi d'exporter de l'électricité vers d'autres sites de consommation que la ville de La Paz.

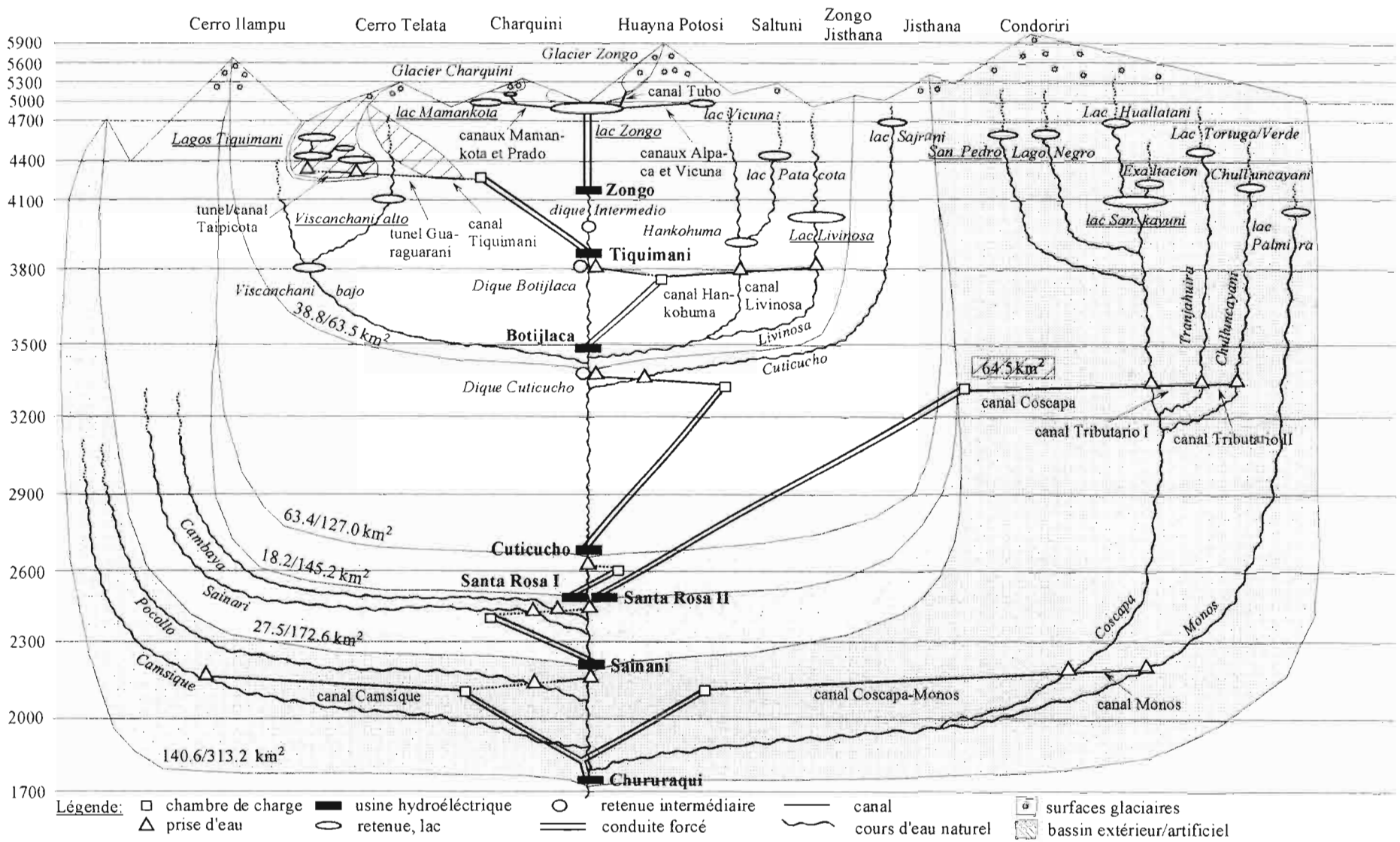


Figure 1 Schéma du système hydraulique de production d'électricité dans le vallée du Zongo. Dans le schéma sont indiqués les sous-bassins versants naturels entre chaque prise d'eau sur le cours d'eau principale, avec leurs surfaces individuelles/cumulées. Les lacs retenues des opérations hydrologiques sont soulignées

Usine :	Capacité installée (MW)			Capacité future (MW)		
	usine	cumulée	% total	usine	cumulée	% total
Zongo	4.4	4,4	3,6%	**10.0**	10.0	5,7%
Tiquimani	9.6	14	7,8%	9.6	19,6	5,5%
Botijlaca	3.5	17,5	2,8%	**6.6**	26,2	3,8%
Cuticucho	8.4	25,9	6,8%	**20.0**	46,2	11,5%
Santa Rosa I	3.2	29,1	2,6%	**6.2**	52,4	3,6%
Santa Rosa II	6.8	35,9	5,5%	6.8	59,2	3,9%
Sainani	10.4	46,3	8,4%	10.4	69,6	6,0%
Chururaqui	24.0	70,3	19,5%	24.0	93,6	13,7%
Harca	26.0	96,3	21,1%	26.0	119,6	14,9%
Cahua	27.0	123,3	21,9%	27.0	146,6	15,5%
Huaji				**28.0**	174,6	16,0%

Tableau 1 Capacités installées et capacités futures des usines hydroélectriques dans la vallée du Zongo. En gras : capacités augmentées

Comme les usines sont organisées en cascade, leurs capacités augmentent en descendant la vallée. Il y a deux usines de petite capacité en amont (Zongo et Botijlaca), suivies de trois usines de capacité moyenne (Cuticucho, Santa Rosa I et II, Sainani) et de trois usines de grande capacité en aval (Chururaqui, Harca, Cahua). La nouvelle usine (Tiquimani), alimentée par des débits captés à l'extérieur du bassin et restituant ses écoulements entre Zongo et Botijlaca, est d'une capacité moyenne. L'augmentation de la capacité se fait par l'ampliation des trois petites usines et par l'ajout d'une nouvelle usine de grande capacité en aval de Cahua à Huaji.

L'augmentation de la capacité installée ne change pas intrinsèquement l'influence du système hydraulique dédié à la production d'électricité sur les débits naturels. En saison sèche, quand cette influence est la plus importante, comme on le montrera d'une façon quantitative dans ce travail, la capacité additionnelle n'est pas utilisée, et en saison des pluies, les prises continueront à déborder parce que la capacité installée restera bien inférieure au potentiel de la ressource disponible pendant cette saison. La raison pour laquelle on utilise pas entièrement ce potentiel est d'ordre économique. Comme les prix de l'électricité sont relativement bas en saison des pluies, les coûts marginaux de la production d'électricité dans une certaine usine deviennent rapidement supérieurs aux gains marginaux, ce qui rend non rentable les augmentations sa capacité au delà d'une certaine limite. En conséquent, les résultats obtenus dans cet étude seront également valable dans le futur.

2. Analyse préliminaire des influences du système hydraulique artificiel sur les débits à Sainani

2.1 Les facteurs d'influence

2.1.1 Le système hydraulique pour la production d'éléctricité

Les usines hydroélectriques dans la vallée du Zongo sont organisées en cascade. La retenue Zongo se trouve à la tête du système. Elle est alimentée principalement par l'eau de fonte des glaciers qui couvrent les sommets couronnant la vallée, le Huayna Potosi et le Charquini. L'eau est captée dans des petits lacs aux pieds des glaciers et amenée au lac Zongo par quatre canaux. Le canal Prado capte les écoulements du glacier Charquini. Le canal Tubo Vertedero amène les eaux de fonte du glacier Zongo et les canaux Alpaca et Vicuña captent une partie des eaux de fonte des autres glaciers du Huayna Potosi. La retenue Zongo alimente directement les conduites forcées de l'usine Zongo, la première de la cascade. Ensuite l'eau est captée dans le cours d'eau principal à l'aval de chaque usine et dirigée sur l'usine suivante par des canaux ou des tunnels (cf. 1.2.1, Figure 1).

Les retenues Hatilata, Taipicota (lacs Tiquimani) et Guaraguarani constituent une deuxième tête du système. Les lacs Tiquimani se trouvent à l'extérieur du bassin versant du Zongo dans un petit sous-bassin de la vallée Tiquimani (environ 6 km2), qui contient un petit glacier (Cerrro Telata). L'eau est amenée par le tunnel Taipicota et le canal Taipicota jusqu'au lac Guaraguarani, qui se trouve toujours dans la vallée Tiquimani à l'extérieur du bassin naturel du Zongo. Une prise d'eau sur le lac redirige les écoulements vers le tunel Guaraguarani et le canal Tiquimani jusqu'au bassin de charge de la nouvelle usine Tiquimani. Le petit canal Tiquimani capte deux affluents du Zongo qui drainent une surface total d'environ 2 km^2 et qui ne coulent pas en saison sèche.

Les retenues Livinosa et Sankayuni font partie de deux systèmes de captage qui fonctionnent de la même façon que celui des retenues Tiquimani/Guaraguarani, sauf que dans ces cas l'eau provient de l'intérieur du bassin du Zongo. Contrairement au système du lac Zongo les deux sous-bassins drainés (Livinosa 27 km^2 et Sankayuni 75 km^2) sont pour l'essentiel non glaciaires, bien qu'ils contiennent des glaciers importants, mais dont l'influence reste minoritaire . Le système de Livinosa commence à alimenter la cascade des usines hydroélectriques à Botijlaca, celui du Sankayuni à Santa Rosa II. L'usine Santa Rosa II et l'usine de Tiquimani ne font pas directement partie de la cascade d'usines, mais en sont affluentes.

2.1.2 Les influences possibles sur les débits journaliers

L'ensemble hydraulique constitué par les retenues, les prises d'eau, les canaux et les usines hydroélectriques influencent le système naturel de deux façons. D'une part, l'écoulement est partiellement acheminée vers l'aval à travers le système hydraulique, ce qui influence la forme des crues. D'autre part, une certaine proportion de l'écoulement est stockée dans les retenues en saison des pluies, période d'abondance, et déstockée pendant la saison sèche, période de manque d'eau. Dans la suite de ce paragraphe, l'importance qualitative de ces deux influences sera brièvement analysée.

On peut admettre que le transfert des écoulement par le système hydraulique n'a pas d'influence sur les débits journaliers à Sainani. Ceci est démontré par la comparaison des temps de propagation dans le système hydraulique (canaux / tunnels / lits naturels) et dans le système naturel (Tableau 2). Les vitesses de propagation pour les transferts naturels n'ont été mesurées que sur certains biefs. Pour établir le tableau, on admis l'hypothèse simplificatrice qu'elles sont constantes sur toute la longueur des biefs concernés. Considérons par exemple la prise d'eau *Alpaca*, tout en amont du bassin versant. Elle constitue le chemin le plus long que peut prendre l'écoulement. Par voie naturelle, l'eau arrive 2 h 35 plus tôt à la retenue *Dique Intermedio* que l'eau qui passe par l'usine Zongo. Dans les cas des autres canaux, les différences des temps de propagation sont beaucoup plus faibles, 20 minutes pour le transfert entre la prise Livinosa et l'usine Botijlaca et 45 minutes pour l'acheminement entre la prise Coscapa et l'usine Chururaqui.

No.	De (prise) :	A (jonction) :	Distances		Vitesse	Temps	
			lit naturel	canaux	lit naturel	lit naturel	canaux
1)	Alpaca	Dique intermedio	3 km	8,7 km	1.14 km/h	5 h 15	2 h 40
2)	Livinosa	Usine Botijlaca	4 km	6,8 km	2 km/h	1h 40	2 h
3)	Coscapa	Usine Chururaqui	9,5 km	15 km	3.5 km/h	1 h 55	2 h 40

Tableau 2 Temps de propagation entre quelques prises d'eau et la confluence du cours d'eau correspondant avec le cours d'eau principal (rivière Zongo). Estimation des vitesses de transfert naturel, pour 1): 3h 30 pour 4 km entre l'usine Zongo et Dique Intermedio ; pour 2): 1 h pour 2 km entre la retenue Livinosa et la prise Livinosa ; 3): 2 h pour 7 km entre la retenue Sankayuni et la prise Coscapa

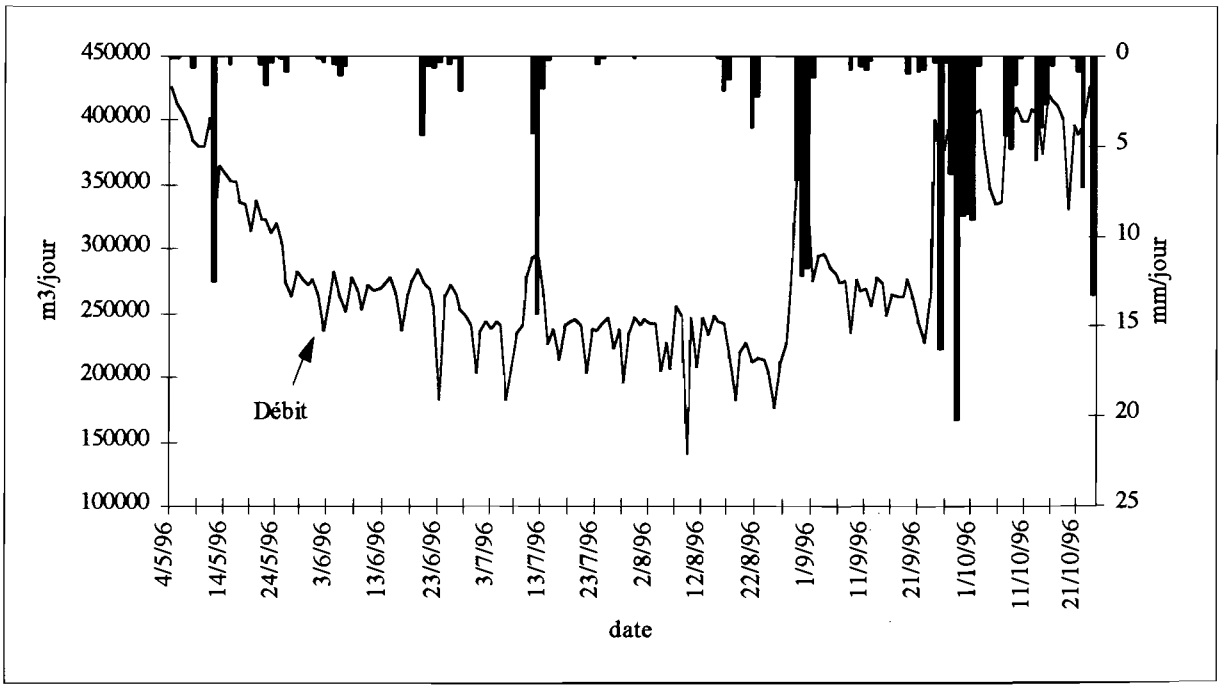


Figure 2 Précipitations spatiales jusqu'à Sainani et débits turbinés à l'usine Sainani

Pour obtenir une idée de l'importance de ces différences il faut les comparer avec la durée des crues. On ne dispose pas encore de mesures directs du débit de la rivière Zongo à Sainani, mais il est possible de reconstituer les débits turbinés à l'usine Sainani à travers l'énergie journalière produite (cf.2.2.4). En saison sèche presque tout l'écoulement du Zongo est turbiné. Le débit qui n'est pas capté à l'usine amont (Santa Rosa) est très faible. On peut observer dans la Figure 2 que la durée des crues en saison sèche de 1996 était toujours supérieure à 3-4 jours. Le décalage de quelques heures d'une partie de l'écoulement par le système hydraulique artificiel ne peut donc pas avoir d'influence significative sur les crues. Par conséquent cette influence ne sera pas étudiée d'une manière plus détaillée dans ce travail.

A première vue, l'influence du stockage d'eau dans les retenues paraît être peu important ; en effet la somme des volumes totaux utiles de toutes les retenues est petite par rapport aux précipitations annuelles. Rapporté à la surface du bassin versant à Sainani, seulement 44 mm d'eau sont stockés et déstockée au cours d'une année, ce qui ne constitue que 4% des précipitations annuelles. Néanmoins, si l'on considère que le déstockage des retenues a lieu en saison sèche, quand il ne pleut presque pas, l'influence à l'échelle mensuelle ou journalière peut être beaucoup plus importante. Les retenues sont vidangées pendant les mois les plus secs, de début mai à fin août. Pendant cette période, il ne pleut que 191 mm (moyenne calculée sur 25 ans ; ENDE 1992). En supposant que les débits spécifiques ne sont pas très différents de cette hauteur de pluie, l'influence du déstockage serait supérieure à 23 % du débit à Sainani en saison sèche. C'est pour cela que par la suite on essayera de quantifier l'influence du stockage d'eau dans les retenues par rapport aux débits journaliers avec une première analyse des données. Cette analyse servira d'abord à sélectionner les retenues dont le changement de stock influence de façon significative les débits mesurés à Sainani. Cela conduira ensuite à l'élaboration d'une méthode pour la reconstitution des débits naturels provenant des écoulements des versants et de la fonte des glaciers.

2.2 L'influence des changements journaliers du stock d'eau dans les retenues

2.2.1 La gestion de la production hydroélectrique

La gestion du stock d'eau dans les retenues dépend de la politique économique de l'entreprise qui gère la production hydroélectrique, la Compagnie Bolivienne d'Energie Electrique (COBEE). Comme la capacité de production dans la vallée n'est pas suffisante pour satisfaire la demande locale de la Paz, la COBEE doit acheter de l'électricité à d'autres opérateurs à un prix plus élevé que celui de sa propre production. En saison des pluies, il y a une abondance d'eau et c'est la capacité des usines qui limite la production. Pendant cette période beaucoup d'eau s'écoule sans être utilisée pour la production. En fait, les augmentations de des usines qu'on réalise actuellement servent à pouvoir satisfaire la demande de pointe en saison des pluies (cf. 1.2.2). En saison sèche par contre, il y a une carence d'eau et la production est limitée par la disponibilité d'eau. Les prix de l'électricité sont plus élevés pendant cette période. Comme on l'a vu dans le chapitre précédent, le volume total utile des retenues est relativement faible, ce qui limite les possibilités de régulation de la production hydroélectrique. Le principe est de déstocker les retenues pendant toute la saison sèche et d'atteindre le minimum du stock au début de la saison des pluies. La production dans les usines en tête du système est adaptée à l'évolution de la demande au cours de la journée.

L'écoulement à l'aval des retenues entre immédiatement dans la cascade des usines hydroélectriques. La production des usines aval est donc déterminée, d'une part, par les débits qui arrivent des usines en tête du système et, d'autre part, par les écoulements naturels des autres parties du bassin versant qui ne sont pas concentrées vers les retenues.

La gestion du stock d'eau dans les retenues est donc surtout importante en saison sèche. L'opération des vannes est différente pour chaque retenue. Il n'y a pas d'automatisation ; toutes les vannes sont réglées manuellement. Les manœuvres hydrauliques sur la retenue Zongo se font pendant toute l'année. Des niveaux à atteindre chaque mois sont préalablement établis. L'objectif est que la retenue atteigne son niveau maximum à la fin de la saison des pluies, et qu'elle soit vidangée jusqu'au minimum au cours de la saison sèche. Pendant la période de vidange, on considère les entrées moyennes (*run-ins*) de chaque mois, c'est-à-dire l'accumulation d'énergie potentielle dans le système par les précipitations et les apports des glaciers, dont on soustrait une production mensuelle qui dépend de l'énergie totale stockée dans la retenue à la fin de la saison des pluies et des jours ouvrables du mois concerné. Cette différence correspond à l'abaissement du niveau d'eau en terme d'énergie qui est à atteindre à la fin du mois. Les vannes de toutes les autres retenues ne sont réglées que pendant la saison sèche pendant des durées qui varient selon le volume utile de dix jours (San Pedro) à trois mois (Sankayuni). En saison des pluies les vannes de ces retenues restent fermées (Tableau 3).

2.2.2 Les données disponibles

Pendant la période d'opération des retenues, il y a une lecture journalière du niveau d'eau, tandis qu'en dehors de cette période les niveaux sont lus tous les deux à sept jours ou même pas du tout (cas de la retenue San Pedro). Le Tableau 3 montre la fréquence et les heures de lecture des niveaux d'eau dans les retenues.

Nom	Volume (10^3 m^3)	Relation niv./vol.	Opération 96 du	au	Opération/lecture ouvert.	fermé	Lecture de niveau hors période d'opération
Zongo	3256		toute l'année		opération continue		7h30 et 16h00
Mamankota	236	inconnue	26.7.	2.9.	op. cont. 9h30		tous les 2 jours, 9h30
Hatilata	2483	connue	19.8.	15.10.	op. cont. 9h00		tous les 2 jours, 8h00
Taipicota	3000	connue	19.6.	22.9.	op. cont. 9h30		tous les 2 jours, 8h30
deuxième période d'opération 1996:			*10.10*	*24.10*			
Guaraguarani	432	connue	10.6.	26.6.	op. cont. 12h00		tous les 2 jours, 11h00
A.Viscanchani	inconnu	inconnue	5.6.	22.9.	op. cont. 5h45		tous les 7 jour, ? h
Livinosa	523	inconnue	24.7.	22.9.	8h30	20h30	tous les 2 à 7 jours, ? h
Sankayuni	443	connu	1.7.	26.9.	16h00	19h30	pas de lecture
San Pedro	inconnu	inconnue	18.6.	29.6.	13h30	17h30	pas de lecture

Tableau 3 Volumes des retenues les plus importantes et caractéristiques de leur manœuvre. Sauf indication contraire, la manœuvre de la vanne et/ou la lecture du niveau se font chaque jour

En plus des observations des niveaux, on dispose de mesures journalières des précipitations relevées à sept heures du matin et de la quantité d'énergie produite dans chaque usine notée chaque demi-heure.

2.2.3 Estimations du changement de stock total journalier

Comme les niveaux d'eau dans les retenues ne sont pas tous lus chaque jour et comme les caractéristiques dimentionnelles des retenues sont le plus souvent inconnues (Tableau 3), la variation journalière de stock n'est pas facile à estimer et il est nécessaire de faire des hypothèses simplificatrices.

Pour les retenues les plus importantes, Zongo, Hatilalta, Taipicota, Guaraguarani et Sankayuni, les relations entre le niveau d'eau et le volume sont connues. Par contre on ne connaît que les volumes totaux utiles des deux retenues Livinosa et Mamankota qui sont d'une importance moyenne (Tableau 3). Pour estimer les relations entre le niveau d'eau et le volume de ces retenues, on a approché leurs formes tridimensionnelles avec des calottes sphériques[1]. En connaissant le volume total, on peut calculer le rayon et la surface de la section de la calotte. Cette surface correspond à la surface de la retenue quand elle est pleine. Les surfaces des deux retenues ainsi calculées sont assez semblbles aux surfaces déterminées par planimétrie, ce qui montre que l'approximation est acceptable (Annexe A). Pour les deux petites retenues Alto Viscanchani et San Pedro, on ne connaît même pas leurs volumes. Mais en approchant leurs formes par la méthode des calottes sphériques, le calcul des rayons et des volumes peut se faire à partir des surfaces déterminées par planimétrage. On obtient ainsi les rayons des calottes, ce qui permet d'établir les relations entre le niveau d'eau et le volume. On peut calculer les volumes totaux utiles de ces retenues modélisées, mais comme on ne connaît pas les volumes réels on n'a pas de base de validation. Néanmoins, les volumes calculés (Alto Viscanchani : 19'500 m^3, San Pedro : 9'000 m^3) sont vraisemblables. On a utilisé cette approximation et les relations niveau / volume connues pour transformer les lectures de niveau de tous les lacs du Tableau 3 en volumes stockés[2], pour la période de janvier 1996 à avril 1997.

Il y a deux autres lacs et plusieurs petits bassins de régulation dont les niveaux sont observés et dont on n'a pas tenu compte dans cette étude préliminaire. Ils sont de la taille de San Pedro, qui a été choisi comme retenue type. Les bassins qui se trouvent sur le cours d'eau principal servent à la régulation au cours de la journée et ils ont des changements de niveau horaires. Comme les pointes de production hydroélectrique sont à midi et le soir, l'eau est lâchée suffisamment tôt pour arriver avant minuit à Sainani, heure à laquelle les débits sont inclus dans le débit journalier (cf.2.2.4).

Pour obtenir des chroniques journalières complètes des volumes stockés on a estimé les données manquantes par des interpolations linéaires entre deux jours pour lesquels on connaît les volumes[3]. On a du interpoler sur des périodes comprises entre un et sept jours (cf. Tableau 3). Quand il y a peu d'entrées dans les retenues, c'est-à-dire en saison sèche, les données interpolées entre deux volumes connus doivent approcher les valeurs réelles. En effet, en

---

[1] La calotte sphérique est l'une des parties d'une sphère coupée en deux par une section horizontale. Son volume et la surface de la section, qui correspond à la surface de la retenue, sont des fonctions de la hauteur de la partie 'coupée' et du rayon de la sphère 'entière'. La relation niveau/volume est donc simplement V=f (rayon, niveau). Le rayon est un paramètre constant de la retenue, qui peut être calculé à partir du volume total ou de la surface maximale, en connaissant le niveau (=la hauteur) maximal (Annexe A).

[2] A l'exception du cas de l'approximation avec la calotte sphérique, les relations niveau/volume ne sont pas des fonctions analytiques. Il faut donc chercher dans les tableaux, le volume correspondant à chaque niveau. Afin de faciliter cette transformation pour cinq séries de plus de 600 données, on l'a automatisée à l'aide d'un programme en Visual Basic pour Microsoft Excel, version 7.0.

[3] Ces interpolations ont également été réalisées à l'aide d'un programme en Visual Basic.

l'absence de lecture de niveau, la position des vannes n'est pas modifiée et les variations de niveau sont faibles par rapport aux changements de volume. Cependant en saison des pluies, quand les retenues reçoivent des apports d'eau importants, l'interpolation peut être erronée. On en tiendra compte lors de la discussion des résultats (cf. 2.3).

Le déphasage des heures de lecture est un autre problème sur les données de niveaux d'eau dans les retenues. On peut vérifier dans le Tableau 3 que les heures de lecture sont distribuées sur toute la journée. Pour obtenir une première approximation du changement de stock total on a choisi la première lecture du jour dans les cas où il y en a deux et on a négligé les décalages.

2.2.4 Estimations des débits turbinés à Sainani et des précipitations spatiales jusqu'à Sainani

Comme on aimerait connaître l'influence du changement du stock d'eau journalier dans les retenues sur les débits à Sainani, il est nécessaire d'avoir des séries journalières de ces débits. Jusqu'à présent on ne dispose pas de mesures de débit à Sainani. On doit donc remplacer les débits réels par les débits turbinés, qui peuvent être reconstitués à partir de l'énergie produite chaque jour (cf. 1.2.1). Cette approche a néanmoins ses limites. Il faut connaître les rendements des machines pour pouvoir reconstituer les débits turbinés[4]. Le rendement de la production hydroélectrique n'est pas linéaire, il dépend de l'énergie produite par unité de temps. Pour l'usine Sainani quelques points de la courbe capacité / rendement ont été mesurés[5]. Néanmoins pour des raisons de simplicité on a utilisé le facteur d'usine pour le calcul, qui est basé sur le rendement maximal, en admettant une petite erreur[6].

Les productions journalières d'électricité des usines sont calculées de minuit à minuit. La transformation de ces productions en débits turbinés donne donc également les débits cumulés pendant la journée de minuit à minuit. Ce sont ces chroniques de débits qu'on utilise pour cette étude préliminaire. Comme les productions des usines sont notées chaque demi-heure, il est possible de calculer les débits turbinés journaliers sur d'autres intervalles. Cette possibilité sera utilisée dans la méthode de reconstitution des débits naturels, comme on le verra dans le chapitre 3.1.3.

Les débits turbinés sont tronqués en saison des pluies, lorsque les turbines atteignent leur capacité maximale (cf. 2.2.1). Ce débit maximal est d'environ 2.8 m^3/s à l'usine Sainani, ce qui correspond à un débit spécifique de 1,85 mm / jour. A la fin de la saison des pluies 1995/96 les débits turbinés à l'usine Sainani commencent à être inférieurs à cette limite à partir du 3 mai et ils la dépassent de nouveau à partir du 23 octobre. Il est possible que la capacité maximale soit déjà atteinte le 24 septembre, date de la fin de la saison sèche, quand les débits turbinés spécifiques commencent à atteindre des valeurs autour de 1,7 mm : jour (Figure 3). Les débits turbinés ne fournissent aucune information sur les débits totaux en

---

[4] En connaissant ce rendement, les débits se calculent avec la formule : $Q\ (m^3/s) = E * 100/ (r * g * h * \rho)$, où E = énergie produite par unité de temps (kW), r = rendements (%), h = hauteur de chute (m), $\rho = 1000\ kg/m^3$ et $g = 9.81\ m/s^2$

[5] Comme la production d'électricité n'est jamais constante, les jaugeages à l'aval des turbines ne sont pas très exacts. Une méthode plus fiable utilise des mesures de pression dans la conduite ainsi que son diamètre pour calculer un débit instantané. Cette méthode sera utilisée pour calculer les débits turbinés qu'on utilisera pour le calage du modèle hydrologique

[6] Le facteur d'usine est calculé avec la formule : $f\ (kWh/m^3) = r * g * h / 3600$

saison des pluies. En saison sèche, par contre, presque tout le débit du Zongo à Sainani est turbiné. On estime que c'est plus de 90% du débit de la rivière Zongo qui est capté par la prise en aval des usines Santa Rosa et qui est amené sur l'usine Sainani. Il y a deux petits sous bassins en aval de Santa Rosa dont l'eau n'est pas turbinée à Sainani, qui ont une surface d'environ 2 km^2 (la surface total du bassin versant jusqu'à l'exutoire de Sainani est de 173 km^2) (cf. 1.2.1, Figure 1).

Par les trois canaux Coscapa et Tributario I et II une partie de l'eau du sous bassin de la rivière Coscapa, un affluent du Zongo, est captée et amenée à l'usine Santa Rosa II. Comme cet affluent rejoint le Zongo en aval de Sainani, il s'agit d'un apport d'eau de l'extérieur du bassin versant de Sainani. Les débits qui déversent aux prises de Coscapa et de cses deux affluents (Tributario I et II) sont très faibles en saison sèche. Il y a quelques ruisseaux qui traversent les trois canaux et dont un faible débit est capté en saison des pluies. En saison sèche on n'a pas pu observer d'écoulement dans ces ruisseaux, même pas au cours d'un événement pluvieux assez fort. On va revenir sur l'importance du captage d'eau dans la vallée Coscapa au cours du chapitre 3.1.4.

Afin d'avoir une base de comparaison pour le stockage dans les retenues en saison des pluies, on a également calculé la chronique des précipitations spatiales dans le bassin de Sainani en se servant des séries des six stations pluviométriques entre la Plataforma Zongo et l'usine Sainani et en utilisant la méthode des isohyètes (tirées de ENDE 1992). Pour atténuer la variabilité des pluies journalières et pour comparer aux débits, on a approché les précipitations par des moyennes mobiles sur 4 jours (Figure 3).

2.2.5 Présentation des résultats

Les débits turbinés à Sainani et les précipitations journalières sur 4 jours sont montrés sur la Figure 3 pour toute la période d'observation de janvier 1996 à avril 1997. On note bien le début et la fin de la saison sèche 1996, tant par la diminution des précipitations comme par celle des débits. Le déstockage du système, calculé par la somme des changements de stock de chaque retenue, est comparé aux débits turbinés pendant la saison sèche dans la Figure 4. Dans la Figure 5, l'influence du déstockage sur les débits est exprimée par le pourcentage du débit qui provient des retenues. Les influences de chaque retenue se trouvent en Annexe. En saison des pluies une partie de l'écoulement est utilisée pour remplir les retenues. Comme on n'a pas de mesures de débit en saison des pluies (cf. 2.2.4), le changement de stock total est comparé avec les précipitations moyennes (Figure 6, Figure 7 et Figure 8).

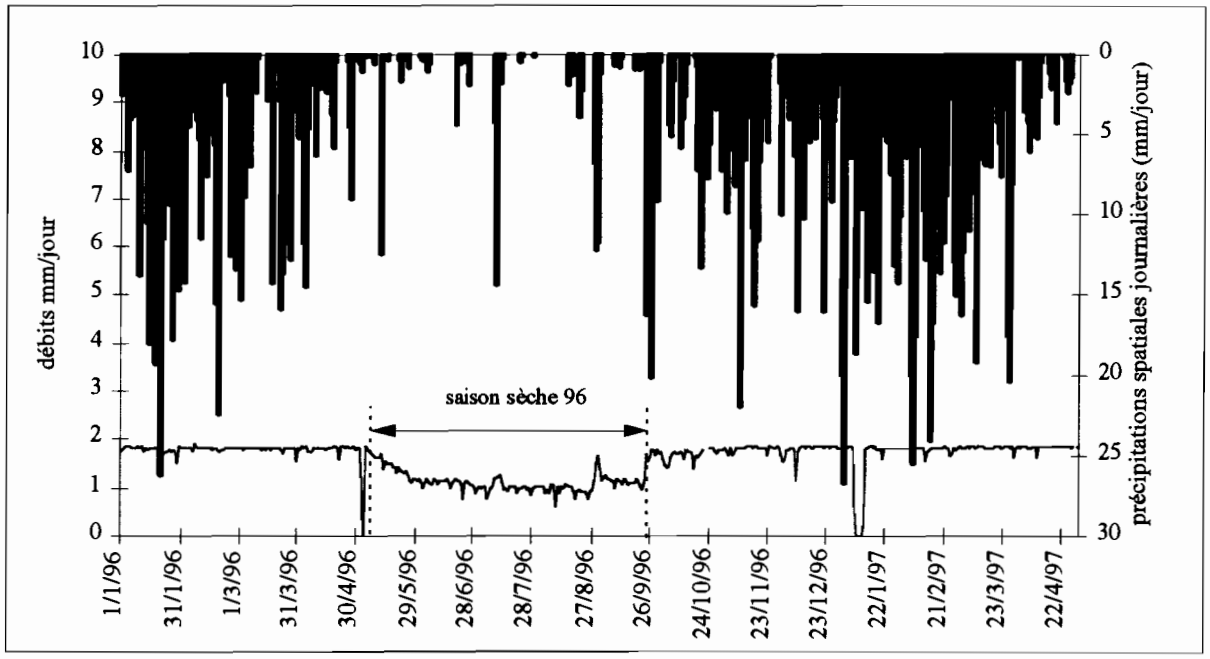


Figure 3 Moyennes mobiles des précipitations journalières sur le bassin de Sainani et débits turbinés à Sainani

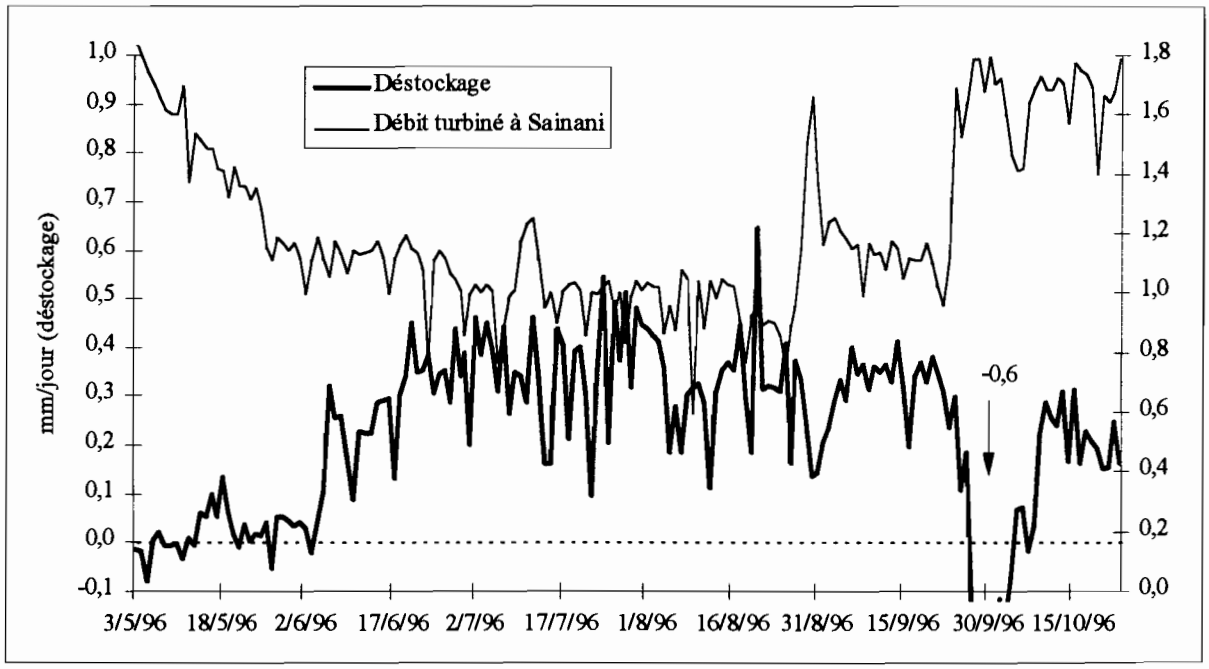


Figure 4 Déstockage des retenues pendant la saison sèche 1996 et débit turbiné à l'usine Sainani

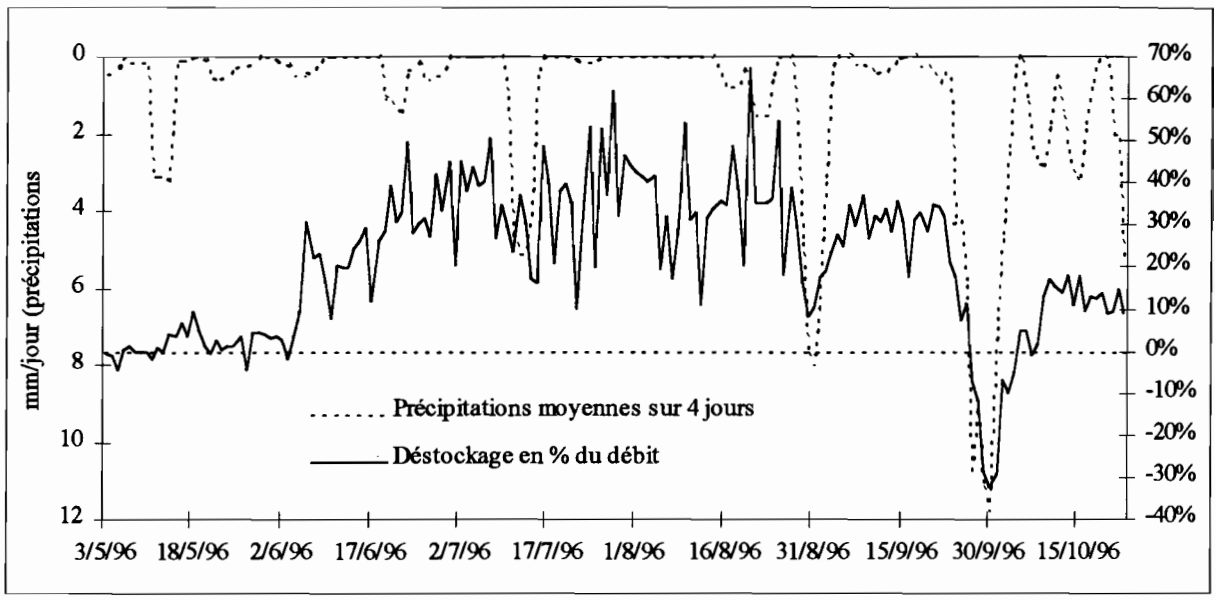


Figure 5 Variation de stockage d'eau dans les retenues en pourcentage du débit turbiné à Sainani et moyennes mobiles des précipitations sur 4 jours pendant la saison sèche 1996

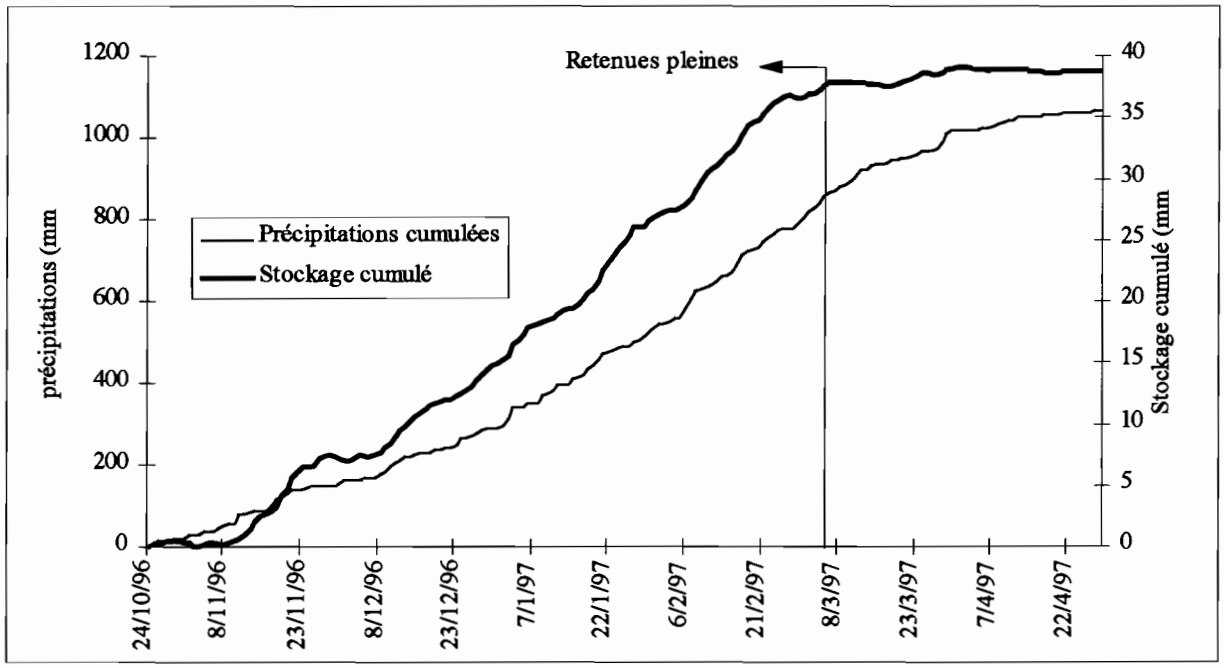


Figure 6 Précipitations moyenne sur le bassin de Sainani et stockage d'eau des réservoirs, valeurs cumulées

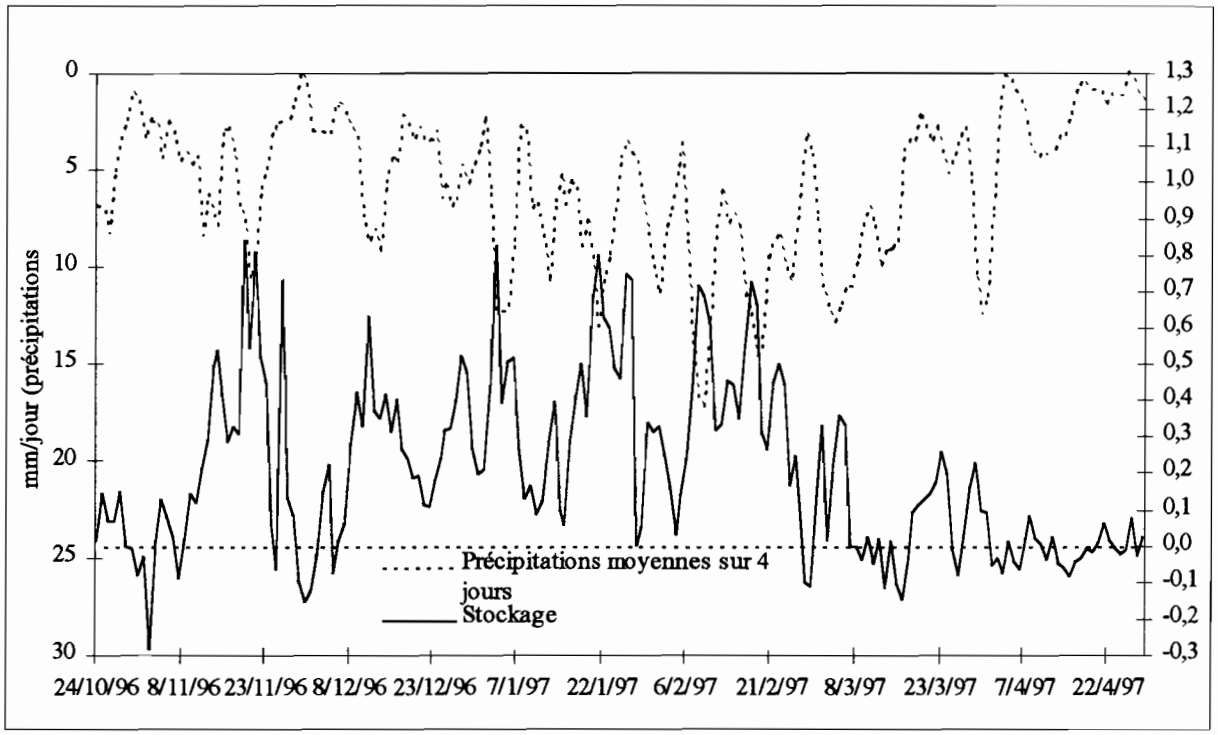


Figure 7 Moyennes mobiles des précipitations sur 4 jour et stockage d'eau dans les retenues

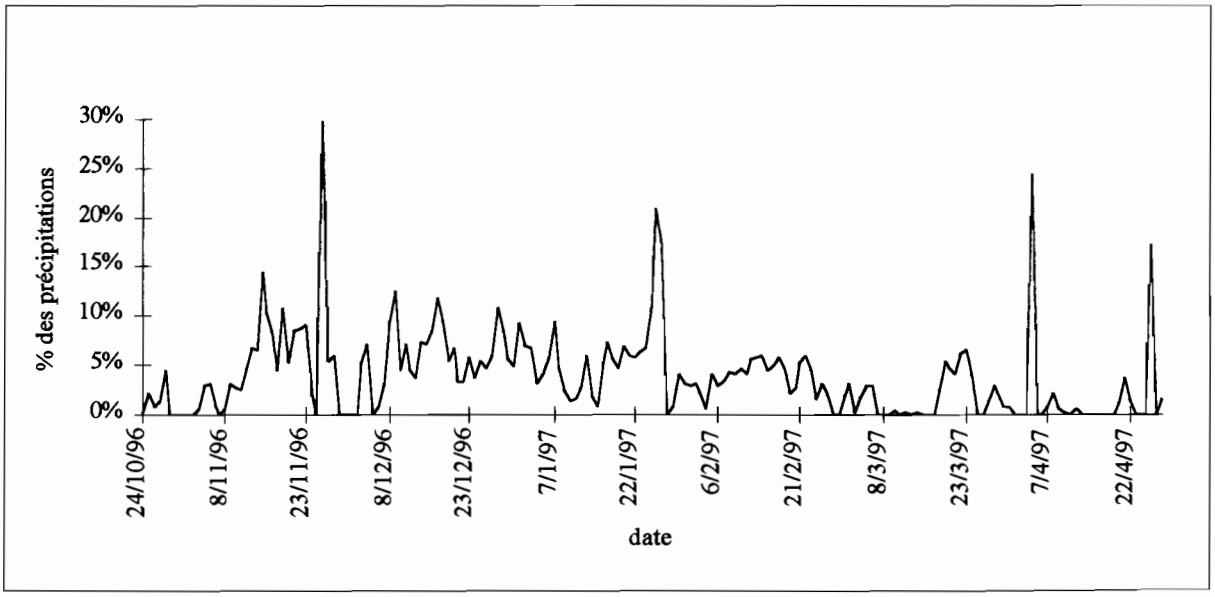


Figure 8 Stockage d'eau dans les réservoir en pourcentage des moyennes mobiles des précipitations sur 4 jours

2.3 Discussion et conclusions concernant la modélisation hydrologique

2.3.1 Déstockage en saison sèche

L'influence du déstockage des retenues en saison sèche est très importante, comme on peut l'observer sur la Figure 5. La part du débit turbiné à Sainani qui provient du déstockage commence à atteindre des valeurs supérieur à 30% au début de juin. Ensuite l'influence augmente jusqu'à un maximum de 70% au milieu d'août et diminue rapidement après. Mais elle reste importante jusqu'à la fin d'octobre. Le maximum est atteint après la période sans pluie la plus longue de l'été. On observe qu'après des forts événements de précipitations l'influence du déstockage diminue (Figure 5). C'est le cas après l'événement de mi juillet et surtout après les forts événements de fin août et de fin septembre. La Figure 4 montre que cette diminution de l'influence pendant les crues n'est pas seulement due à l'augmentation du débit. Le déstockage total diminue pendant les crues associées à ces précipitations. Ces observations sont en accord avec la stratégie de la gestion des retenues (cf. 2.2.1)

La diminution du déstockage pendant les crues pourrait faire penser que la prise en compte du déstockage lors d'une modélisation hydrologique n'est pas si importante que cela. En fait, pendant les forts événements de fin août et de fin septembre l'influence est inférieure à 10%. La conclusion est séduisante mais fausse. Bien qu'il soit possible que l'influence du déstockage soit négligeable pendant les pointes des crues, elle ne l'est pas pendant les autres phases. La procédure de déstockage en parallèle avec la montée de la crue la rend moins aiguë et augmente le volume par comparaison avec une crue non influencée. De plus, il n'y a presque pas de diminution du déstockage pendant les faible crues, que l'on souhaite aussi modéliser. Le déstockage des retenues a donc une influence sur les débits à Sainani qui n'est pas négligeable pour la modélisation hydrologique.

Les apports d'eau des retenues aux débits de Sainani sont variables. Exprimé en pourcentage du débit turbiné à Sainani, le déstockage du lac Zongo varie entre 15 et 25% et celui des lacs Tiquimani entre 20 et 25%. Les lacs Tiquimani sont vidangés l'un après l'autre, de sorte qu'ils contribuent aux débits pendant toute la saison sèche, comme dans le cas du lac Zongo. Les apports des autres lacs sont moins importants. L'influence de la retenue Mamankota, qui alimente le lac Zongo par le canal Prado, est normalement inférieure à 5%, mais atteint un maximum de 10% pendant quelques jours en août. Les lacs Livinosa et Sankayuni contribuent pour environ 5% aux débits, avec des maximums de 22% et 12%. La contribution de San Pedro ne dépasse pas 2% (voir Annexe). Cela confirme qu'on peut négliger les changements de stock des très petites retenues comme San Pedro, dont plusieurs n'ont pas été considérées dans cette étude préliminaire (cf. 2.2.3).

Les apports maximaux du lac Sankayuni ont lieu en octobre, quand les débits turbinés à Sainani sont déjà proches de la limite de capacité (Figure 3), ce qui est d'autant plus étrange que selon les informations de la COBEE les vannes de cette retenue n'étaient plus manœuvrées en octobre 1996 (Tableau 3). Comme beaucoup de valeurs de niveau du lac Sankayuni sont interpolées hors de la période d'opération, il suffit que quelques lectures soient fausses pour arriver à ces déstockages journaliers extrêmes. Les vannes n'étant plus à cette période, il est encore plus probable que ces valeurs soient erronées. Si c'est le cas, les grands apports totaux du déstockage en octobre (Figure 4 et Figure 5) seraient également

surestimés. Quant au stockage pendant les jours précédents, il s'agit probablement d'un artefact causé par les mêmes erreurs de lectures.

La contribution de la retenue Alto Viscanchani est très irrégulière. Elle atteint jusqu'à 15% des débits turbinés à Sainani. C'est étonnant pour une retenue relativement petite. On peut observer dans la figure en Annexe que des apports positifs et négatifs se suivent plusieurs fois pendant la saison sèche, ce qui n'est pas le cas des autres retenues. En fait, en 1996 la retenue Alto Viscanchani était alimentée par les eaux des lacs Tiquimani et Guaraguarani, ce qui n'est plus le cas depuis la mise en service de l'usine Tiquimani en février 1997 (cf. 2.1.1). Jusque-là, elle servait de bassin de régulation journalier, comme les petites retenues du cours d'eau principal. Une telle régulation est nécessaire parce que les vannes des lacs Tiquimani et Guaraguarani ne sont manœuvrées que tous les deux jours (cf. 2.2.2)[7]. C'est pour cela qu'il est bien probable que les apports relativement importants de ce petit lac soient des artefacts dus aux décalages des heures de lecture (cf. 2.2.3). Quoi qu'il en soit, en 1997 les vannes du lac Alto Vischanchani ne sont plus touchées, et comme la modélisation hydrologique sera réalisée avec une chronique de la saison sèche 1997, on ne s'en préoccupera pas.

En conclusion de l'exposé, on peut dire que ce sont les retenues Zongo, Hatilata, Taipicota, Guaraguarani, Livinosa, Mamankota et éventuellement Sankayuni dont le déstockage en saison sèche doit être pris en compte dans une modélisation hydrologique.

2.3.2 Stockage en saison des pluies

Les entrées d'eau dans les retenues proviennent des précipitations et de la fonte des glaciers. On ne connaît pas l'importance respective de ces deux origines différents. Sur la Figure 7 on observe que la variation du stockage journalier suit celle des précipitations journalières (moyennées sur 4 jours). La fonte des glaciers est diminuée pendant les événements de précipitations à cause de la baisse d'énergie consécutive à l'interception de la radiation par les nuages, la baisse des températures et l'augmentation de l'albédo des glaciers (cf. RIGAUDIERE, P. *et al.*). En conséquence, les variations parallèles du stockage et des précipitations montrent qu'une grande partie de l'eau stockée pendant les précipitations provient des précipitations. Néanmoins, on observe qu'en novembre 1996 le stockage est plus élevé en comparaison aux précipitations qu'en plein hiver (Figure 7). Dans la figure des valeurs cumulées (Figure 6) ce fait est encore plus marqué. La courbe de stockage cumulé change brusquement de pente tandis que la pente des précipitations cumulées ne change pas beaucoup. On constate que cet événement se produit entre le 8 et le 25 novembre 1996. Pendant cette période, les apports de la fonte des glaciers au remplissage des retenues doivent avoir été très importants. C'est justement pendant le mois de novembre que la fonte des glaciers est souvent la plus élevée. C'est également entre le 8 et le 25 novembre que les valeurs du stockage journalier en pourcentage des précipitations journalières sont les plus élevées (Figure 8). On doit néanmoins être prudent si on veut attribuer les pics de la Figure 8 à des événements de forte fonte des glaciers. Un tel pic peut aussi être l'effet d'un écoulement de base qui continue de remplir les retenues quand les précipitations ont déjà cessé[8], ou d'une répartition déséquilibrée des précipitations sur les hautes parties du bassin versant, qui sont drainées dans les retenues.

---

[7] Aujourd'hui, c'est le bassin de charge de l'usine Tiquimani qui a cette fonction de régulation. C'est la raison pour laquelle son volume est exceptionnellement grand (30'000 m^3)

[8] C'est justement pour diminuer cet effet qu'on a moyennées le précipitations journalières sur 4 jours

Vers la fin de février 1997 les retenues Zongo et Taipicota ont atteint leurs niveaux maximaux. La retenue Hatilata a été remplie fin mars. En mars, il y a une courte période de déstockage, qui est suivie de deux pics de stockage, dont le premier (23 mars) est précédé de précipitation moins fortes. En avril, il y a cinq très petits *événements* de stockage, dont le premier (4 avril) et le dernier (26 avril) suivent des jours sans précipitations (Figure 7), d'où les deux grands pics en avril du stockage en pourcentage des précipitations (Figure 8). Le mois d'avril est la deuxième période d'ablation élevée dans l'année hydrologique, et le stockage durant ces deux dates est principalement du aux apports d'eau des glaciers.

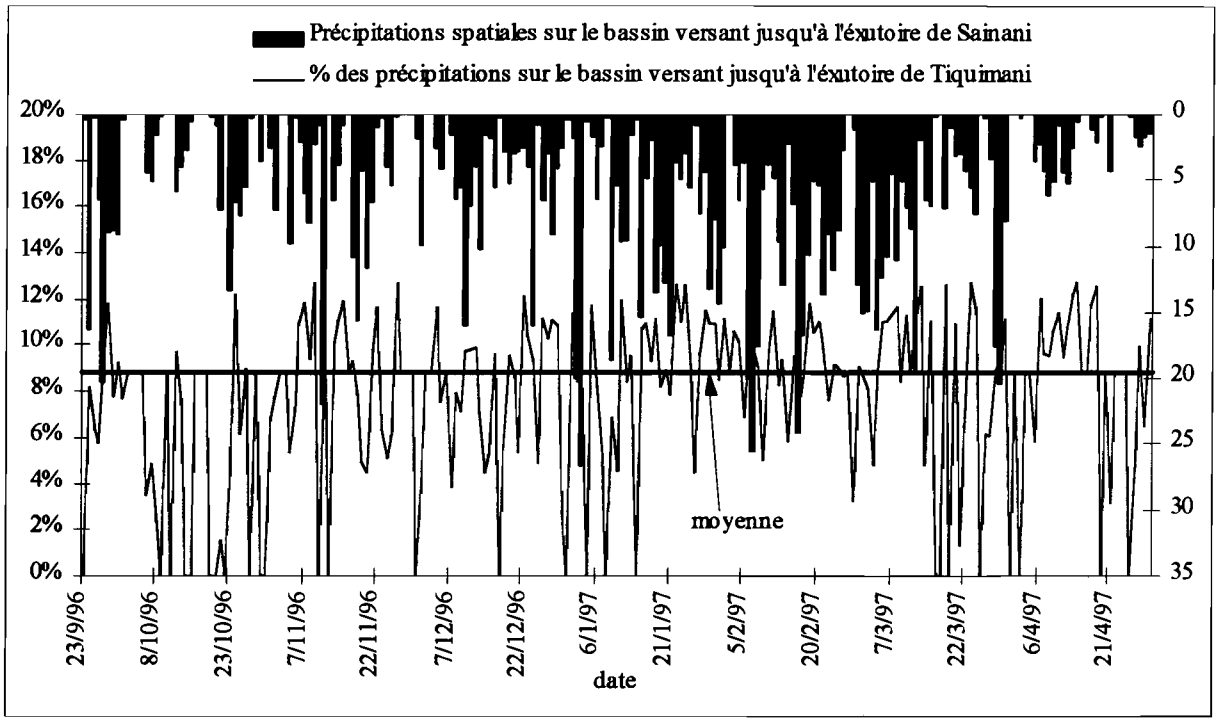


Figure 9 Part des précipitations moyennes sur le bassin de Sainani tombée sur le bassin de Tiquimani

Quant à la modélisation hydrologique, il est important de savoir s'il faut prendre en compte le stockage d'eau dans les retenues pendant la saison des pluies. Plus précisément, s'il faut prendre en compte le stockage de l'écoulement des précipitations et de la fonte de neige. Le volume total d'eau stockée pendant la saison des pluies 1996 ne fait que 3.9 % des précipitations cumulées pendant cette période (Figure 6). Si la part de l'écoulement des précipitations (écoulement direct et fonte de neige) stockée dans les retenues est également aussi faible, on peut la négliger lors d'une modélisation hydrologique, comme on le verra plus tard (cf. 3.2.1). Cela pourrait être le cas si les pics dans la Figure 8 étaient dus à l'apport d'eau de fonte des glaciers plutôt qu'à des précipitations particulièrement abondantes sur les hautes parties du bassin versant qui sont drainées dans les retenues.

La Figure 9 montre la part des précipitations moyennes journalières sur le bassin de Sainani qui est tombée sur le bassin versant de Tiquimani. Le bassin versant de Tiquimani contient toutes les surfaces qui peuvent contribuer au remplissage des retenues les plus importantes. Ce sont surtout les faibles précipitations qui n'intéressent pas la partie haute du bassin. Les précipitations les plus fortes atteignent les zones hautes et apportent généralement un plus grand volume d'eau aux parties hautes du bassin. La valeur moyenne de la part des précipitations sur les parties hautes était de 8.8% en saison des pluies 1996, la valeur

maximale, 12.7% et la valeur minimale, 0%. Cela signifie que la part de l'écoulement provenant des précipitations qui a été stockée lors de cet événement maximal est au maximum 44% plus grande que la part stockée en moyenne pendant toute la saison[9]. C'est-à-dire que si la part des écoulements cumulés des précipitations qui a été stockée dans les retenues pendant la saison des pluies 1996 est de 4%, la part stockée des écoulements journaliers n'a pas pu dépasser 5.8%.

Néanmoins, afin de savoir quelle part de l'écoulement des précipitations a été stockée dans les retenues en saison des pluies 1996, il faudra prendre en compte les pertes d'eau (évapotranspiration et sublimation). Pour le développement de la méthode de reconstitution des débits en saison des pluies (cf. 3.2.1), on part de l'hypothèse que cette part de l'écoulement est négligeable, sans la démontrer[10].

[9] 44% = (12.7%-8.8%) / 8.8%

[10] On pourra vérifier cette hypothèse plus facilement quand on aura des mesures de débit en saison des pluies à Sainani

3. Une méthode pour reconstituer les débits naturels provenant de la fonte des glaciers et des écoulement des versants

3.1 Principe de la méthode de reconstitution des débits naturels

3.1.1 L'estimation des débits *naturels* sans apport des glaciers

Le calage d'un modèle hydrologique utilise en entrée les précipitations et fournit en sortie les débits à l'exutoire du bassin versant. Les débits ne doivent pas être influencés par d'autres données journalières non prises en compte dans le modèle. C'est pour cela qu'on est obligé de faire abstraction pour les débits mesurés à Sainani de l'influence du changement de stock d'eau dans les retenues et des apports d'eau de fonte des glaciers.

Dans une première étape, on essaye d'utiliser les données disponibles sur la variation des niveaux d'eau dans les retenues et sur les débits turbinés aux usines pour estimer les débits *naturels*. Ce sont les débits qui proviennent uniquement des précipitations, de la fonte de neige et de la fonte des glaciers à l'intérieur du bassin versant. En ce sens, le déstockage des retenues en saison sèche signifie un apport extérieur d'eau, qu'il faut soustraire des débits totaux mesurés. Par contre, leur remplissage en saison des pluies est une soustraction d'eau du système qu'il faut additionner aux débits mesurés.

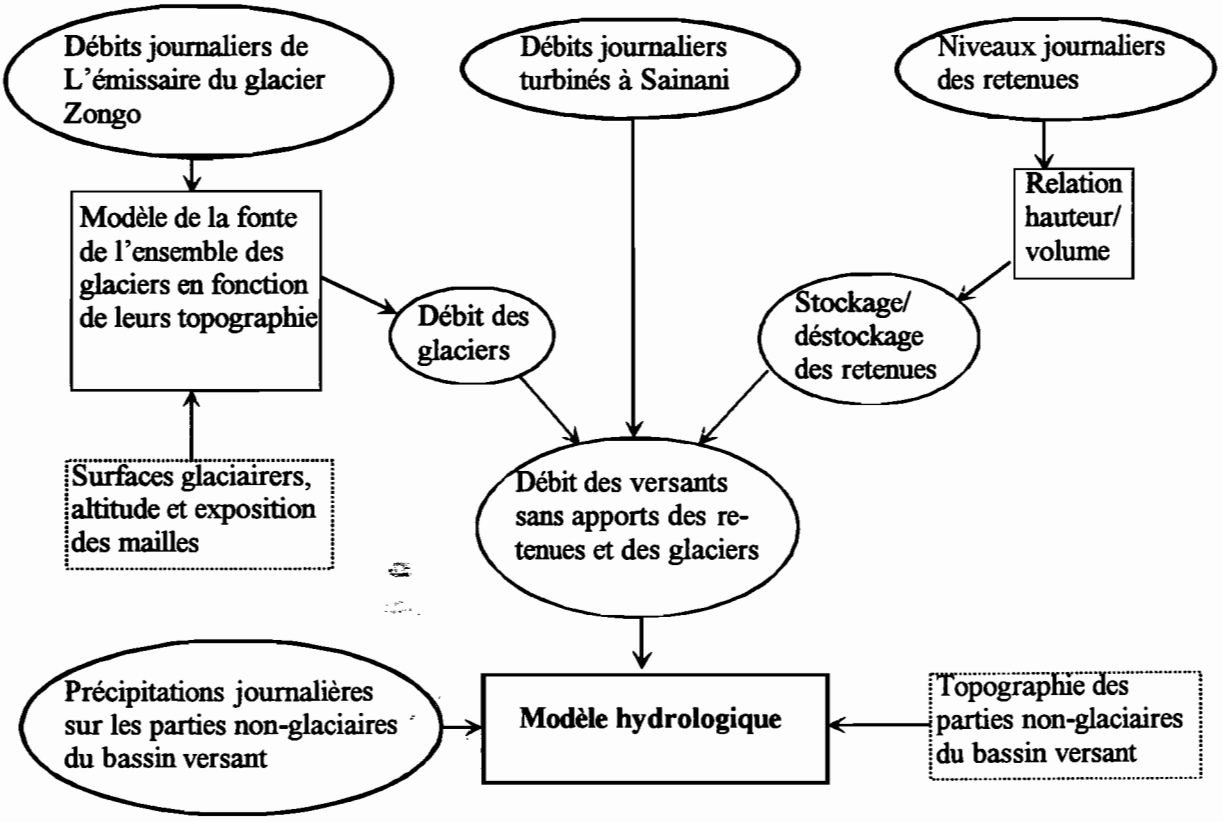


Figure 10 Principe de la modélisation hydrologique de la vallée du Zongo

La modélisation précipitations/débits ne tient pas compte de la fonte des glaciers qui constitue pourtant un apport naturel. La soustraction d'eau de précipitations sur les zones d'accumulation des glaciers n'est pas prise en compte non plus. Les surfaces glaciaires doivent donc être traitées à part et on considérera l'eau de fonte provenant de ces surfaces comme un apport extérieur d'eau. Le principe de la modélisation hydrologique de la vallée du Zongo est présenté sur la Figure 10.

3.1.2 La séparation des périodes de modélisation

Dans les chapitres précédent, on a vu que l'influence du système *artificiel*, c'est-à-dire du changement de stock dans les retenues, n'est pas la même en saison des pluies et en saison sèche. On doit donc la prendre en compte d'une manière différente pendant les deux saisons (cf. 2.3.1 et 2.3.2). En fait, il faut distinguer quatre périodes différentes pendant l'année. On a d'abord la saison des pluies et la saison sèche, qui contient la période d'opération des retenues. Ensuite, il faut distinguer les deux périodes de transition entre les saisons. La plus importante d'entre elles est celle de fin de la saison des pluies.

En 1997, cette période couvrait le mois d'avril (Figure 3, 2.2.5), quand les précipitations avaient déjà diminué, mais les débits continuaient à être importants, c'est-à-dire au-dessus de la capacité maximale de l'usine de Sainani (cf. 2.2.4), sous l'influence de la fonte élevée des glaciers. Pendant cette période, seule la retenue Zongo est contrôlée et les jours de stockage et de déstockage se suivent (Figure 7). Néanmoins, le déstockage pendant cette période de transition ne paraît pas être important. A la fin de la saison des pluies en 1996 et 1997 il constituait environ 2% des débits turbinés à Sainani, avec des maxima de 8.7% en 1996 et de 8.0% en 1997 (résultats qui ne sont pas montrés sur des figures). Si on tient compte du fait que les débits turbinés pendant cette période de transition sont à la limite de capacité de l'usine de Sainani, et par conséquent inférieurs aux débits totaux, l'influence réelle du déstockage est encore plus faible. On peut donc supposer qu'elle est négligeable.

Pendant la période de transition entre la saison des pluies et la saison sèche en 1996 on observe quelques jours de stockage élevé autour du 30 septembre (Figure 4 et Figure 5, 2.2.5) après des fortes précipitations. Le stockage atteint 30% du débit turbiné à Sainani. Il est évident qu'il y a eu stockage durant ces jours, mais le pourcentage paraît exagéré, d'autant plus que pendant cette période la fonte de glaciers est faible. Il s'agit donc très probablement d'un artefact causé par des erreurs de lecture (cf. 2.3.1). Néanmoins, comme on ne prend pas en compte la part du stockage qui provient de l'écoulement des précipitations, et comme la fonte des glaciers n'est pas importante pendant cette période de transition, on peut utiliser la méthode pour la reconstitution des débits de saison sèche (cf. 3.2.1).

Il suffit donc de différencier deux périodes de modélisation. La première est celle de la saison sèche. Elle débute quand le niveau de la retenue Zongo commence à descendre de façon continue, après la période de transition, et elle se termine à la fin de la saison sèche, quand les vannes sont fermées pour remplir les retenues et quand les valeurs du stockage deviennent définitivement positives. En 1996, c'était le cas le 24 octobre (Tableau 2). Pendant le reste de l'année, le déstockage peut être négligé et c'est la méthode pour la reconstitution des débits naturels en saison des pluies qu'on utilise (cf. 3.2.1).

3.1.3 Le problème du décalage horaire des données

Pour faciliter le calcul du changement de stock d'eau total dans les retenues, on a négligé les décalages des heures de lecture des niveaux des retenues et des débits turbinés à Sainani (cf. 2.2.3 et Tableau 3, 2.2.2). Afin d'obtenir une première estimation de l'influence du changement de stock sur les débits, cette simplification était admissible. Néanmoins, dans une modélisation hydrologique précipitations / débits pendant la saison sèche, le déphasage des heures de lecture n'est plus négligeable, sachant que les lectures sont reparties sur presque toute la journée (Tableau 3, 2.2.2).

Site	Temps de transfert à l'usine Sainani	Heure de lecture (niveaux, débit)	Lecture optimale par rapport au lac Zongo, 16.00h	Décalage
Zongo	7 h 35 min.	16h00	16h00	-
Mamankota	8 h 55 min.	09h30	14h40	**- 5 h 10 min.**
Livinosa	5 h 10 min.	19h30	18h25	+ 1 h 5 min.
Sankayuni	3 h 10 min.	20h30	20h25	+ 5 min.
Hatilata	3 h 50 min.	08h00-09h00	19h45	**-9 h 45 (-10h 45)**
Taipicota	4 h	08h30-09h30	19h55	**-10h 25 (-11h 25)**
Guaraguarani	3 h 10 min.	11h00-12h00	20h25	**- 8h 25 (-9h 25)**
Usine Tiquimani	2 h 50 min.	21h00	20h45	+ 15 min.
Usine Santa Rosa	10 min.	23h30	23h25	- 5 min.
Usine Sainani	-	23h30	23h35	+ 5 min.

Tableau 4 Temps de transfert entre les retenues (les usines) et l'usine Sainani, heures de lecture, heures de lecture idéales par rapport à l'heure de lecture du niveau de la retenue Zongo

A l'aide des temps de transfert entre les retenues et l'usine Sainani on peut calculer les heures de lecture idéales par rapport à une heure de lecture donnée à Sainani (ou ailleurs). A fin de minimiser les différences entre ces heures idéales et les heures de lecture réelles, on a choisi la deuxième lecture de la journée dans les cas où il y en a deux par jour. Les résultats sont présentés dans le Tableau 4. On a calculé le décalage par rapport à la deuxième lecture de niveau de la retenue Zongo à 16.00h. On voit que dans les cas des retenues Livinosa et Sankayuni les décalages entre l'heure idéale et réelle sont très faibles. Ce n'est pas un hasard. Les lectures se font pendant l'ouverture et la fermeture des vannes de ces retenues. Comme on essaye de satisfaire les heures de demande de pointe du soir avec leur opération, on a intérêt que l'eau lâchée arrive pendant ces heures aux usines. Pour le lac Zongo, la plupart de l'eau est également lâchée avant 16.00h, afin qu'elle arrive aux heures de pointes aux usines. Malheureusement, ce n'est pas le cas des retenues Hatilata, Taipicota (lacs Tiquimani) et Guaraguarani. Comme ces retenues sont localisées à une demi-journée de marche, leurs vannes ne sont réglées que tous les deux jours (Tableau 3, 2.2.2). C'est là que l'on trouve les différences entre les heures de lecture idéale et réelle les plus importantes ; elles atteignent la demi-journée (Tableau 4). L'influence sur les débits de ces retenues est trop importante pour pouvoir négliger ces différences.

La solution pour la modélisation en saison sèche consiste à remplacer le changement de stock journalier de ces trois retenues par les débits journaliers turbinés à l'usine Tiquimani. A sus du déstockage des retenues Hatilata, Taipicota et Guaraguarani, ces débits contiennent une partie des écoulements des versants que traversent les canaux d'adduction. Tant que ces apports supplémentaires d'eau proviennent des versants de la vallée Tiquimani, c'est-à-dire de l'extérieur du bassin versant du Zongo, l'approche choisie est meilleure que si l'on ne teint

compte que du changement de stock, car on considère la totalité des apports d'eau de l'extérieur du système (cf. 3.1.1). Par contre à l'intérieur du bassin versant du Zongo, les écoulements qui parviennent aux canaux faussent l'estimation des apports extérieurs. Heureusement à l'intérieur du bassin versant, l'eau est principalement transférée dans des tunnels. A proximité du bassin de régulation de l'usine Tiquimani, il y a deux prises d'eau dans des affluents du Zongo qui sont actives en saison des pluies. Les sous bassins captés ont une surface d'environ 3 km^2, ce qui est très faible par rapport à la surface total du bassin versant de 237 km^2. Les pertes dans les canaux et tunnels d'adduction de l'usine Tiquimani sont minimales, c'est-à-dire que presque tout l'apport extérieur d'eau est turbiné.

Un autre décalage horaire important de lecture de niveau concerne le lac Mamankota. Cette retenue de taille moyenne a une influence sur les débits à Sainani qui est normalement au-dessous de 5%, mais qui peut atteindre 10% pendant quelques jours de l'année (cf. 2.3.1 et Annexe). Comme les vannes du lac Mamankota ne sont manœuvrées que tous les deux jours, le débit sortant ne change pas brusquement. Vu la petite influence de la retenue, une interpolation linéaire du volume stocké entre deux lectures de niveaux afin d'obtenir le volume stocké à l'heure *idéale* est admissible.

3.1.4 L'apport d'eau de la vallée Coscapa

Une partie de l'écoulement de la vallée Coscapa est captée par des prises d'eau dans la rivière Coscapa et dans deux de ses affluents. Cette eau est amenée à l'usine Santa Rosa II, en amont de Sainani (cf. 2.2.4). Comme la rivière Coscapa joint la rivière Zongo en aval de Sainani, cet apport d'eau provient de l'extérieur du bassin versant à Sainani. Si tout débit est capté dans les trois prises, les apports d'eau de fonte de tous les glaciers de la vallée du Zongo passent à Sainani. C'est presque le cas en saison sèche, quand les débits qui débordent des prises sont très faibles et probablement négligeables en comparaison avec les débits captés. En saison des pluies, la situation est inverse, le déversement excède de beaucoup ce qui est capté. La question qui se pose est de savoir si on veut inclure ces apports d'eau extérieurs dans la modélisation en saison sèche. Si on les inclut, il faut prendre en compte le déstockage de la retenue Sankayuni qui se trouve à l'amont des prises. Cela aurait l'avantage d'effectuer la modélisation hydrologique en tenant compte des apports de toutes les surfaces glaciaires. Mais le problème de cette inclusion est que les limites du bassin versant sont floues lorsque les pertes dans les canaux ou les déversements des prises d'eau ne sont pas négligeables. Si on ne les inclut pas, il faut soustraire des débits à Sainani les débits qui sont transférés au Zongo par l'usine Santa Rosa II. Comme toute l'eau qui est turbinée à Santa Rosa II provient de l'extérieur du bassin versant, cette démarche a l'avantage d'une délimitation exacte du bassin versant.

3.2 Les méthode pour la reconstitution des débits naturels

3.2.1 La méthode pour la reconstitution des débits naturels en saison sèche

En saison sèche il faut tenir compte du déstockage des retenues. Les changements de niveau des retenues Zongo, Mamankota, Livinosa et éventuellement Sankayuni sont directement utilisés dans la méthode, tandis que les déstockages des lacs Tiquimani et Guaraguarani sont assimilés aux débits turbinés à l'usine Tiquimani. Si on n'inclut pas dans la modélisation hydrologique les zones de la vallée de Coscapa qui sont drainées par les canaux d'adduction de l'usine Santa Rosa II, il faut prendre en compte les apports extérieurs de cette usine aux débits du Zongo.

Le schéma des flux d'eau (Figure 11) montre comment on peut estimer les débits à l'exutoire de Sainani qui proviennent uniquement de l'écoulement des précipitations et de la fonte de la neige (cf. 3.1.1). Ces débits correspondent au flux d'eau (2) dans le schéma[11]. Si on part du débit turbiné à l'usine Sainani (8), qui correspond au débit total du Zongo en saison sèche, on voit qu'il est composé d'autres flux d'eau, dont deux proviennent de l'extérieur du bassin versant. Ce sont les apports d'eau des bassins extérieurs Tiquimani et Coscapa. Le débit turbiné à Santa Rosa II (6) correspond exactement à l'apport extérieur, tandis que le débit turbiné à Tiquimani (7b) contient une petite partie d'eau provenant de l'intérieur du bassin versant (3a) (cf. 3.1.3 et 2.1.1). Si on soustrait (6) et (7b) de (8), on obtient une bonne estimation du débit provenant de l'intérieur du système (la somme des flux 3b, 4a, 4b, 5 et 7a). L'autre composante importante du débit turbiné à Sainani (8) est l'eau du déstockage des retenues à l'intérieur du bassin versant (5). Ce flux n'est pas connu, car les changements du stock d'eau incluent aussi les entrées dans les retenues, qui comprennent les apports des glaciers (4c) et ceux des précipitations et de la fonte de neige (3c). Le changement du stock d'eau est la différence entre le flux (5) et les deux flux (3c) et (4c). En saison sèche, ces derniers sont faibles par rapport au flux (5). Si on soustrait ce changement de stock des débits provenant de l'intérieur du système, on obtient l'écoulement *naturel* composé de l'eau de fonte des glaciers (4a,b,c) et des écoulements des précipitations et de la fonte de neige (3b,c). La somme de ces flux correspond à l'écoulement naturel du bassin versant (somme des flux 1 et 2) diminué par les apports intérieurs aux débits turbinés à l'usine Tiquimani (3a) et augmenté par les pertes des canaux d'adduction de cette usine à l'intérieur du bassin versant (7a). Comme ces deux derniers flux sont très faibles par rapport au total, on obtient une bonne estimation de l'écoulement naturel. Il suffit de soustraire les apports des glaciers (1) pour obtenir le flux cherché, l'écoulement des précipitations et de la fonte de neige du bassin versant (2). En résumant :

$$(2) = (3a,b,c) \sim (3b,c) + (7a) = [(3b) + (4a,b) + (7a) + (5)] - [(5) - (3c) - (4c)] - (4a,b,c)$$

où : $[(4a,b) + (3b) + (7a) + (5)] = [(8) - (6) - (7b)]$ = Différences des débits turbinés
$[(5) - (3c) - (4c)]$ = Changement de stock des retenues
$(4a,b,c) = (1)$ = Eaux de fonte des glaciers

Le schéma détaillé de la méthode pour la reconstitution des débits naturels en saison sèche est présenté dans la Figure 12

[11] On fait l'hypothèse pour la modélisation hydrologique qu'il n'y a pas de pertes d'eau durant le transfert dans les cours d'eau et dans les canaux. Dans la réalité, la largeur des flèches des flux diminue vers le bas à cause de ces pertes et l'estimation des flux inconnus est beaucoup plus compliquée

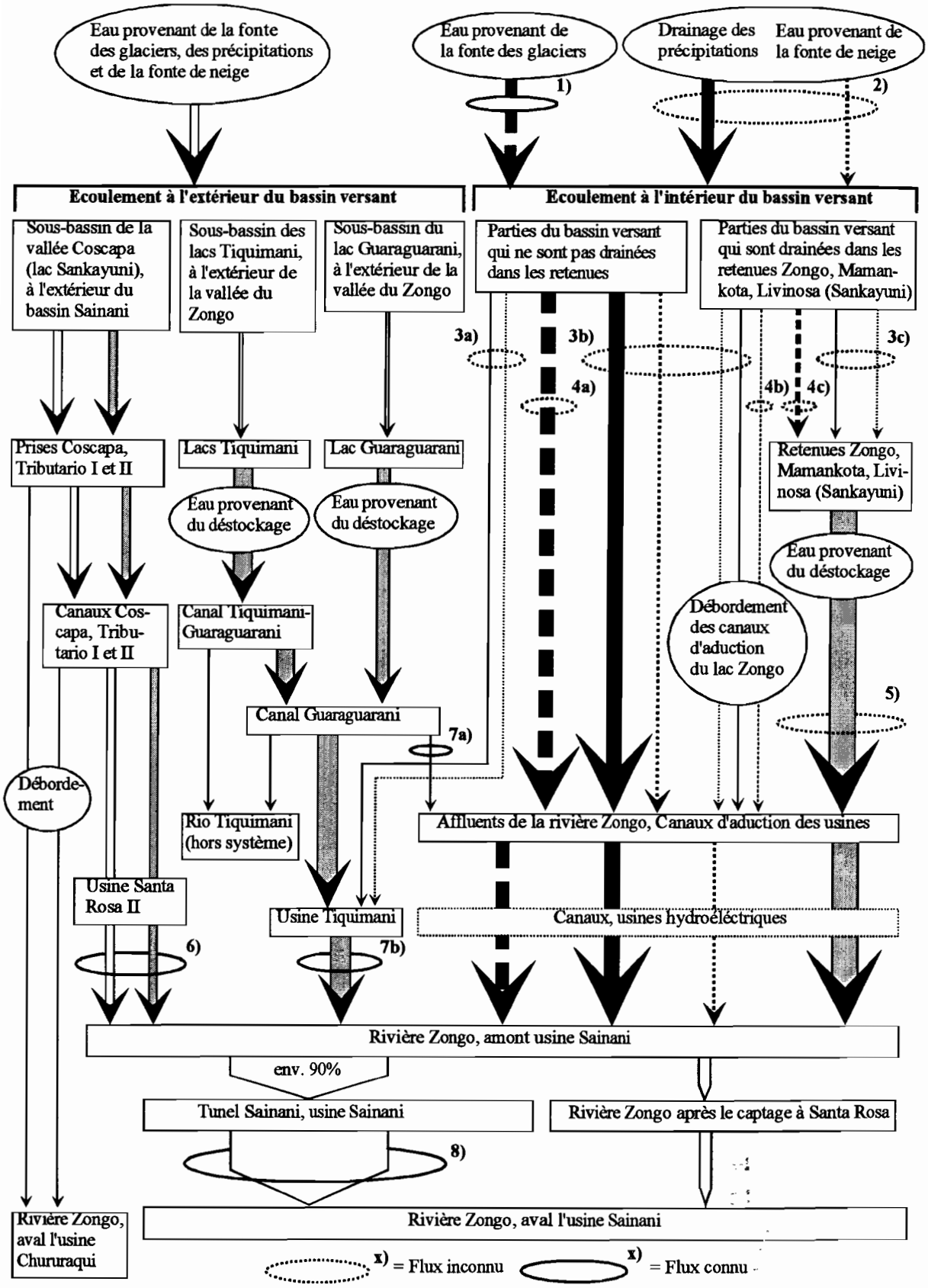


Figure 11 Schéma des flux d'eau dans la vallée du Zongo en saison sèche. Les explications se trouvent dans le texte.

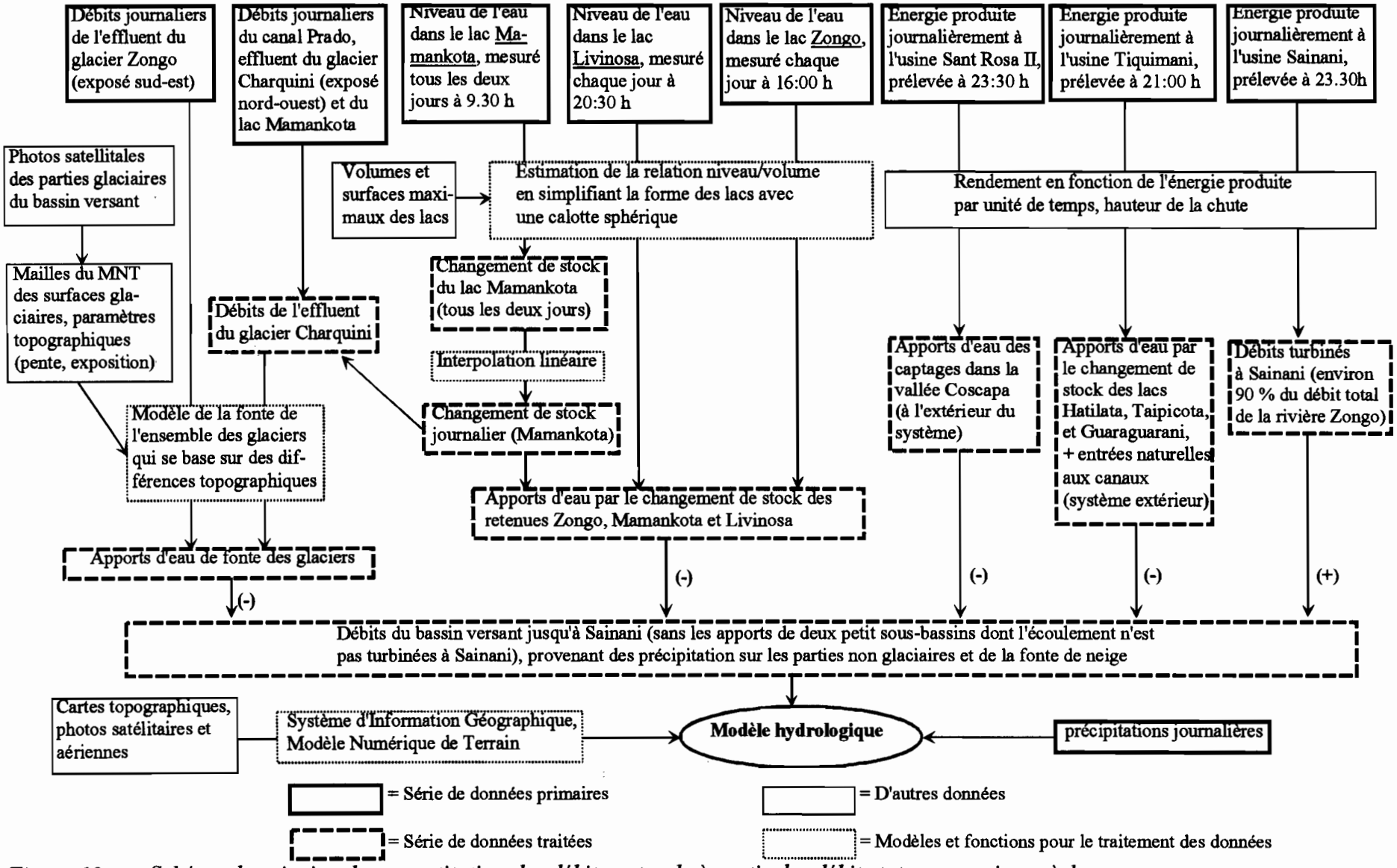


Figure 12 Schéma du principe de reconstitution des débits naturels à partir des débits totaux en saison sèche

3.2.2 La méthode pour la reconstitution des débits naturels en saison des pluies

En saison des pluies, la situation est complètement différente de la saison sèche. Les débits du Zongo et de ses affluents sont beaucoup plus importants et l'influence du système artificiel est plus faible (cf. 2.3.2). Les bassins extérieurs Tiquimani et Guaraguarani n'apportent de l'eau au système qu'à partir du moment où leurs retenues sont pleines. Quant aux retenues à l'intérieur du bassin versant, ce n'est pas leur déstockage mais leur remplissage qu'il faut prendre en compte. Une partie de l'écoulement produit dans le bassin versant n'arrive pas à l'exutoire parce qu'elle est stockée dans les retenues. On fait l'hypothèse que la partie de l'eau qui est utilisée pour remplir les retenues et qui provient des précipitations ou de la fonte de neige est négligeable par rapport aux écoulements totaux provenant de ces deux origines (cf. 2.3.2). En saison des pluies, il n'es pas possible de choisir si on inclut ou non dans la modélisation hydrologique les parties de la vallée Coscapa qui sont captées par les canaux d'adduction de l'usine Santa Rosa II (cf. 3.1.4). Le déversement des prises est trop important.

La Figure 13 des flux d'eau montre comment on peut estimer les débits à l'exutoire de Sainani qui proviennent uniquement des précipitations et de la fonte de neige (cf. 3.1.1). Ces débits correspondent au flux d'eau (2) dans le schéma. En saison des pluies, on doit disposer de mesures de débit total à Sainani, les débits turbinés n'ayant pas de relation avec les débits réels (cf. 2.2.4). Ce débit total correspond au flux (8) dans le schéma. Si on en soustrait les apports extérieur de la vallée Coscapa, connus par les débits turbinés à l'usine Santa Rosa II (7), on obtient l'écoulement provenant de l'intérieur du bassin versant, avec un petit apport extérieur d'eau du système Tiquimani/Guaraguarani (6). Cet apport ne se produit que quand les lacs Tiquimani et Guaraguarani débordent, à la fin de la saison des pluies. On part de l'hypothèse que ce flux (6) est petit par rapport au flux total d'eau, au regard de la petite surface du système extérieur par rapport à la surface totale du bassin versant. Pendant que les retenues Mamankota et Livinosa se remplissent, il n'y a pas de débordement, c'est-à-dire que les écoulements des sous bassins de ces deux retenues (4a, 3a) sont entièrement stockés et ne contribuent pas aux débits à Sainani. Ce n'est pas le cas de la retenue Zongo, dont les vannes sont manœuvrées toute l'année. L'eau lâchée correspond au débit turbiné à l'usine Zongo (5). Si on soustrait ce flux (5) de l'écoulement provenant de l'intérieur du bassin versant ((8)-(7)), on obtient l'écoulement naturel du bassin versant moins la part qui est stockée dans les retenues ((3a,b) et (4a,b)).

Sous l'hypothèse que les flux d'eau dans les retenues qui proviennent des précipitations et de la fonte de neige (3a,b) sont négligeables (cf. ci-dessus et 2.3.2), ce n'est que la part de l'eau de stockage qui provient de la fonte des glaciers (4a,b) qu'il faut prendre en compte. Autrement dit, il suffit de soustraire des écoulements naturels ((8)-(7)-(5)) l'écoulement qui provient des glaciers et qui n'est pas stockée dans les retenues (4c,d) pour obtenir l'écoulement des précipitations et de la fonte de neige. A la différence des autres retenues, le lac Zongo est alimenté par des canaux. Comme ces canaux et les prises d'eau qui les alimentent peuvent déverser, ce n'est pas toute l'eau des sous bassins drainés qui parvient au lac. A partir des surfaces glaciaires, on peut estimer le total de l'écoulement d'eau de fonte dans ces sous bassins ((4b)+(4c)), mais pas la part de ce qui arrive dans le lac Zongo. Sous l'hypothèse que le déversement d'eau de fonte (4c) est négligeable, l'écoulement des précipitations et de la fonte de neige (2) est obtenu par la différence entre les écoulements naturels ((8)-(7)-(5)) et l'écoulement des surfaces glaciaires qui n'est pas transféré vers les

retenues (4d)[12]. Les apports d'eau de fonte des glaciers doivent être calculés en fonction du débordement des retenues Livinosa et Mamankota. Au moment où l'une des deux retenues Livinosa ou Mamankota déverse, il est nécessaire d'augmenter les surfaces glaciaires dont on calcule l'apport aux débits naturels (4d) par les surfaces glaciaires du sous bassin drainé par cette retenue (une partie du flux (4a)). Néanmoins, les surfaces glaciaires drainées par les retenues Mamankota et Livinosa sont assez petites par rapport aux surfaces glaciaires totales du bassin versant pour que les apports additionnels d'eau de fonte soient négligeables. En résumant :

1) Sans débordement des lacs Livinosa ou Mamankota :

$$(2) = (3a,b,c) = (8) - (7) - (6) - (5) - (4d) - (4c) \sim (8) - (7) - (5) - (4d)$$

2) Avec débordement :

$$(2) = (3a,b,c) = (8) - (7) - (6) - (5) - (4d) - (4c) - (4a) \sim (8) - (7) - (5) - (4d) - (4a)$$

où : (8) = Débits totaux mesurés à Sainani
(7) = Débits turbinés à l'usine Santa Rosa II
(5) = Débits turbinés à l'usine Zongo
(4d) = Eaux de fonte des glaciers qui ne sont pas drainées par les retenues
(4a) = Eaux de fonte des glaciers qui sont drainées par les retenues Mamankota et/ou Livinosa

[12] Si cette hypothèse est fausse, on pourrait utiliser les débits des canaux Prado, Tubo Verterdero et Alpaca pour calculer l'apport d'eau au lac Zongo ((4b)+(3b)). En ajoutant ce flux aux écoulement naturels ((8)-(7)-(5)) et en soustrayant l'apport des surfaces glaciaires qui ne sont pas drainées par les retenues Mamankota et Livinosa ((4d)+(4b)), on obtiendrait une estimation de l'écoulement des précipitations qui tient compte du débordement des canaux d'adduction au lac Zongo.

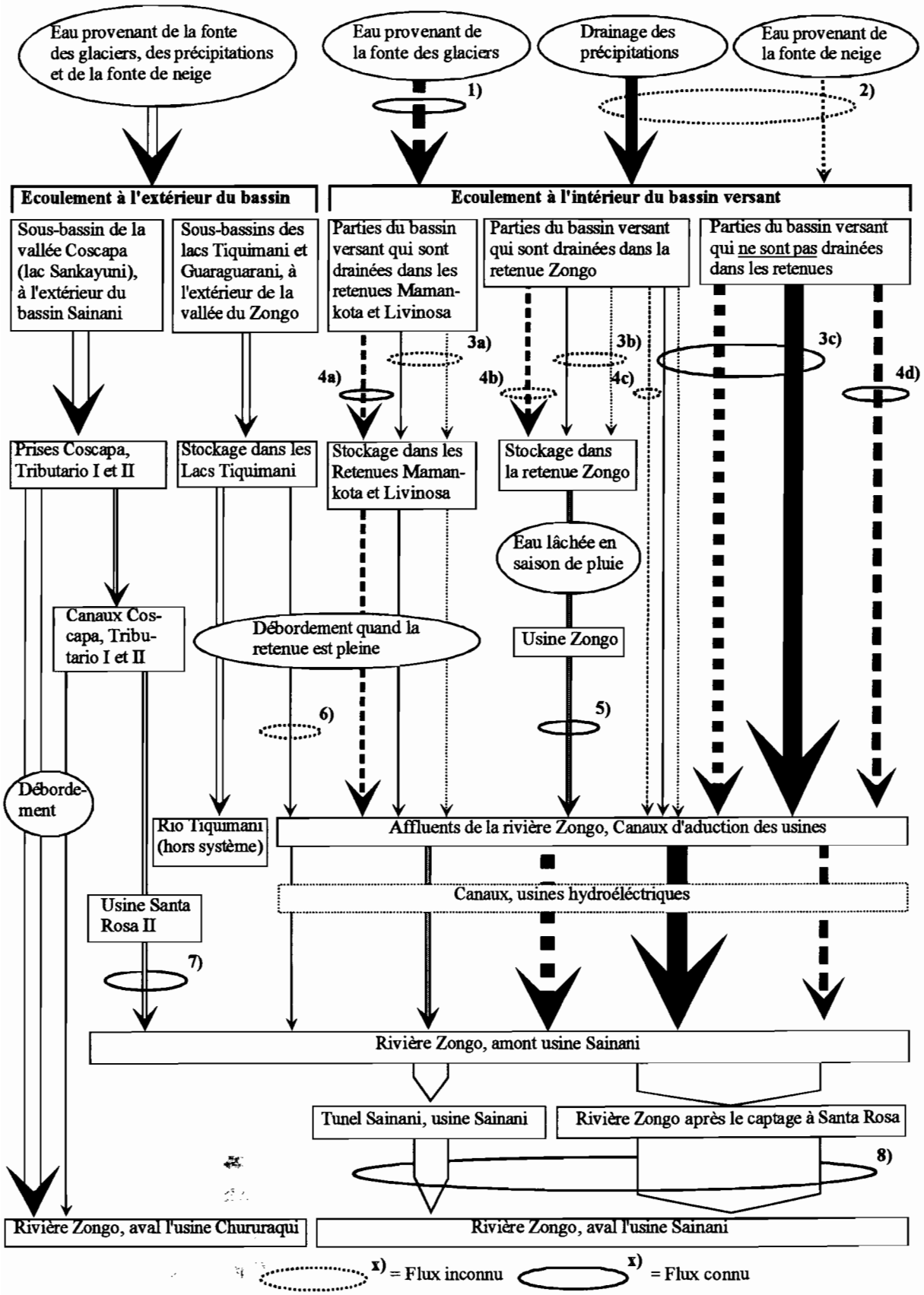


Figure 13 Schéma des flux d'eau dans la vallée du Zongo en saison des pluies. Les explications se trouvent dans le texte.

4. Amélioration et application de la méthode pour la reconstitution des débits naturels en saison sèche

4.1 Reconstitution des débits turbinés

4.1.1 Estimation des rendements des usines

Pour l'étude préliminaire de l'influence du changement de stock sur les débits mesurés à Sainani (cf. 1) on s'est basé sur des rendements approximatifs des usines hydroélectriques, c'est-à-dire sur les facteurs d'usine utilisés par la COBEE (cf. 2.2.4). Ces facteurs se basent sur des rendements des turbines qui datent de l'installation des usines. Or, ces turbines ont été remplacées par des modèles nouveaux, qui ont de meilleures performances. Pour l'étude préliminaire, les facteurs d'usines utilisés étaient acceptables, mais pour calculer les débits naturels à appliquer avec les méthodes de la reconstitution des débits en saison sèche et en saison des pluies (cf. 3.2.1, 3.2.1), il faut des valeurs plus précises. Comme les rendements, et par conséquent les facteurs d'usines, varient avec la puissance instantanée (par rapport à la puissance maximale ou capacité), il convient de faire varier ces facteurs d'usine. On les a donc estimé pour 25, 50, 75 et 100% de la puissance instantanée par rapport à la capacité. Entre ces valeurs, on interpole linéairement afin d'obtenir un point tous les 5% de la courbe.

Les facteurs d'usine ont été estimés en différentiant les rendements totaux des usines. On a considérés les pertes dans la conduite forcée et dans l'injecteur de la turbine (rendement de la conduite), les pertes dans la roue hydraulique (rendement de la turbine) et les pertes du générateur d'électricité (rendement du générateur) (cf. Tableau 2). Généralement, ce sont les rendements des conduites qui varient le plus d'une usine à l'autre. Les pertes dans la conduite dépendent de différents facteurs, dont les principaux sont la longueur de la conduite et sa rugosité. On dispose des valeurs calculées des rendements de la conduite forcée de l'usine Santa Rosa II. La méthode de calcul est basée sur des mesures de pression dans l'injecteur et des puissances instantanées (cf. Annexe C). Elle permet d'obtenir séparément les pertes (les rendements) dans la conduite, dans l'injecteur et dans l'ensemble turbine/générateur. Pour les autres usines, on ne dispose pas des mesures nécessaires à l'application la méthode. La chute de la conduite forcée de l'usine Sainani est la plus courte (291 m), ce qui mène à des rendements proches de 1. On a choisit des valeurs expérimentales de la littérature pour les rendements de la conduite de cette usine. Les rendements des autres conduites ont été calculés par interpolation linéaire. Les pertes dans l'injecteur, qu'on inclut dans le rendement de la conduite, peuvent être estimées pour l'usine Santa Rosa II selon le même calcul. On fait l'hypothèse qu'elles ne varient pas beaucoup d'une usine à l'autre.

Le rendement de la turbine dépend principalement de l'âge de la roue hydraulique. Comme les roues de toutes les usines datent des dernières années, on a fait l'hypothèse que les rendements des turbines correspondent aux rendements indiquées par les fabricants, en négligeant les autres pertes dans les turbines, qui sont petites par rapport à celles de la roue. On dispose de ces informations pour les usines Tiquimani et Sainani. On a adopté pour l'usine Zongo, plus âgée que l'usine toute neuve de Tiquimani, le même rendement des roues

hydrauliques qu'à Sainani. Pour Santa Rosa II, il n'est pas nécessaire d'estimé les rendements, puisque le calcul déjà mentionné donne directement les rendements de l'ensemble turbine/générateur.

Les rendements des générateur ne varient pratiquement pas d'une usine à l'autre et ne diminuent pas avec le temps. On s'est donc également basé sur les valeurs indiquées par les fabricants, en supposant que les valeurs sont les mêmes aux usines pour lesquelles on ne dispose pas de l'information.

Tiquimani	*25*	*50*	*75*	*100*	Source :
Turbine	0,893	0,902	0,906	0,899	données du fabricant
Générateur	0,932	0,961	0,969	0,972	données de Santa Rosa II
Conduite	0,921	0,875	0,841	0,762	interpol. lin. chutes Sain./SR II
Total	0,767	0,759	0,738	0,666	chute brute d'eau (m) : 487
F. U. (kWh/m3)	**1,017**	**1,008**	**0,980**	**0,883**	capacité max. (MW) : 9.4
Santa Rosa II	*25*	*50*	*75*	*100*	
Turbine	0,730	0,832	0,846	0,843	calcul (Turbine et Gén./Gén.)
Générateur	0,932	0,961	0,969	0,972	données du fabricant
Conduite	0,921	0,864	0,818	0,731	calcul *1)
Turbine et Gén.	0,680	0,800	0,820	0,820	calcul *1)
Total	0,626	0,691	0,671	0,599	chute brute d'eau (m) : 830
F. U. (kWh/m3)	**1,416**	**1,563**	**1,518**	**1,356**	capacité max. (MW) : 6.8
Sainani	*25*	*50*	*75*	*100*	
Turbine	0,884	0,895	0,901	0,897	données du fabricant
Générateur	0,925	0,956	0,967	0,9715	données du fabricant
Conduite	0,921	0,882	0,854	0,779	expérience*2)
Total	0,753	0,755	0,744	0,679	chute brute d'eau (m) : 291
F. U. (kWh/m3)	**0,597**	**0,598**	**0,590**	**0,538**	capacité max. (MW) : 10.4
Zongo	*25*	*50*	*75*	*100*	
Turbine	0,884	0,895	0,901	0,897	comme données Sainani
Générateur	0,932	0,961	0,969	0,972	comme données S.R. II
Conduite	0,921	0,878	0,846	0,769	Interpol. lin. chutes Sain./SR II
Total	0,759	0,756	0,739	0,671	chute brute d'eau (m) : 377
F. U. (kWh/m3)	**0,779**	**0,776**	**0,759**	**0,689**	capacité max.(MW) : 4.4/10.5

*Tableau 5 Rendements et facteurs d'usine en fonction du pourcentage de la puissance instantanée par rapport à la puissance nominale (capacité). *1) Calculs du rendement à partir des séries de mesures de la pression dans la sortie de la conduite forcée et la puissance instantanée correspondante (logiciel de la COBEE). *2) Valeurs approximatives données par le responsable de la production d'électricité*

Le résumé des calculs des rendements et des facteurs d'usine est présenté dans le Tableau 5. On voit que c'est principalement la hauteur de la chute qui détermine la variabilité des facteurs d'usine. Les rendements totaux sont pratiquement les mêmes pour toutes les usines, à l'exception de Santa Rosa II, dont le rendement total est affaibli par la hauteur exceptionnelle de la chute. Comme les rendements varient peu entre eux, la correction se répercute sur les débits de façon sensiblement proportionnelle ; c'est-à-dire que tous les débits augmentent ou

diminuent du même facteur. Pour la reconstitution des débits naturels on travaille avec des différences des débits turbinés et des stock d'eau dans les retenues (3.2.1 et 1.1.1). C'est pour cela qu'une correction des rendements, et par conséquent des débits turbinés, peut beaucoup influencer l'hydrogramme des débits reconstitués. Même une correction proportionnelle des débits turbinés ne consuit pas à une augmentation ou à une diminution d'un facteur constant des débits reconstitués. Afin de pouvoir reconstituer correctement les débits naturels du bassin, il est absolument nécessaire que l'estimation des rendements des usines soit correcte. Il faudrait donc améliorer ces estimations avec des données supplémentaires comme des jaugeages ou l'application de la méthode d'estimation de la COBEE à d'autres usines.

4.1.2 Reconstitution des débits turbinés

Les débits turbinés des usines Zongo, Tiquimani, Santa Rosa II et Sainani, qui interviennent dans la détermination des débits naturels, ont été reconstitués à partir des puissances instantanées, enregistrées à des intervalles d'une heure ou d'une demi-heure (durant les heures de pointe). On a déterminé les facteurs d'usines et les débits turbinés à chaque intervalle de mesure. Les débits journaliers sont obtenus par addition des ces débits entre une heure choisie et la même heure le lendemain. Comme on l'a vu dans le chapitre précédent, il est nécessaire de décaler les débits turbinés par le temps de propagation entre les usines afin de pouvoir reconstituer les débits naturels (cf. 3.1.3). Dans la Figure 14 les débits journaliers des quatre usines sont présentés pour la période du 2 avril au 30 septembre 1997.

On voit bien que jusqu'à la fin avril les débits à Sainani sont constants, c'est-à-dire à la limite de la capacité maximale de l'usine. Cette limite n'est plus dépassée ensuite jusqu'à la fin septembre. C'est donc cette période durant laquelle les débits turbinés correspondent aux débits totaux à Sainani et avec laquelle on va travailler par la suite (cf. 2.2.4).

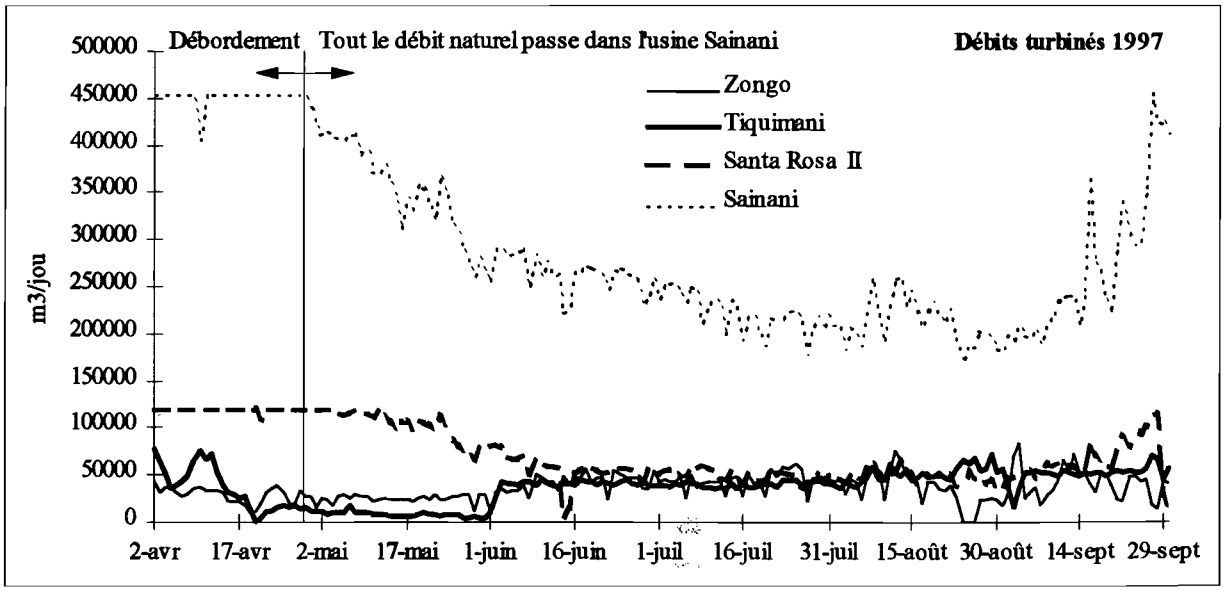


Figure 14 Débits turbinés reconstitués pour les usines Zongo, Tiquimani, Santa Rosa II et Sainani, qui interviennent dans la détermination des débits naturels.

A partir des débits horaires on peut calculer les débits moyens pour chaque intervalle de temps, c'est-à-dire pour les débits moyens journaliers à partir d'heures fixes. Les hydrogrammes journaliers moyens des usines ainsi obtenus sont présentés et discutés dans le paragraphe suivant.

4.1.3 Discussion des hydrogrammes journaliers moyens des usines

On peut observer sur la Figure 15 que les débits turbinés des usines Zongo et Tiquimani varient sensiblement au cours de la journée. Ces usines se trouvent en-tête du système, en aval des retenues importantes (lac Zongo et lacs Tiquimani) qui drainent des sous bassins relativement petits. Ce ne sont donc pas des usines de fil de l'eau et leurs productions hydroélectriques en saison sèche sont complètement adaptées à la demande au cours de la journée (cf. 2.1.1). Par conséquent, les débits turbinés de ces deux usines sont les plus élevés pendant les heures de pointe de la demande, à midi et le soir. Ce n'est pas le cas pour Santa Rosa II. Bien qu'en aval d'un système de retenues dont la plus importante est le lac Sankayuni, la possibilité de réguler la production est limitée. Car le sous bassin de la rivière Coscapa, partiellement drainé par l'usine, est beaucoup plus grand devant les volumes de régulation que dans les cas des usines Zongo et Tiquimani. Par conséquent, l'hydrogramme est moins variable au cours de la journée. On observe quand même l'influence de l'ouverture des vannes du lac Sankayuni entre 16h00 et 19h30, ce qui augmente la production et les débits turbinés de l'usine durant les heures de pointe. Les hydrogrammes moyens des trois autres usines se retrouvent finalement dans les débits turbinés de l'usine Sainani. C'est la raison pour laquelle l'hydrogramme est aussi variable que pour les usines Zongo et Tiquimani, avec la différence que les débits turbinés ne s'annulent jamais, à cause des écoulement qui ne dépendent pas de manœuvres des retenues.

L'organisation du système hydraulique explique donc bien les hydrogrammes journaliers moyens trouvés pour les quatre usines. Néanmoins, on observe une anomalie qui, à première vue, semble difficile à expliquer. Pourquoi les pointes de l'hydrogramme de l'usine Sainani ne sont-elles pas déphasées par le temps de propagation depuis Zongo et Tiquimani ? Il n'y a qu'une seule explication possible. Une partie de l'eau turbinée par les usines Zongo et Tiquimani est retenue dans des bassins de régulation intermédiaire et lâchée le lendemain, afin d'augmenter la production de Sainani au moment des heures de pointe. Or, on a négligé la variation de stock de ces bassins intermédaires lors du calcul du changement de stock total des retenues (cf. 2.2.3) en estimant leurs volumes utiles trop petits pour avoir une influence significative. Le résultat de l'étude préliminaire semblait confirmer cette hypothèse, parce que l'influence sur les débits turbinés à Sainani de la plus petite retenue étudiée, San Pedro, de la taille des bassins intermédiaires, était négligeable (cf. 2.3.1). Mais l'eau du lac San Pedro est lâchée d'une manière régulière. Durant une période de déficit, on ouvre les vannes durant certaines heures de la journée (cf. 2.2.2), sans lâcher toute l'eau d'un seul coup.

Les stock d'eau des bassins intermédiaires, par contre, doivent varier beaucoup plus, parce qu'on essaie à travers leur gestion de mieux adapter la production des usines en aval à la demande d'électricité pendant la journée, c'est à dire de décaler de quelques heures les débits qui arrivent des usines en amont. Est-ce que cela rend nécessaire la prise en compte du changements de stock des retenues intermédiaires dans la méthode pour la reconstitution des débits naturels en saison sèche (cf. 3.2.1) ? On cherchera dans la suite une réponse à cette question.

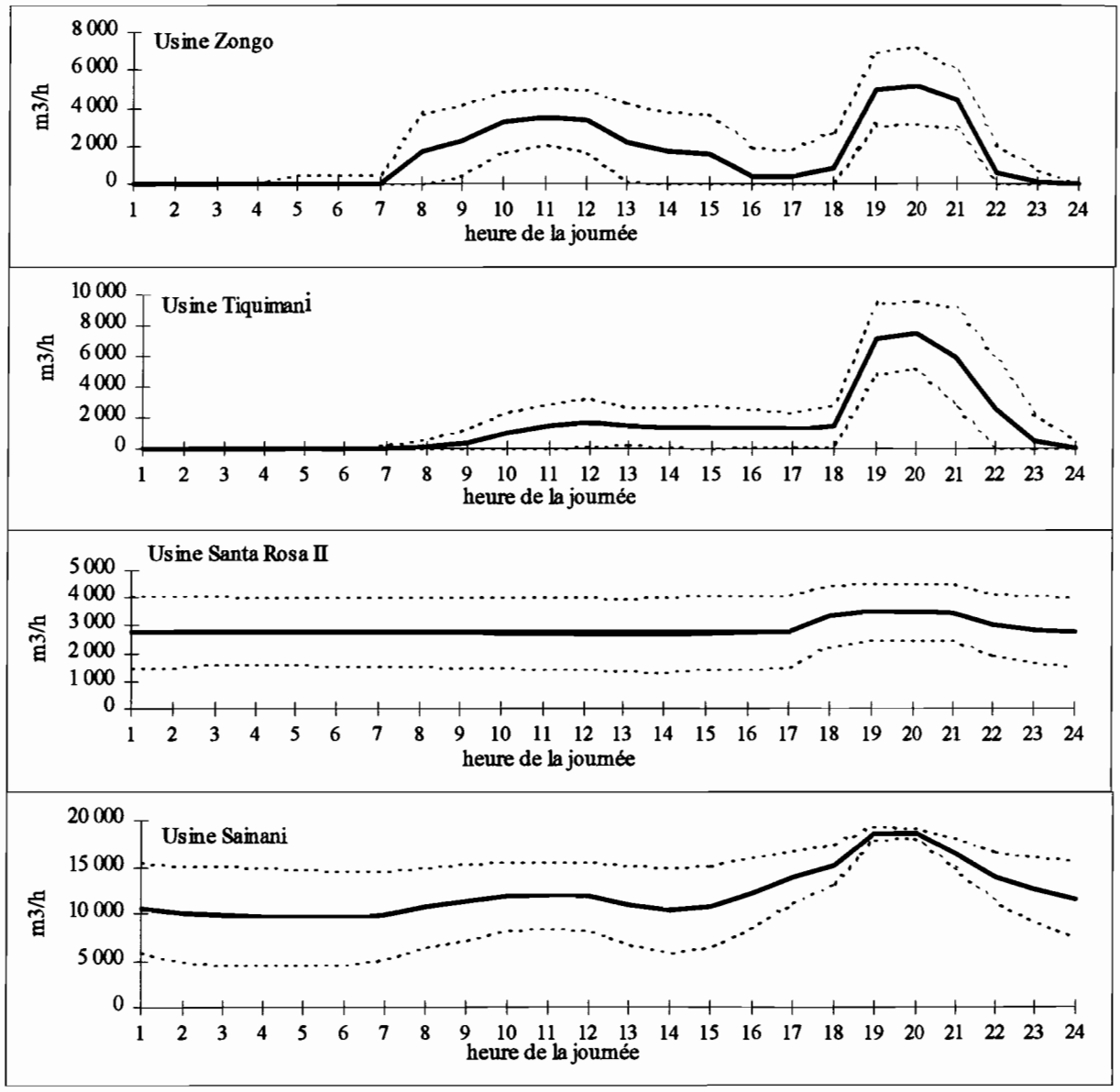


Figure 15 Hydrogrammes journaliers moyens des usines (+/- écart-type), déterminés à partir des débits horaires entre le 2 mai au 30 septembre 1997

4.2 Le rôle des petits bassins intermédiaires de régulation

4.2.1 Données et informations disponibles sur les bassins intermédiaires et leurs gestion

Il y a trois bassins intermédiaires, deux grands et un plus petit. Les deux grands bassins se trouvent juste à l'aval de l'usine Tiquimani (*Dique Botijlaca*) et au droit de la prise du canal Cuticucho, en aval de l'usine Botijlaca (*Dique Cuticucho*). Le troisième (*Dique Intermédio*) est situé à trois quart de la distance entre les usines Zongo et Tiquimani. Pour la localisation de ces bassins on peut consulter le schéma du bassin versant (cf. 1.2.2, Figure 1). Les niveaux des deux bassins intermédiaires Botijlaca et Cuticucho sont enregistrés par la COBEE à des intervalles d'une demi heure à une heure, comme pour les puissances instantanées (cf. 4.1.2). On connaît les volumes totaux de ces deux bassins, mais les relations hauteur d'eau/volume sont inconnues. Du troisième bassin intermédiaire (Dique Intermedio), on ne connaît pas le

volume et les niveaux ne sont pas relevés. A cause cette absence de données, on a préféré estimer la variation du stock d'eau dans les bassins sur la période de la saison sèche 1997 à l'aide des hydrogrammes horaires des quatre usines Zongo, Tiquimani, Santa Rosa II et Sainani, dont les données de base (puissances instantanées) sont disponibles. La variation de stock et son influence sur les débits naturels à Sainani est ensuite calculée et interprétée.

Les volumes des bassins Botijlaca et Cuticucho sont respectivement de 16 880 m^3 et de 9 390 m^3. Les volumes du bassin Intermedio et du bassin de charge de l'usine Sainani doivent être beaucoup plus faibles. On dispose d'informations qualitatives sur la gestion des bassins intermédiaires que nous a données le responsable de la gestion de production : on tente de maximiser la production durant les heures de pointe ; c'est-à-dire, de lâcher le maximum d'eau des bassins de sorte qu'il arrive aux heures de pointes aux usines au fil de l'eau de grande capacité, dont la première vers l'aval est Sainani. Ces lâchures se font parfois au détriment de la production d'électricité par les usines plus petites de Botijlaca, située entre les bassins de régulation Botijlaca et Cuticucho, et de Cuticucho, en aval du bassin Cuticucho. Ainsi, quand le bassin Botijlaca est plein, l'eau n'est pas seulement redirigée dans le canal Botijlaca, qui alimente l'usine, mais elle est aussi et principalement déversée dans la rivière Zongo. La rivière est en effet utilisée comme volume de stockage. Car les débits prennent plus de temps pour arriver à l'aval de l'usine Botijlaca lorsqu'ils se propagent dans le lit naturel. Le même principe s'applique dans le cas du bassin de régulation et de l'usine de Cuticucho. Un autre principe de la gestion des bassins intermédiaires consiste à essayer d'atteindre les niveaux de remplissage maximaux vers six heures du matin. De cette manière, on est prêt à les vidanger pour augmenter le production électrique durant les heures de pointe. En saison sèche, toujours selon les informations du responsable de la gestion de production, presque tous les débits provenant des usines Zongo et Tiquimani peuvent être déphasés vers les heures de pointes de la production des grandes usines en aval, en utilisant les volumes de stock disponible. C'est-à-dire qu'il n'y a pas de débit turbiné à Zongo et Tiquimani qui ne passe directement à Sainani, sans être décalésdans le temps par le stockage dans les retenues intermédiaires.

4.2.2 Une méthode pour l'estimation de la courbe de stockage de l'ensemble des bassins intermédiaires

On peut faire cinq hypothèses simplificatrices pour reconstituer les volumes stockés dans les bassins intermédiaires :

1) Les débits dans le lit naturel de la rivière Zongo se propagent approximativement comme une onde cinématique
2) La vitesse de propagation de crue est à peu près constante sur toute le bief entre l'usine Zongo et l'usine Sainani
3) En saison sèche, tous les débits provenant des usines Zongo et Tiquimani sont décalés dans le temps par le stockage dans les retenues
4) Les débits stockés dans les retenues sont plutôt propagés par le lit naturel que par les systèmes artificiels canal Botijlaca / usine Botijlaca et canal Cuticucho / usine Cuticucho (cf. 4.2.1).
5) Les débits provenant du déstockage de la retenue Livinosa sont devant les débits turbinés dans les usines Tiquimani et Zongo

La première hypothèse se justifie parce qu'on a pas besoin d'une grande précision pour l'analyse de l'évolution du stock total estimé. La deuxième se base sur le fait que les pentes ne varient pas beaucoup sur le bief considéré. La troisième et la quatrième hypothèse se basent sur l'expérience du responsable de la gestion de production (cf. 4.2.1). La cinquième hypothèse est nécessaire parce que les débits provenant du déstockage de la retenue Livinosa sont stockés dans le bassin Cuticucho. Sur la période considérée elle est vérifiée parce que les manœuvres de cette retenue n'ont commencé en 1997 que fin septembre.

Les hypothèses 2) et 3) permettent d'assimiler les trois bassins de régulation et le bassin de charge de l'usine Sainani à un seul bassin de rétention. Le volume utile de cette retenue fictive contient les volumes des trois bassins de régulation et du bassin de charge de l'usine Sainani ainsi que la capacité de stock de la section de la rivière Zongo entre le premier bassin (Dique Intermedio) et le bassin de charge de l'usine Sainani (cf. 4.2.1).

Sous les hypothèses 1) et 2) la position de cette retenue fictive sur la section de la rivière entre le premier et le dernier bassin n'a pas d'influence sur la variation du stock d'eau total au cours de la journée (courbe de stockage). Comme sous les deux hypothèses une quantité d'eau se propage indépendamment de son volume[13] et avec une vitesse constante sur toute la section vers l'aval. Par conséquent, quelque soit la position de la retenue, les décalages dans le temps des hydrogrammes des débits d'entrées et de sortie sont les mêmes et la courbe de variation de stock ne change pas de forme. Ce qui change avec le localisation de la retenue fictive, c'est la position absolue sur l'axe des temps de cette courbe. C'est-à-dire que si la retenue est à l'amont, un point singulier de la courbe (par exemple le stock maximal) est atteint plus tôt que si elle se trouve plus à l'aval. Le décalage sur l'échelle des temps correspond au temps de propagation de l'eau dans la rivière entre deux positions de la retenue fictive. Pour la suite (et dans les graphiques) on va supposer que la retenue fictive se trouve à la place du bassin de charge de l'usine Sainani.

Afin de pouvoir estimer la variation du stock d'eau au cours de la journée, il faut connaître les hydrogrammes instantanés d'entrée et de sortie de la retenue fictive. L'hydrogramme d'entrée est facile à déterminer. Il suffit de retarder les hydrogrammes instantanés des usines Zongo et Tiquimani de la durée de transfert entre ces usines et l'usine Sainani (Figure 16). Les deux usines produisent uniquement pendant les heures de pointe et ce sont les débits totaux qui constituent le volume à décaler vers les heures de pointe des grandes usines en aval au travers la gestion des bassins intermédiaires (cf. 4.1.3 et 4.2.1). En ce qui concerne les entrées de débits naturels dans la retenue, elles sont prises en compte dans l'estimation des débits de sorties. Car la rétention d'un débit naturel instantané diminue d'autant l'hydrogramme de sortie, comme on le verra dans la suite.

L'hydrogramme de sortie peut être estimé en utilisant les hydrogrammes instantanés des quatre usines Zongo, Tiquimani, Santa Rosa II et Sainani. L'hydrogramme instantané des débits turbinés à Sainani se compose de l'hydrogramme instantané de sortie de la retenue fictive, de l'hydrogramme instantané de Santa Rosa II, qui constitue un apport latéral (cf. 3.1.4), et des débits naturels du bassin versant jusqu'à l'usine Sainani, sans les apports des sous bassins captés par les usines Tiquimani et Zongo. Car sous l'hypothèse 3), la totalité des débits de ces bassins (les débits turbinés) est retenue dans les bassins intermédiaires et donc

[13] Cette condition est vérifiée par l'absence de terme de diffusion pour l'onde cinématique.

contenus dans l'hydrogramme de sortie. L'hydrogramme de sortie des retenues correspond finalement à la différence entre l'hydrogramme des débits turbinés à Sainani, sans les apports de Santa Rosa II[14], et les débits naturels jusqu'à Sainani, sans les apports des bassins captés par les usines Tiquimani et Zongo (Figure 16).

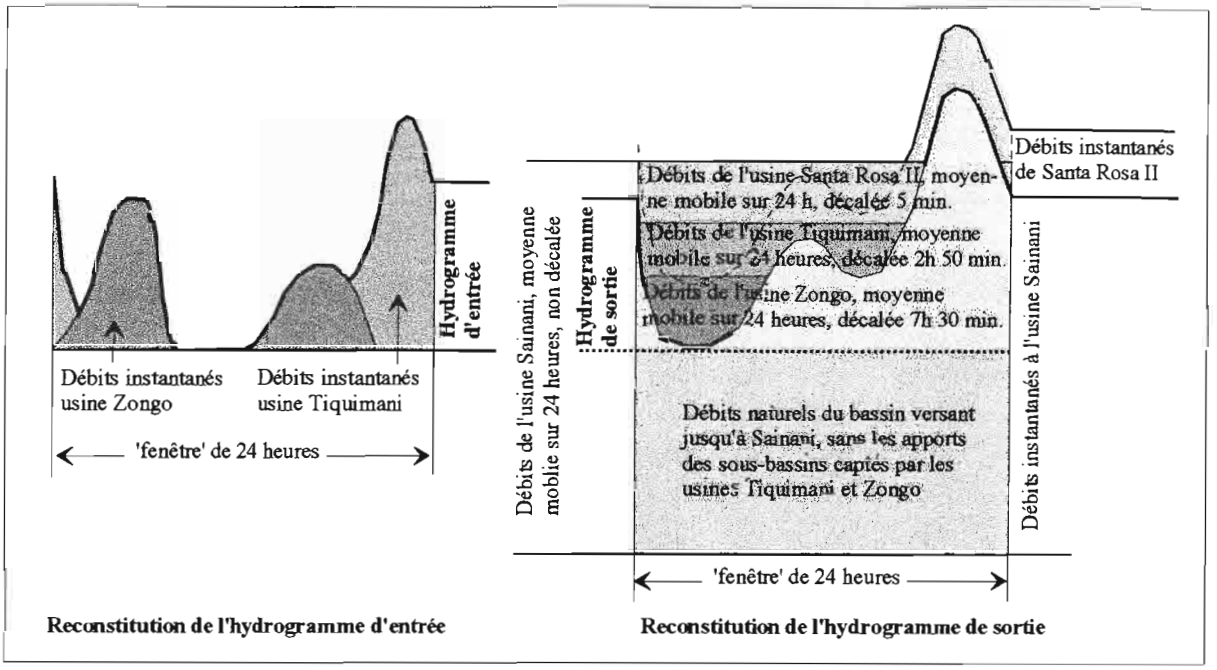


Figure 16 Reconstitution des hydrogrammes d'entrées et de sortie de la retenue fictive

Comment peut-on estimer les débits naturels jusqu'à Sainani, sans les apports des sous bassins captés par les usines Zongo et Tiquimani ? On part de la supposition que l'hydrogramme journaliers moyen de ces débits naturels est constant. C'est-à-dire que les débits instantanés varient en fonction du temps, mais ne dépendent pas de l'heure de la journée. Il est clair que la fonte des glaciers n'est pas constante pendant la journée, ce qui devrait se répercuter dans la forme de l'hydrogramme journalier moyen. Néanmoins, si on regarde l'hydrogramme journaliers moyen de l'usine Santa Rosa II (Figure 15), on constate que les débits instantanés moyens sont à peu près constants au cours de la journée, avec une petite *bosse* vers le soir, due au déstockage du lac Sankayuni (cf. 4.1.3). Or, l'usine Santa Rosa II draine la partie supérieure de la vallée Coscapa, qui contient des surfaces glaciaires importantes (cf. 1.2.2, Figure 1). On peut objecter que c'est justement la gestion de la retenu Sankayuni qui amortit l'hydrogramme journaliers moyen de Santa Rosa II. Mais même si c'est le cas, on se rend compte que le petit volume d'eau contenu dans la *bosse* du déstockage (Figure 15), réparti sur la journée, ne peut pas changer beaucoup la forme générale de l'hydrogramme.

L'hydrogramme instantané des débits naturels du bassin versant jusqu'à Sainani, sans apports des sous-bassins captés par les usines Zongo et Tiquimani, peut donc être estimé en soustrayant de la moyenne mobile sur 24 heures des débits turbinés à Sainani les moyennes mobiles des débits turbinés des usines Santa Rosa II, Zongo et Tiquimani, décalées par leurs temps de propagation jusqu'à Sainani. Evidemment, les débits naturels ainsi estimés ne s'adaptent pas bien à la réalité quand il y a des changement rapide des débits naturels

[14] Un décalage en arrière des débits de Santa Rosa II n'est pas nécessaire, parce que le temps de propagation entre les deux usines n'est que de dix minutes

instantanés réels. En saison sèche, en absence de fortes précipitations, cela n'est généralement pas le cas. La différence entre les débits naturels instantanés ainsi estimés et les débits instantanés turbinés à Sainani, dont on a soustrait les débits instantanés de Santa Rosa II, correspond à l'hydrogramme cherché des débits de sortie de la retenue fictive (Figure 16). Les hydrogrammes journaliers moyens des débits naturels et des débits de Sainani, sans ceux de Santa Rosa II, calculées sur la période d'observation de la saison sèche 1997, du 1 mai au 27 septembre, sont présenté dans la Figure 17.

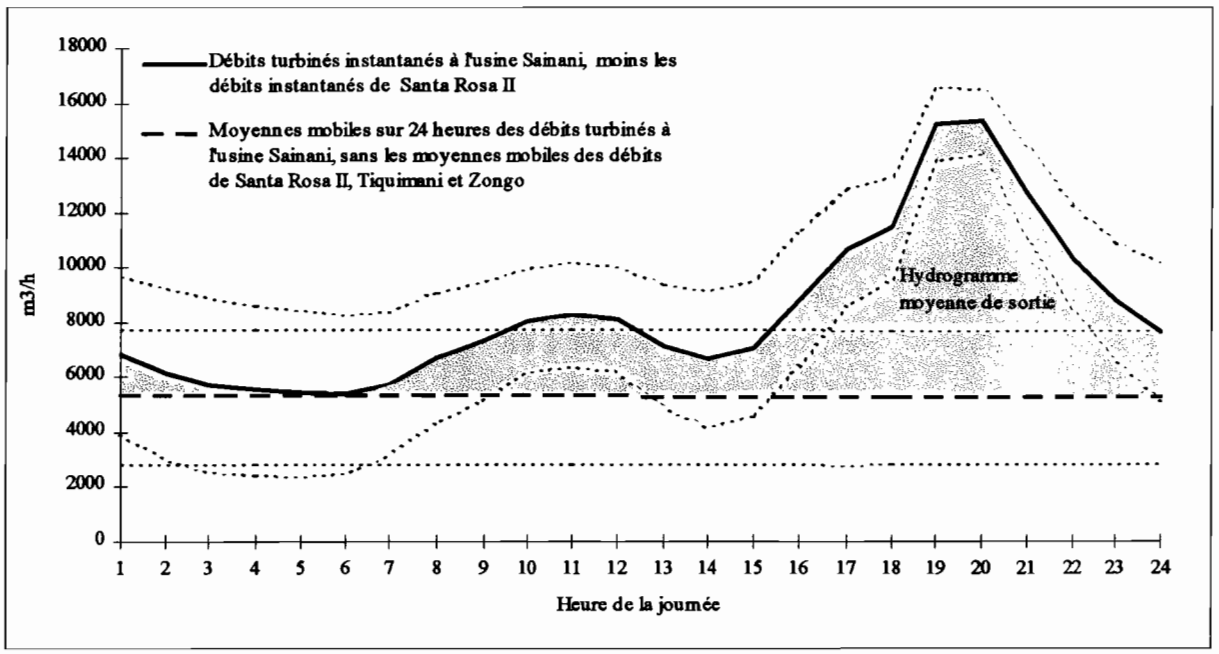


Figure 17 Hydrogramme journalier moyen des débits instantanés turbinés à l'usine Sainani sans les débits instantanés de l'usine Santa Rosa II et l'hydrogramme moyen des débits naturels du bassin jusqu'à Sainani, sans les apports des sous bassins captés par les usines Zongo et Tiquimani. Moyenne des valeurs horaires sur la période d'observation, du 1er mai au 27 septembre 1997. La différence de ces deux hydrogrammes est l'hydrogramme journaliers moyen de sortie de la retenue fictive. L'échelle de l'heure de la journée correspond à la position de la retenue fictive à l'endroit du bassin de charge de l'usine Sainani

Dans les débits de sortie ainsi calculés sont inclut les entrées naturelles de la retenue fictive. La rétention d'un débit naturel instantané dans la retenue fictive à une heure de la journée donnée diminue le débit turbiné instantané à Sainani quelque temps plus tard. On peut supposer que les débits naturels à Sainani, qui sont des moyennes sur 24 heures, ne diminuent presque pas à cause de la rétention. Par conséquent, le débit instantané retenu est inclut dans la différence entre le débit naturel instantané et le débit turbiné instantané, c'est-à-dire, dans le débit de sortie instantané calculé pour cette heure. C'est pour cela qu'on peut admettre que les sorties instantanés prennent des valeurs négatives.

4.2.3 Simulation de la courbe de stockage

En connaissant les hydrogrammes instantanés des débits d'entrée et de sortie de la retenue fictive, la variation du stock d'eau dans cette retenue peut facilement être reconstitué. Entre deux pas de temps, le changement dans la retenue est la différence entre les débits instantanés d'entrée et de sortie. Le volume de stockage utile dont on a besoin pour ne pas avoir de débordement (hypothèse 3), est calculé par la différence entre le maximum et le minimum du

stock atteint pendant la période d'observation. Si on considère toute la période d'observation, du 1er mai au 30 septembre 1997, le volume utile de la retenue doit être d'environ 60 000 m^3. Cela paraît un volume un peu exagéré. Ce volume de stockage n'est nécessaire que pendant deux journées, le 2 et le 16 septembre 1997. Ces jours-là les débits turbinés à l'usine Zongo étaient exceptionnellement élevés à cause d'essais de fonctionnement de la nouvelle usine Zongo II (cf. 1.2.2). Ces débits additionnels n'ont certainement pas pu être retenus dans les bassins versants intermédiaires. Si on ne considère pas ces deux journées dans la modélisation de la courbe de stockage, le volume utile nécessaire de la retenue fictive est de 42 500m^3. Si on considère les volumes utiles connus des deux bassins Botiljlaca et Cuticucho (26 000m^3) l'ensemble des volumes utiles du bassin Intermedio et du bassin de charge de Sainani aurait un volume de 17 500m^3. Ce volume additionnel semble raisonnable et confirme l'information du responsable de la gestion, que tous les débits turbinés aux usines Zongo et Botijlace sont stockés et décalés dans le temps vers les heures de pointes des grandes usines en saison sèche (cf. 4.2.1). L'hypothèse 3) de la méthode est donc justifiée. La Figure 18 montre l'évolution journalière moyenne de la courbe de stockage ainsi que les hydrogrammes journaliers moyens des entrées et des sorties.

On observe sur la Figure 18 que le stock d'eau atteint son maximum en moyenne vers 6h00 dans le cas où la retenu fictive se trouve à l'endroit du bassin de charge de l'usine Sainani (Figure 18). Si on suppose que la retenue est située entre les plus grands bassins Botijlaca et Cuticucho, on doit retarder la courbe de stockage au maximum de 2h30, qui correspond au temps de propagation du bassin Botijlaca à l'usine Sainani. Le maximum du stock est donc atteint entre 4h15 et 6h00. Cela coïncide avec le principe de gestion de remplir tous les bassins intermédiaires avant 6h00 (cf. 4.2.1).

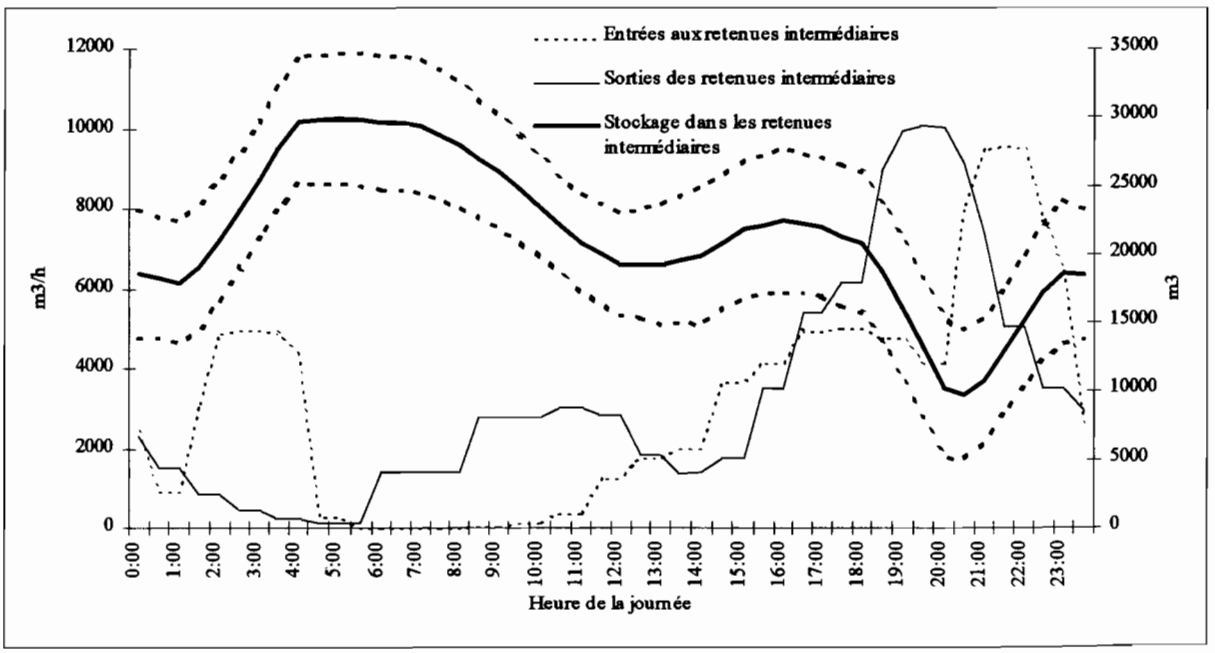


Figure 18 Entrées et sorties moyennes aux bassins intermédiaires au cours de la journée et variation moyenne du stock d'eau dans les bassins (+/- écart type). L'échelle de l'heure du jour correspond une position de la retenue fictive à la place du bassin de charge de l'usine Sainani

Il faut faire une remarque importante concernant la validité de l'analyse de la courbe de stockage, qui sera effectuée dans le paragraphe suivant. La mise en service de la nouvelle usine ne changera pas la gestion du lac Zongo et des bassin intermédiaires en saison sèche. Le lac Zongo sera vidangé d'une façon linéaire comme par le passé (cf. 2.2.1), car la capacité additionnelle de la nouvelle usine n'est utilisée que pour profiter des écoulements abondants en saison des pluies (1.2.2). La réponse à la question de savoir si la gestion des bassins intermédiaires doit être prise en compte dans la reconstitution des débits naturels du bassin versant, qui sera donnée dans la suite, est donc également valable pour les saisons sèches futures.

4.2.4 L'influence de la variation de stock dans les bassins intermédiaires sur les débits naturels

La courbe de stockage pendant la période d'observation en saison sèche 1997 (2 mai au 27 septembre) permet de calculer la variation de stock d'un jour au suivant, pour une heure d'observation donnée. La Figure 20 donne un exemple de calcul entre le 27 août à 23h30 et le 28 août à la même heure. Pour chaque heure de la journée on peut ainsi calculer la moyenne sur toute la saison sèche et la variation maximale atteinte pendant la période d'observation. Ce qui nous intéresse, c'est l'influence de ces variations de stock sur les débits naturels journaliers à Sainani qui seront reconstitués dans le chapitre prochain. Pour estimer cette influence, on s'est simplement servi des débits naturels reconstitués dans un paragraphe précédent (cf.4.2.2), ce qui surestime un peu l'influence. Les variations de stock des bassins intermédiaires pour chaque heure de la journée, moyennées sur la période d'observation et exprimées en pourcentage des débits naturels à Sainani sont présentées dans la Figure 20.

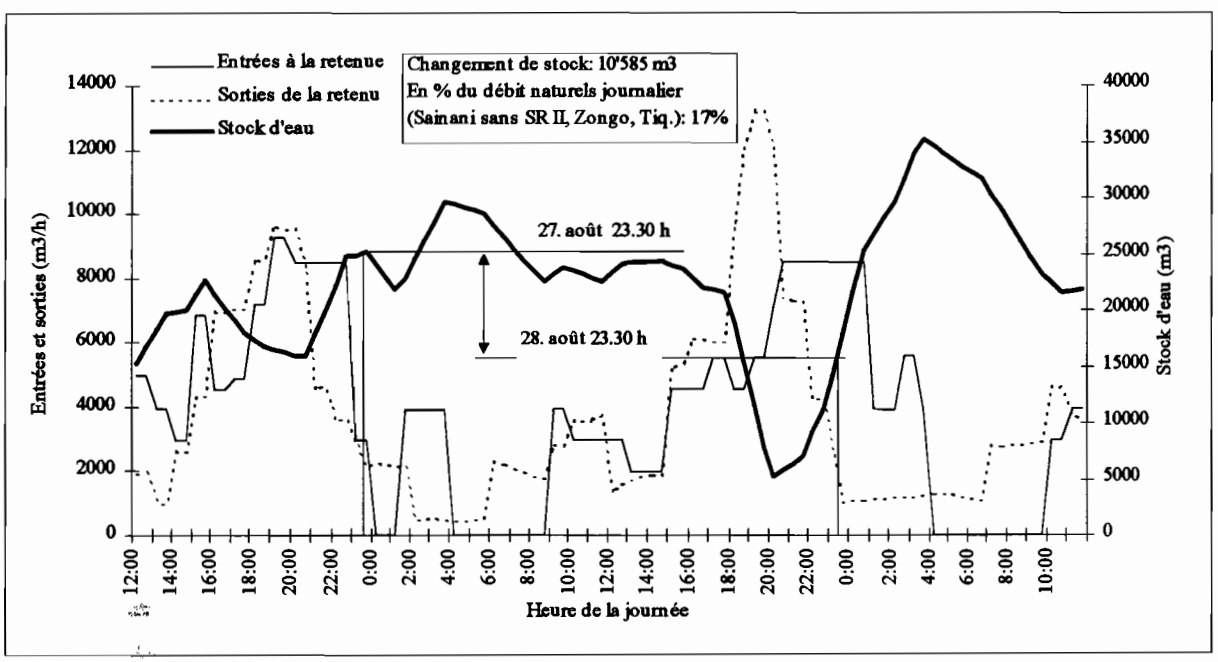


Figure 19 Calculs de la variation de stock d'eau dans les bassins intermédiaires entre le 27 et du 28 août 1997 à 23h30. Cette variation correspond à 17% du débit naturel à Sainani, sans les apports des sous bassins des usines Zongo et Tiquimani, écoulés entre ces heures.

On rappelle que c'est à 23h30 que l'on doit déterminer les débits turbinés à l'usine Sainani pour reconstituer les débits naturels selon le concept développé dans le chapitre précédent (cf.3.2.1, Figure 12). Mais il faut noter aussi que l'échelle de temps de la courbe de stock est relative et variable selon l'endroit de la retenue fictive sur le Zongo (cf. 4.2.2). Si on suppose

d'abord que la retenue fictive se trouve à la place du bassin de charge de Sainani, il n'est pas nécessaire de décaler l'échelle de temps. L'heure de comparaison des volume stockés est 23h30, car les débits du déstockage n'ont pas à être transférés pour atteindre Sainani. Si on déplace la retenue fictive vers l'amont, l'échelle de temps doit être avancée d'une durée égale au temps de propagation entre la nouvelle position de la retenue et Sainani, car les débits doivent être lâchés plus tôt de la retenue (cf.4.2.2). Mais comme la retenue se trouve maintenant à une certaine distance en amont de Sainani, le changement de stock doit être déterminé à une heure de référence antérieure, parce que les débits du déstockage prennent un certain temps pour arriver à Sainani. Evidemment, ces deux durées sont les mêmes et les deux actions s'annulent. La position de la retenue fictive sur la rivière Zongo n'a donc pas d'influence sur la détermination de la variation de stock journalier pour une heure de référence de mesure de débits à Sainani donnée.

Observons sur la Figure 20, dans laquelle la retenue fictive est située à Sainani, les variations de stock en pourcentage des débit naturels de Sainani à 23h30. L'influence moyenne sur ces débits pendant toute la période d'observation est de 2.7%, l'influence maximale de 17%. Il n'y a que 4 jours (3% des jours) pour lesquels l'influence du déstockage / stockage sur les débits naturels à Sainani dépasse 10%.

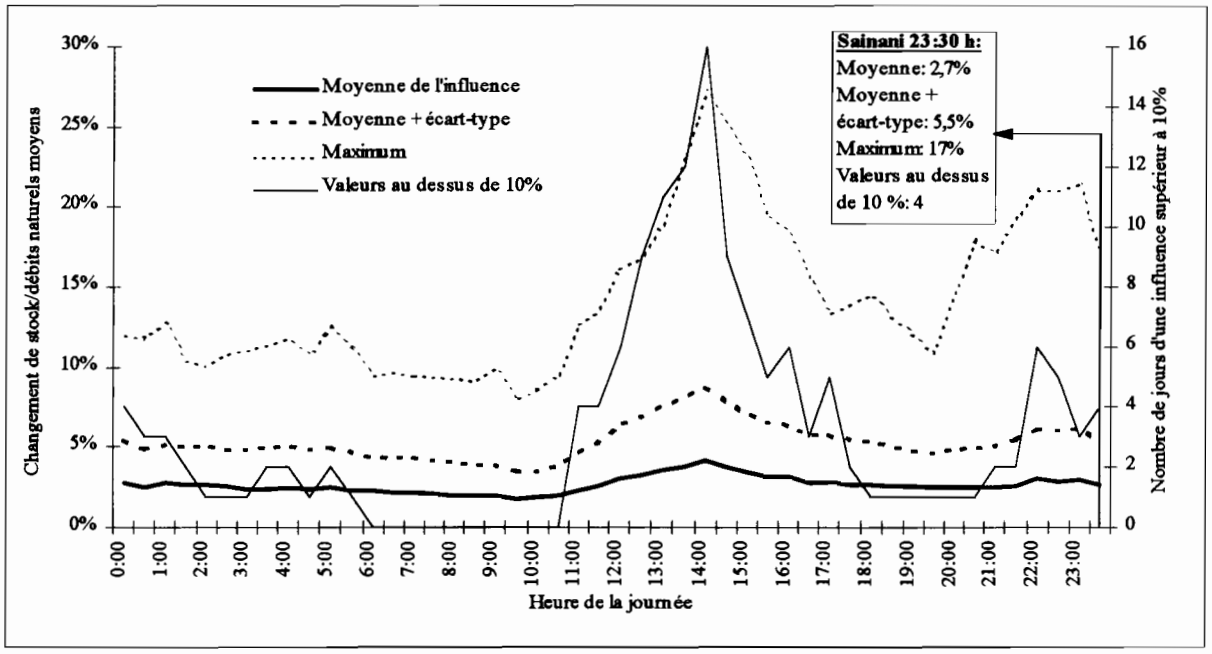


Figure 20 Influence de la variation de stock d'eau dans les bassins intermédiaires sur les débits naturels à Sainani, exprimée comme la variation du stock entre une heure donnée et la même heure du lendemain (heure d'observation sur l'axe x) en proportion des débits naturels écoulés entre les heures d'observation (débits naturels de Sainani, sans apport des sous bassins des usines Tiquimani et Zongo, cf. Figure 17) Dans le graphique sont montrées les moyennes sur toute la période d'observation (2 mai au 27 septembre), les écarts types, le maximum et le nombre d'écarts supérieurs à 10%. L'échelle de l'heure du jour correspond à une position de la retenue fictive à l'emplacement du bassin de charge de l'usine Sainani

Pour donner un exemple de calcul de la variation de stock à une heure de la journée donnée (Figure 20), on a choisi la partie de la courbe de stockage qui montre la variation de stock maximal à 23h30. On voit sur la figure que la variation de stock élevée entre le 27 août et le

28 août à 23h30 est due à une différence marquée des pics de débit de sorties qui servent à satisfaire les demandes des heures de pointe. Si on compare avec l'évolution moyenne de la courbe de stockage pendant la journée (Figure 18), on constate que c'est plutôt le pic du 27 qui est diminué par rapport à celui du 28 que l'inverse. Il apparaît qu'après quelques jours de faibles précipitations entre le 24 et le 27 août, la crue causée par cet événement a été utilisée pour remplir les bassins intermédiaires pendant une heure de la journée à laquelle ils se trouvent normalement à un niveau minimal. On rappelle que, selon le mode de calcul adopté, les débits de sortie incluent les entrées dans les bassins intermédiaires des débits naturels (cf. 4.2.2). Le lendemain, le 28 août, ces eaux stockées ont été utilisées pour augmenter la production d'électricité pendant les heures de pointes. On se trouvait alors déjà en décrue, car le stock atteint son niveau bas habituel. Le même effet devrait s'observer au début de la crue, lorsque le stockage de débits naturels commence. Par contre, au cours de la crue, il ne faut pas attendre de fortes variations de stock, car les bassins doivent être remplis la plupart du temps.

En conclusion de ce chapitre on peut dire que l'influence de la gestion des bassins intermédiaires sur les débits à Sainani est généralement faible. Mais elle peut quand même atteindre des valeurs importantes lors des événements de crue, surtout au début et à la fin, lorsque les débits naturels excédantaires sont utilisés pour remplir les bassins. Ce fait pourrait rendre nécessaire la détermination de la variation de stock des bassins intermédiaires lors des événements de crue. Cela peut se réaliser soit par l'utilisation des mesures de niveau disponibles pour les deux bassins Cuticucho et Botijlaca avec une estimation des courbes niveau/volume de ces bassins, soit par l'utilisation de la méthode développée. Une combinaison entre les deux méthodes pourrait également être envisagée.

Dans la suite on reconstituera les débits naturels à Sainani, à l'aide du principe exposé précédemment (cf. 3.2.1, Figure 12). Comme on ne dispose pas encore d'une modélisation des débits de fonte de l'ensemble des glaciers du bassin versant jusqu'à Sainani, une analyse fine des débits reconstitués à partir des précipitations n'est pas encore possible. C'est pour cela que, à cette étape des travaux, on ne considérera pas l'influence de la gestion des bassins intermédiaires sur les débits reconstitués.

4.3 Reconstitution des débits naturels à Sainani en saison sèche 1997

4.3.1 Reconstitution des débits naturels en saison sèche 1997

Rappelons que, pour appliquer un modèle hydrologique aux débits de Sainani, il faut reconstituer les débits naturels non influencés par les opérations hydrauliques (stockage et déstockage des retenues) et sans les apports de l'extérieur du bassin et de la fonte des glaciers. (cf. 3.1.1). A cette fin on a développé des méthodes pour la reconstitution des débits en saison sèche et en saison des pluies (cf. 3.2). Comme on ne dispose pas pour le moment de données hydrométriques, on doit se contenter d'une reconstitution des débits en saison sèche (cf. 3.2.1) en approchant les débits totaux à Sainani avec les débits turbinés à l'usine Sainani (cf. 2.2.4). Dans un premier temps, on se limite à essayer de reconstituer les débits naturels du bassin versant non influencé par les opérations hydrauliques et sans les apports de l'extérieur du bassin versant, mais avec les apports de la fonte des glaciers.

Le principe de la reconstitution de ces débits naturels en saison sèche a été développé dans un chapitre précédent (cf. Figure 12, 3.2.1). Rappelons que pour reconstituer les débits naturels à

Sainani il faut soustraire des débits journaliers de l'usine Sainani ceux des usines Tiquimani et Santa Rosa II, déterminés avec des décalages dans le temps qui correspondent au temps de transit des débits entre ces usines et Sainani. Aux débits obtenus il faut ajouter les variations de stock (le déstockage est négatif) des retenues Zongo, Mamankota, Livinosa et Sankayuni, dont les volumes sont calculés à l'heure de lectures des niveaux. On a choisi l'heure de la détermination des débits à Sainani de sorte que les temps de transit des débits du déstockage de ces retenues jusqu'à Sainani soient pris en compte le mieux possible (cf. 3.1.3, Tableau 4). Dans le cas de la retenue Mamankota l'heure de lecture de niveau est le matin (cf. 2.2.2 et Tableau 3), alors qu'on doit connaître la variation de stock journalier à 14h40 d'un jour au lendemain. C'est pour cela qu'on a fait une estimation du volume stocké à 14h40 d'un jour donnée par interpolation linéaire des stocks d'eau aux heures de lectures de niveaux. Les variations de stock journaliers des retenues ont été estimées de la même façon que dans l'étude préliminaire (cf. 2.2.3). C'est-à-dire qu'on a calculé les volumes instantanés d'eau stockés dans les retenues pour chaque jour aux heures de lecture de niveau à l'aide des courbes niveaux/volumes. Pour les retenues les plus importantes ces courbes ont été établies par la COBEE en se basant sur des mesures topographiques. Pour d'autres retenues, on a du estimer les courbes (cf. 2.2.3 et Annexe A).

Sur la Figure 21, les résultats de la reconstitution des débits naturels à Sainani, avec l'apport de l'eau de fonte des glaciers, sont présentés pour la période d'observation du 1er mai au 30 septembre 1997.

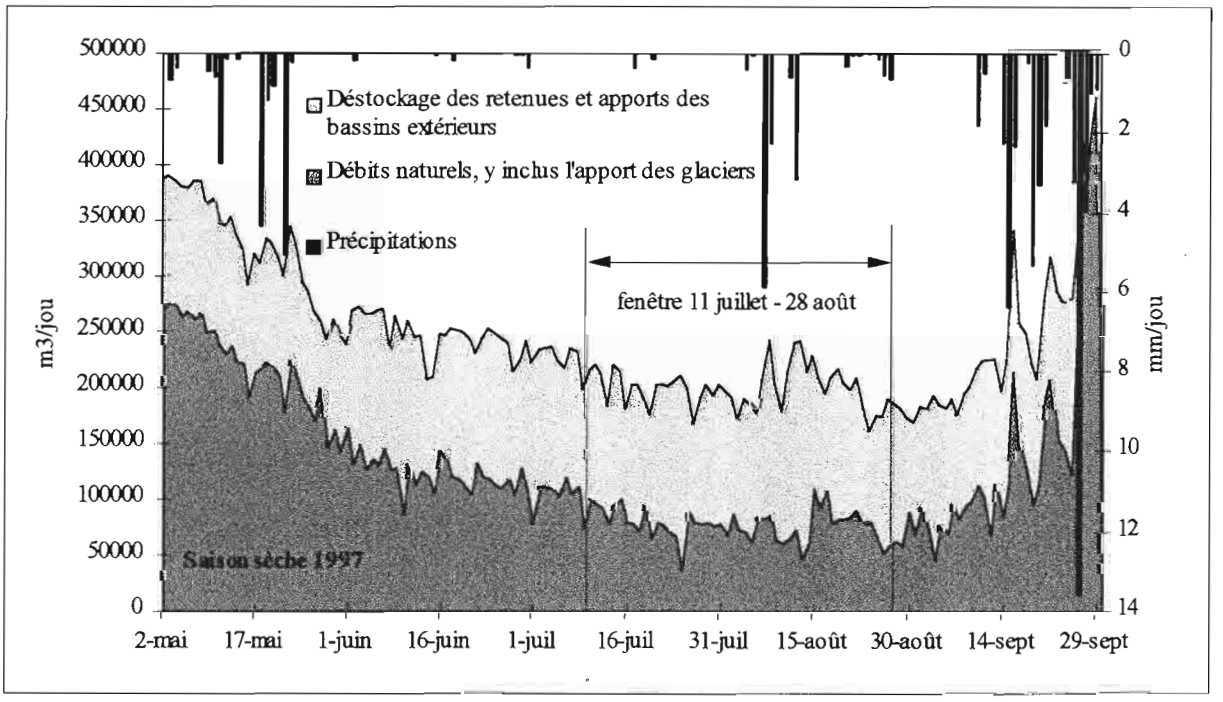


Figure 21 Précipitations moyennes sur le bassin de Sainani, débits naturels reconstitués à Sainani et variations de stock journalier des retenues pendant la période d'observation en saison sèche 1997. Les débits naturels ont été calculés selon la méthode de reconstitution des débits naturels en saison sèche (cf. 3.2.1). Pour les précipitations moyennes on a utilisé la méthode des isohyètes

4.3.2 Discussion des résultats

La somme des débits naturels à Sainani et des débits du déstockage des retenues avec les apports de l'extérieur (débits de Santa Rosa II et une partie des débits de Tiquimani) donne l'hydrogramme des débits turbinés à l'usine Sainani. On observe sur la Figure 21 que les débits turbinés et les débits naturels journaliers évoluent de façon différente. Autrement dit, la prise en compte du déstockage des retenues et des apports de l'extérieur du bassin changent l'aspect de l'hydrogramme. Si on ne s'intéresse qu'à une partie de l'hydrogramme (Figure 22), on observe que ce changement est surtout du à la prise en compte du déstockage des retenues. L'évolution des débits de l'usine Santa Rosa II, par contre, est presque parallèle à celle des débits turbinés de Sainani, ce qui est un peu moins le cas des débits de l'usine Tiquimani. Cela s'explique facilement. Les débits turbinés de Santa Rosa II reflètent principalement la production d'écoulement de la partie supérieure de la vallée Coscapa, dont le comportement doit être similaire à celui du bassin versant jusqu'à Sainani, d'où les formes parallèles de ces deux hydrogrammes. L'influence des manœuvres du lac Sankayuni sur l'hydrogramme de Santa Rosa II est faible, à cause du faible volume de cette retenue par rapport à la surface drainée (cf. 4.1.3). Par contre, le bassin versant extérieur drainée par les canaux d'adduction de l'usine Tiquimani contient les trois lacs Tiquimani, dont la manutention en saison sèche a une influence plus importante sur les débits (cf. 2.3.1 et 1.2.1, Figure 1). Comme la variation de stock des retenues diminue plutôt quand les productions des versants augmentent, les débits de Tiquimani évoluent de manière moins parallèle aux débits de Sainani que ceux de Santa Rosa II. C'est finalement pour cela que les hydrogrammes du déstockage des retenues ne ressemblent pas à l'hydrogramme de Sainani, influençant ainsi non seulement les volumes des crues, mais aussi leurs formes.

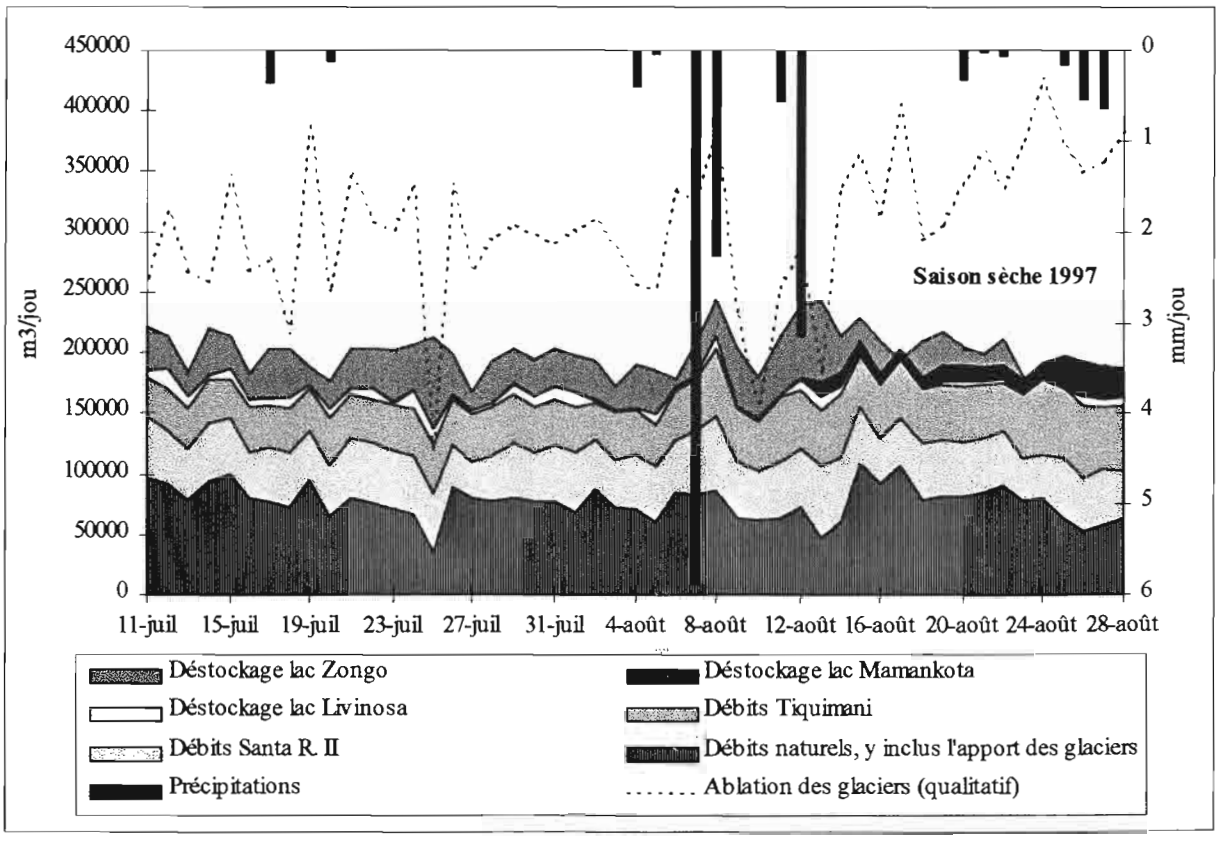


Figure 22 Sommes des hydrogrammes des débits naturels, des débits turbinés à Santa Rosa II et à Tiquimani et des débits provenant du déstockage des retenues Zongo, Livinosa,

Sankayuni et Mamankota pour la période comprise entre le 11 juillet et le 28 août 1997. Cette somme correspond à l'hydrogramme des débits turbinés à Sainani. Indication de la tendance de la fonte des glaciers en pointillés (cf. 2.2.4)

On observe que, pendant les longues périodes sans précipitations, les débits naturels reconstitués varient beaucoup (Figure 21 et Figure 22). C'est un peu étrange, car en absence de précipitation on s'attend à une forme de l'hydrogramme plus lissée. Il doit exister une influence autre que les précipitations qui fait varier les débits. Cette influence vient évidemment des glaciers. Pour l'instant, on n'a aucune possibilité de vérifier que la reconstitution des débits naturels correspond à la réalité. La question est de savoir si les débits provenant de la fonte des glaciers peuvent expliquer la variation de l'hydrogramme en absence d'événements de précipitation. On observe sur la Figure 21et la Figure 22 que les débits turbinés à Sainani varient également en l'absence de précipitation. Si la reconstitution des débits naturels est bonne, l'hydrogramme de ces débits doit s'adapter mieux à l'évolution de la fonte des glaciers que l'hydrogramme des débits turbinés. Dans le paragraphe suivant, on va essayer de vérifier si cela est vrai à l'aide d'une estimation qualitative de l'évolution de la fonte des glaciers.

4.3.3 Estimation qualitative de la fonte des glaciers

La variation journalière du stock d'eau dans le lac Zongo correspond à la somme des débits d'entrée et de sorties de la retenue. Comme en saison sèche il n'y a pas de débordement de la retenue, les débits turbiné à l'usine Zongo constituent les seules sorties excepté les pertes par évaporation. Comme les variations journalières de stock peuvent être estimées à partir des lectures journalières de niveau, on peut calculer le total des débits d'entrées, si on ne considère pas les pertes par évaporation. Ces entrées sont constituées par les apports du canal Tubo qui capte les eaux de l'émissaire du glacier Zongo, des canaux Mamankota / Prado qui drainent le versant nord-ouest du Charquini et des canaux Alpaca / Vicuna qui sont alimentés par le versant est du Huayna Potosi (cf. 1.2, Figure 1 5.2.1, Figure 25). La plupart des surfaces drainées par ces canaux est glaciaire. C'est pour cela qu'en l'absence de précipitation, les débits d'entrée dans la retenue proviennent principalement de la fonte des glaciers. La Figure 23 montre ces débits d'entrée pendant la période d'observation en saison sèche 1997 avec les varaitions de stock de la retenue Zongo (déstockage négatif) et les débits turbinés à l'usine Zongo.

On note que les débits d'entrée prennent parfois des valeurs négatives. Cela signifierait que pendant ces jours, il y a d'autres sorties de la retenue que les débits turbinés à l'usine Zongo. Comme il n'y a pas de débordement, on pourrait attribuer ces pertes à l'évaporation. Il y a cependant une autre explication plus plausible pour les valeurs négatives. On observe que ces valeurs coïncident avec des jours pendant lesquelles les variations de stock de la retenue et les débits journaliers turbinés à Sainani sont élevés (Figure 23). Cela s'explique d'ailleurs par le fait que, quand il y a peu de débits provenant de la fonte des glaciers, on doit lâcher plus d'eau de la retenue Zongo pour maintenir la production d'électricité, surtout en l'absence de précipitation. Mais si les débits de sortie et la variation de stock sont élevés et les entrées diminuées, une faible erreur relative dans le calcul de la variation de stock peut conduire à une valeur négative en entrée. Une telle erreur peut se produire par exemple quand la mesure de niveau est réalisée plus tôt ou plus tard que l'heure prévue.

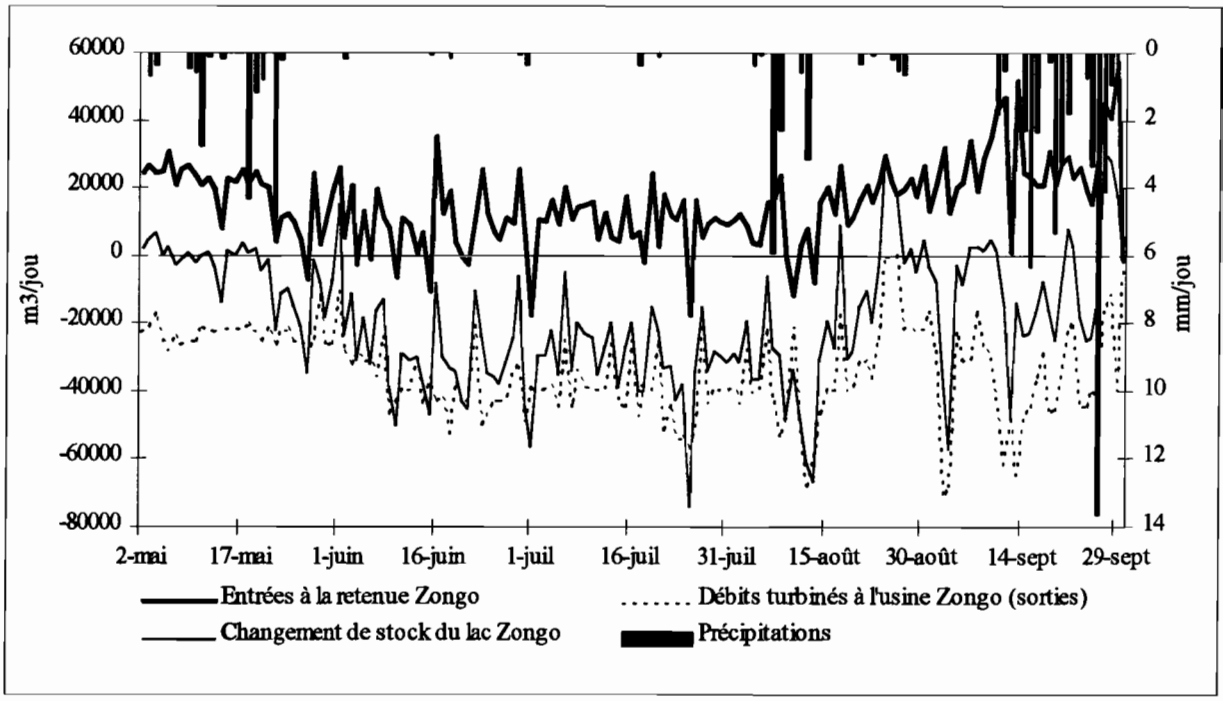


Figure 23 Débits d'entrée, déstockage de la retenue Zongo (signe positif), débits turbinés à l'usine Zongo et précipitations. Valeurs en mm / jour

Les entrées dans la retenue Zongo peuvent être un excellent indicateur de la production d'eau de fonte de tous les glaciers dans le bassin versant, mais elles ne contiennent pas d'information sur les valeurs absolues de la fonte. Car les surfaces glaciaires dont l'eau de fonte alimente la retenue Zongo ne constituent qu'une faible partie du total des surfaces glaciaires contenues dans le bassin versant de Sainani (1.2.1, Figure 1). Par contre on peut attendre que l'évolution de la production d'eau de fonte de cette partie des surfaces glaciaires suive plus ou moins celle de l'ensemble des glaciers, parce que les glaciers qui alimentent les canaux d'adduction de la retenue couvrent une large gamme d'expositions et d'altitudes. Pour utiliser comme un indicateur les entrées dans la retenue Zongo, on peut attribuer un signe positif à une augmentation des débits d'entrée d'un jour à l'autre et un signe négatif à une diminution. Si on fait la même chose avec les débits à Sainani, on peut comparer qualitativement les évolutions de la fonte (les entrées à la retenue Zongo) et des débits à Sainani. Le résultat de la comparaison entre les débits naturels à Sainani et l'indicateur et entre les débits turbinés et l'indicateur, pour les périodes en saison sèche 1997 sans précipitation, est présentée sur la Figure 24

On peut observer que, en l'absence de précipitation, les débits naturels reconstitués à Sainani (cf. 4.3.1) suivent mieux l'indicateur de la fonte totale des glaciers que les débits turbinés. Ce qu'on observe visuellement est confirmé par les chiffres. Les jours de coïncidence, c'est-à-dire les jours pour lesquelles les variations du débit journalier et de l'indicateur de la fonte sont dans le même sens (positif ou négatif), s'élèvent à 78% des jours considérés pour les débits naturels reconstitués et seulement 56% pour les débits turbinés. Les débits reconstitués suivent donc mieux l'évolution de la fonte des glaciers que les débits turbinés. Sur les 42 jours durant lesquels l'évolution des débits turbinés ne coïncident pas avec celle de la fonte, 27 jours ont une coïncidence avec les débits reconstitués (64%). Par contre, sur les 53 jours durant lesquels les débits turbinés coïncident, seulement 6 jours ne montrent pas de coïncidence avec les débits naturels (11%). 78% de coïncidence pour l'évolution des débits

naturels reconstitués est une proportion significative. Il faut en effet tenir compte du fait qu'on ne peut pas attendre une coïncidence parfaite des variations pendant toute la période d'observation : il est tout à fait possible que le comportement de la fonte de tous les glaciers diffère de celui des surfaces glaciaires qui fournissent les entrées à la retenue Zongo.

Période	26 mai à 13 juin 1997 (un jour par plage)																		
Débits d'entrée	-	-	+	-	+	+	+	-	+	-	+	-	+	-	-	-	+	-	-
Débits naturels	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+
Débit turbinés	-	-	-	-	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	+	-	+	-	+
Période	14 juin à 2 juillet 1997																		
Débits d'entrée	+	-	+	-	+	-	-	-	+	+	-	-	-	+	-	+	-	-	+
Débits naturels	-	-	+	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	+	-	+	-	-	+
Débit turbinés	-	+	+	-	+	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-	+	+	-	+
Période	3 juillet à 21 juillet 1997																		
Débits d'entrée	-	+	-	+	-	+	+	+	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+
Débits naturels	+	-	-	+	-	+	-	+	-	-	-	+	+	-	-	-	+	-	+
Débit turbinés	+	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	+	-	-	-	+
Période	22 juillet à 3 août 1997							15 août au 20 août 1997						15 août au 20 août 1997					
Débits d'entrée	-	-	+	-	+	-	+	+	-	-	+	+	-	+	-	+	-	+	+
Débits naturels	-	-	-	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	+
Débit turbinés	-	-	+	+	-	-	+	+	-	+	-	-	-	+	-	-	+	+	-
Période	21 août à 8 sept 1997																		
Débits d'entrée	+	-	+	+	-	-	+	+	-	+	-	+	+	-	+	+	+	-	+
Débits naturels	+	+	-	+	-	-	+	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+	-	+
Débit turbinés	-	+	-	-	+	-	+	-	-	-	-	+	-	+	-	-	+	-	+

Figure 24 Augmentations et diminutions du jour au lendemain des débits turbinés à Sainani, des débits naturels reconstitués et des débits d'entrée à la retenue Zongo. Si le débit journalier a augmenté du jour au lendemain, le signe est positif, s'il a diminué, négatif. En gris : coïncidences entre le débit et la fonte. Pour la comparaison on a choisi les deux longues périodes sans précipitation de la saison sèche 1997.

Les résultats de l'analyse précédente sont encourageants. Ils confirment qu'on se trouve sur la bonne voie pour la méthode de reconstitution des débits naturels à Sainani. Afin de pouvoir reconstituer les débits provenant des écoulements des versants, qui pourront être utilisés dans une modélisation hydrologique, on doit connaître les apports d'eau de fonte des glaciers. Une modélisation de ces eaux de fonte constitue donc la prochaine étape.

On verra dans le chapitre prochain que cette tâche n'est pas simple. Une ébauche de la modélisation de la fonte totale des glaciers est présentée qui se base sur les différences topographiques entre les glaciers. Pour cette étude de l'influence de la topographie sur la fonte des glaciers on a choisi le glacier Zongo et le glacier Charquini, pour lesquels on a des mesures des débits de fonte.

5. Ebauche d'une modélisation de l'eau de fonte de tous les glaciers

5.1 La modélisation de la fonte des glaciers

5.1.1 Introduction

Rappelons que l'objectif du programme auquel ce travail apporte sa contribution est l'étude du fonctionnement hydrologique du bassin versant du Zongo et le calage d'un modèle hydrologique. Ce modèle doit servir à faire des prédictions sur les changements du régime hydrologique dans la vallée sous différents scénarios climatiques. Évidemment le changement climatique n'influence pas seulement le régime des versants, mais aussi sur celui des glaciers. L'étude du fonctionnement des glaciers dans la vallée du Zongo a commencé en 1991 avec l'installation d'instruments de mesure sur le glacier Zongo, qui couvre un flanc du Huayna Potosi, la montagne la plus haute du bassin versant (Figure 1, 1.2.1). Les mesures de différents paramètres climatologiques au pas de temps horaire ont permis d'établir et de caler des modèles déterministes du fonctionnement du glacier, dont quelques-uns marchent déjà assez bien (cf. RIGAUDIERE, P. et al. 1995). On devrait disposer dans peu de temps d'un modèle qui permettra de faire des prédictions des fonctionnements du glacier Zongo sous différents scénarios climatiques. Néanmoins, afin de pouvoir reconstituer les débits naturels qui proviennent de l'écoulement des versants, la contribution de l'eau de fonte de tous les glaciers du bassin versant doit être connue (cf. Figure 10, 3.1.1).

Si on suppose que le comportement du glacier Zongo sous différents scénarios climatiques pourra être modélisé, le problème consiste à étendre ce comportement aux autres glaciers du bassin versant. Dans ce chapitre, on présente une approche possible pour arriver à cette fin.

5.1.2 Les hypothèses d'une approche topographique

Les débits réels d'un glacier dépendent de l'interaction de la surface du glacier avec l'atmosphère et de son fonctionnement physique interne. Un modèle déterministe cherche à décrire les processus physiques réels de la façon la plus exacte possible. On utilise un nombre limité de données d'entrées pour décrire les conditions climatologiques à la surface du glacier et de paramètres physiques et conceptuels pour simuler les processus physiques. Sur le glacier Zongo, divers facteurs climatologiques, comme la température, l'humidité relative, la vitesse du vent, etc. sont mesurés à différentes distances de la surface du glacier (cf. BERTON P. *et al.*). Le modèle déterministe qu'on a développé pour le glacier Zongo utilise ces mesures climatologiques, ainsi que des mesures de température dans la couche supérieur de glace, comme données d'entrée (cf. RIGAUDIERE, P. *et al.* 1995). Afin de pouvoir simuler la production d'eau de fonte de l'ensemble des glaciers à partir des débits mesurés ou modélisés du glacier Zongo, il est nécessaire de connaître la répartition spatiale de ces données d'entrée sur l'ensemble des glaciers et les paramètres physiques et conceptuels de leurs fonctionnements internes.

L'absence de mesures climatologiques sur la plupart des surfaces glaciaires rend nécessaire l'estimation des conditions à l'interface de ces surfaces et de l'atmosphère. La seule approche possible consiste à expliquer la variabilité de ces conditions par la topographie. Cela veut dire

que l'on doit faire l'hypothèse que les conditions climatologiques à la surface des glaciers ne dépendent que de la topographie, la situation climatique étant identique pour tous les glaciers. Dans le modèle de Rigaudière *et al.*, c'est aussi l'état de la couche supérieur de la glace qui influence la fonte. L'état de cette couche et caractérisé, d'une part, par son profil de température duquel dépend son réchauffement ou son refroidissement, et, d'autre part, par son âge qui influence l'absorption du rayonnement solaire (albédo). En l'absence de mesures sur les autres glaciers, on doit également faire l'hypothèse que cet état ne dépend que de la situation topographique de l'unité de surface et du temps, qui a le même effet sur l'ensemble des glaciers.

L'extension des paramètres du fonctionnement interne du glacier Zongo à l'ensemble des autres glaciers est encore plus difficile, voire impossible. Car dans le modèle de Rigaudière, les débits produits à la surface du glacier sont transférés à l'exutoire au travers d'un modèle conceptuel à réservoirs, dont les paramètres doivent être calés avec des débits non disponibles pour les autres glaciers. Dans le modèle de Rigaudière *et al.*, la sectorisation du glacier et le calage des paramètres des réservoirs de chaque secteur conduisent à une prise en compte tridimensionnelle du glacier, c'est à dire de la position relative du secteur sur le glacier (en haut, au milieu, en bas, etc.) et de la profondeur de la glace (plus la glace au dessous d'un secteur est épaisse, plus le réservoir est grand). Pour un modèle d'écoulement de l'ensemble des glaciers, la prise en compte tridimensionnelle des glaciers n'est probablement pas nécessaire. En première approche, on peut admettre l'hypothèse que le transit des eaux de fonte produites sur les surfaces de l'ensemble des glaciers est en moyenne similaire au transit observé pour le glacier Zongo. Par conséquent, on peut négliger la position relative de l'endroit de production d'eau de fonte à l'intérieur du glacier.

Les hypothèses pour un modèle préliminaire sont donc

1) La situation climatologique, principalement la couverture nuageuse du ciel et la température à grande échelle, est identique pour tous les glaciers du bassin.
2) La topographie est le seul facteur qui détermine le microclimat sur les glaciers pour une situation climatologique donnée.
3) La topographie est le seul facteur qui détermine l'état de la couche supérieure de glace (neige) du glacier et l'effet temporel sur l'état de la glace est identique pour tous les glaciers
4) Les temps de transit des eaux de fonte depuis le lieu de production jusqu'à l'exutoire sont en moyenne les mêmes pour tous les glaciers et sont ceux qui sont observés dans le cas du glacier Zongo.

En résumant ces quatre hypothèses en une seule :

- La relation entre les écoulements du glacier Zongo (mesurés ou simulés) et les écoulement de l'ensemble des glaciers est uniquement déterminée par les conditions climatiques de surface des glaciers qui ne dépendent que de la topographie locale des mailles de surface

5.1.3 L'importance de l'exposition

On observe que, dans l'hémisphère sud, les fronts des glaciers exposés au nord se trouvent généralement à une altitude plus élevée que les fronts des glaciers exposés au sud. Leurs tailles sont en général plus petites et ils reculent plus vite (cf. FRANCOU, B. ET RIBSTEIN, P.

1995). C'est la conséquence de l'ablation élevée des surfaces glaciaires exposées au nord par rapport à celles exposées au sud, due à une intensité du rayonnement solaire globalement plus élevée. La position du soleil à une certaine latitude varie au cours de la journée et au cours de l'année. A la latitude de 16°1' sud vers laquelle sont situées les surfaces glaciaires du bassin versant du Zongo, le soleil se trouve la presque toute l'année au nord. Par conséquent, les pentes exposés au nord reçoivent en moyenne plus de rayonnement solaire. Mais il n'y a pas que l'insolation moyenne qui influence la fonte des glaciers. La distribution de cette énergie selon les heures de la journée doit aussi être importante. Ainsi, il est probable que l'ensoleillement de l'après-midi produise plus d'eau de fonte que celui du matin, l'humidité augmentant au cours de la journée à cause de la remontée de masses d'air humide venant de la basse vallée : cela a pour conséquence une diminution de la sublimation de la glace au profit de la fonte.

L'observation que les glaciers d'une certaine exposition reculent plus vite fait penser que l'exposition doit être un des facteurs les plus importants de la topographie des glaciers qui influencent leurs fonte. Dans un modèle basé sur les hypothèses faites dans le paragraphe précédent, les influences des caractéristiques topographiques sur la fonte peuvent être étudiée pour chaque maille indépendamment des autres. La fonte total dans ce type de modèle correspond à l'intégral de la fonte d'une maille sur l'ensemble des mailles qui contribuent de l'eau de fonte. C'est-à-dire, si on arrive à décrire l'influence de la topographie sur la fonte d'une maille, on peut intégrer la relation trouvée sur une surface et sur une durée déterminées afin d'obtenir un facteur topographique pour le total de l'eau de fonte d'un glacier. Ceci se fera dans la suite

5.1.4 Le concept et la base physique d'un modèle à développer

Dans le modèle de Rigaudière et al. (cf. RIGAUDIERE, P. *et al.* 1995) la production des eaux de fonte sur la surface du glacier Zongo se base sur le bilan d'énergie. Les termes de ce bilan sont présentés dans l'équation Equation 1). Ils dépendent du microclimat sur le glacier qui est la résultante de la situation climatologique générale et de la topographie, ainsi que de l'état de la couche supérieure de glace (ou de neige). Sous les hypothèses faites dans le paragraphe précédent, il suffit de connaître l'influence de la topographie des glaciers sur ces termes pour modéliser les écoulements de l'ensemble des glaciers à partir des débits mesurés ou modélisés du glacier Zongo.

La topographie des glaciers possède deux aspects. Ce sont, d'une part, les paramètres topographiques de chaque maille descriptive du glacier, c'est-à-dire l'altitude, l'exposition et la pente, et, d'autre part, la topographie à grande échelle. Cette dernière concerne surtout la circulation atmosphérique et par conséquent le terme d'échange de chaleur sensitive, mais aussi le rayonnement solaire direct en prenant en compte les ombres portées sur des parties plus ou moins grandes du glacier. En première approche on peut faire l'hypothèse que les mouvements d'air sont en moyenne identiques sur toutes les mailles des glaciers et par conséquent l'évolution du terme de la chaleur sensitive est la même pour tous les glaciers. A l'exception de l'effet des ombres portées sur le rayonnement solaire direct, les autres termes du bilan ne sont pas influencés par la topographie à grande échelle et on peut ramener l'étude à l'influence des paramètres topographiques de chaque maille.

Pour notre futur modèle, on peut séparer la somme des termes de droite du bilan (EQUATION 1), qui correspond à l'énergie disponible pour la fonte et pour l'évaporation, en deux groupes.

$$\mathbf{q}*H_f*\rho + H_v*\mathbf{e} = (1 - a)*(R_{dir} + R_{dif}) + R_{atm} - R_{sol} + Q_{sens} + Q_{prof} + Q_{prec} - Q_{rech}$$

q	Débit spécifique de fonte ($m^3/s/m^2$)
H_f	Chaleur latente de fusion ($2.5*10^6$ J/kg)
ρ	densité de l'eau (kg/m^3)
H_v	Chaleur latente de sublimation de la neige/glace ($3.3*10^5$ J/kg)
e	Masse d'eau évaporé par unité de temps et de surface ($kg/s/m^2$)
a	Albédo, sans unité
R_{dir}	Rayonnement solaire direct (W/m^2)
R_{dif}	Rayonnement solaire diffus (W/m^2)
R_{atm}	Radiation atmosphérique
R_{sol}	Rayonnement du sol (grandes longueurs d'ondes) (W/m^2)
Q_{sens}	Flux de chaleur sensible (W/m^2)
Q_{prof}	Flux de chaleur provenant des couches inférieures (W/m^2)
Q_{prec}	Chaleur apporté par les précipitations (W/m^2)
Q_{rech}	Réchauffement/Refroidissement du manteau neigeux (W/m^2)

Equation 1 Bilan d'énergie à la surface du glacier(d'après LIBOUTRY, 1964)

Le premier groupe comprend les termes d'énergie qui sont influencés par la situation topographique de la maille de calcul. Il contient l'expression du rayonnement solaire (1-a)* (R_{dir} + R_{dif}), de la radiation atmosphérique (R_{atm}) et le terme des apports des couches inférieures (Q_{prof}) Le deuxième groupe contient tous les termes dont l'évolution dans le temps est identique pour toutes les mailles. Ce sont les termes qui peuvent être influencés par les conditions climatiques générales ou par l'état général de la couche superficielle de glace, mais qui ne dépendent que peu ou pas du tout de l'altitude ou de l'exposition des mailles. Ceci est plus ou moins le cas des termes de la radiation du sol (R_{sol}), de la chaleur sensible (Q_{sens}), de l'apport de chaleur par les précipitations ($Q_{préc}$) et du réchauffement/refroidissement de la couche superficielle de glace (neige) (Q_{rech}) (cf. RIGAUDIERE, P. *et al.* 1995). Comme dans l'application du modèle de Rigaudière *et al.* on observe des variations de R_{atm} et de Q_{prof} relativement petites par rapport à celles de l'énergie totale, on peut les affecter au deuxième groupe. Ainsi on peut décrire l'énergie disponible pour la fonte et l'évaporation pour une maille donnée de la façon suivante :

$$E_{tot} = \mathbf{q}*H_f*\rho + H_v*\mathbf{e} = \Sigma E_{topo} + \Sigma E_{prop} \quad (2)$$

et

$$\Sigma E_{topo} = (1-a)*R_{dir}(exp) + (1-a)*R_{dif}$$
$$\Sigma E_{prop} = Q_{sens} + Q_{préc} - Q_{rech} - R_{sol} + R_{atm} + Q_{prof}$$

où :

a = Albédo, qui dépend de l'altitude (alt), de l'angle incident du soleil (exp), de l'âge du manteau neigeux (t) et du couvert nuageux du ciel

R_{dir}(exp) = le rayonnement solaire direct, qui dépend de l'angle incident du soleil

Comme il s'agit d'estimer finalement la quantité d'eau de fonte produite à la surface des glaciers, on ne s'intéresse qu'à la part de l'énergie totale disponible qui n'est pas utilisée pour la sublimation. Au dessus de l'isotherme zéro degré des glaciers, il n'y a pas de fonte : toute l'énergie disponible est utilisée pour la sublimation. Par contre, au dessous de l'isotherme zéro degré, la plus grande part de cette énergie est utilisée pour la fonte de la neige. Car, si la fonte est possible (température supérieure à zéro degré), dix fois moins d'énergie est utilisée pour la fonte que pour la sublimation d'une même quantité de glace/neige. Il suffit donc de prendre en compte les mailles au dessous de cette isotherme zéro degré, qui se déplace au cours de la journée. Au dessous de cette isotherme, la quantité de glace sublimée dépend du gradient de l'humidité relative, qui est plus élevé et présente une plus grande variabilité en saison sèche qu'en saison des pluies (cf. RIGAUDIERE, P. *et al.* 1995). Un gradient élevé favorise l'éloignement des masses d'air humide produites par la sublimation, ce qui augmente le flux de chaleur latente (la sublimation). En saison sèche, les masses d'air humide qui montent dans l'après-midi de l'Amazonie vers le haut du bassin versant diminuent les gradients d'humidité et en conséquence la sublimation. On peut donc attendre que l'après-midi une plus grande partie de l'énergie totale disponible est utilisée pour la fonte que le matin. Bien que le flux de chaleur latente s'atténue un peu avec l'altitude, on peut supposer que ces variations sont petites. Cela permet d'accepter l'hypothèse que la part d'énergie utilisé pour la fonte ne dépend que de l'heure de la journée.

$$F(h) = (q^*H_v^*\rho)/(q^*H_f^*\rho + H_v^*e) \quad (3)$$

Le débit instantané constitué par l'eau de fonte d'une maille peut donc s'écrire à partir des équations 2 et 3:

$$\mathbf{q}^*H_f^*\rho = F(h)^*\ (1\text{-}a)^*R_{dir}(\exp) + F(h)^*(1\text{-}a)^*R_{dif} + F(h)^*\Sigma E_{prop} \quad (4)$$

On posant pour l'albédo la valeur correspondant à une altitude moyenne, on intègre (4) sur la surface d'ablation variable :

$$Q_s \cdot H_f\rho = (1 - a_m(h)) \cdot F(h)\left[\int_{S_f} R_{dir}(\exp) \cdot dS + R_{dif} \cdot S_f(h)\right] + F(h) \cdot \sum E_{prop} \cdot S_f(h) \quad (5)$$

où :

Qs	=	débits de fonte instantané du glacier entier
$S_f(h)$	=	Surface au dessous de l'isotherme zéro degré pour une heure de la journée donnée
$a_m(h)$	=	Albédo qui correspond à l'altitude du centre de gravité de la surface au dessous de l'isotherme zéro degré, pour une heure de la journée donnée et un angle d'incidence nul

Regardons le premier terme de cette équation. Tant la part du rayonnement solaire réfléchie (l'albédo) que le rayonnement solaire directe dépendent de l'angle d'incidence du soleil (α), mesuré par rapport à normale de la maille (cf. Figure 30). Alors que le rayonnement diminue en proportion avec le cosinus de cet angle, l'absorption de ce rayonnement augmente, c'est-à-dire qu'il y a moins d'énergie réfléchie par la surface (1-a augmente). Si on met $I_\alpha = \cos(\alpha)$

et en prenant en compte la diminution de l'albédo on peut écrire pour le rayonnement solaire direct absorbé :

$$(1-a_m(h))\cdot R_{dir}(\exp) = (1-a_m(h))\cdot R_{dir}^{\max} I_\alpha^{\ x} \qquad (6)$$

où :

$R_{dir}^{\max}$ = Rayonnement solaire direct pour un angle d'incidence nul, constant dans le temps (environ 25% du rayonnement extraterrestre, cf. MUSY, A. et SOUTTER, M. 1991)

x = Facteur de puissance, entre 0 et 1, constant

Pour obtenir le débit journalier, on doit intégrer l'équation (5) sur la journée. En tenant compte de la variation horaire de l'énergie disponible, on peut l'intégrer sur deux demi-journées, le matin jusqu'à midi et l'après-midi jusqu'au soir. Cela donnerait :

$$Q\cdot H_f\rho = \sum_i F_i\left[(1-a_{m,i})\cdot R_{dir}^{\max}\int_{S_f(i)} I_\alpha^{\ x} dS + (1-a_{m,i})\cdot R_{dif} S_f(i)\right] + \sum_i F_i(\sum E_{prop} S_f(i)) \quad (7)$$

où :

Q = débit journalier

i = index de la demi journée : 1= matin à midi, 2 = midi au soir

$a_{m,i}$ = Albédo qui correspond à un angle d'incidence nul et à l'altitude du centre de gravité de la surface moyenne au dessous de l'isotherme zéro pendant la demi journée

S_f (i) = Surface moyenne au dessous de l'isotherme zéro degré pendant la demi-journée

En partant de l'équation (2) on a remplacé les termes qui dépendent de l'exposition et de l'altitude du pixel, le rayonnement solaire direct (R_{dir}) et l'albédo (a), par des fonctions du cosinus de l'angle d'incidence du soleil (I_α) et des valeurs moyennes ($a_{m,i}$) ou maximales ($R_{dir}^{\max}$) de ces termes. Ces dernières ne dépendent plus de la topographie des glaciers et leurs évolutions dans le temps est identique pour l'ensemble des glaciers, comme c'est le cas des termes E_{prop}. Cela permet de remplacer ces deux énergies par un facteur qui exprime la part de l'énergie du rayonnement direct de l'énergie totale :

$$R_E = \frac{R_{dir}^{\max}}{R_{dir}^{\max} + E_{prop}} = \frac{R_{dir}^{\max}}{E_{tot}} \qquad (8)$$

Si on remplace cette équation dans l'équation (7), et en supposant que l'influence de l'angle d'incidence sur l'albédo et négligeable et que l'albédo moyen est le même le matin et le soir, on peut assimiler le rayonnement diffus (R_{dif}) aux termes qui ne dépendent pas de la topographie et écrire

$$Q\cdot = \frac{(1-a_{m,i})\cdot E_{tot}}{H_f\cdot\rho\cdot}\cdot\sum_i F_i\left[R_i\cdot\int_{S_f(i)} I_\alpha dS + (1-R_i)\cdot S_f(i)\right] \qquad (9)$$

et

$$\int_{S_f(i)} I_a dS = I(S_{f,i}) \qquad (10)$$

dont :

$I(S_{f,i})$ = Sommes des cosinus de l'angle d'incidence du soleil sur les mailles de la surface au dessous de l'isotherme zéro. C'est une mesure du rayonnement solaire direct reçu par le glacier en fonction de sa topographie

L'équation des débits (9) dérivée du bilan d'énergie (1) est un modèle simple qui prend en compte l'influence de la topographie sur les débits des glaciers. Elle montre qu'une approche 'topographique' ne peut pas fonctionner avec des facteurs d'exposition. En effet, $I(S_{f,i})$ est le seule terme qui est influencé par la topographie du glacier. Il est une mesure du rayonnement reçu par la surface au dessous de l'isotherme zéro degré pendant un pas de temps de l'intégration sur la journée (par exemple pendant une demie journée) et en fonction de la topographie des mailles de surface sur lesquelles on intègre. On voit dans l'équation (8) que l'influence de ce terme sur le débit n'est pas constant, mais qu'elle dépend de l'énergie totale reçue par le glacier et de la part du rayonnement solaire direct maximal (R_{dir}^{max}) de ce total (R_i).

Le terme $I(S_{f,i})$ fait donc intervenir la topographie des mailles de surfaces des glaciers dans la production d'eau de fonte. Il est correspond à l'intégrale sur une surface variable en fonction du temps du cosinus de l'angle d'incidence du soleil. Il mesure le rayonnement directe reçu par la surface variable au dessous de l'isotherme zéro pendant un pas de temps variable. Dans la suite on a choisi la journée entier pour ce pas de temps. Mais avec la méthode qu'on a développé pour son calcul, présente dans la suite, il est facilement possible de calculer l'intégral pour un pas de temps quelconque. Il faut remarquer que chaque pas de temps dans une journée fait nécessaire le calage d'un paramètre qui détermine la part de l'énergie disponible qui est utilisée pour la fonte (F_i). La variante la plus simple du modèle développé dans ce paragraphe divise la journée en deux pas de temps, comme on l'a déjà mentionné, pour tenir compte de la conversion d'énergie disponible en eau de fonte qui est plus élevé pendant l'après-midi que le matin.

5.2 Comparaison des débits de fonte et des topographies des glaciers Charquini et Zongo

5.2.1 Les glaciers de référence

Pour le moment on ne dispose de mesure de débits que pour les glaciers Zongo et Charquini. Un limnigraphe vient d'être installé au pied du glacier du versant nord du Huayna Potosi, mais des mesures exploitables ne sont pas encore disponibles. La situation des deux glaciers Zongo et Charquini ainsi que les installations limnimétriques et météorologiques sont localisées sur la Figure 25. Les débits de l'émissaire du glacier Zongo sont mesurés juste au pied du glacier et la partie du bassin versant non glaciaire ne comprend que les moraines, correspondant à 30% de la surface totale captée (0.9 km^2 de 3.05 km^2). Par contre, la partie non glaciaire du bassin versant du Charquini est beaucoup plus importante, elle fait presque 70% de la surface totale captée. Les deux prises d'eau installées sur les émissaires du Charquini, qui alimentent le canal Prado, sur lequel les débits sont mesurés, ne captent pas la

totalité des écoulements glaciaires, en particulier en saison des pluies. En plus, les débits mesurés sur le canal Prado incluent les débits provenant du déstockage du lac Mamankota. Cela limite les possibilités de comparaison des débits du canal Prado avec ceux de l'émissaire du Zongo à des périodes sans pluie et sans opérations hydraulique sur le lac Mamankota.

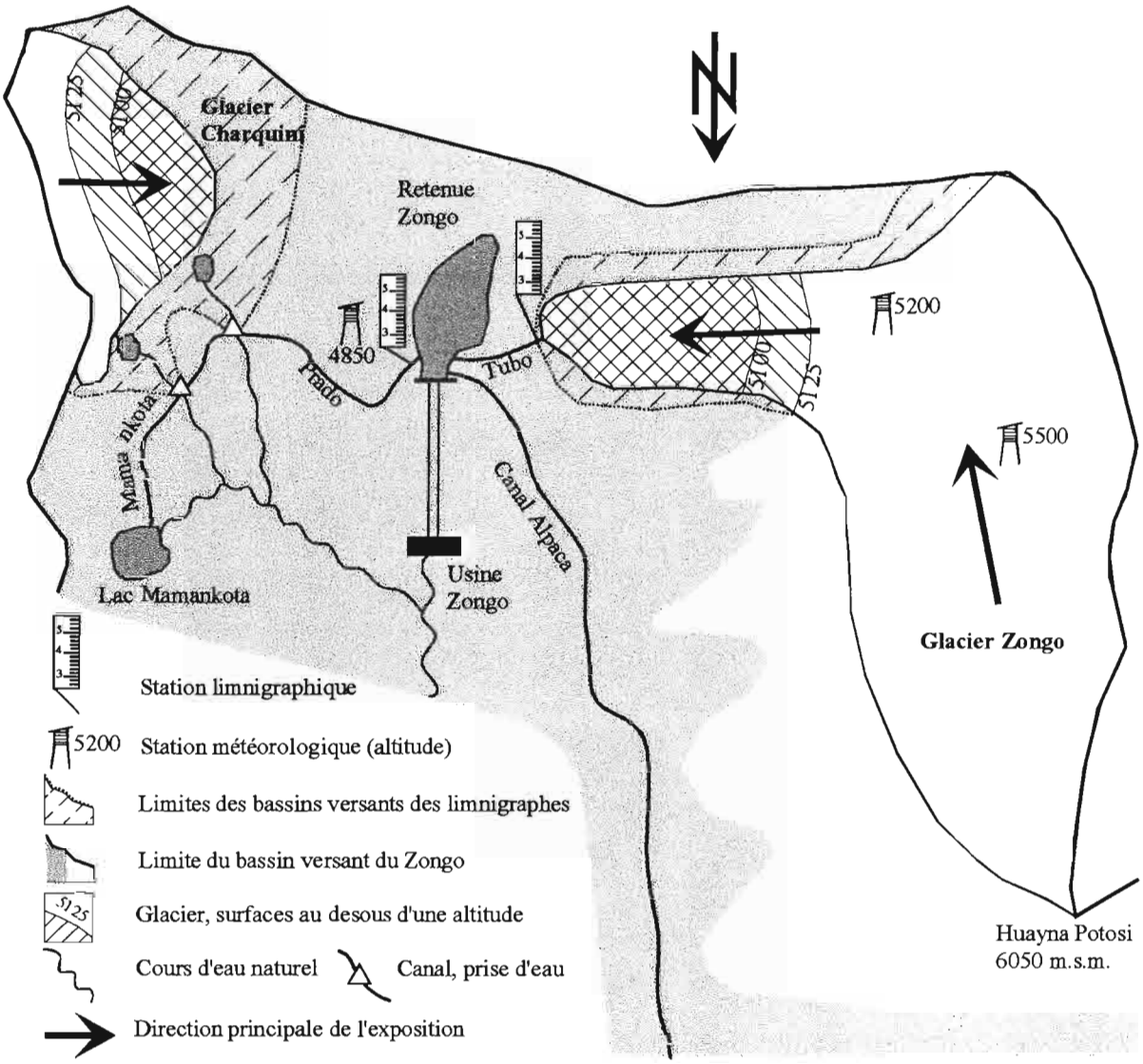


Figure 25 Plan de situation des glaciers Zongo et Charquini avec les installations limnimétriques et météorologiques

5.3 Les données obtenues à l'aide du MNT

5.3.1 Les MNT des glaciers

Pour obtenir les données topographiques des glaciers, on a superposé une image satellitaire SPOT de la saison sèche 1989 avec le modèle numérique de terrain (MNT) du bassin versant, obtenu à l'aide des cartes géographiques militaires d'échelle 1:50'000. Comme les fronts des glaciers tropical reculent rapidement, on a essayé d'utiliser l'image la plus récente possible. La superposition a été réalisée avec le programme de traitement d'images ERDAS 'Imagine'. Sur l'image 'SPOT' les surfaces glaciaires sont visibles, avec des pixels d'une couleur bleu claire ou foncée. Par superposition on a pu délimiter les contours des glaciers. On obtient de

cette manière les MNT du glacier Zongo et du Charquini, ainsi que, à fin de comparaison, de l'ensemble des autres glaciers. A titre d'exemple, le MNT obtenu pour le glacier Zongo est présenté sur la Figure 26.

Un examen attentif des cartes géographiques militaires, à l'aide desquelles on a obtenu le MNT du bassin, montre que les courbes de niveau de ces cartes ont probablement été tracées par interpolation entre des points d'altitude connue. Le MNT des glaciers n'est par conséquent pas très précis et la topographie réelle est beaucoup plus accidentée.

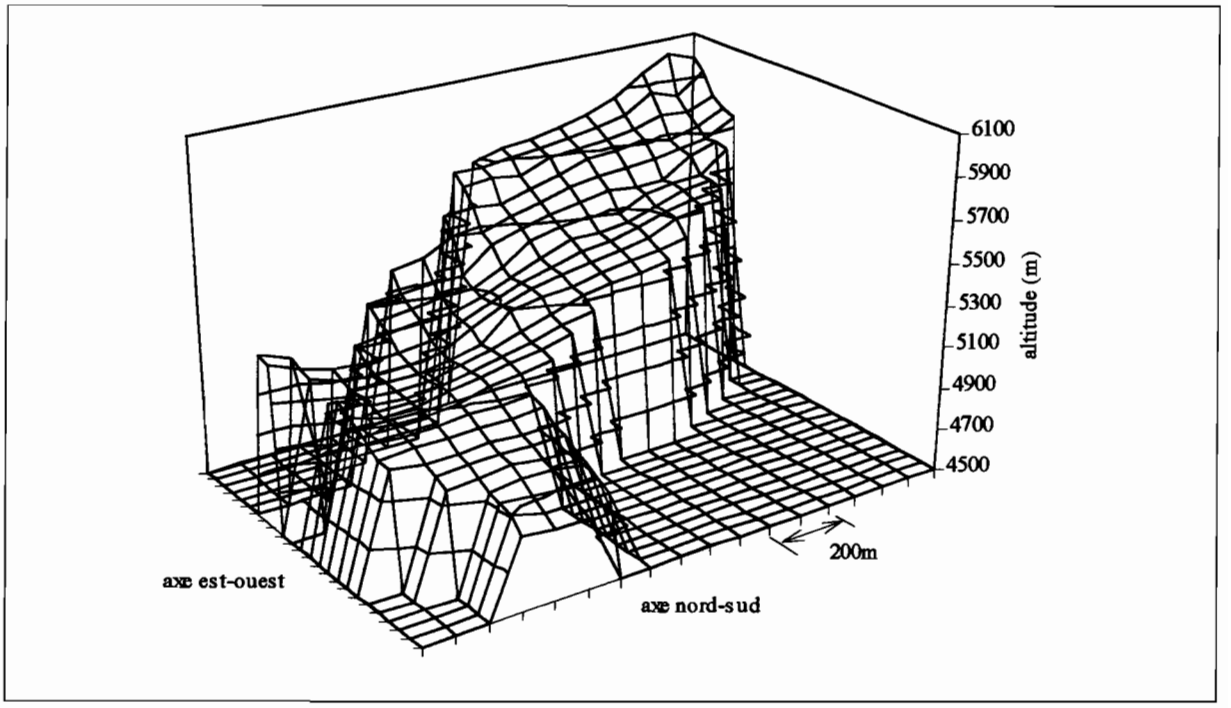


Figure 26 Modèle numérique de terrain (MNT) du glacier Zongo. La résolution élémentaire est de 100 m.

5.3.2 Les paramètres topographiques obtenus à l'aide du MNT pour chaque maille

La surface d'une maille du MNT projetée sur le plan horizontal est de 0.01 km^2 (100*100m). La somme de toutes les mailles du glacier Zongo correspond à une surface de 2.15 km^2, ce qui coïncide avec la surface totale déterminé par B. Francou (FRANCOU, B. ET RIBSTEIN, P., 1995). La surface du glacier Charquini est de 0.46 km^2 et celle de l'ensemble des glaciers de 18.3 km^2. Si on ne prend pas en compte la vallée de Coscapa, la surface totale des glaciers est de 11.5 km^2. Il faut noter que 37% des surfaces glaciaires du bassin du Zongo appartiennent à cette vallée de Coscapa, dont les écoulements ne passent pas par l'usine de Sainani. A partir des altitudes de chaque maille d'un glacier, on peut établir les courbes hypsométriques des glaciers. Les courbes hypsométriques pour les glaciers Charquini et Zongo et pour l'ensemble des glaciers (sans Coscapa) sont présentées sur la Figure 27. La forme de la courbe de l'ensemble des glaciers est la plus typique : une partie raide juste au front du glacier, puis une pente plus faible et à nouveau un accroissement jusqu'aux valeurs maximales observées dans les zones sommitales. Le glacier Zongo a sensiblement le même profil, tandis que le glacier Charquini a un profil particulier. L'inflexion dans la courbe du glacier Charquini entre 4900 et 5100 m d'altitude est due à quelques mailles englacées isolées et non contigues au glacier principal.

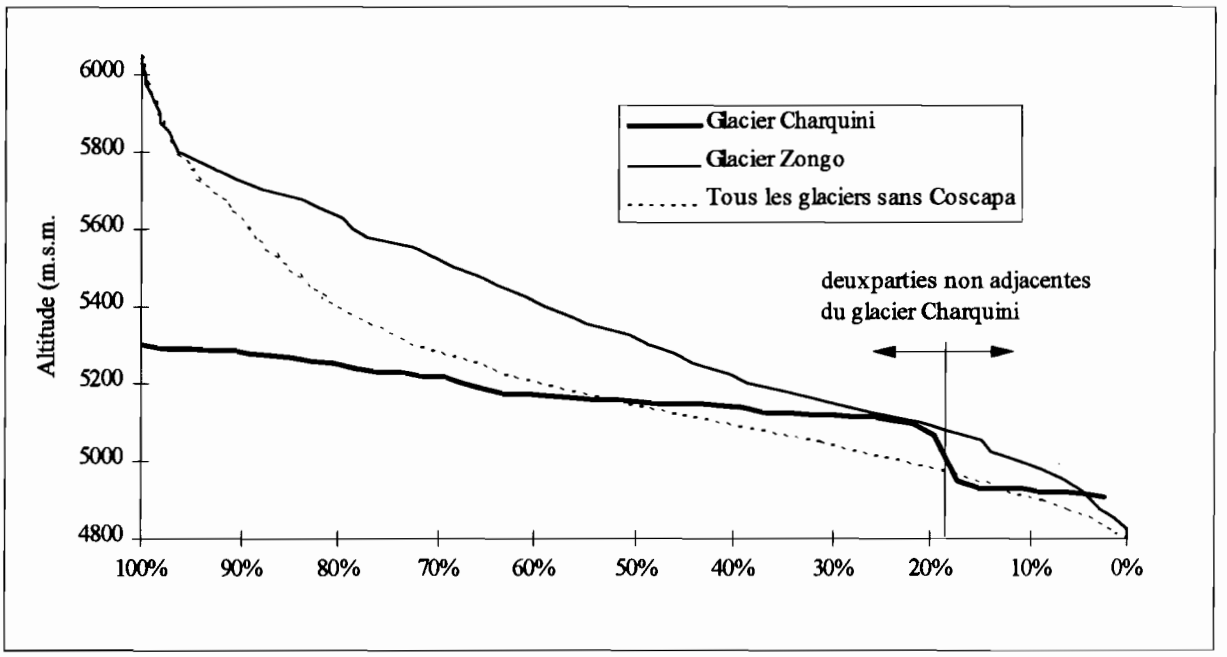


Figure 27 Courbes hypsométriques des glaciers Charquini, Zongo et de l'ensemble des glaciers du bassin versant (sans les glaciers de la vallée Coscapa)

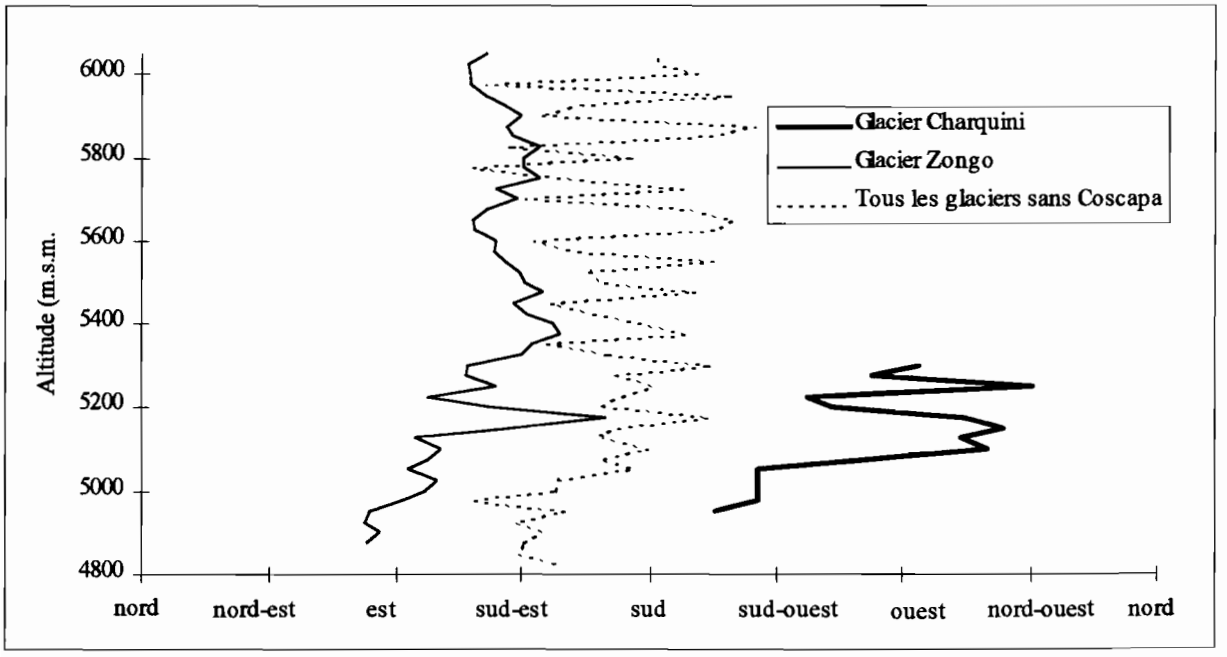


*Figure 28 Exposition moyenne des mailles de 100m*100m pour des classes de 25m de différence d'altitude*

Le programme de traitement d'images utilisé permet de calculer les expositions et les pentes maximales des mailles. L'exposition des mailles correspond à la direction de la pente maximale. Les expositions moyennes des glaciers sont présentées sur la Figure 28. On observe que le glaciers Zongo passe d'une exposition est dans sa partie inférieure vers une exposition sud sud-est dans sa partie supérieure. Un changement comparable de l'exposition moyenne de la partie inférieure vers la partie supérieure du glacier peut s'observer en cas du Charquini. Mais l'exposition du Charquini est exactement opposée à celle du Zongo (cf.

également Figure 25). La courbe d'exposition moyenne de l'ensemble de glacier se trouve entre celles du Charquini et du Zongo. Elle oscille irrégulièrement entre le sud-sud-est et sud-ouest. Cette tendance vers une exposition au sud de l'ensemble des glaciers s'explique par le fait que les glaciers exposés au nord sont généralement réduits, à cause du rayonnement solaire direct, qui est en moyen plus fort sur les pentes exposées au nord (cf. 5.1.3).

5.4 L'estimation des différences du rayonnement solaire direct au cours de la journée et pendant l'année sur les glaciers Zongo et Charquini

5.4.1 Introduction

Sur le plan de situation des glaciers Charquini et Zongo (Figure 25) ou sur la Figure 28 des expositions moyennes, on observe que les parties inférieures de ces deux glaciers sont orientées de l'ouest au sud-ouest (Zongo) et du sud-est au nord-est (Charquini) ; c'est-à-dire à peu près opposées de par et d'autre d'une ligne d'est en ouest. Par conséquent, la différence entre les insolations de ces expositions opposées ne doit pas varier beaucoup au cours de l'année. Les deux glaciers diffèrent cependant par les heures de la journée où il se trouvent directement exposés à l'ensoleillement. Les parties basses du Zongo reçoivent le soleil le matin, celles du Charquini le soir. Si on considère les glaciers dans leur ensemble, la variation de l'intensité solaire diffère pour les deux glaciers. les parties moyennes et hautes du glacier Zongo sont exposées plutôt vers le sud, ce qui fait qu'elles reçoivent un ensoleillement maximal en été, quand le soleil se trouve au sud de la latitude des glaciers. A midi, c'est le cas entre le 26 janvier et le 24 avril ; dans les premières heures de la matinée et en fin de journée entre le 12 décembre et le 8 juin. Les parties moyennes et hautes du glaciers sont exposées au soleil pendant la plupart de la journée en saison des pluies et partiellement en saison sèche, entre début janvier et mi-mai.

Il apparaît donc que la position du soleil au cours de l'année n'est pas à négliger si on veut estimer les différences de rayonnement solaire direct sur les deux glaciers Charquini et Zongo. C'est pour cela que dans la suite on prend en compte non seulement l'évolution de l'ensoleillement au cours de la journée, mais aussi de l'année.

5.4.2 La position du soleil au cours de l'année et pendant la journée

La position du soleil par rapport à un point terrestre est déterminée par deux angles. Le zénith est l'angle incident sur l'horizontale du point, c'est-à-dire, l'angle entre la ligne soleil/terre et la verticale au point considéré. L'azimut correspond à la déclinaison du soleil par rapport au nord (Figure 30). Les formules de calcul de ces deux angles en fonction des coordonnées, de la journée et de la date, établies par Robinson (cf. ROBINSON, N. 1966). La position du soleil au cours de la journée et de l'année est présenté sur la Figure 29.

La Figure 29 présente les trajectoires du soleil au cours de la journée pour les journées les plus longues et les plus courtes de la saison sèche. On voit qu'au début de la saison le soleil monte au delà de la latitude des glaciers, tandis que vers la fin de la saison, sa trajectoire passe beaucoup plus au nord.

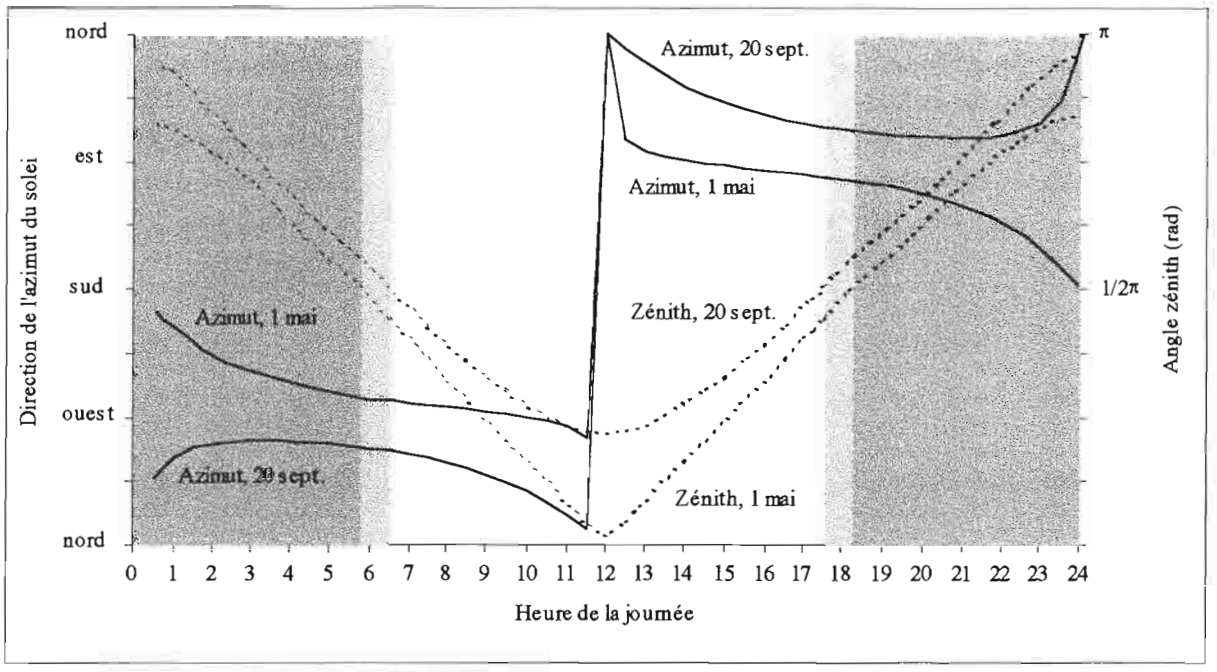


Figure 29 Position du soleil au cours de la journée pour le jour le plus long (1 mai) et plus court (20 sept.) de la saison sèche. En gris foncé : heures de nuit du 1 mai ; en gris clair/foncé : heures de nuit du 20 sept.

5.4.3 Calculs des angles d'incidences du soleil avec les mailles des glaciers

L'intensité d'ensoleillement d'une maille dépend de l'angle incident du soleil sur cette maille. La puissance de l'ensoleillement est maximale quand l'angle incident, mesuré par rapport à la normale de la surface, est 0°. Elle est nulle pour un angle incident de 90°. Au delà de 90°, la maille se trouve à l'ombre. Le maille peut également se trouver à l'ombre à cause de l'élévation des mailles voisines. Pour savoir si une maille se trouve à l'ombre des mailles voisines, il faut connaître les angles 'topographiques' entre la maille considérée et les mailles qui se trouvent dans l'alignement de l'azimut du soleil. Si le complément à 90° du zénith du soleil est plus grand que l'angle 'topographique' maximal, la maille se trouve au soleil, dans le cas contraire, elle est à l'ombre. Le schéma de la Figure 30 en présente une explication graphique. La moyenne des cosinus des angles d'incidence (I_α) sur toutes les mailles de surface d'un glacier est proportionnelle au rayonnement solaire direct (moyen) sur cette surface (cf. 2.2.4).

Afin de pouvoir calculer ces moyennes du cosinus de l'angle d'incidence au cours de la journée et de l'année, il faut calculer les caractéristiques de toutes les mailles à chaque pas de temps. Pour simplifier et permettre un calcul rapide, on a choisi une autre approche. Au lieu de calculer la moyenne du cosinus des glaciers à chaque pas de temps, on calcule les moyennes des trois ensembles glaciaires (Charquini, Zongo et l'ensemble des glaciers) pour une gamme de valeurs des angles (zénith et azimut) limitée. Le résultat est un tableau pour chaque glacier avec les valeurs moyennes sur toutes les mailles de surfaces du cosinus de l'angle d'incidence, pour les valeurs choisies de zénith et d'azimut. Pour une heure et une date données, on peut ainsi facilement d'abord déterminer les angles de la position du soleil (à l'aide du tableau des zénith et azimut en fonction de l'heure et de la date, cf. 5.4.2), et

ensuite lire les cosinus dans le tableau établi[15]. Cela peut paraître compliqué, mais pour déterminer les moyennes des cosinus de l'angle d'incidence par rapport à une surface des glacier au dessous d'un certaine altitude, ce procédé est le seul possible, comme on le verra dans le prochain paragraphe. Le tableau a été établi pour 8 angles d'azimut et 16 angles de zénith.

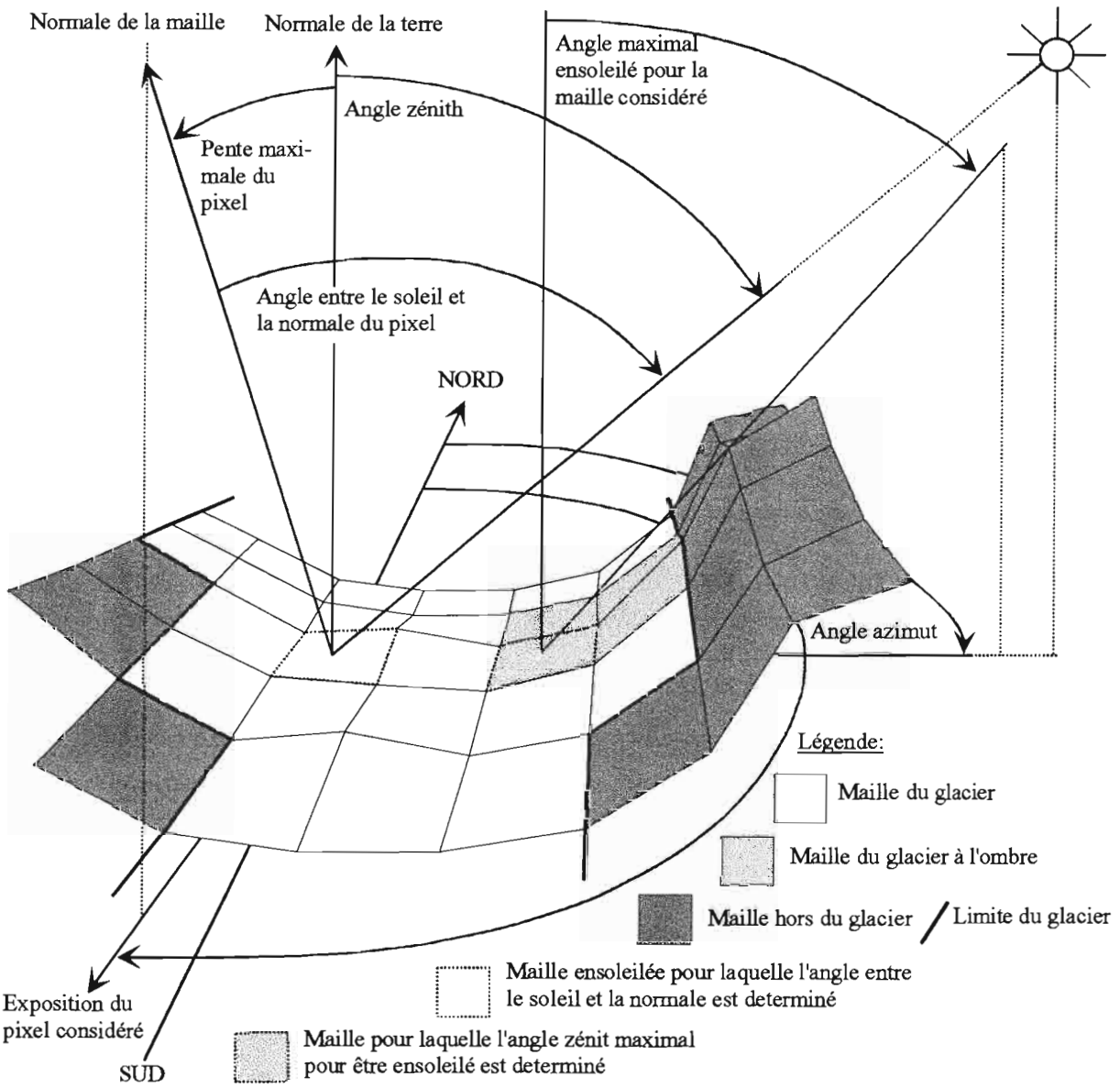


Figure 30 Calcul de l'intensité de l'ensoleillement des mailles des glaciers pour une position (azimut/zénith) du soleil donnée. Détermination si une maille se trouve à l'ombre et calcul de l'angle incident du soleil pour une maille (angle entre la normale de la maille et la ligne soleil/terre)

5.4.4 L'ensoleillement moyen sur les surfaces totales des glaciers

Le résultat du calcul des moyennes des cosinus de l'angle d'incidence sur les surfaces entières des glaciers est présenté sur la Figure 31 et la Figure 32. On peut y observer, d'une part,

[15] Comme le nombre de valeurs d'azimut et de zénith dans le tableau est nécessairement limité, des interpolations linéaires sont effectuées entre les valeurs du tableau

l'évolution des moyennes journalières (moyennes des cosinus sur les mailles de surface et les heures de la journée), et, d'autre part, les variations au cours de la journée pour les jours d'ensoleillement maximal (1 mai) et minimal (10 septembre). La conclusion de la comparaison qualitative faite dans le paragraphe 5.4.1 est confirmé par les données. On observe que l'ensoleillement moyen du glacier Zongo est plus proche de celui du Charquini au début de la saison sèche, quand la partie sommitale du glacier Zongo, exposée vers le sud, est ensoleillée, parce que le soleil monte au delà de la latitude des glaciers au cours de la journée (cf. Figure 25, 5.2.1). L'ensoleillement du glacier Zongo diminue ensuite, parce que la partie sommitale est de moins en moins ensoleillée quand le soleil se déplace vers des latitudes nord au cours de la saison sèche. Il est intéressant d'observer que le développement de l'ensemble des glaciers (moyennes de l'ensoleillement sur les mailles de tous les glaciers de la vallée) suit plus ou moins celui du glacier Charquini, avec un décalage vers des valeurs un peu plus faibles. Les mailles de surface de l'ensemble des glaciers sont en moyenne exposées au sud-est, alors que l'exposition du glacier Charquini est au sud-ouest (cf. Figure 28, 5.3.2). Ces deux expositions sont symétriques de part et d'autre d'une ligne sud-nord, sur laquelle l'inclinaison du soleil se déplace au cours de l'année. Cela explique l'évolution parallèle de l'ensoleillement des deux glaciers au cours de l'année.

La variation de l'ensoleillement au cours de la journée reflète la trajectoire du soleil au cours de la journée d'est en ouest. Comme le glacier Zongo est exposé plutôt vers l'est et le glacier Charquini plutôt vers l'ouest, le maximum d'ensoleillement du glacier Zongo est décalé vers le matin et celui du Charquini vers l'après-midi. On a remarqué précédemment que l'ensoleillement de l'après-midi a probablement un effet plus important sur les écoulements que l'ensoleillement du matin, car une énergie moindre est utilisée pour la sublimation (0). Dans une approche modélisatrice, les séries de débits des deux glaciers sont donc idéales pour caler les facteurs qui décrivent la part de l'énergie disponible utilisée pour la fonte de la glace au cours de la journée.

La variation de l'ensoleillement au cours de la journée sur l'ensemble des glaciers ressemble plutôt à celle du glacier Zongo qu'à celle du glacier Charquini, parce que la composante est de l'exposition à la même importance que dans le cas du Zongo (cf. Figure 28, 5.3.2). Les différences d'ensoleillement au cours de la journée entre le glaciers Zongo et l'ensemble des glaciers s'observent surtout pendant les heures de l'après-midi et vers la fin de la saison sèche (10 septembre), quand l'ensemble des glaciers est plus ensoleillé que le glacier Zongo. Au début de la saison, par contre, l'ensoleillement au cours de la journée est presque identique pour les deux surfaces glaciaires. Cela s'explique en partie par les ombes portées. On peut observer dans la Figure 32 que les courbes du glacier Zongo sont un peu aplaties l'après-midi, surtout au début de la saison sèche (1 mai). Comme les parties sommitales du glacier Zongo sont exposées au sud-est, elles entrent dans l'ombre de l'arête sud du Huayna Potosi (cf. Figure 25, 5.2.1). Au début de la saison sèche, la courbe du glacier Zongo est décalée vers des valeurs plus élevées, à cause de l'augmentation générale de l'ensoleillement sur ce glacier pendant l'été. Par conséquent, l'ensoleillement matinal du glacier Zongo est plus élevé que celui de l'ensemble des glaciers, tandis que pendant l'après-midi, les valeurs des deux surfaces glaciaires deviennent plus proches à cause de l'effet des ombres portées. En hiver, vers la fin de la saison sèche, il n'y a pas d'effet des ombres portées sur la partie sommitale du glacier Zongo, car cette zone se trouvent déjà à l'ombre le matin. Par contre, la moraine nord du glacier Zongo pourrait bien au cours de l'après-midi diminuer l'ensoleillement des parties basses de ce glacier (cf. Figure 25, 5.2.1). L'effet est augmenté par le fait que ce sont

seulement ces parties basses qui reçoivent le gros de l'ensoleillement en hiver. Cela pourrait être l'explication des valeurs de plus en plus élevées de l'ensoleillement de l'ensemble des glaciers le 10 septembre en comparaison avec le glacier Zongo au cours de la journée.

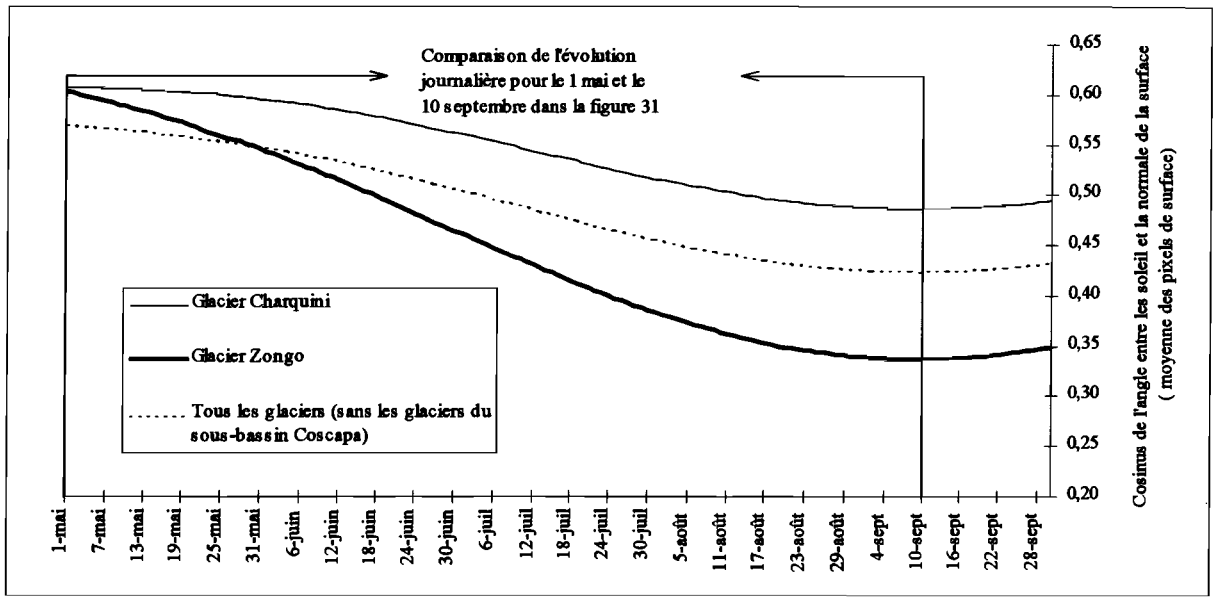


Figure 31 Moyennes sur l'ensemble des mailles des glaciers du cosinus de l'angle d'incidence du soleil (I_α). Evolution des valeurs moyennes journalières

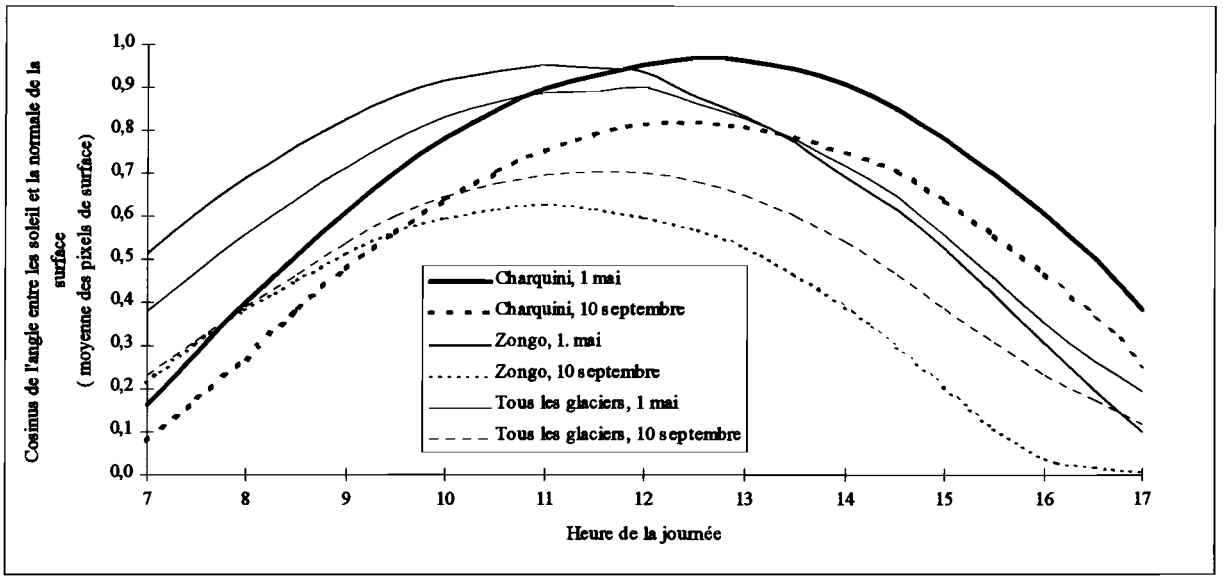


Figure 32 Moyennes sur l'ensemble des mailles des glaciers du cosinus de l'angle d'incidence du soleil (I_α). Evolution pendant les jours d'ensoleillement maximal (1 mai) et minimal (10 sept.) de la saison sèche

En résumant et en conclusion de ce paragraphe, on peut dire que l'évolution de l'ensoleillement sur l'ensemble des glaciers au cours de l'année n'est pas concommitante à celle du Zongo. Par conséquent la saisonnalité est un facteur d'influence qui devrait être pris en compte lors du développement d'un modèle pour estimer les débits d'eau de fonte de l'ensemble des glaciers à partir de ceux du glacier Zongo. La variabilité de l'ensoleillement

au cours de la journée, par contre, est plus comparable, surtout en début de la saison sèche. Mais l'ensoleillement de l'ensemble des glaciers pendant l'après-midi est quand même élevé par rapport à celui du Zongo. De ce fait, les facteurs de conversion des énergies en débit sont probablement importants dans la modélisation, surtout en fin de saison sèche.

5.4.5 L'ensoleillement moyen des surfaces au dessous de l'isotherme zéro

Dans un futur modèle de fonte de l'ensemble des glaciers, il pourrait être intéressant de séparer les surfaces de glaciers en deux zones au dessous et au dessus de l'isotherme zéro degré, ou même de prendre en compte différentes classes d'altitude comme dans le modèle de RIGAUDIERE et al. (1995) (cf. 2.2.4). Pour cela, on doit pouvoir calculer la moyenne de l'ensoleillement des mailles, c'est-à-dire la moyenne des cosinus de l'angle d'incidence, pour une surface des glaciers jusqu'à une courbe de niveau donnée. Dans ce cas, l'ensoleillement moyen ne dépend pas seulement du zénith et de l'azimut du soleil mais aussi de l'altitude. Le procédé est identique à celui qui est présenté dans le paragraphe 5.4.3. Dans ce cas il est absolument indispensable de calculer les moyennes de l'ensoleillement pour des gammes de valeurs de zénith, d'azimut, et, en plus, d'altitudes jusqu'à la limite à laquelle on souhaite traiter les surfaces glaciaires. En effet, un calcul sur toutes les mailles pour des triplets (zénit, azimut, altitude) du bassin prendrait beaucoup de temps.

On choisit les mêmes valeurs de zénith et azimut que pour le calcul de l'ensoleillement sur les surfaces entières des glaciers (cf. 5.4.4). La gamme des courbes de niveau est comprise entre 4800 et 6050 m., avec des pas de 25 m, ce qui donne 50 valeurs d'altitude. L'ensoleillement moyen des mailles au dessous de ces altitudes a été calculé, en faisant varier les 8 angles d'azimut et les 16 angles de zénith, pour les glaciers Zongo et Charquini. A l'aide des tableaux résultants, de dimension 50 x 8 x16, les ensoleillements moyens des deux glaciers sur les surfaces au dessous d'une isotherme à une heure et une date donnée peuvent facilement être calculés.

Pour la comparaison des glaciers on a choisi trois périodes d'observation pendant lesquelles coexistent des données de débits du glacier Zongo et du canal Prado et qui ne contiennent pas de jours de fortes précipitations ni de jours d'opération des vannes du lac Mamankota (cf. 5.2.1). La premier période d'observation est du 1 mai au 25 juillet 1995, la seconde du 16 août au 3 septembre de la même année et la troisième du 10 juin au 19 juillet 1996 (Annexe C). Toutes les période choisies se trouvent en saison sèche parce qu'en saison des pluies, les débits du canal Prado sont trop influencés par les précipitations. Pour la saison sèche 1997 nous ne disposions pas encore des valeurs traitées de débits au moment de la réalisation de l'étude.

L'estimation de l'altitude de l'isotherme zéro degré à chaque demi-heure pendant les périodes d'observations a été réalisée à l'aide des températures mesurées toutes les demi-heures à la station Campbell 21 X sur le glacier Zongo à 5200 m d'altitude (cf. Figure 25, 5.2.1). Afin d'atténuer les erreurs de mesures et l'oscillation de l'altitude de l'isotherme zéro degré, on a préféré établir la courbe des moyennes des températures en 30 minutes, centrées et réduites pour chaque jour et sur la période des deux saisons sèches 1995 et 1996 (Annexe D). Cette courbe de l'évolution moyenne de la température permet de recalculer les températures en 30 minutes à partir des moyennes journalières et des écart types des valeurs en 30 minutes pendant la journée. L'altitude de l'isotherme zéro degré a été calculé en supposant un gradient constant de -0.67°/100 m.

A l'aide du tableau en trois dimensions décrit ci-dessus, les ensoleillements moyens (par unité de surface) des surfaces au dessous de l'isotherme zéro degré estimé (moyennes sur les mailles au dessous de l'isotherme zéro degré des cosinus des angles d'incidence du soleil) ont été reconstitués au pas de temps de la demi-heures pour les deux glaciers Charquini et Zongo. Ensuite on a calculé les moyennes journalières qui sont présentées dans la Figure 33.

La Figure 33 correspond en quelque sorte à celle des évolutions des moyennes de l'ensoleillement des surface entières des glacier (cf. 5.4.4, Figure 31). On observe également une diminution des moyennes journalières du Zongo par rapport au Charquini au cours de la saison sèche. Cette diminution est cependant moins accusée que dans le cas des moyennes sur les surfaces entières. Cela s'explique par le fait que le poids de la partie supérieure du glacier Zongo, qui provoque un effet de saisonnalité sur la différence de l'ensoleillement des glaciers Charquini et Zongo, est réduit, car elle se trouve moins souvent au dessous de l'isotherme zéro degré que les parties inférieures du glacier. Les valeurs nulles de la Figure 33 sont par ailleurs le résultat de jours très froids, pendant lesquel l'isotherme zéro degré se trouve au dessous des glaciers tout au long de la journée.

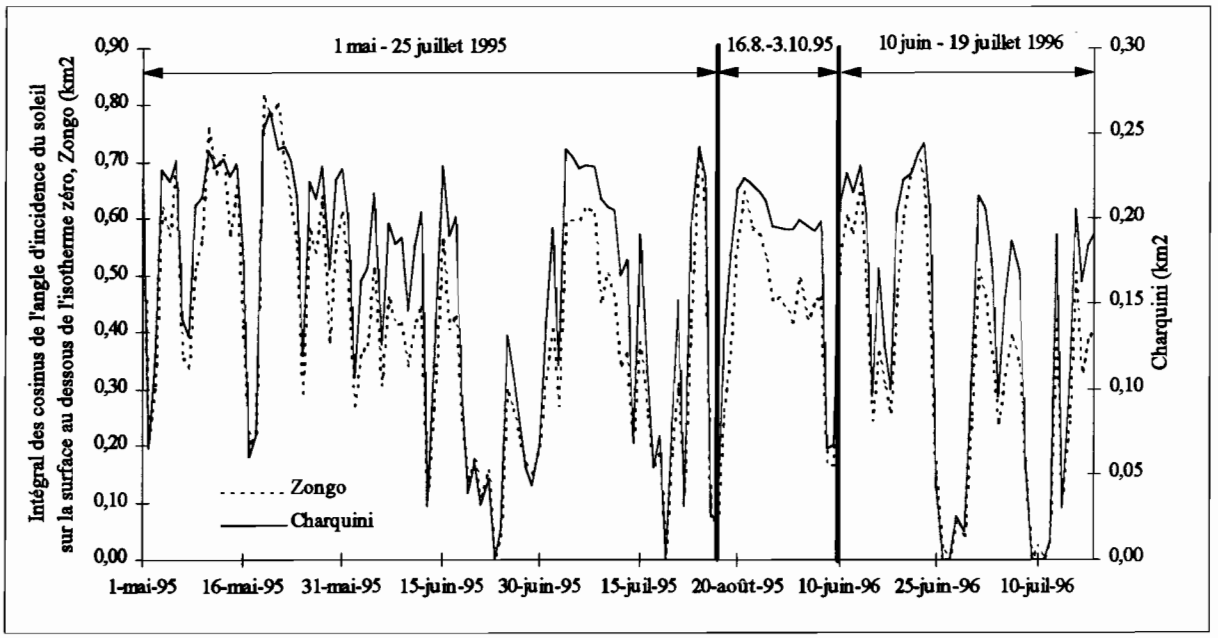


Figure 33 Ensoleillement des surfaces au dessous de l'isotherme zéro degré (intégrales sur les mailles au dessous de l'isotherme des cosinus des angles d'incidence du soleil) pour les glaciers Zongo et Charquini. Valeurs intégrée sur la journée (pas d'intégration 1 demi-heure)

Sur la Figure 34 est présenté une comparaison entre l'ensoleillement sur toute la surface des glaciers et sur les surfaces au dessous de l'isotherme zéro degré. Comme la Figure 33, elle montre l'intégrale de ensoleillement sur la surface (la somme des cosinus de l'angle d'incidence du soleil sur chaque pixel). Dans la figure est montré également l'évolution de la surface au dessous de l'isotherme zéro degré. Comme la valeur maximale de l'ensoleillement d'une maille est 1 (cos (0°)), la valeur maximale de l'intégrale sur les surfaces au dessous de l'isotherme zéro correspond à cette surface (en km^2), de même pour la valeur maximal de l'intégrale sur toute la surface du glacier. Ces valeurs maximales ne sont évidemment jamais atteinttes, car cela signifierait que toutes les mailles de la surface considérée sont à chaque instant exposées vers le soleil.

Il est intéressant maintenant de comparer les ensoleillement avec les débits de fonte des deux glacier Zongo et Charquini. C'est l'objet du prochain chapitre.

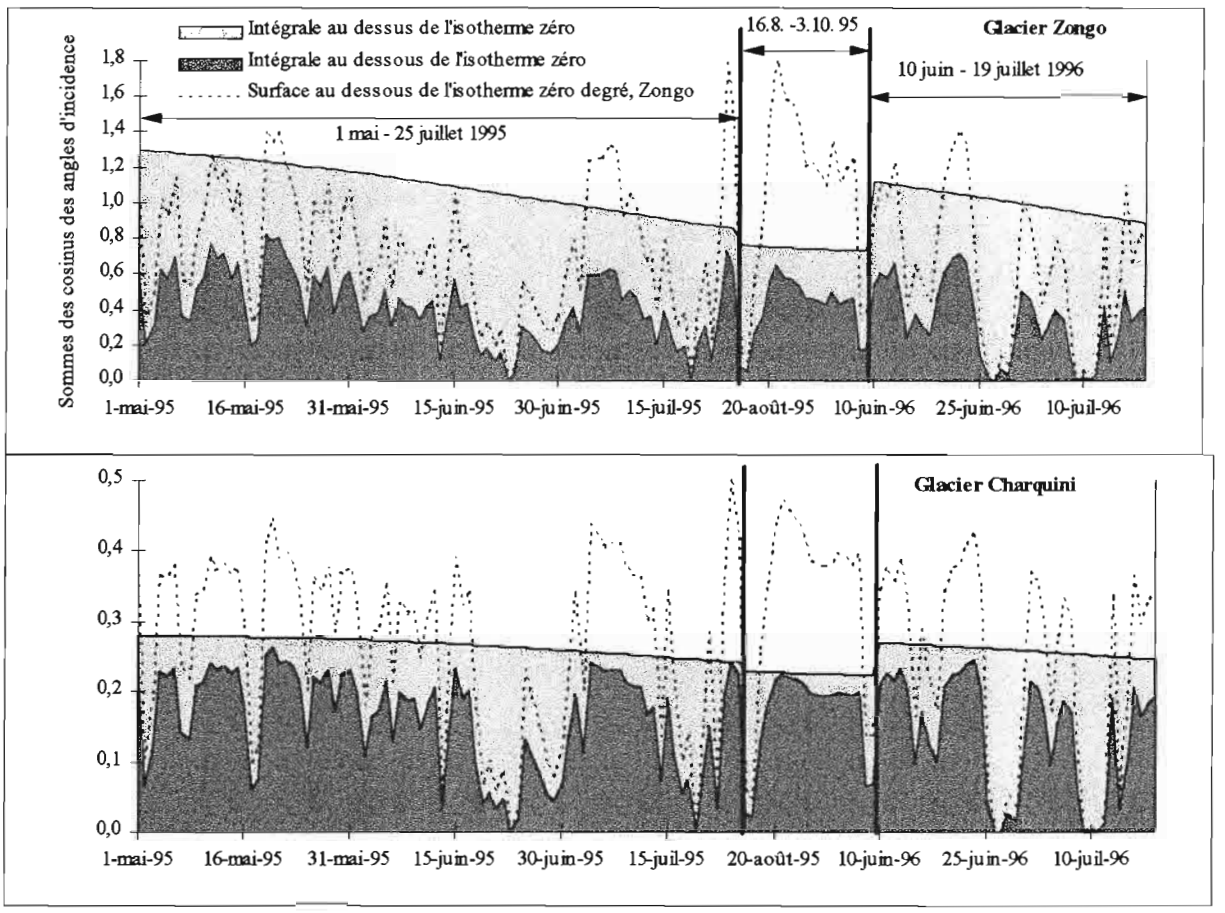


Figure 34 Ensoleillement des surfaces au dessous de l'isotherme zéro degré (intégrales sur les mailles au dessous de l'isotherme des cosinus des angles d'incidence du soleil) pour les glaciers Zongo et Charquini. Valeurs intégrée sur la journée (pas d'intégration 1 demi-heure). L'unité est le km². En pointilles : Surfaces au dessous de l'isotherme zéro du glaciers Zongo

5.5 Simulation des débits du glaciers Charquini avec deux modèles simples et comparaison avec l'ensoleillement des glaciers

5.5.1 Simulation des débits de fonte du glacier Charquini avec deux modèles simples

Le modèle plus simple pour simuler les débits d'une surface glaciaire à partir des débits connus d'une autre consiste à admettre l'hypothèse que les débits spécifiques ramenés aux surfaces totales des glaciers sont égaux. Ce modèle linéaire simple s'écrit :

$$Q_{ch} = \frac{S_{ch}^{tot}}{S_z^{tot}} Q_z + Q_{base} \quad (10)$$

où :

Q_{ch} = Débit journalier du glacier Charquini (simulé)

Q_z = Débit journalier du glacier Zongo
Q_{base} = Débit additionnel du aux différences entre les glaciers
S_{ch}^{tot} = Surface totale du glacier Charquini
S_z^{tot} = Surface totale du glacier Zongo

Ce modèle se base sur les hypothèses faites dans le chapitre 5.1.2 postulant que c'est la production d'eau de fonte à la surface des mailles des glaciers qui influencent la différence des débits. Mais ce modèle, extrêmement simple, suppose en plus que la production d'eau de fonte est en moyenne égale sur toute la surface d'un glacier et liée d'un façon linéaire aux productions des autres glaciers. Afin de tenir compte des différences de production entre les glaciers, on introduit un débit de base constant. Un modèle un peu plus sophistiqué adapte la dernière hypothèse du modèle linéaire simple en posant que ce sont que les mailles de la surface d'ablation qui produisent le débit. Ce modèle se base sur l'idée qu'au dessus de l'isotherme zéro degré, il n'y a pas de fonte et toute l'énergie est utilisée pour la sublimation. Ce deuxième modèle peut s'écrire :

$$Q_{ch} = \frac{S_{ch}^{iso}}{S_z^{iso}} Q_z + Q_{base} \quad (11)$$

où :

S_i^{iso} = Surface au dessous de l'isotherme zéro degré du glacier (i) (moyenne sur la journée des surfaces au dessous de l'isotherme à chaque demi-heure)

Pour adapter aux mieux les termes du débit de base de ces deux modèles on utilise la fonction critère de Nash. Le résultat des simulations avec les deux modèles est présenté sur la Figure 35. On réalise une application de chaque modèle sur l'ensemble des périodes d'observation en saison sèche 1995 et, séparément, sur la période d'observation en saison sèche 1996, qui est plus courte. Evidemment, ces modèles simples ne sont pas adaptés à la description des processus complexes à l'origine des différences entre les débits des glaciers, mais ces simulations permettent l'interprétation des différences topographiques entre les deux glaciers Charquini et Zongo, détaillées dans le chapitre précédent.

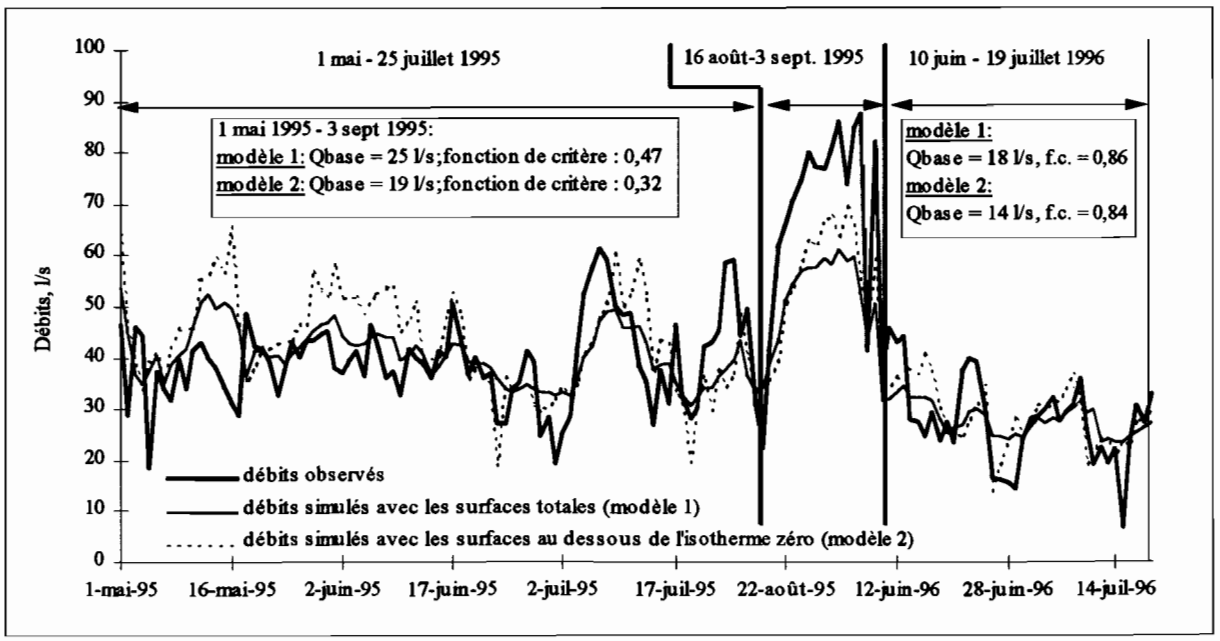


Figure 35 Simulation des débits du glacier Zongo avec des modèles qui se basent sur les débits spécifiques rapportés aux surfaces totales des glaciers (modèle 1) et par rapport aux surfaces au dessous de l'isotherme zéro degré (modèle 2). Calage du paramètre du débit de base avec le critère de Nash.

5.5.2 Interprétation des résultats de la modélisation en comparant les différences d'ensoleillement

On observe dans les simulations que les deux modèles utilisés reconstituent assez bien les débits du glacier Charquini en saison sèche 1996, tandis qu'en saison sèche 1995, sur une plus longue période, l'adaptation des débits simulés est bien moins bon (cf. Figure 35). C'est évidemment à mettre en relation avec la différence de la longueur des périodes d'observation. Observons sur la Figure 35 le résultat de la simulation sur les deux premières périodes. Les débits au début de la saison sèche sont souvent surestimés par rapport aux débits réels tandis que vers la fin de la saison, se trouvent généralement sous-estimés. Cela semble être lié aux différentes évolutions de l'ensoleillement au cours de la saison sur les glaciers Charquini et Zongo.

Si on reprend la Figure 33 et la Figure 34, on observe une diminution plus forte de l'ensoleillement sur le glacier Zongo que sur le glacier Charquini au cours de l'avancement de l'hiver (cf. 5.4.4 et 0). Ces évolutions différentes conduisent très probablement à une diminution plus importante des débits du Zongo par rapport aux débits du Charquini au cours de la saison sèche. Or, dans le cas du modèle de surfaces totales, les débits simulés du Charquini sont liés par un facteur constant dans le temps aux débits du glacier Zongo. Par conséquent, quand les débits du glacier Zongo diminuent plus fortement que les débits réels du glacier Charquini au cours de la saison sèche, les débits simulés, d'abord surestimés, deviennent peu à peu sous-estimés. Il se peut que la sous-estimation des débits du Charquini entre le 16 août et le 3 septembre est due à l'incapacité du modèle de simuler une non-linéarité des débits qui ne dépend pas de la saisonnalité, car les débits pendant cette période d'observation sont exceptionnellement élevés. Néanmoins, la diminution des débits estimés par rapport aux débits réels s'observe aussi si l'on ne regarde que la première période d'observation en 1995 et pendant la période d'observation en saison sèche 1996. Pendant ces deux périodes d'observation, les sous-estimations ne sont pas liées à des débits exceptionnellement élevés. De plus, les sous-estimations des débits réels par le deux modèles pendant la crue des débits de fonte du glacier Charquini entre le 16 août et le 3 septembre correspondent à des jours pendant lesquelles l'ensoleillement moyen des surfaces au dessous de l'isotherme zéro degré du glacier Zongo était fortement inférieur à celui du glacier Charquini.

Dans le cas du modèle des surfaces au dessous de l'isotherme zéro degré, les débits simulés ne dépendent pas d'un facteur constant dans le temps des débits du glacier Zongo. On pourrait même penser que ce facteur, le quotient des surfaces des glaciers au dessous de l'isotherme zéro degré, introduit une certaine saisonnalité dans les débits simulés, car les températures diminuent avec l'avancement de l'hiver et, avec elles, les surfaces au dessous de l'isotherme zéro degré. En se rappelant les courbes hypsométrique des glaciers (cf. 5.3.2, Figure 27), on note que celle du Charquini est beaucoup plus plate que celle du Zongo. Par conséquent, une baisse de température conduit à une diminution plus grande des surfaces au dessous de l'isotherme zéro degré du glacier Charquini que du glacier Zongo. Comme ces

surfaces sont généralement plus petites dans le cas du Charquini que dans le cas du Zongo, leur diminution relative est plus grande que celle du Zongo. Et donc les quotients devraient plutôt tendre à augmenter. Cela introduirait une saisonnalité dans l'autre sens. Néanmoins, on observe un quotient des surfaces au dessous de l'isotherme zéro degré qui ne semble pas avoir de tendance saisonnière (Figure 36)

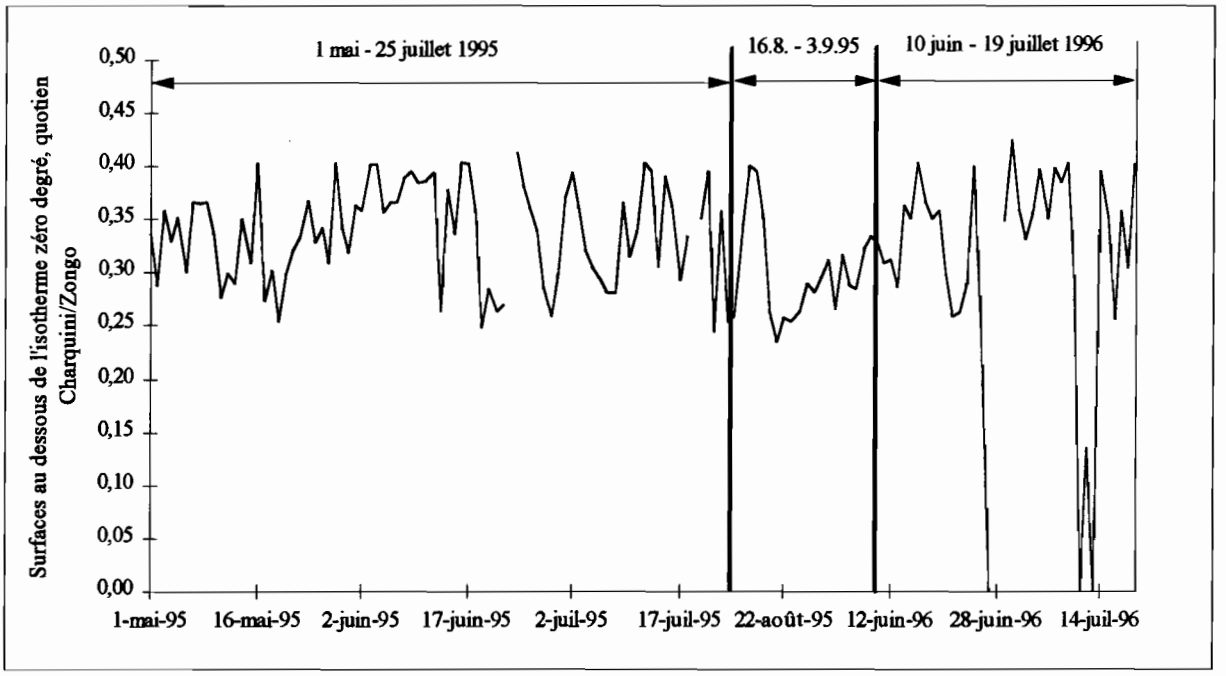


Figure 36 Quotient des surfaces d'ablation au dessous de l'isotherme zéro degré entre le glacier Charquini et le glacier Zongo

Un modèle à développer pourrait se baser sur l'équation (9) (cf. 5.1.4). Le facteur de multiplication correspondrait au quotient de cette équation pour le glacier Charquini et pour le glacier Zongo. Le calcul de ce quotient fait nécessaire de connaître la partie de l'énergie totale qui est due au du rayonnement solaire direct à chaque pas de temps de l'intégration (R_i). On pourrait écrire le modèle pour de pas de temps comme cela :

$$Q_{Char} = \sum_{i=1}^{2} \left[\frac{F_i \cdot (R_i \int_{S_{f,i}^{Char}} I_\alpha \cdot dS + (1 - R_i) \cdot S_f^{Char}(i))}{F_i \cdot (R_i \int_{S_{f,i}^{Zongo}} I_\alpha \cdot dS + (1 - R_i) \cdot S_f^{Zongo}(i))} \right] \cdot Q_{Zongo} \qquad (12)$$

dont :

Q_{char}	=	Débits simulé du glacier Charquini
Q_{Zongo}	=	Débits mesuré ou simulé avec un modèle déterministe du glacier Zongo
i	=	Indicateur du matin (=1) et du l'après-midi (=2)
F_i	=	Facteur de la conversion de l'énergie disponible en eau de fonte, indépendant du glacier
R_i	=	Part de l'énergie totale reçu qui est due au rayonnement solaire direct, indépendant du glaciers

$S_f^{Char}(i)$ = Surface moyenne au dessous de l'isotherme zéro degré du glacier Charquini au cours de la demie journée

$S_f^{Zongo}(i)$ = Surface moyenne au dessous de l'isotherme zéro degré du glacier Zongo au cours de la demie journée

On voit que contrairement à l'équation (9) le terme de l'énergie totale a disparu dans l'équation de ce modèle. Comme l'énergie totale disponible par unité de surface ne dépend pas de la topographie de la maille (il s'agit de l'énergie totale hypothétique disponible pour une maille toujours exposée au soleil, $E_{tot} = E_{prop} + R_{dir}^{max}$), ce sont les termes de surfaces des glaciers au dessous de l'isotherme zéro qui tiennent en compte la différence de cet énergie totale entre les glaciers. Ces surfaces ainsi que les intégrales des cosinus des angles d'incidence du soleil peuvent être déterminés avec les méthodes développées dans ce chapitre à un pas de temps de l'intégration au cours de la journée quelconque.

Pour vérifier le fonctionnement de cette proposition pour un modèle il va donc falloir trouver une méthode pour déterminer la part du rayonnement solaire direct de l'énergie totale à chaque pas de temps de l'intégration sur la journée (R_i)

6. Conclusions

L'objectif principal de ce travail était de trouver une méthode pour reconstituer les débits naturels de la rivière Zongo qui ne soient pas influencés par le système hydraulique dédié à la production d'électricité et qui ne contiennent pas les apport de la fonte des glaciers. La démarche pour atteindre ce but a suivi deux voies. La première était de trouver une méthode de reconstitution des débits naturels de l'ensemble des écoulements des versant et de la fonte des glaciers, la deuxième de développer l'ébauche d'une modélisation pour la fonte des glaciers.

On a étudié le fonctionnement du système hydraulique et réalisé une analyse qualitative et quantitative des composantes qui influencent les débits observés à l'exutoire du bassin versant. Les résultats de cette analyse ont montré que ce sont surtout les changements de stock d'eau dans les retenues et les apports extérieurs du bassin qu'il faut prendre en compte pour la reconstitution des débits naturels ; l'influence du remplissage des retenues en saison des pluies est probablement négligeable. En quantifiant l'influence du changement de stock pour différentes retenues, on a pu distinguer les retenues dont les volumes utiles sont suffisamment grands pour qu'on doive les prendre en compte dans la reconstitution des débits. A partir de cette analyse préliminaire une méthode pour la reconstitution des débits naturels à l'exutoire de Sainani en saison sèche a été développée, ainsi qu'une autre méthode pour la reconstitution en saison des pluies. Ces méthodes utilisent les mesures journalières de niveau dans les retenues et les débits journaliers à certaines usines hydroélectriques pour estimer les débits qui proviennent du déstockage de retenues et des apports extérieurs.

Une estimation des rendements des usines Zongo, Tiquimani, Santa Rosa II et Sainani a permis de reconstituer leurs débits turbinés au pas de temps horaire pendant la saison sèche 1997 et d'étudier l'influence de la gestion des petits bassins de régulation sur le cours d'eau principal qui n'avaient pas été pris en compte dans l'étude préliminaire. Pour analyser cette influence, il a fallu développer une méthode d'estimation de la courbe de remplissage de l'ensemble de ces bassins intermédiaires. La méthode développée utilise les débits des trois usines Zongo, Tiquimani et Santa Rosa II, ainsi que lés débits totaux à Sainani pour reconstituer la courbe de remplissage. Faute de disposer des débits totaux à Sainani, on a du les estimer à partir des débits turbinés à l'usine.

Les débits naturels provenant de la fonte des glaciers et de l'écoulement des versants ont été reconstitués sur 5 mois de mai à septembre 1997 avec la méthode développée pour la saison sèche. On a finalement utilisé une comparaison entre l'évolution de l'hydrogramme journalier reconstitué et l'évolution estimée de la fonte d'une petite partie des surfaces glaciaires du bassin versant pour discuter la qualité de l'hydrogramme des débits naturels obtenus.

La qualité des débits naturels reconstitués est bonne. La méthode développée pour calculer les débits naturels en saison sèche tient compte des influences principales du système hydraulique de la production d'électricité sur les débits mesurés à Sainani. Elle pourrait être améliorée en prenant en compte la variation du stock dans les bassins intermédiaires. Ceci pourrait se faire en utilisant la méthode développée pour estimer la courbe de remplissage de l'ensemble de ces bassins ou en estimant les changement de stock dans les deux bassins intermédiaires les plus importants à l'aide des mesures de niveau. La variation du stock de ces bassins et surtout

importante au début et à la fin des crues. Mais ce n'est que lors du calage d'un modèle hydrologique qu'on saura s'il faut améliorer la qualité des débits reconstitués par un raffinement de la méthode de la reconstitution des débits naturels.

En absence de données des débits totaux à Sainani, il n'était pas possible de reconstituer les débits naturels en saison des pluies en utilisant la méthode adaptée à cette saison. Par conséquent, la qualité de la méthode n'a pas pu être testée. Ce travail reste à faire quand on disposera des séries de données des débits totaux en saison des pluies, probablement en 1998.

La modélisation de la fonte de l'ensemble des surface glaciaires dans la vallée est primordiale. Ce modèle permettra de reconstituer les débits naturels à Sainani sans apports des glaciers et de caler un modèle hydrologique. L'ébauche d'un tel modèle a été développée au cours de ce travail. Elle se base sur une estimation de la fonte de l'ensemble des surfaces glaciaires à partir des débits de l'émissaire du glacier Zongo, en prenant en compte les différences topographiques entre les glaciers. Une considération théorique de l'influence de la topographie sur la production d'eau de fonte à la surface des glaciers a permis de conclure que cette influence n'est pas linéaire et qu'une approche avec des facteurs correctifs ne fonctionne très probablement pas. En faisant pour simplifier quelques hypothèses sur la dépendance des termes du bilan d'énergie vis à vis de la topographie, on peut réduire cette influence à un facteur qui mesure l'énergie du rayonnement solaire direct reçue sur la surface au dessous de l'isotherme zéro degré au cours de la journée. Cette mesure est la double intégrale sur la surface au dessous de l'isotherme zéro degré, dont la position varie au cours de la journée, et sur les heures de la journée, du cosinus de l'angle d'incidence du soleil.

A l'aide de la superposition d'une image satellitale et d'un modèle numérique de terrain (MNT) du bassin versant, on a obtenus les MNT des deux glaciers Zongo et Charquini et de l'ensemble des surfaces glaciaires. C'est à partir de ces MNT et de la détermination de la position du soleil au cours de la journée et de l'année qu'on a pu calculer aussi bien l'énergie du rayonnement solaire direct reçu sur l'entier de la surface des glaciers que celle reçu sur la surface au dessous de l'isotherme zéro degré au pas de temps d'une demi-heure. On a calculé les intégrales sur la journée de ces énergies pour les glaciers Charquini et Zongo. Ces intégrales montrent une forte saisonnalité, qui est différente pour les deux glaciers. Sur trois périodes d'observation en saison sèche 1995 et 1996, on a finalement modélisé les débits journaliers du glacier Charquini à partir des débits du glacier Zongo à l'aide de deux modèles simples qui ne tiennent pas compte de la saisonnalité.

La comparaison entre la différence des débits simulés et observés et les intégrales de l'énergie solaire directe reçue conduit à la conclusion que la saisonnalité est un facteur qui n'est pas à négliger dans la simulation de la fonte de l'ensemble des surfaces glaciaires à partir des débits du glaciers Zongo. On a pu montrer que ce sont les différences entre les évolutions de l'énergie solaire directe reçue par les glaciers comparés qui déterminent cette saisonnalité. Mais des considérations théoriques ont également montré que l'influence de la différence de ces énergies reçues par les glaciers rapportées à la différence de leurs débits dépend du rapport entre l'énergie solaire direct maximale (pour un angle d'incidence nul) et l'énergie totale reçue par les glaciers. Selon les hypothèses admises pour l'ébauche du modèle à développer, ces rapport sont indépendants de la topographie et par conséquence égaux par unité de surface des glaciers.

Il paraît finalement possible de développer un modèle qui se base sur l'énergie du rayonnement solaire direct reçu par la surface au dessous de l'isotherme zéro degré du glacier de référence et de la surface glaciaire dont on simule la fonte. Mais il est nécessaire d'inclure dans ce modèle l'évolution du rapport entre l'énergie solaire directe maximale (pour un angle d'incidence nul) et l'énergie totale. L'évolution de ce rapport peut probablement être calculé à partir des mesures climatologiques sur le glacier Zongo.

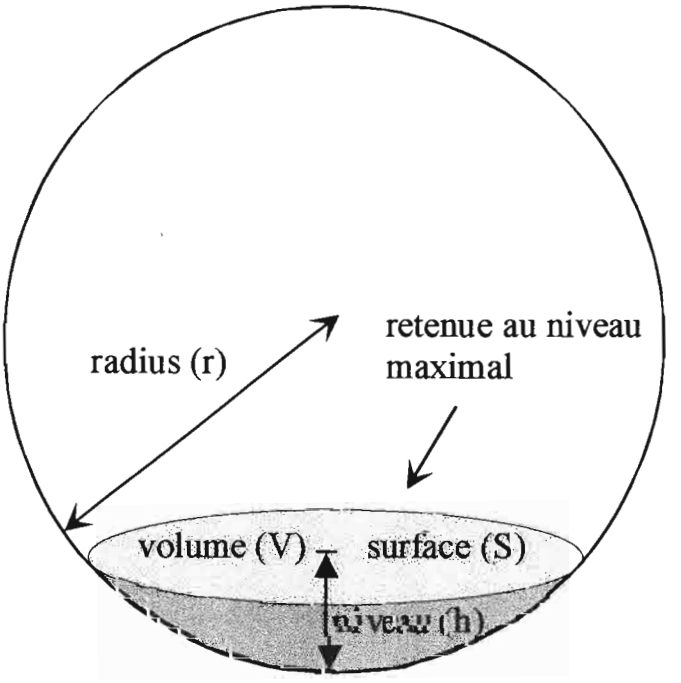
7. Annexes

Annexe A Estimation des relations entre le niveau d'eau et le volume pour les retenues Mamankota, Livinosa, Alto Viscanchani et San Pedro, sous l'hypothèse que leurs formes sont assimilées à des calottes sphériques

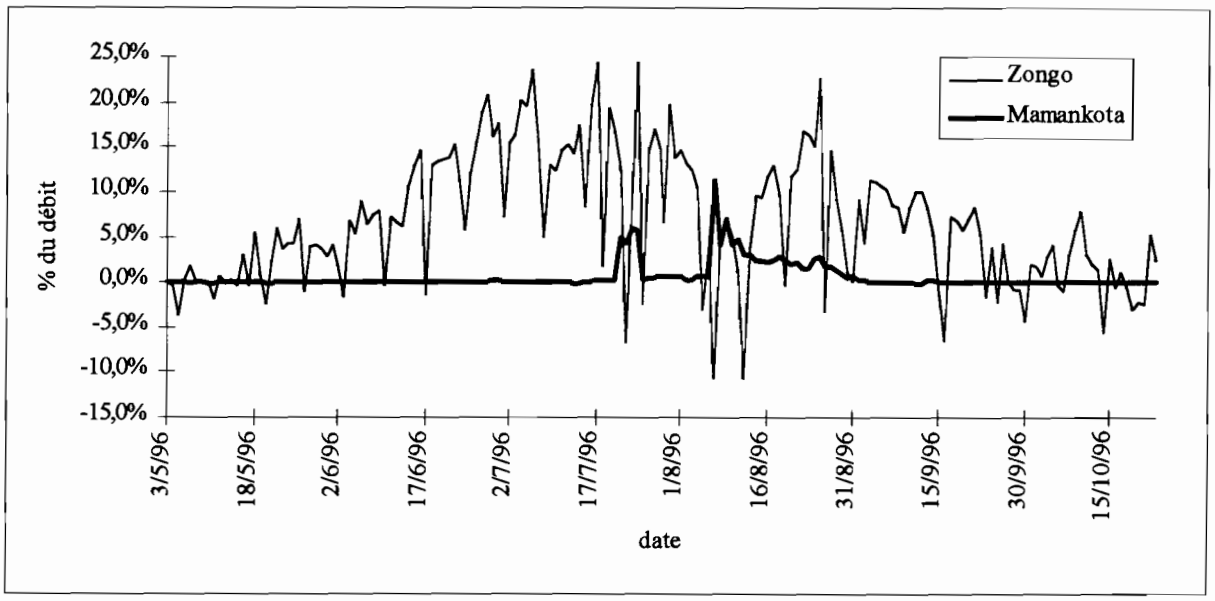
	Valeurs mésurées			Valeurs calculées		
	Volume maximal (V_{max})	Surface max. (planimétrie) (S_{max})	Niveau maximal (h_{max})	Rayon 1*) (r)	Surface calculé (S_{max})	Volume calculée (V_{max})
	1000 m^3	m^2	m	m	m^2	1000 m^3
Hatilata	2483,33					
Taipicota	3000,00					
Guaraguarani	432,73					
Alto Viscanchani	?	**40000**	**8,83**	725	40000	19462
Zongo	3256,59					
Mamankota	**236,00**	67010	**7,19**	1456	65593	236,00
Livinosa	**523,00**	70352	**7,72**	2796	135430	523,00
Sankayuni	433,37					
San Pedro	?	**15000**	**2,7**	886	15000	8869

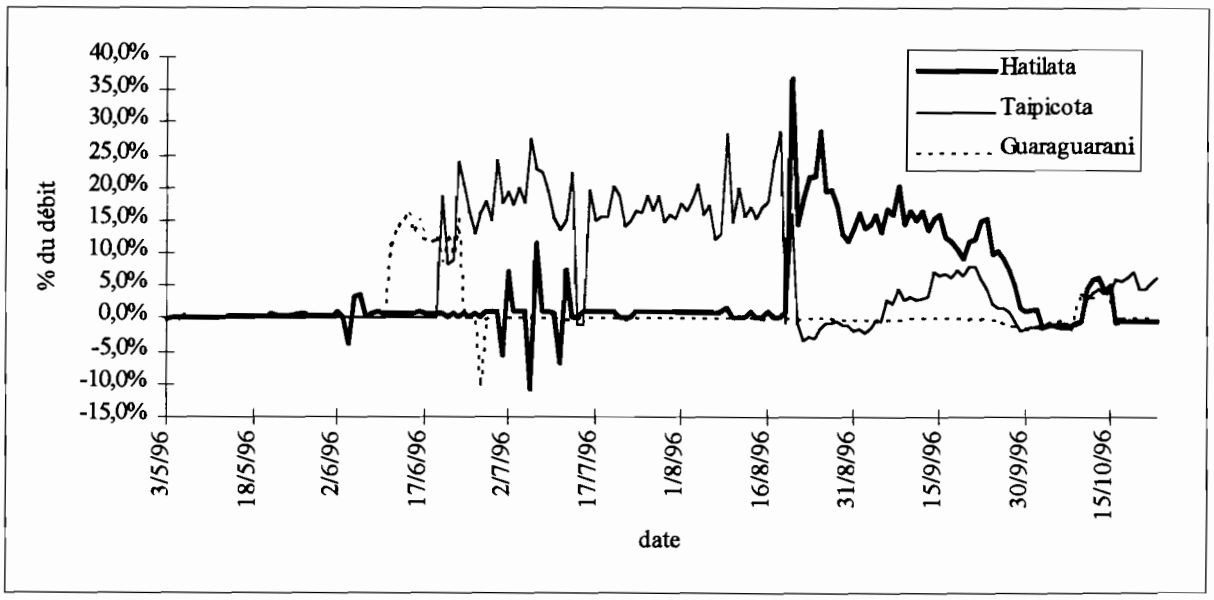
1*) $r = \frac{(V_{max} + h_{max}/3)}{\pi \cdot h_{max}^{2}}$ ou $r = \frac{S_{max}}{2 \cdot \pi \cdot h_{max}} + \frac{h_{max}}{2}$

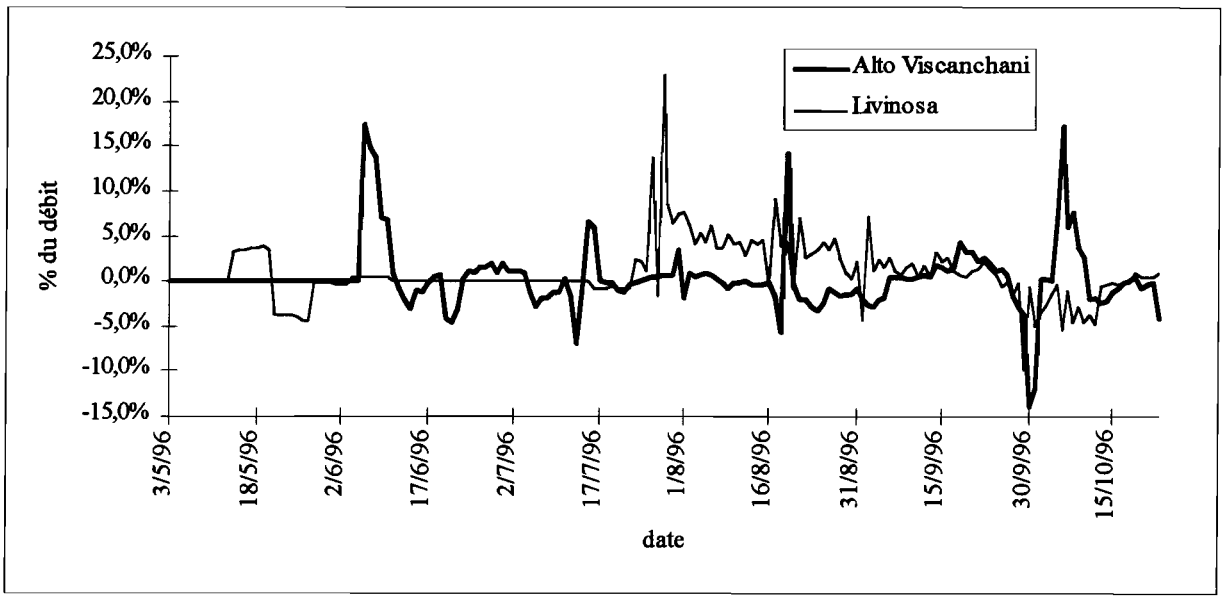
Relation niveau/volum utilisé : $V = \pi \cdot h^2 \cdot (r - \frac{h}{3})$

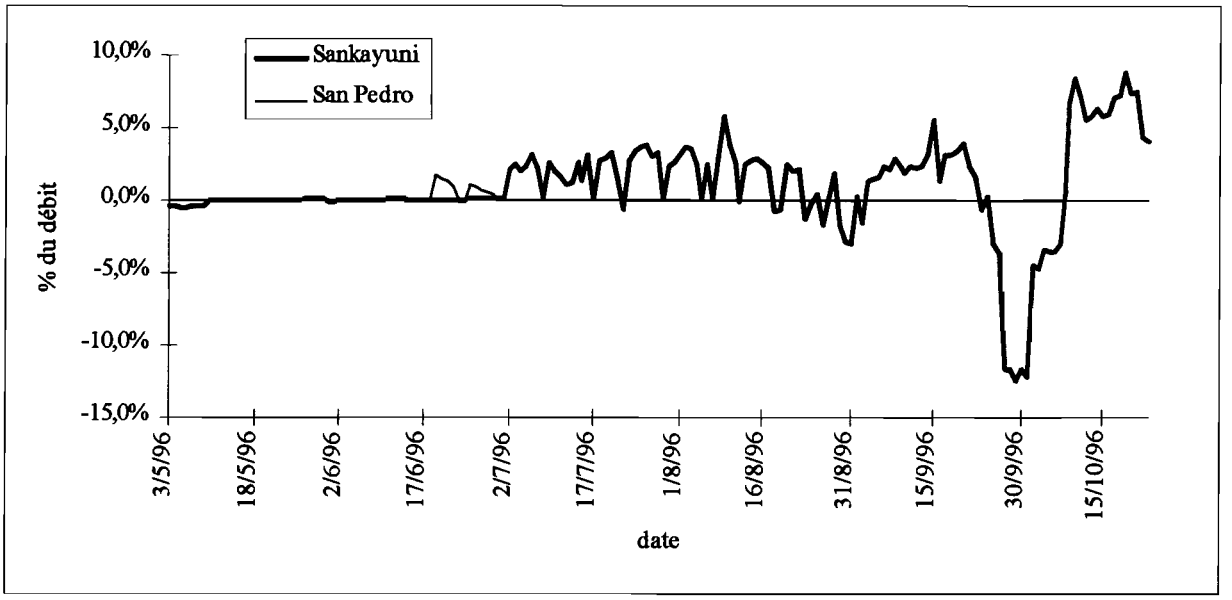


Annexe B. Déstockage des lacs de régulation en pourcentage du débit turbiné, en saison sèche 1996

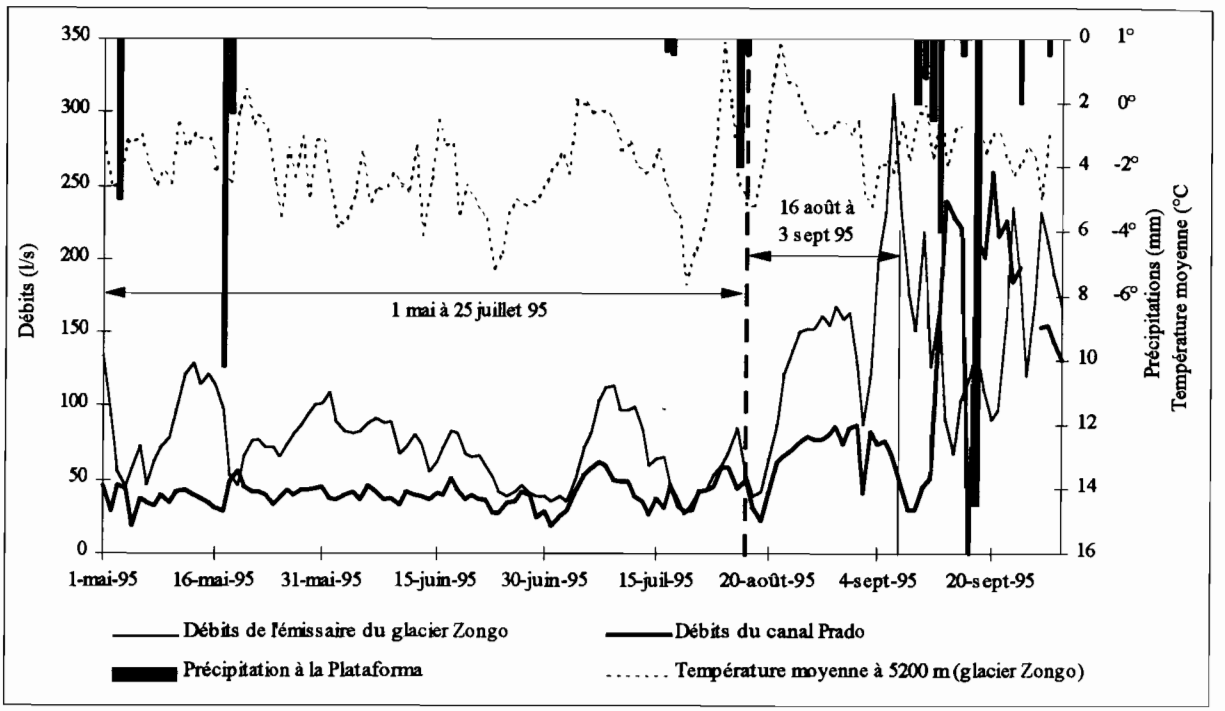


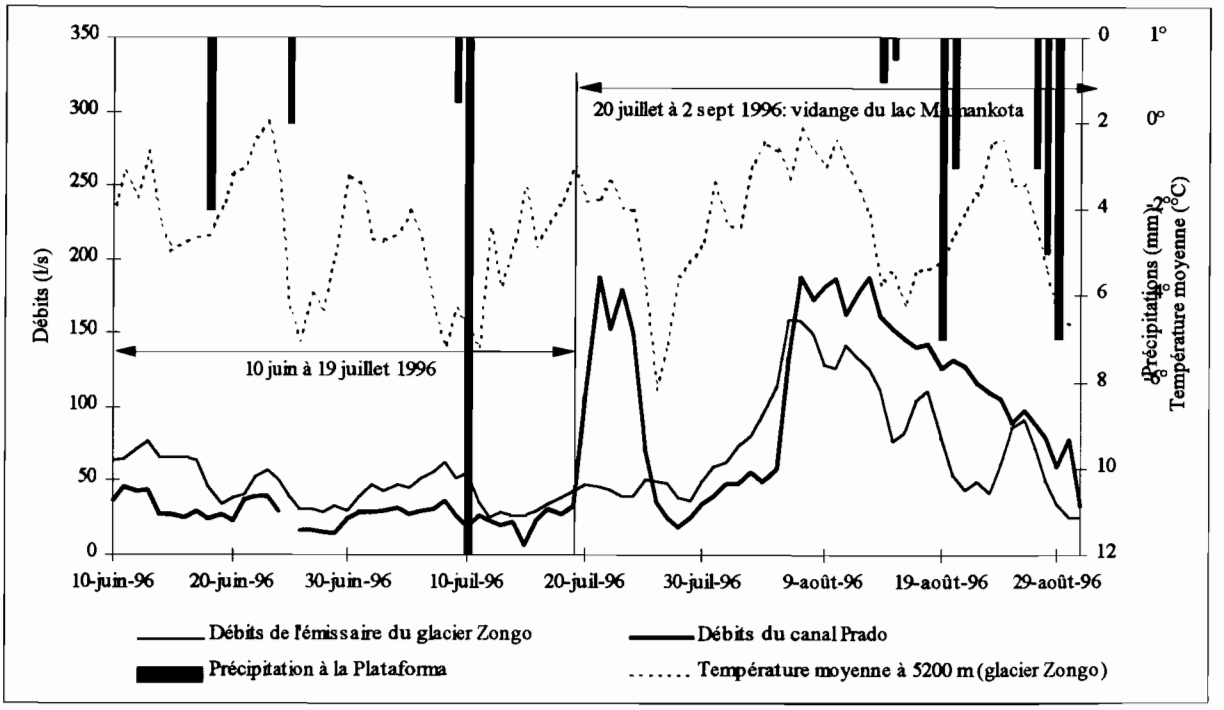



Alto Viscanchani
Livinosa
% du débit
25,0%
20,0%
15,0%
10,0%
5,0%
0,0%
-5,0%
-10,0%
-15,0%
3/5/96
18/5/96
2/6/96
17/6/96
2/7/96
17/7/96
1/8/96
16/8/96
31/8/96
15/9/96
30/9/96
15/10/96
date

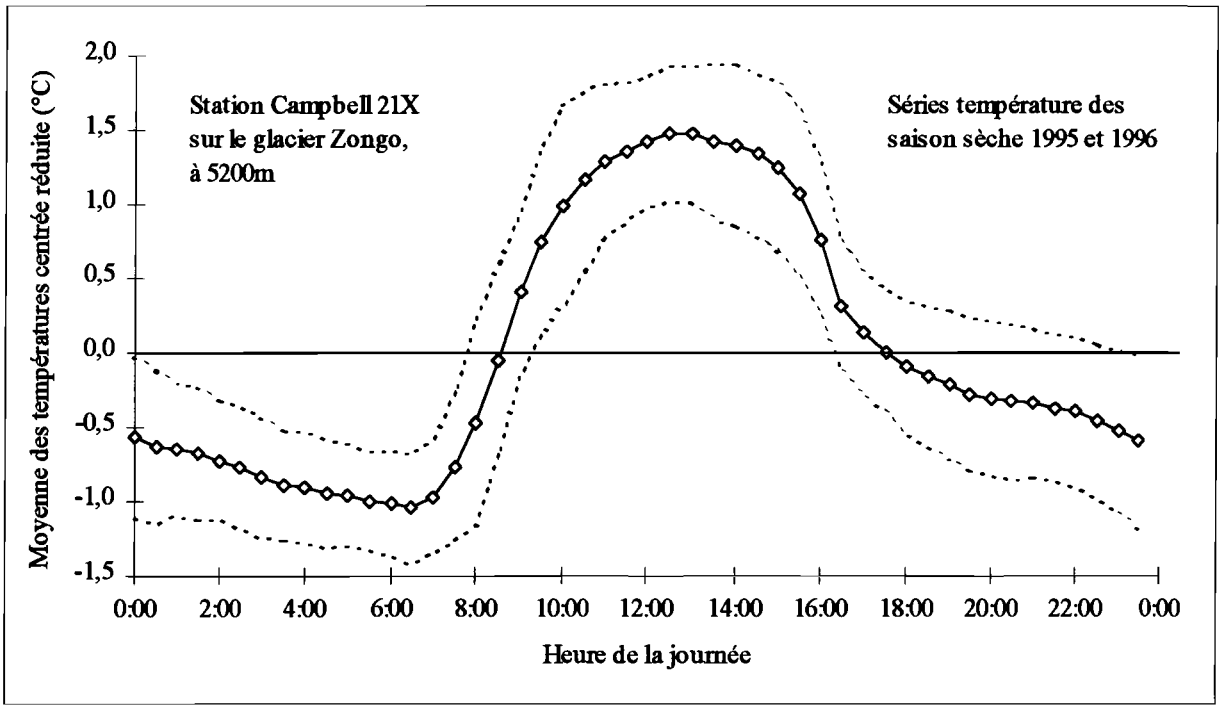

Sankayuni
San Pedro
% du débit
10,0%
5,0%
0,0%
-5,0%
-10,0%
-15,0%
3/5/96
18/5/96
2/6/96
17/6/96
2/7/96
17/7/96
1/8/96
16/8/96
31/8/96
15/9/96
30/9/96
15/10/96
date

Annexe C Détermination des périodes d'observation des débits du glacier Zongo et du canal Prado





Annexe D *Evolution moyennes au cours de la journée des températures centrées réduites*



8. Références

ENDE, (1992). Hidrologìa del valle del Zongo, *Empresa National de Electricidad SA*

EROUT A., (1996). Rapport de stage, version provisoire

ALEGRE W.T., (1996). Influencia de los glaciares en el comportamiento hidrolológico de cuencas de alta montaña, estudio de casos en Perù y Bolivia, *Thèse d'ingénieur à l'université nationale d'Ancash, faculté d'ingénierie civile, Pérou*

BOUVIER, C. ET HINGRAY, B. (1995). Une méthode hydro-géographique pour la caractérisation du risque pluvial en milieu urbain. *Dans:* Hydrologie urbaine et modélisation spatialisée. *Mémoire de DEA de B. Hingray, Université de Montpellier 2*

RIGAUDIERE, P., RIBSTEIN, P., FRANCOU, B., POUYAUD, B. ET SARAVIA, R. (1995). Un modèle hydrologique pour le glacier Zongo, *Informe No. 44, ORSTOM-Bolivie*

RIGAUDIERE, P., RIBSTEIN, P., FRANCOU, B., POUYAUD, B. ET SARAVIA, R. (1995). Mesures météorologiques, hydrologiques et glaciologiques sur le glacier Zongo, année hydrologiques 1993-94, *Informe No. 43, ORSTOM-Bolivie*

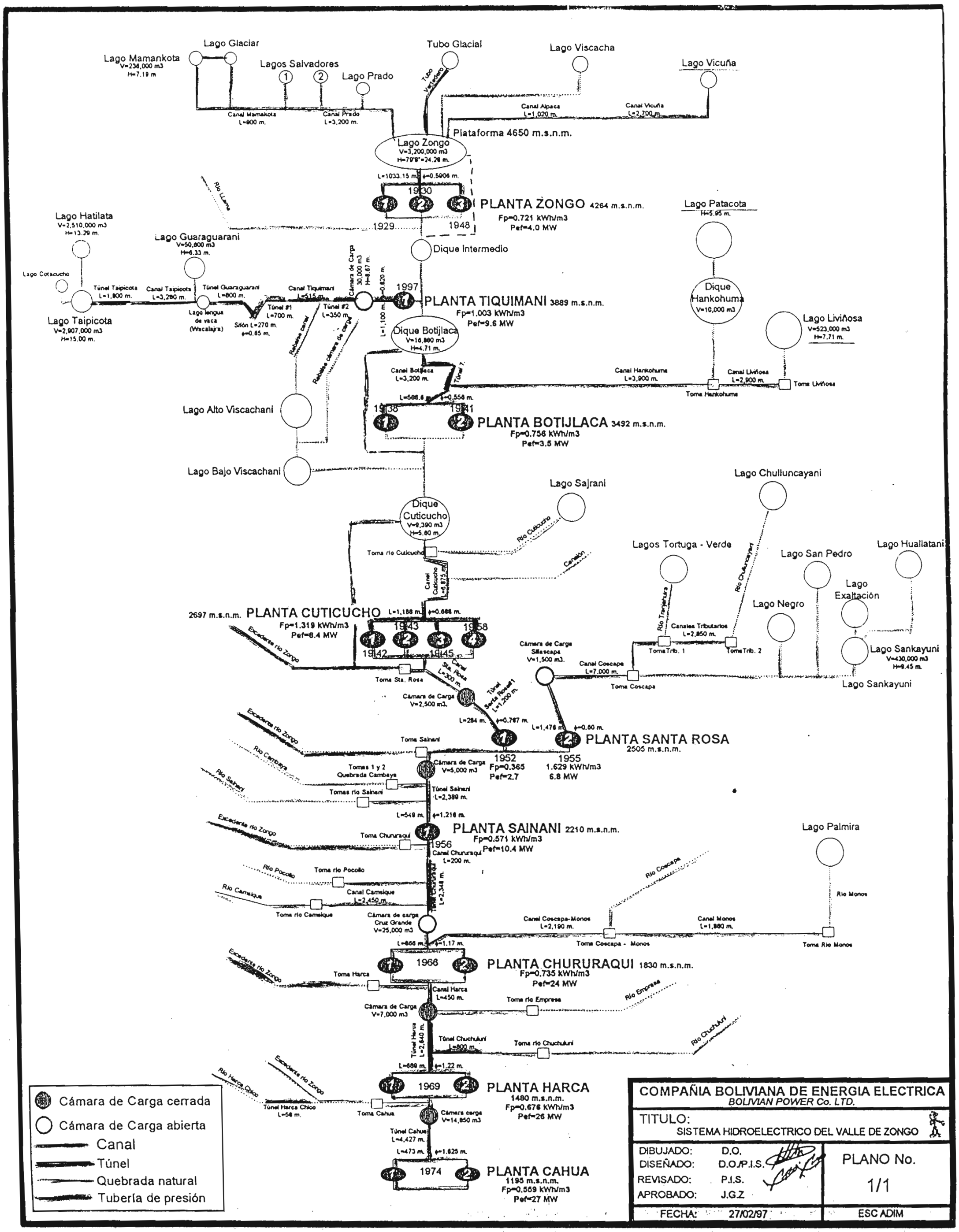
WAGNON, P., RIBSTEIN, P., FRANCOU, B., POUYAUD, B. ET VALDIVIESO, H. (1995). Mesures météorologiques, hydrologiques et glaciologiques sur le glacier Zongo, année hydrologiques 1994-95, *Informe No. 49, ORSTOM-Bolivie*

BERTON, P., WAGNON, P., FRANCOU, B., POUYAUD, B. ET VALDIVIESO, H. (1997). Mesures météorologiques, hydrologiques et glaciologiques sur le glacier Zongo, année hydrologiques 1995-96, *Informe No. 55, ORSTOM-Bolivie*

FRANCOU, B. ET RIBSTEIN, P. (1995). Glaciers et évolution climatiques dans les Andes boliviennes, glacier de Zongo et glacier de Chacaltaya, Cordillère Royale, 16° S, *Bull. Inst. fr. études andines 24(1), 23-36*

LIBOUTRY, L. (1964). Traité de glaciologie, *p.364, Masson et Cie, Paris 1964*

ROBINSON, N. (1966). Solar Radiation, *Elsevier Publishing Company, New York 1966*


Lago Glaciar
Lago Mamankota
V=236,000 m3
H=7.19 m
Lagos Salvadores
Lago Prado
Tubo Glacial
Lago Viscacha
Lago Vicuña
Canal Mamakota
L=900 m.
Canal Prado
L=3,200 m.
Canal Alpaca
L=1,020 m.
Canal Vicuña
L=2,700 m.
Plataforma 4650 m.s.n.m.
Lago Zongo
V=3,200,000 m3
H=79'8"=24.26 m.
L=1033.15 m. ϕ=0.5906 m.
1930
PLANTA ZONGO 4264 m.s.n.m.
Fp=0.721 kWh/m3
Pef=4.0 MW
1929
1948
Río Llama
Lago Patacota
H=5.95 m.
Lago Hatilata
V=2,510,000 m3
H=13.29 m.
Lago Guaraguarani
V=50,600 m3
H=6.33 m.
Dique Intermedio
Lago Cotacucho
Túnel Taipicota
L=1,800 m.
Canal Taipicota
L=3,280 m.
Túnel Guaraguarani
L=800 m.
Canal Tiquimani
L=515 m.
Cámara de Carga
30,000 m3
H=8.67 m.
L=0.820 m.
1997
PLANTA TIQUIMANI 3889 m.s.n.m.
Fp=1.003 kWh/m3
Pef=9.6 MW
Dique Hankohuma
V=10,000 m3
Lago Taipicota
V=2,907,000 m3
H=15.00 m.
Lago lengua de vaca (Wacalajra)
Sifón L=270 m.
ϕ=0.65 m.
Túnel #1
L=700 m.
Túnel #2
L=350 m.
Rebalse canal
Rebalse cámara de carga
L=1,100 m.
Dique Botijlaca
V=16,880 m3
H=4.71 m.
Lago Liviñosa
V=523,000 m3
H=7.71 m.
Canal Botijlaca
L=3,200 m.
Túnel 1
Canal Hankohuma
L=3,900 m.
Canal Liviñosa
L=2,900 m.
Toma Liviñosa
Toma Hankohuma
L=566.6 m. ϕ=0.554 m.
1938
1941
PLANTA BOTIJLACA 3492 m.s.n.m.
Fp=0.756 kWh/m3
Pef=3.5 MW
Lago Alto Viscachani
Lago Bajo Viscachani
Lago Chulluncayani
Lago Sajrani
Dique Cuticucho
V=9,390 m3
H=5.60 m.
Río Cuticucho
Toma río Cuticucho
Canal Cuticucho
L=6,875 m.
Canalón
Lagos Tortuga - Verde
Río Chulluncayani
Lago San Pedro
Lago Huallatani
Lago Exaltación
Lago Negro
Río Tarijeñuta
Canales Tributarios
L=2,850 m.
Toma Trib. 1
Toma Trib. 2
Lago Sankayuni
V=430,000 m3
H=9.45 m.
2697 m.s.n.m.
PLANTA CUTICUCHO
Fp=1.319 kWh/m3
Pef=8.4 MW
L=1,188 m. ϕ=0.686 m.
1943
1958
1942
1945
Excedente río Zongo
Toma Sta. Rosa
Canal Sta. Rosa
L=300 m.
Cámara de Carga
Silascapa
V=1,500 m3.
Canal Coscapa
L=7,000 m.
Toma Coscapa
Lago Sankayuni
Cámara de Carga
V=2,500 m3.
Túnel Santa Rosa #1
L=1,200 m.
L=284 m. ϕ=0.787 m.
L=1,476 m. ϕ=0.60 m.
Toma Sainani
PLANTA SANTA ROSA
2505 m.s.n.m.
Río Cambaya
Tomas 1 y 2 Quebrada Cambaya
Cámara de Carga
V=5,000 m3
1952
Fp=0.365
Pef=2.7
1955
1.629 kWh/m3
6.8 MW
Río Sainani
Tomas río Sainani
Túnel Sainani
L=2,389 m.
L=549 m. ϕ=1.216 m.
PLANTA SAINANI 2210 m.s.n.m.
Fp=0.571 kWh/m3
Pef=10.4 MW
Toma Chururaqui
1956
Canal Chururaqui
L=200 m.
Lago Palmira
Río Pocollo
Toma río Pocollo
Río Coscapa
Río Camsique
Canal Camsique
L=2,450 m.
Toma río Camsique
Túnel Chururaqui
L=2,348 m.
Río Monos
Cámara de carga
Cruz Grande
V=25,000 m3
Canal Coscapa-Monos
L=2,190 m.
Canal Monos
L=1,880 m.
Toma Coscapa - Monos
Toma Río Monos
L=666 m. ϕ=1.17 m.
1966
PLANTA CHURURAQUI 1830 m.s.n.m.
Fp=0.735 kWh/m3
Pef=24 MW
Toma Harca
Canal Harca
L=450 m.
Río Empresa
Toma río Empresa
Cámara de Carga
V=7,000 m3
Túnel Harca
L=2,640 m.
Túnel Chuchuluni
L=800 m.
Toma río Chuchuluni
Río Chuchuluni
L=689 m. ϕ=1.22 m.
Río Harca Chico
1969
PLANTA HARCA
1480 m.s.n.m.
Fp=0.676 kWh/m3
Pef=26 MW
Túnel Harca Chico
L=58 m.
Toma Cahua
Cámara carga
V=14,850 m3
Túnel Cahua
L=4,427 m.
L=473 m. ϕ=1.625 m.
1974
PLANTA CAHUA
1195 m.s.n.m.
Fp=0.569 kWh/m3
Pef=27 MW
Cámara de Carga cerrada
Cámara de Carga abierta
Canal
Túnel
Quebrada natural
Tubería de presión
COMPAÑIA BOLIVIANA DE ENERGIA ELECTRICA
BOLIVIAN POWER Co. LTD.
TITULO:
SISTEMA HIDROELECTRICO DEL VALLE DE ZONGO
DIBUJADO: D.O.
DISEÑADO: D.O./P.I.S.
REVISADO: P.I.S.
APROBADO: J.G.Z
PLANO No.
1/1
FECHA: 27/02/97
ESC ADIM