

Water Transfer modelling in a High Valley Equipped with Hydropower Plants: Rio Zongo Valley (Bolivia)

Yvan CABALLERO and Pierre CHEVALLIER

Research Unit Great Ice (IRD R050)

Maison des Sciences de l'Eau / IRD, BP 64501, 34394 Montpellier Cedex 5 – France

Abstract: Pour modéliser les écoulements dans une vallée de montagne aménagée pour la production d'hydroélectricité, une double démarche est proposée. Il s'agit, dans un premier temps, de mettre en œuvre un schéma de surface développé par Météo-France afin de représenter la redistribution des précipitations neigeuses et pluvieuses. Dans un deuxième temps un modèle de transfert décrivant la superposition d'un réseau hydrologique naturel avec un réseau hydraulique complexe est développé en utilisant les techniques de la dynamique des systèmes. Le résultat obtenu est très encourageant et permet d'envisager une utilisation opérationnelle d'une telle méthode par les opérateurs de l'eau en haute montagne.

Keywords: mountain hydrology, modelling, hydropower, system dynamics, Andes

1. Introduction

L'Institut Français de Recherche pour le Développement (IRD) conduit depuis 1991 des recherches dans la Cordillère des Andes (Bolivie, Chili, Equateur et Pérou) afin de mieux comprendre l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau de très haute montagne et d'en évaluer les conséquences sur leurs usages. C'est dans ce cadre qu'une étude fine a été entreprise en collaboration avec la *Bolivian Power Company* (Cobee) afin de modéliser les transferts d'eau dans une haute vallée équipée de plusieurs centrales hydroélectriques en cascade, ainsi que d'un réseau complexe de retenues et de canaux de captage [1].

La vallée du Rio Zongo se situe à une trentaine de kilomètres au nord de la capitale de la Bolivie, La Paz. Elle descend depuis les sommets du Huayna Potosi (6088 m), du Condoriri (5648 m) et du Charquini (5392 m) et rejoint les cours d'eau de la plaine amazonienne. Dix usines hydroélectriques sont installées en cascade totalisant une puissance totale de 174,6 MW (Fig. 1). La présente étude s'intéresse au dispositif constitué par les trois usines supérieures au dessus de l'altitude de 3500 m.

Les ressources en eau de cette vallée proviennent de trois origines dont les processus et

la dynamique diffèrent : les glaciers qui couvrent les principaux sommets et sont tous situés à une altitude supérieure à 4900m, les précipitations neigeuses et les précipitations pluvieuses. La variabilité climatique et tout particulièrement le réchauffement global observé ces dernières années ont une influence considérable sur la disponibilité de cette ressource [2].

Il était intéressant de modéliser les écoulements superficiels de cette vallée à la fois pour des raisons méthodologiques (configuration complexe de processus de production et combinaison de transferts naturels et artificiels), mais aussi à des fins opérationnelles (construction d'un outil permettant à l'opérateur hydroélectrique de mieux évaluer les conséquences d'une évolution future soit du climat, soit des aménagements).[3]

2. Tools and method

L'application de modélisation a été faite sur la partie supérieure de la vallée limitée à la section de Llaullini (Fig.1), 2 km à l'aval de l'usine hydroélectrique de Botijlaca. Le bassin versant correspondant couvre une surface de 95 km² et contient trois usines, plusieurs retenues contrôlables et tout un réseau de canaux et de prises d'eau (Fig.2).

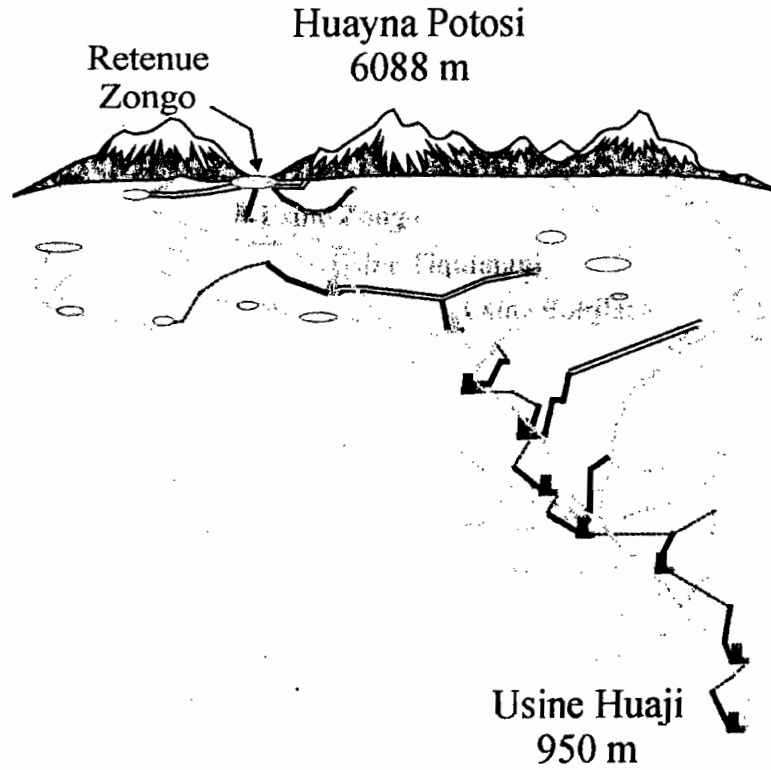


Fig. 1. Organisation des aménagements hydrauliques de la Cobee pour la production d'électricité dans la vallée du Zongo.

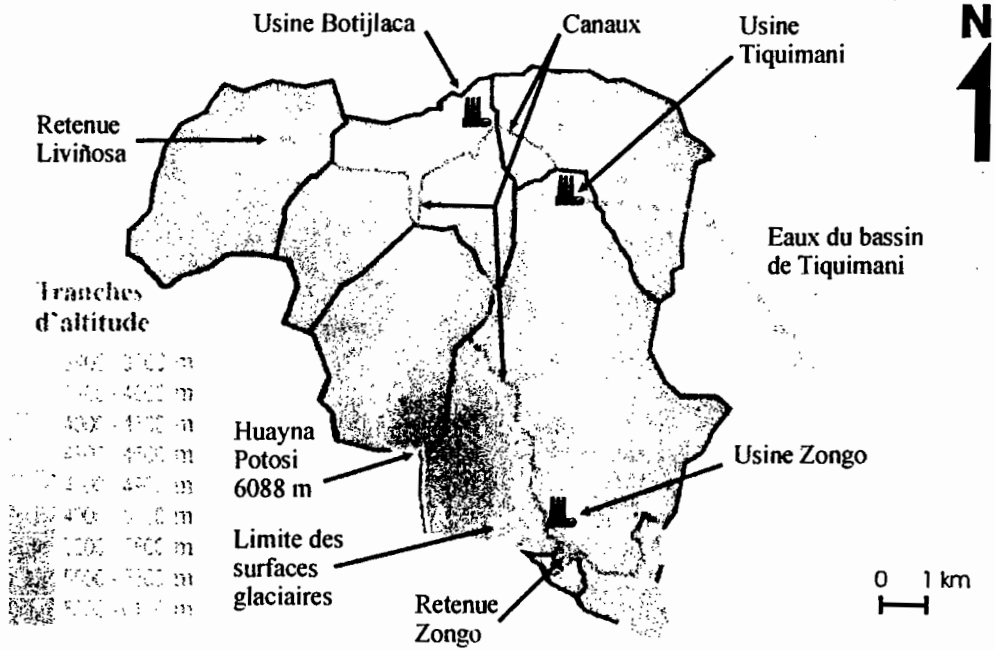


Fig. 2. Bassin versant de Llaullini

La modélisation pluie / débit a été faite en deux étapes :

- Une première étape d'évaluation de la redistribution sur les versants non englacés à l'aide du schéma de surface ISBA développé par Météo-France [4, 5]. La variabilité climatique en très haute montagne nécessite en effet une prise en compte fine des paramètres climatiques (températures, rayonnement).
- Une deuxième étape pour assurer le transfert des écoulements dans le réseau hydrographique naturel et artificiel en tenant compte des opérations hydrauliques. Un modèle de flux utilisant les méthodes de la dynamique des systèmes [6] et plus particulièrement le langage Vensim ® [7] a été spécialement développé.

Les écoulements glaciaires n'ont pas été modélisés dans le cadre de cette étude et on a utilisé les observations directes de l'écoulement, mesurées sur deux des principaux ensembles glaciaires. Pour

les glaciers non observés, on s'est contenté d'une extrapolation proportionnellement aux surfaces couvertes.

La mise en œuvre de ces modélisations, et tout particulièrement celle du schéma de surface ISBA, a nécessité l'établissement d'une cartographie précise au sein d'un système d'information géographique. C'est l'outil Arc View ® qui a été retenu pour croiser les cartes de relief (découpé en tranches d'altitudes de 300 m) et des types de surfaces (regroupées en quatre catégories : glaciers, rochers, formations de pente et formations de fond de vallée) (Fig.3).

Le modèle ISBA a été appliqué pour chacune des surfaces élémentaires obtenues par ce croisement. Ces surfaces sont ensuite combinées entre elles pour constituer des entrées dans le système de transfert (Fig. 4).

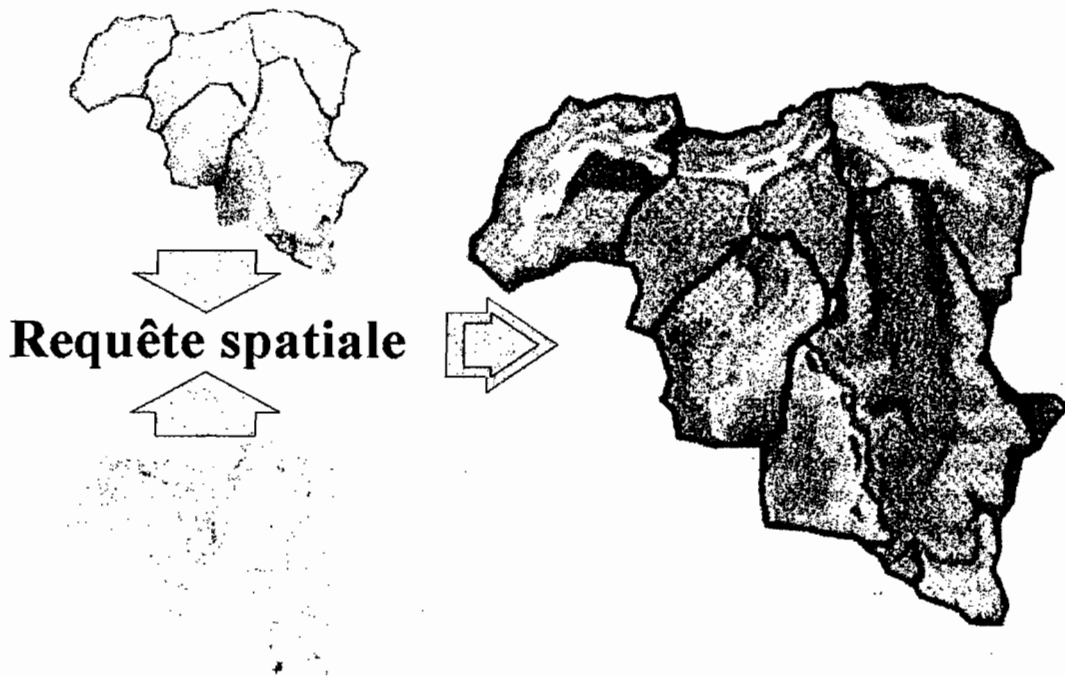


Fig. 3: Croisement de la carte des tranches d'altitude avec la carte des types de surface par requête spatiale sous Arcview®. Le résultat du croisement d'une surface avec une tranche d'altitude dans un sous-bassin, définit une unité de surface. Celles-ci sont représentées par niveaux de gris différents dans chaque sous-bassin. Les surfaces glaciaires n'ont pas été prises en compte

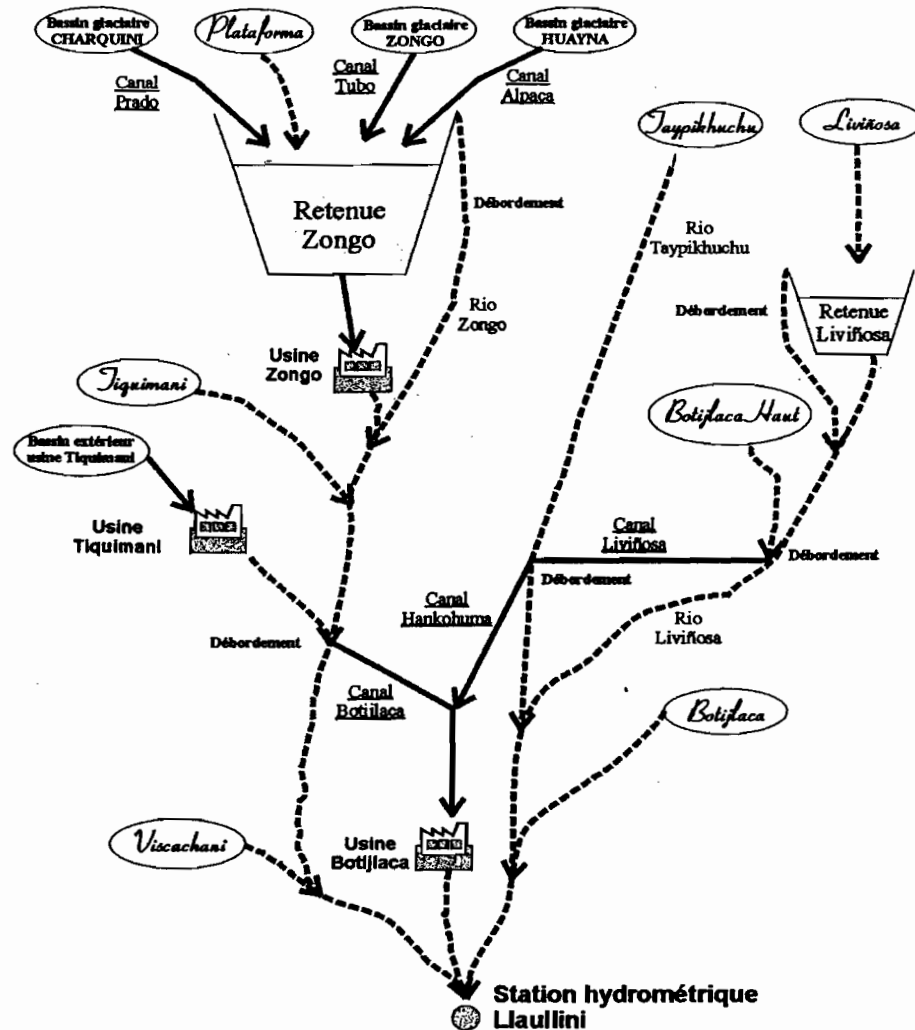


Fig. 4. Organisation schématique des écoulements dans le système hydroélectrique. Les lignes en pointillés représentent les écoulements en rivière et les traits pleins les écoulements en canalisation à surface libre ou en conduites forcées. Les entrées notées en script sont les sous-bassins sur lesquels ISBA a été appliqué. Les entrées en gras sont des bassins dont la production d'écoulement est directement introduite dans le modèle à partir des observations.

3. Results and discussion

Pour l'application, nous avons utilisé un jeu de données d'observations hydrologiques et climatologiques acquis par les auteurs sur le bassin effectué au cours de la période allant du 1^{er} septembre 1999 au 1^{er} février 2001. Cette période de 17 mois couvre une année hydrologique complète avec une saison d'été humide d'octobre à mai, suivie

d'une période sèche d'hiver de juin à septembre, ainsi que le début de la saison suivante.

Toutes les simulations ont été réalisées avec un pas de temps journalier.

Dans une première étape, nous avons appliqué seulement le schéma de surface ISBA en composant les débits observés à l'issue de chacune des surfaces élémentaires pour obtenir le débit total à l'exutoire du bassin (Llaullini) (Fig. 5).

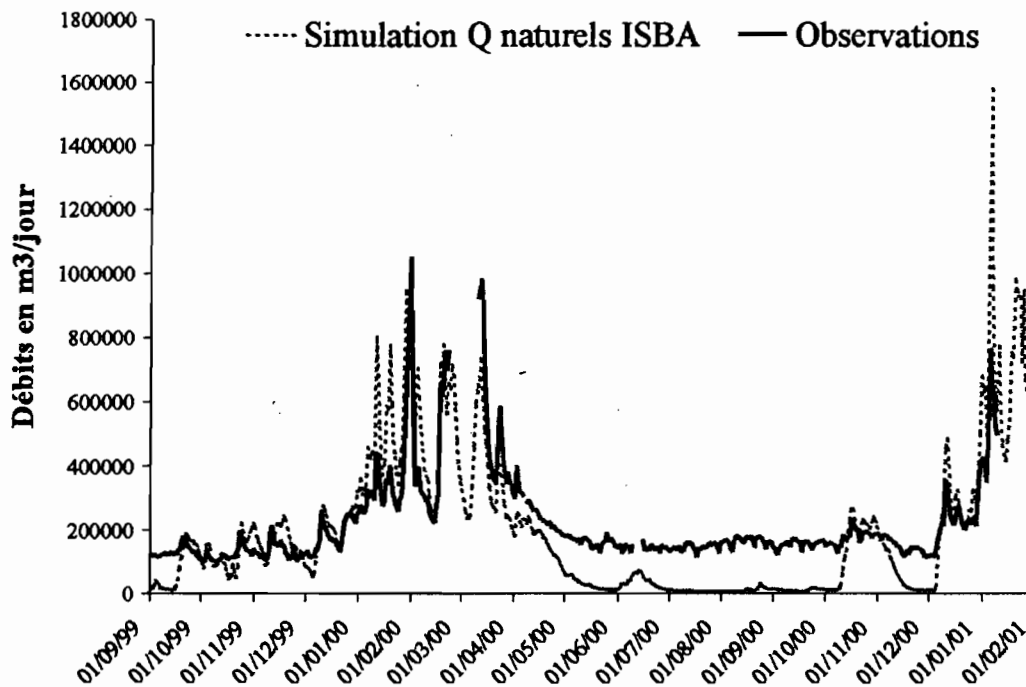


Fig. 5: Débits simulés sur les 7 sous-bassins naturels du bassin de Llaullini, cumulés pour comparaison avec les débits observés à son exutoire.

On remarque que pendant les saisons humides les ordres de grandeurs de débits simulés sont très proches des observations. Au contraire, en début de saison des pluies certaines crues sont surestimées et tout au long de la saison sèche, on observe un décalage systématique. Ces écarts sont dus aux opérations réalisées par le gestionnaire hydroélectrique dont les manœuvres n'ont pas été prises en compte dans le modèle de production. En effet, pendant la saison humide qui correspond à l'été en région tropicale, d'une part la demande énergétique est diminuée, et, d'autre part, la ressource en eau utilisable par les ouvrages est suffisante. Au contraire en saison sèche, pour couvrir la demande énergétique, le gestionnaire utilise l'eau stockée dans les retenues soit en cours de saison humide, soit en provenance des réservoirs que constituent les glaciers.

La Fig.6 présente le résultat obtenu après la deuxième étape en modélisant les transferts dans le

système hydrologique comme dans le système hydraulique.

On confirme bien que les écarts observés précédemment sont comblés et que la prise en compte des opérations hydrauliques de stockage et de déstockage des retenues donnent un résultat global assez proche de la réalité.

Il subsiste néanmoins des différences :

- Les déficiences observées pendant la période qui précède la saison des pluies montrent que l'intégration des écoulements dans le système hydroélectrique peut être améliorée. Il s'agit principalement de mieux prendre en compte les stockages de moyenne durée dans les petites retenues.

L'écart observé au cours de la saison sèche est probablement dû à une sous-estimation des débits glaciaires au cours de l'extrapolation des données des glaciers observés aux glaciers non observés dont l'exposition est différente et plus favorable à la fonte.

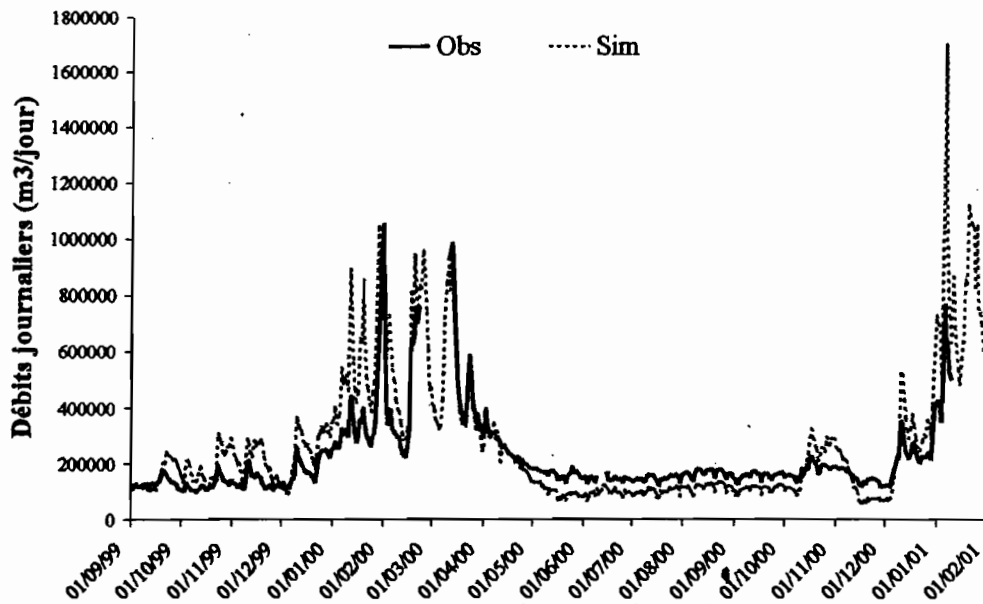


Fig.6 : Débits simulés et observés à l'exutoire du bassin de Llaullini.

4. Conclusion

La méthode présentée ici donne des résultats très encourageants et elle intéresse fortement les opérateurs qui utilisent à des fins énergétiques ou d'alimentation en eau potable dans les régions de haute montagne. Elle reste toutefois à ce stade un outil scientifique et peut difficilement, en l'état, être utilisé comme *système d'aide à la décision*. En effet, elle nécessite une excellente connaissance des données climatiques et une cartographie très fine, informations qui ne sont le plus souvent pas disponibles dans ce type de milieu. On pense actuellement à l'utilisation d'une modélisation plus grossière pour la production. Enfin, pour que cette approche soit totalement *autonome*, un modèle d'écoulement glaciaire devra y être couplé.

5. Acknowledgments

Ce travail a été développé dans le cadre d'une thèse de doctorat de l'Université Montpellier II. Il a été réalisé au sein de l'unité de recherche Great Ice de l'IRD (R050) à la Maison des Sciences de l'Eau de Montpellier (France) et à l'Institut d'Hydraulique et d'Hydrologie de l'Université Majeure San Andrés de La Paz (Bolivie). Les auteurs remercient la *Bolivian Power Company* (COBEE).

6. References

- [1] Caballero, Y., 2001, *Modélisation des écoulements d'origine pluvio-nivo-glaciaire en contexte de haute montagne tropicale. Application à la haute-vallée du Zongo (Bolivie)*, thèse, doctorat, Université Montpellier II. 198p. + annexes.
- [2] Francou, B., Ribstein, P., 1995, *Glaciers et évolution climatique dans les Andes boliviennes. Glacier de Zongo et glacier de Chacaltaya, Cordillère Royale, 16°S*, Bull. Inst. fr. études andines 24(1):23-36.
- [3] Ribstein, P., Tiriau, E., Francou, B., Saravia, R., 1995, *Tropical climate and glacier hydrology - a case study in Bolivia*, J. Hydrol., 165:221-234.
- [4] Noilhan, J., Planton, S., 1989, *A single parametrization of land surface processes for meteorological models*, Monthly Weather Review (117):536-549.
- [5] Noilhan, J., Mahfouf, J.F., 1996, *The ISBA land surface parametrization scheme*, Global & Planetary Change, 13:145-159.
- [6] Forrester, J.W. - 1968. *Principles of systems*. Wright-Allen, Press Inc. 285 p