

# PARAMÉTRISATION DES FLUX DE SURFACE SUR LA MORAINÉ DU GLACIER DU ZONGO (BOLIVIE)

*Simon Gascoïn<sup>1</sup>   Agnès Ducharne<sup>1</sup>   Pierre Ribstein<sup>1</sup>  
Patrick Wagnon<sup>2</sup>   Jean-Emmanuel Sicart<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> UMR Sisyphe, UPMC case 105, 4 Place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05, France

<sup>2</sup> LGGE, IRD, BP 96, 38402 St-Martin d'Hères, France

<sup>3</sup> Maison des Sciences de l'Eau, IRD, 34000 Montpellier, France

## Résumé

Depuis août 2003 un Observatoire de Recherche en Environnement (ORE) est installé sur la moraine du glacier du Zongo (Bolivie). L'intérêt de cette station est de fournir des données météorologiques précises concernant la surface non-englacée du bassin versant, afin d'évaluer la quantité d'eau qui alimente le torrent émissaire en dehors des eaux de fusion du glacier. Les flux d'eau et d'énergie ont d'abord été évalués sur la parcelle même de la station de mesure avec le modèle CaB (Catchment-Based). CaB est un schéma de surface associant un modèle TSVa (Transfert Sol-Végétation-Atmosphère) et le modèle hydrologique TOPMODEL. Les données permettent de tester la paramétrisation de l'albédo au sein du modèle, qui joue un rôle prépondérant dans le calcul des flux d'énergie. En effet, le modèle CaB inclut un module relatif à la présence d'une couche neigeuse sur le sol et gère l'évolution au cours du temps de sa densité et de son albédo. Les premiers résultats montrent que le modèle simule correctement le flux de chaleur mesuré dans le sol, mais que les variations d'albédo sont mal reproduites. En particulier en l'absence de neige, il apparaît nécessaire de paramétrer l'albédo en fonction de l'humidité du sol, avant de spatialiser les flux sur l'ensemble de la surface non-englacée du bassin versant. Grâce aux concepts de TOPMODEL il est alors possible de tenir compte de la topographie très accidentée du site dans les calculs de ruissellement et d'humidité du sol, à travers une paramétrisation sous-maille de l'indice topographique.

## 1 Introduction

### 1.1 Le bassin du glacier du Zongo

Le glacier du Zongo est situé dans le massif de la Cordillère Royale, en Bolivie. Son bassin versant est étudié par l'unité GREAT-ICE de l'Institut de la Recherche pour le Développement (IRD) depuis 1991 [1]. Les premiers travaux ont permis de bien quantifier la fonte du glacier en relation avec le climat local [2, 3]. Toutefois, le transfert d'eau au sein des surfaces non-englacées (c'est-à-dire en dehors du glacier, soit un tiers du bassin versant) n'a pas encore été précisément estimé. Ce flux d'eau à travers la moraine s'ajoute au flux dominant issu de la fonte du glacier et alimente un torrent exutoire qui constitue une ressource locale essentielle notamment pour la production d'hydroélectricité. Actuellement, les bilans d'eau à l'échelle du bassin versant ont montré que la contribution des surfaces non-englacées au débit total du torrent est faible et de l'ordre de grandeur de l'incertitude sur la quantité d'eau provenant du glacier. Cependant, avec la regression du glacier entamée depuis les années 70, la proportion de ce flux est amenée à grandir.

Pour mieux quantifier les processus hydrologiques en dehors du glacier, une station de mesure automatique a été installée sur la moraine et fournit des données météorologiques précises à haute résolution temporelle. La station est financée au titre d'Observatoire de Recherche en Environnement (ORE) par l'INSU (Institut National des Sciences de l'Univers).

## 1.2 Le modèle CaB

Nous exploitons les mesures de l'ORE à l'aide du modèle CaB (*Catchment-Based*) [4]. CaB est un schéma de surface continentale qui résulte de l'intégration des concepts de TOPMODEL ([5]) dans un modèle TSVA (Transfert Sol-Végétation-Atmosphère). TOPMODEL est un modèle hydrologique qui s'appuie sur la notion d'indice topographique pour calculer les écoulements souterrains et superficiels. La profondeur de la nappe libre que génère TOPMODEL est utilisée dans CaB pour obtenir une répartition de l'humidité au sein de chaque maille en trois fractions (saturée, stressée, intermédiaire). Pour chaque fraction les flux d'eau et d'énergie sont calculés séparément en fonction de la nature du sol, de la végétation, et des forçages atmosphériques de la maille. En outre, CaB intègre un module spécifique à la présence d'une couche de neige qui calcule l'albédo et la densité de la neige en fonction du temps.

## 2 Mise en oeuvre de CaB à l'échelle de la parcelle de l'ORE

Pour l'instant, le modèle CaB a été mis en oeuvre de façon quasi-monodimensionnelle à l'échelle de la parcelle de l'ORE (environ 100 m<sup>2</sup>). Cela permet d'utiliser les mesures de la station qui ne servent pas en entrée du modèle comme des critères de validation très précis, avant d'envisager une spatialisation à l'ensemble des surfaces non-englacées du bassin versant. Les paramètres décrivant le sol sont ceux donnés par Cosby et al. [6] pour un sol de type limon sableux. La végétation est suffisamment rare pour être négligée. Les paramètres topographiques (c'est-à-dire la distribution des indices topographiques de la maille) sont ceux d'un bassin quelconque avec de fortes pentes. Les forçages météorologiques sont lus au même pas de temps que les calculs des flux d'eau et d'énergie (30 min). La détermination de la phase des précipitations est faite d'après le constat fait par L'Hote et al. [7] selon lequel 90% des précipitations sont solides en dessous de 0.5°C à cette altitude dans les Andes tropicales.

Les premiers résultats montrent que le modèle reproduit de façon satisfaisante la température et le flux de chaleur mesurés dans le sol (figure 2). En revanche, le modèle ne simule pas correctement les variations d'albédo (calculé comme le rapport des radiations de courte longueur d'onde incidentes et réfléchies mesurées par les pyranomètres). En particulier, en l'absence de neige, nous émettons l'hypothèse que cela tient au fait que l'albédo du sol de la moraine varie en fonction de son humidité. En analysant rétrospectivement les données de la station, et en éliminant les effets d'angle zénithal on peut constater que l'albédo varie simultanément à l'occurrence d'un événement pluvieux (figure 1). Dans ces exemples l'albédo diminue de plus de 30 % après une faible pluie (1 mm).

## 3 Vers une paramétrisation de l'albédo de sol nu

La variation de l'albédo du sol en fonction de son humidité est un phénomène familier déjà décrit par Ångström en 1925 [8] : l'eau qui remplace l'air dans les pores du sol a tendance à assombrir la surface. Les premiers travaux visant à quantifier cette relation ont montré que l'albédo d'un sol nu est une fonction linéaire de la teneur en eau d'une fine couche de surface (0.2 cm à 10 cm) [9]. Plus récemment, les auteurs s'accordent à utiliser une loi exponentielle [10]. Mais ces relations empiriques sont issues de travaux effectués en laboratoire et ne sont pas adaptées à tous les types de sol. C'est pourquoi il est envisagé de poursuivre l'étude par une campagne de mesure de l'humidité du sol *in situ*. Les données récoltées pourront alors servir à développer une paramétrisation de l'albédo du sol nu en fonction de l'humidité calculée par CaB.

## 4 Conclusion

Le schéma de surface CaB utilisé à l'échelle de l'ORE est un moyen d'analyser les processus physiques qu'il peut être important de considérer avant de mettre en oeuvre le modèle à l'échelle du bassin versant. L'outil développé doit permettre d'estimer la contribution des surfaces non-englacées au débit du torrent exutoire, dans un contexte de changement climatique qui entraîne la réduction de la surface englacée.

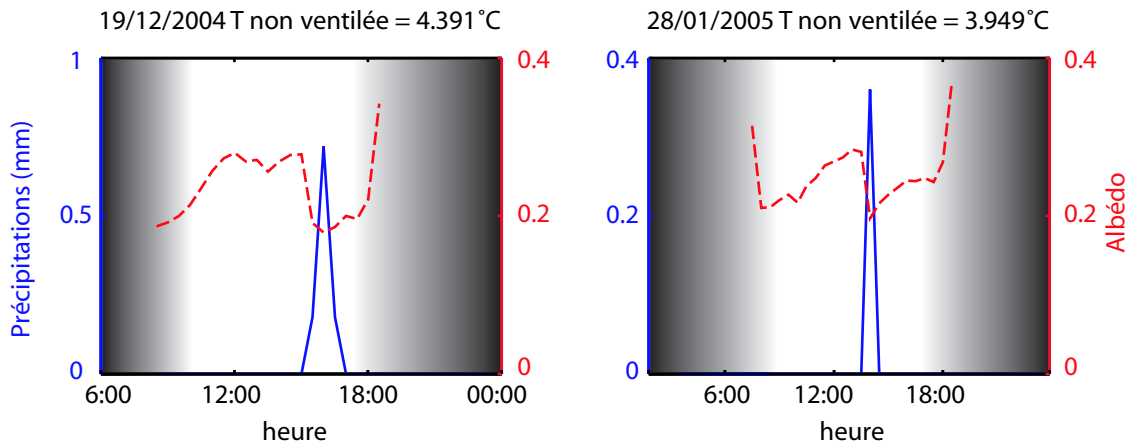


Fig. 1: Exemples de variations de l'albédo observé lors de deux évènements pluvieux le 19/12/2006 et le 28/01/2006. En rouge pointillé : albédo ; en bleu trait plein : précipitations. Les mesures sont au pas de temps demi-horaire. Les zones grisées représentent les moments où les variations d'angle zénithal faussent l'interprétation de l'albédo. La température non ventilée est indiquée pour le maximum des précipitations, et exclue la présence de neige

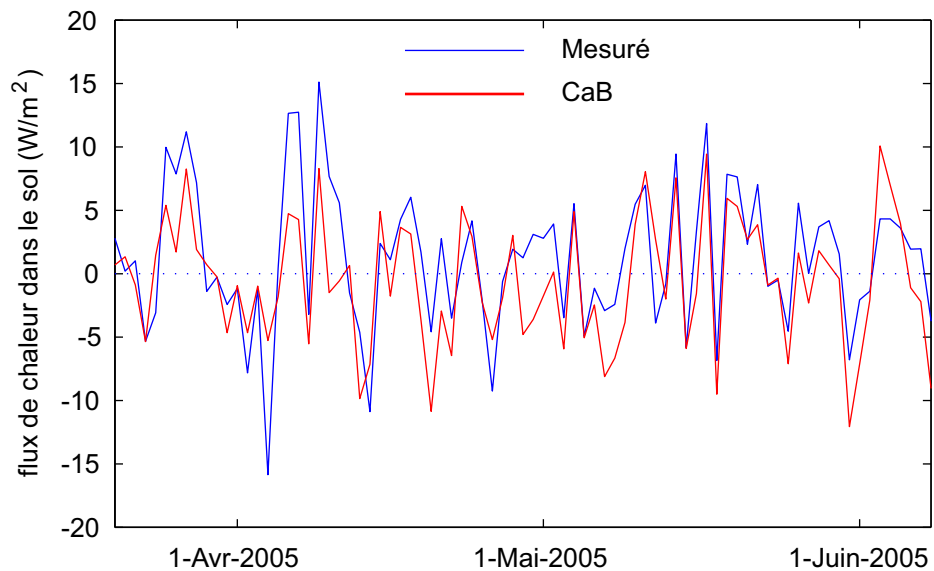


Fig. 2: Variations mesurées et simulées par CaB du flux de chaleur dans le sol entre le 15/03/2006 et le 10/06/2006 (flux positif dirigé vers le haut).

## Remerciements

Ce travail est réalisé dans le cadre d'un projet ECCO-PNRH (Écosphère Continentale : processus et modélisation - Programme National de Recherche en Hydrologie) mené par Pierre Etchevers. L'auteur remercie Pierre Chevallier pour ses conseils « pédologiques ».

## Références

- [1] P. RIBSTEIN, E. TIRIAU, B. FRANCOU et R. SARAVIA : Tropical climate and glacier hydrology : a case study in Bolivia. *J. Hydrol.*, 165:221–234, 1994.
- [2] P. WAGNON : *Analyse du bilan d'énergie d'un glacier tropical, application à la relation glacier-climat*. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier - Grenoble I, 1999.
- [3] J.-E. SICART : *Contribution à l'étude des flux d'énergie, du bilan de masse et du débit de fonte d'un glacier tropical : le Zongo, Bolivie*. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2002.
- [4] A. DUCHARNE, R. D. KOSTER, M. SUAREZ, M. STIEGLITZ et P. KUMAR : A catchment-based approach to modeling land surface processes in a GCM - Part 2 : Parameter estimation and model demonstration. *J. Geophys. Res.*, 105(D20):24823–24838, 2000.
- [5] K. BEVEN et M. J. KIRKBY : A physically based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrol. Sci. Bull.*, 24:43–69, 1979.
- [6] B. J. COSBY, G. M. HORNBERGER, R. B. CLAPP et T. R. GINN : A statistical exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of soils. *Water Resour. Res.*, 20(6):682–690, juin 1984.
- [7] Y. L'HÔTE, P. CHEVALLIER, A. COUDRAIN, Y. LEJEUNE et P. ETCHEVERS : Relationship between precipitation phase and air temperature : comparison between the bolivian andes and the swiss alps. *Hydrol. Sci. J.*, 50(6):989–997, 2005.
- [8] A. ÅNGSTRÖM : The albedo of various surfaces of ground. *Geograf. Ann.*, 7:323–342, 1925.
- [9] S.B. IDSO, R.D. JACKSON, R.J. REGINATO, B.A. KIMBALL et F.S. NAKAYAMA : The dependence of bare soils albedo on soil water content. *J. Appl. Meteorol.*, 14:109–113, 1975.
- [10] D. B. LOBELL et G. P. ASNER : Moisture Effects on Soil Reflectance. *Soil Sci Soc Am J*, 66(3):722–727, 2002.