

Relation hydrologie climat dans les Andes centrales

**FRANCOIS DELCLAUX, ANNE COUDRAIN,
ALAIN DEZETTER**

HydroSciences Unité Mixte de Recherche CNRS-IRD-UMII, case MSE, place Eugène Bataillon, F-34095 Montpellier Cedex 5, France

delclaux@msem.univ-montp2.fr

THOMAS CONDOM

UMR Sisyphe Paris 6-IRD, UPMC, 4 place Jussieu, F-75252 Paris Cedex 05, France

LAURENT LI ZHAOXIN

LMD CNRS, CC 99, UPMC, 4 place Jussieu, F-75252 Paris Cedex 05, France

Résumé Un modèle hydrologique global appliqué aux deux sous-bassins de l'Altiplano andin a permis de calculer la durée nécessaire à une baisse de niveau de 100 m de leur lac central pour différentes conditions climatiques vraisemblables. Un lac de 53 000 km² dans le bassin sud, très plat, serait d'après les simulations asséché en moins de 100 ans. Le lac Titicaca a des temps de réponse plus longs et est très sensible à la répartition des pluies sur l'année. Une simulation du climat par MCGA (1000 ans/couplage océan-atmosphère/conditions orbitales actuelles) révèle une variabilité pseudo-périodique de la température des océans. L'analyse des pluies correspondantes ne fait pas apparaître d'impact sur la variabilité des précipitations dans les Andes. Ces processus couplés ne sont donc pas suffisants pour rendre compte de situations hydrologiques contrastées sur l'Altiplano.

Mots clefs Altiplano andin; bassin versant endoréique; modèle de circulation générale; modèle hydrologique; paléohydrologie; paléolac

Key words Andean altiplano; endoreic catchment; general circulation model; hydrological model; palaeohydrology; palaeolake

INTRODUCTION

Les extensions et régressions lacustres constituent une manifestation intégrée des modifications des conditions hydrologiques et climatiques. A ce titre, l'Altiplano est une région particulièrement intéressante pour étudier la relation climat-hydrologie: elle est à la charnière entre différents types de climat et elle a connu des variations drastiques des conditions hydroclimatiques sur les derniers 20 000 ans (Abbott *et al.*, 1997). Actuellement les pluies proviennent des basses latitudes de l'Atlantique selon un régime tropical avec une saison des pluies très marquée et un gradient latitudinal de la pluie important (750 mm an⁻¹ au nord, 250 mm an⁻¹ au sud). Sur le passé, il y a 15 000 ans environ, certains arguments sédimentaires au large du Chili (Lamy *et al.*, 2000) ou d'autres arguments hydrologiques et géochimiques (Coudrain *et al.*, 2002) apportent des éléments en faveur d'un gradient latitudinal plus faible. Ceci pourrait être lié à un flux plus important qu'actuellement de vapeur d'eau provenant des hautes



Fig. 1 Zone d'étude. Le bassin nord, incluant le lac Titicaca est séparé du bassin sud (salars de Coipasa et Uyuni) par la limite en pointillé. La connexion hydraulique est le rio Desaguadero. Les numéros entourés sont les stations climatologiques.

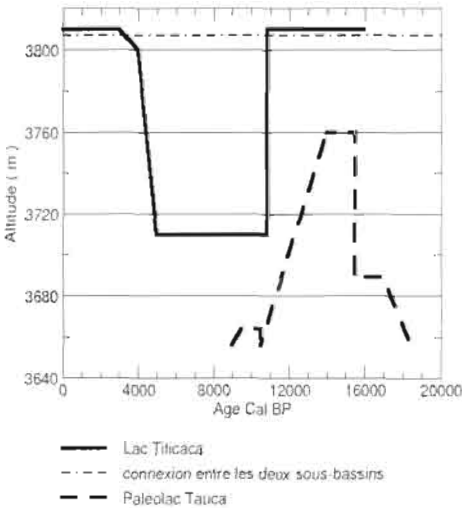


Fig. 2 Variation des niveaux des lacs durant les 20 000 dernières années pour les bassins nord (Titicaca) et sud (Tauca).

latitudes océaniques. La manifestation la plus remarquable de ces changements est l'évolution du bassin endoréique de l'Altiplano. Celui-ci est composé de deux bassins,

reliés entre eux par un unique écoulement superficiel du nord vers le sud (Fig. 1). Le bassin nord, de latitude 14–16°S, a pour point bas le lac Titicaca dont les variations de niveau ont été largement documentées sur les 11 000 dernières années (Sylvestre *et al.*, 1999): le niveau actuel oscille autour de 3810 m, alors qu'un niveau bas, à 3710 m, a été atteint entre 10 000 et 6000 BP (Fig. 2). L'évolution du bassin sud (point bas vers 20°S), estimée à partir de paléobiohermes (Rouchy *et al.*, 1996) est plus contrastée: c'est un vaste plateau de 126 000 km² dont les points bas centraux sont les étendues de croûte de sel des salars de Coipasa et d'Uyuni. Ces salars témoignent d'importantes phases lacustres antérieures dont la dernière majeure est le Tauca (18 000/14 000 ans BP).

L'objectif de cette étude est de tester et de valider différents scénarios hydro-climatiques. La première partie porte sur la quantification des flux hydriques entre les bassins à l'aide d'un modèle conceptuel pluie/débit prenant en compte la dynamique de remplissage ou de vidange lacustre. Elle permet de conclure que les changements hydrologiques affectant ces régions peuvent être rapides, de l'ordre de la centaine d'années. La seconde partie présente des tests pour vérifier si les fluctuations séculaires du climat pourraient conduire à des évolutions actuelles comparables à celles du passé. La méthode mise en oeuvre s'appuie sur l'analyse en "empirical orthogonal functions" (EOF) du champ spatio-temporel des températures de surface de l'océan (TSO) issu d'une simulation longue durée effectuée avec le modèle de circulation générale atmosphérique (MCGA) du Laboratoire de Météorologie Dynamique. Les différents champs de pluie calculés dans les Andes et correspondant à des situations contrastées de TSO sont alors analysés.

MODELISATION HYDROLOGIQUE

Modèle et données

Un modèle conceptuel été développé (Condom *et al.*, 2002) pour chacun des deux bassins nord et sud. Ce modèle prend en compte un réservoir sol et un réservoir lac dont la surface varie en fonction des apports. Les entrées du modèle sont la pluie et l'évapotranspiration pour le sol, et la pluie et l'évaporation pour le lac. La connexion hydraulique entre les deux bassins par le rio Desaguadero est modélisée par une loi empirique reliant le débit au niveau du lac Titicaca. L'évaporation est déterminée à partir des données climatologiques mensuelles de température de l'air et d'intensité et de durée d'ensoleillement. L'évapotranspiration est calculée à partir de l'eau disponible dans le réservoir sol par la combinaison de l'évaporation potentielle et du coefficient de capacité en eau du sol. Ce dernier paramètre est utilisé comme paramètre de calage sur les données actuelles. Le modèle est ensuite utilisé pour tester et valider les scénarios de régression lacustre à partir des données mensuelles de précipitation et de température de l'air.

RESULTATS

La calibration du modèle sur les données actuelles conduit à une gamme de valeurs de la capacité en eau du sol de 0.2 à 0.3 m, la valeur optimale étant de 0.24 m pour le

bassin nord. Concernant les simulations du passé, les résultats ont montré que pour le bassin nord et le lac Titicaca, plusieurs situations mènent à une régression de 100 m du niveau du lac en 700 ans: une diminution de pluviométrie de 15% (640 mm an^{-1}), ou une augmentation de température de 5.5°C par le biais de l'évaporation. La disparition de la saisonnalité de la pluie, correspondant à un renforcement de la pluviométrie pendant l'hiver austral, accélère le processus de régression lacustre.

Les simulations hydrologiques du bassin sud montrent que le maintien du niveau du paléolac Tauca à 3760 m, alors que l'altitude du salar est de 3653 m, nécessiterait une pluviométrie annuelle d'environ 750 à 900 mm selon la valeur de l'écoulement de surface provenant du bassin nord. Elles montrent aussi que le niveau du lac peut décroître de 100 m en 100 ans avec une pluie de 300 mm an^{-1} . De plus, il apparaît que la saisonnalité et la température de l'air ont peu d'influence sur la vitesse d'abaissement du niveau du lac de ce bassin sud.

VARIABILITÉ CLIMATIQUE ET PLUVIOMÉTRIE ANDINE

Les données TSO et pluviométriques sont issues d'une simulation en mode couplé océan-atmosphère de 1000 ans du climat en situation de forçage actuel par le soleil et les glaces. L'analyse des résultats de cette modélisation du climat s'appuie sur l'hypothèse selon laquelle une "plongée" quasi-périodique d'eaux froides provenant de l'Antarctique modifie la structure spatiale de la température de l'océan et des circulations des masses d'air, induisant une remontée plus au nord du courant-jet (Li & Le Treut, 1999; Menendez *et al.*, 2001) pouvant être à l'origine d'une pluviométrie accrue sur l'Altiplano. L'analyse EOF sur la valeur annuelle de la TSO fait apparaître un cycle de 200 à 300 ans concernant les zones Pacifique Sud (anomalies négatives) et Atlantique Sud (anomalies positives). La première composante PC1 représente 17% de la variance totale (Fig. 3). Cependant, l'analyse des sorties pluviométriques ne révèle aucune variation concomitante de la pluie. De plus, les cumuls annuels et la variabilité saisonnière de la pluie sont mal représentés par le MCGA sur l'Amérique du Sud, et plus particulièrement sur l'Altiplano andin (Fig. 4(a)). L'hypothèse explicative sur les écarts entre les pluies modélisées et pluies observées semble résider dans une

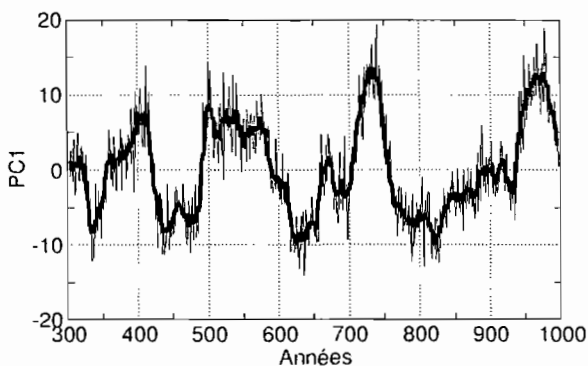


Fig. 3 Variation de la première composante EOF des TSO sur les 700 dernières années de la simulation climatique longue durée.

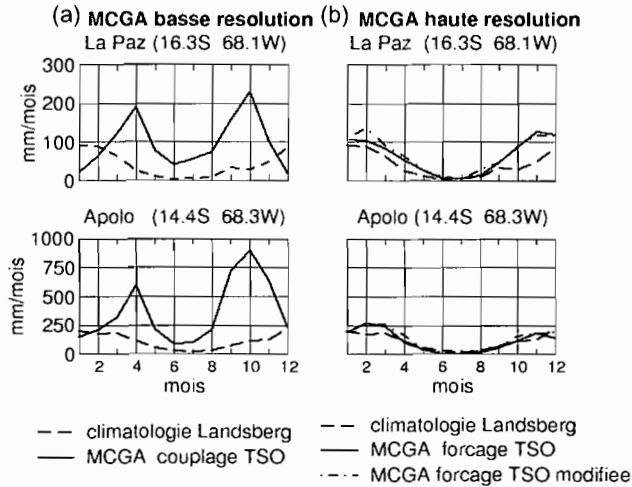


Fig. 4 Comparaison des pluies mensuelles pour deux stations de l'Altiplano entre les simulations MCGA et les observations: (a) MCGA basse résolution couplé avec l'océan. (b) MCGA haute résolution forcé par deux types de TSO: (i) TSO de contrôle, moyenne issue de la simulation basse résolution, (ii) anomalie de TSO (correspondant aux extrema de PC1).

paramétrisation déficiente des schémas de surface, laquelle se trouve aggravée en zone montagneuse par la taille importante des mailles de calcul (5×4). Par la suite, une deuxième simulation a été effectuée avec la version haute résolution du MCGA (1×0.6 sur la zone considérée) forcé par les températures de surface moyennes issues du modèle couplé. La Fig. 4(b) montre alors une bonne adéquation entre les pluies mensuelles observées et simulées. Cependant, une troisième simulation forcé par l'anomalie de TSO correspondant aux extrema de PC1 ne révèle pas de différence significative de valeurs de pluie avec celles calculées à partir de la TSO moyenne. A ce stade de l'étude, la variabilité interne du climat actuel tel que simulé par le MCGA n'induit pas de variations pluviométriques susceptibles de modifier le comportement hydrologique des lacs et salars de l'Altiplano andin.

CONCLUSIONS

L'analyse quantitative hydro-climatique des situations contrastées archivées sur l'Altiplano permet d'avancer certains arguments sur la dynamique des processus.

La dernière phase lacustre majeure du bassin sud (15 000 ans BP) serait liée un renforcement des flux de vapeurs d'eau provenant des hautes latitudes et non des basses latitudes. L'abaissement de 100 m du lac Titicaca pendant l'Holocène moyen a pu être occasionné, soit par des modifications de la pluie ou de l'évaporation, soit par l'affaiblissement de la saisonnalité des pluies.

En l'état actuel des connaissances et des développements de MCGA, la variation des conditions climatiques régionales à l'origine des situations hydrologiques contrastées ne peut être expliquée seulement par la variation climatique associée aux processus couplés entre océan et atmosphère.

Remerciements Les auteurs remercient l'UMR HydroSciences, ainsi que le PNRH (Programme National de Recherche en Hydrologie) pour leur soutien financier au projet.

REFERENCES

- Abbott, M. B., Binford, M. W., Brenner, M. & Kelts, K. R. (1997) A 3500 ^{14}C yr high-resolution record of water-level changes in Lake Titicaca, Bolivia/Peru. *Quatern. Res.* **47**, 169–180.
- Condom, T., Coudrain, A., Dezetter, A., Brunstein, D., Delclaux, F. & Sicart, J.-E. (2002) Transient modelling of lacustrine regressions. Two case studies from the Andean Altiplano. (En cours de révision) *Hydrol Processes*.
- Coudrain, A., Loubet, M., Condom, T., Talbi, A., Ribstein, P., Pouyaud, B., Quintanilla, J., Dieulin, C. & Dupré, B. (2002) Données isotopiques ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) et changements hydrologiques depuis 15 000 ans sur l'Altiplano andin. *Hydrol. Sci. J.* **47**, 293–306.
- Lamy, F., Klump, J., Hebbeln, D. & Wefter, G. (2000) Late Quaternary rapid climate change in northern Chile. *Terra Nova* **12**, 8–13.
- Li, Z. X. & Le Treut, H. (1999) Transient behavior of the meridional moisture transport across South America and its relation to atmospheric circulation patterns. *Geophys. Res. Lett.* **26**(10), 1409–1412.
- Menendez, C. G., Saulo, A. C. & Li, Z. X. (2001) Simulation of South American wintertime climate with a nesting system. *Climate Dyn.* **17**, 219–231.
- Rouchy, J. M., Servant, M., Fournier, M. & Causse, C. (1996) Extensive carbonate algal bioherms in upper Pleistocène saline lakes of central Altiplano of Bolivia. *Sedimentology* **43**, 973–993.
- Sylvestre, F., Servant, M., Servant-Vildary, S., Causse, C., Fournier, M. & Ybert, J. P. (1999) Lake level chronology on the Southern Bolivian Altiplano (18°–23°S) during the Late-Glacial Time and the Early Holocene. *Quatern. Res.* **51**, 54–66.

IAHS Publication no. 278
ISSN 0144-7815



Hydrology of Mediterranean and Semiarid Regions

Edited by

*Eric Servat, Wajdi Najem, Christian Leduc
& Ahmed Shakeel*





Hydrology of Mediterranean and Semiarid Regions

Edited by

ERIC SERVAT

IRD, UMR HydroSciences Montpellier (CNRS, UM2, IRD, UMI), Maison des Sciences de l'Eau, BP 64501, F-34394 Montpellier Cedex 5, France

WAJDI NAJEM

ESIB, Faculté d'Ingénierie de l'Université Saint-Joseph, BP 1514, Beyrouth, Liban

CHRISTIAN LEDUC

IRD, UMR HydroSciences Montpellier (CNRS, UM2, IRD, UMI), Maison des Sciences de l'Eau, BP 64501, F-34394 Montpellier Cedex 5, France

AHMED SHAKEEL

Indo-French Centre for Groundwater Research, National Geophysical Research Institute, Uppal Road, Hyderabad 500 007, India

Papers selected for the international conference on:

Hydrology of the Mediterranean and Semi-Arid Regions

held in Montpellier, France, from 1 to 4 April 2003.

This conference was jointly convened by:

UNESCO (United Nations Educational and Cultural Organization)

IAHS (International Association of Hydrological Sciences)

WMO (World Meteorological Organization)

FRIEND AMHY (Flow Regimes from International Experimental and Network Data, Alpine and Mediterranean Region)

IFR ILEE (Institut Fédératif de Recherche, Institut Languedocien de Recherche sur l'Eau et l'Environnement)

**Published by the International Association of
Hydrological Sciences 2003**

IAHS Press, Centre for Ecology and Hydrology, Wallingford,
Oxfordshire OX10 8BB, UK

IAHS Publication no. 278

ISBN 1-901502-12-0

British Library Cataloguing-in-Publication Data.

A catalogue record for this book is available from the British Library.

© IAHS Press 2003

This publication may be reproduced as hard copy, in whole or in part, for educational or nonprofit uses, without special permission from the copyright holder, provided acknowledgement of the source is made. As a courtesy the authors should be informed of any use made of their work. No use of this publication may be made for electronic publishing, resale or other commercial purposes without the prior written permission of IAHS Press.

The papers included in this volume have been peer reviewed and some were extensively revised before publication.

IAHS is indebted to the employers of the Editors for the invaluable support and services provided that enabled them to carry out their task effectively and efficiently.

The designations employed and the presentation of material throughout the publication do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of IAHS concerning the legal status of any country, territory, city or area or of its authorities, or concerning the delimitation of its frontiers or boundaries.

The use of trade, firm, or corporate names in the publication is for the information and convenience of the reader. Such use does not constitute an official endorsement or approval by IAHS of any product or service to the exclusion of others that may be suitable.

The papers were checked, formatted and assembled by Cate Gardner and Penny Farnell at IAHS Press, Wallingford, UK.

Publications in the series of Proceedings and Reports are available *only* from:
**IAHS Press, Centre for Ecology and Hydrology, Wallingford,
Oxfordshire OX10 8BB, UK**

tel.: +44 1491 692442; fax: +44 1491 692448; e-mail: jilly@iahs.demon.co.uk