

Dossier projet IFR-ILEE

Titre

Modélisation de bassins partiellement englacés dans l'outil d'aide à la planification WEAP

Demande

Financement de missions interandines (9 000. €) pour soutenir l'adaptation de la méthodologie proposée au Pérou dans les autres pays andins - Equateur, Bolivie - en s'appuyant notamment sur des anciens thésards de l'IRD - Wilson Suarez, Marcos Villacis et Edson Ramirez -.

Financement de missions Montpellier-Quito (4 000. €) pour sensibiliser des membres de l'IFR-ILEE à l'outil WEAP et à son application dans l'appui à l'adaptation aux changements globaux.

Porteur

Jean-Christophe Pouget - UMR G-EAU IRD Quito – jcpouget@ird.fr

Unités IFR-ILEE participantes

UMR G-EAU - Gestion, Eau, Acteurs, Usages - avec Patrick Le Goulven, Jean-Christophe Pouget

UMR HSM – Hydro Sciences Montpellier – avec Thomas Condom

Participants associés

Dans le cadre de conventions "*Assessing the Impacts of Climate Change on Mountain Hydrology: Development of a Methodology through a Case Study in Peru*" avec la Banque Mondiale : David Purkey, Marisa Escobar du Stockholm Environment Institute des Etats-Unis (SEI-US, www.sei-us.org), Cayo Ramos de l'université La Molina Lima (www.lamolina.edu.pe), Wilson Suarez, docteur de l'UM2, recruté dans le cadre de cette convention.

Contexte

Les enjeux en termes de Recherche et de Développement liés aux changements globaux et aux ressources en eau ont été largement présentés et débattus durant le Congrès Mondial de l'Eau de Montpellier en septembre 2008. Dans les Andes, un enjeu important pour la planification est une meilleure évaluation des dynamiques des ressources en eau d'altitude et de leurs évolutions probables dans un contexte de changement climatique (Pouget *et al.*, 2008). En effet la fonte accélérée des glaciers andins ces dernières décennies est avérée. Mais l'impact sur les ressources en eau fait l'objet d'expectatives souvent alarmantes (Vergara *et al.*, 2007) qui rendent nécessaires l'implication des scientifiques et le renforcement des études afin de disposer d'arguments solides et consistants.

Depuis 1991, une équipe de glaciologues et d'hydrologues de l'IRD analyse précisément avec ses partenaires sud-américains et européens la dynamique glaciologique et hydrologique des Andes tropicales, en relation avec les fluctuations climatiques actuelles et passées. Ces recherches, initiées d'abord en Bolivie, se sont ensuite étendues au Pérou et en Equateur, d'abord dans le cadre du programme NGT (Neiges et Glaciers Tropicaux), ensuite au sein de l'UR Great Ice. L'objectif central du programme de recherche consiste à comprendre l'impact des fluctuations climatiques sur le comportement des glaciers et pour cela analyser les processus actuels pour reconstituer les fonctionnements passés afin de mieux prévoir les évolutions futures. Avec la disparition de l'UR pour fin 2008, les hydrologues de Great Ice sont maintenant rattachés à l'UMR HSM et feront partie, sous couvert d'acceptation par l'IRD, du futur Laboratoire Mixte International Great Ice (projet porté par Bernard Francou et Edson Ramirez de l'IHH de La Paz).

AguAndes est un projet de recherche de l'UMR G-EAU destiné à favoriser la gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) dans les bassins andins. Les recherches portent notamment sur la co-construction de modèles adaptés afin d'évaluer des solutions de développement économiquement viables, socialement acceptables et supportables par l'environnement. Les outils développés doivent favoriser les dialogues et les concertations entre tous les acteurs, pour que notamment la société civile soit impliquée dans les prises de décision ou pour le moins informée. Le projet pilote d'AguAndes est constitué par l'étude du bassin de Quito, Quito constituant l'implantation principale du projet depuis août 2007. Les enjeux sont largement partagés par les autres métropoles comme Lima et La Paz, mais aussi nombre d'autres bassins andins qui connaissent une forte croissance socio-économique.

Le projet Banque Mondiale

Les membres de AguAndes et Thomas Condom de HSM sont associés avec l'unité Eau du centre américain du Stockholm Environment Institute (SEI-US, www.sei-us.org) sur le projet Banque Mondiale "Assessing the Impacts of Climate Change on Mountain Hydrology : Development of a Methodology through a Case Study in Peru". Le projet vise à proposer une modélisation de bassins englacés dans l'outil d'aide à la planification WEAP (Water Evaluation and Planning ; www.weap21.org ; Yates *et al.*, 2005). Les tests vont porter sur 3 bassins péruviens (voir les cartes interactives sur <http://www.mpl.ird.fr/divha/aguandes/>, Figure 1.) : **(1) le Santa**, bassin possédant près d'un tiers des surfaces englacées du Pérou et de gros périmètres irrigués à l'aval sur des bassins limitrophes (voir Figure 2.); **(2) le Mantaro**, bassin produisant plus de 30 % de l'énergie hydro-électrique du Pérou ; **(3) le Rimac**, bassin en amont de Lima. Les impacts du changement climatique sur l'hydrologie alto andine seront évalués au travers de simulations de scénarios climatiques proposés par NCAR (National Center for Atmospheric Research), PNNL (Pacific Northwest National Laboratory) et SENAMHI (www.senamhi.gob.pe).

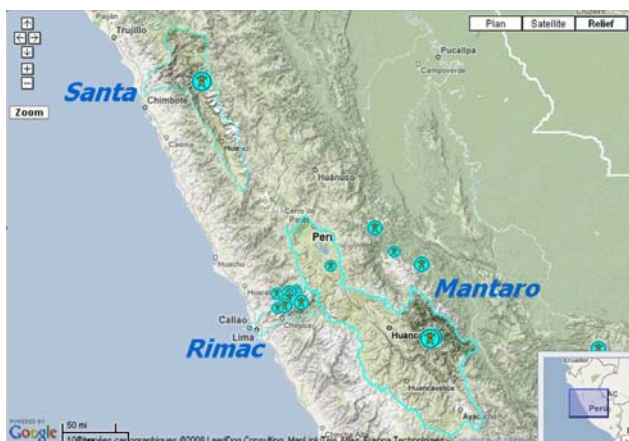


Figure 1. Les bassins d'étude au Pérou

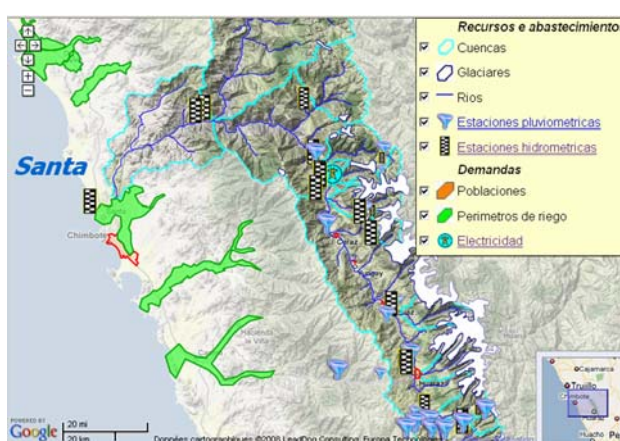


Figure 2. Le bassin du Santa

Les avancées de la modélisation

La formulation des glaciers dans WEAP va s'appuyer sur l'approche semi-distribuée préconisée dans WEAP pour construire un modèle pluie-débit d'une région montagneuse. Les processus pluie-débit sont ainsi simulés en divisant d'abord un bassin en sous-bassins qui sont les aires contributives au-dessus des points de mesure hydrologiques ou des points de gestion (réservoirs, captages, etc). De plus, les sous-bassins sont divisés en bandes d'altitude (Figure 3). Chaque bande d'altitude d'un sous-bassin est alors représentée comme un objet unique "catchment" de WEAP dans lequel l'évolution temporelle de l'occupation des sols (définie en pourcentages d'occupation de couverts types) et l'évolution des conditions climatiques (homogènes sur cet espace) peuvent être imposées (voir exemple Figure 4).

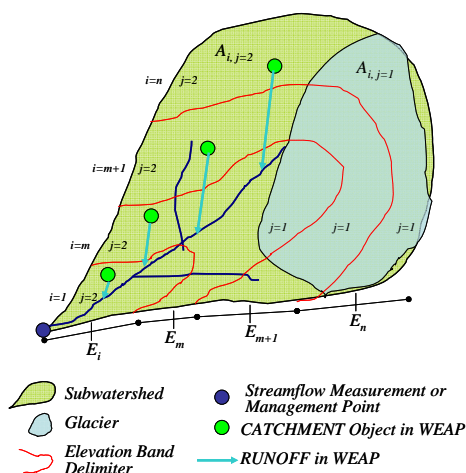


Figure 3. Schéma d'un sous bassin englacé

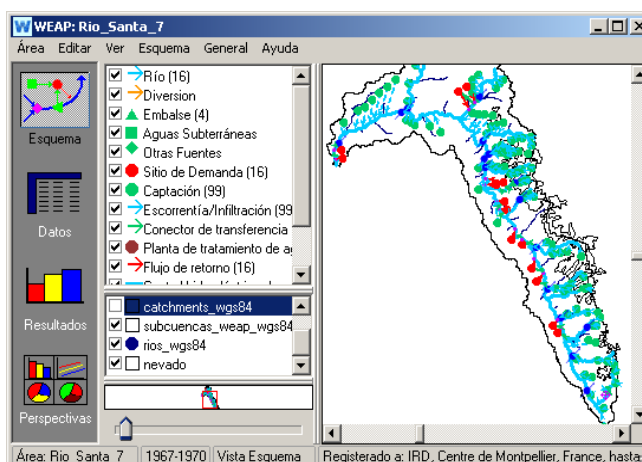


Figure 4. Modèle semi-distribué du Santa sous WEAP

Le modèle sera initialisé en utilisant les données issues d'un SIG pour estimer les parts englacées et non englacées de chaque bande de tous les sous-bassins définis. Les calculs seront menés à 2 échelles de temps: le mois et l'année hydrologique.

Pour chaque mois, la contribution à l'écoulement de surface de chaque partie englacée sera estimée par l'adaptation d'une méthode proposée par (Schaefli *et al.*, 2005) qui distingue écoulement provenant de la neige et écoulement provenant de la glace au pas de temps journalier. Cette méthode a été adaptée par Suarez *et al.* (2008) pour modéliser au pas de temps mensuels des écoulements des bassins partiellement englacés de la Cordillère Blanche au Pérou. Il sera notamment proposé un calcul du ratio de temps dans le mois où le glacier est non recouvert de neige, afin de mieux approcher la fonte de la glace par une méthode degré-jour. Le modèle "partie englacée" va comporter 4 paramètres de calage : 2 pour la glace, 2 pour la neige.

L'écoulement des parties non englacées est calculé à partir du modèle à réservoirs de WEAP (Yates *et al.*, 2005). Les écoulements des parties englacées et non englacées sont sommés pour calculer l'écoulement à l'exutoire de chaque sous bassin.

A chaque fin d'année hydrologique, il sera calculé un bilan en volume d'eau de chaque partie englacée (soit par bande d'altitude) par la somme sur l'année des entrées (précipitation totale) – sorties (écoulements). Il sera ensuite effectué un bilan de masse sur tout le glacier, en tenant compte des densités respectives de la glace et de la neige, qui conduit à l'évaluation de la variation de volume glaciaire. A partir de cette variation de volume, la variation de surface glaciaire sera calculée (relation $V=c.A^p$, Bahr *et al.* 1997) et l'évolution de la géométrie du glacier sera effectuée en considérant que la variation de surface s'applique en pied de glacier.

La calibration des modèles utilisera les mesures d'écoulement aux stations de contrôle mais aussi le calcul de la ligne d'équilibre des glaciers, ligne des points du glacier où le bilan de masse est nul. L'altitude de cette ligne (usuellement désignée par ELA, *Equilibrium Line Altitude*) peut être connue par des mesures in situ ou peut être évaluée par des formules calées régionalement (Condom *et al.*, 2007).

Marisa Escobar et David Purkey (SEI-US) viennent d'achever fin décembre le développement d'un prototype du modèle glacier. Ce prototype sera testé et calibré sur des bassins fortement englacés du Santa pour fin janvier 2009.

Il est à noter que ce présent contrat avec la Banque Mondiale, modeste dans sa durée (9 mois) a pour finalité de démontrer : (a) la faisabilité de l'intégration des glaciers dans l'outil d'aide à la planification WEAP ; (b) l'intérêt pour les études d'adaptation aux changements globaux et l'appui à la répartition de l'eau dans les Andes. D'autres financements plus importants sont en train d'être recherchés, auprès de la Banque Mondiale (cf Proyecto Adaptation to the Impact of Rapid Glacier Retreat in the Tropical Andes, www.mpl.ird.fr/divha/aguandes/socios.htm#praa) et de la Banque Interaméricaine de Développement (cf. réunion avec la BID à Washington lors de la mission de J.C. Pouget aux USA en février), afin de continuer ces recherches et les développements de méthodologies et d'outils avec la forte volonté de former des chercheurs et des cadres locaux pour assurer la réplification sur de nombreux bassins andins.

Demande budgétaire

Le financement demandé vise à :

- (1) **amorcer l'adaptation de la modélisation proposée au Pérou à d'autres bassins andins partiellement englacés en Equateur et en Bolivie.** Les missions proposées pour Jorge Molina (IHH de la Universidad Mayor de San Andrés de La Paz, www.umsa.bo), Edson Ramirez (IHH), Cayo Ramos (Prof. Universidad Agraria La Molina de Lima, www.lamolina.edu.pe), Wilson Suarez, Marcos Villacis (Escuela Politécnica Nacional de Quito, www.epn.edu.ec) visent à assurer la formation à la modélisation initiée au Pérou et son adaptation aux bassins fortement englacés des environs de Quito (Antisana, cf. Villacis, 2008, Cotopaxi et Cayambe) et de La Paz.
- (2) **favoriser la poursuite de collaborations avec SEI-US afin de pouvoir influencer sur les développements de WEAP.** La mission de J.C. Pouget en février à Boston va permettre de travailler avec Jack Sieber, le responsable informatique de WEAP, et David Purkey, le Responsable Eau de SEI-US, sur l'intégration du modèle glacier dans WEAP et sur les stratégies de développement informatique (Pouget, 2008) : couplage avec Google Maps et Google Earth (www.mpl.ird.fr/divha/aguandes/), utilisation des technologies XML (Extensible Markup Language), interopérabilité des modèles (par exemple, utilisation possible des modèles GR, ou d'autres modèles pluie-débit), développement de versions sous licence libre, etc.

- (3) **valoriser l'approche développée par des publications.** La mission de Thomas Condom en avril vise notamment à travailler sur deux articles d'ores et déjà prévues : un sur la méthodologie de modélisation, un sur la première application sur le bassin du Santa. Ces articles vont être proposés à *Water Resources Research*, car la présentation de notre projet par David Purkey aux journées de l'American Geophysical Union (AGU, cf. www.agu.org/journals/wr/) à San Francisco début décembre a été très bien perçue. Les adaptations aux autres bassins andins devraient donner matière à plusieurs publications. D'autres revues seront ciblées : *Hydrology and Earth System Sciences*, *Hydrological Sciences*, *Global & Planetary Change*, *Water International*, etc.
- (4) **favoriser la création d'un réseau Gestion Intégrée des Ressources en Eau dans les Andes.** Ce réseau, qui pourrait s'appeler *ACAR Agua (Adaptaciones a los Cambios e Apoyo a la Repartición del Agua)*, est complémentaire au réseau très actif "*Nieve y Hielo*" initié par Bernard Franco. Il est ainsi proposé, afin de favoriser les synergies, d'étoffer la 8ème rencontre du groupe de travail Nieve y Hielo (GTNH) d'Amérique latine prévu sur Quito en octobre 2009 (thème la modélisation) avec la participation de notre groupe de travail orienté "gestion des ressources en eau". Cette rencontre est organisée sur 3 jours sous formes d'ateliers, où nous présenterons notamment nos travaux de modélisation sur le Santa. Nous allons organiser, en marge de cette réunion, une formation de 2 jours "WEAP et le changement climatique", formation assurée par le Stockholm Environment Institute (www.sei-us.org). La rencontre GTNH est co-financée par le PHI-UNESCO (pour les missions des représentants de chaque pays), par le Service de la Coopération Régionale Andine dirigé par Jean Joinville Vacher à Lima (un financement de 8 000 \$ est demandé dont le principe est déjà acquis), par le Secrétariat de la Recherche et de la Technologie d'Équateur (www.senacyt.gov.ec, financement 15 000 \$). La formation WEAP, évaluée à 10 000 \$ va être co-financée par le FONAG (www.fonag.org.ec), notre partenaire principal sur Quito, et le Projet d'Adaptation au Changement Climatique en Équateur (www.pacc-ecuador.org). Le co-financement IFR-ILEE est demandé pour assurer la venue de divers partenaires: Jorge Molina (IHH de la Universidad Mayor de San Andrés de La Paz, www.umsa.bo), Cayo Ramos (Prof. Universidad Agraria La Molina de Lima, www.lamolina.edu.pe), Wilson Suarez.
- (5) **sensibiliser les unités de l'ILEE à l'outil WEAP et aux études d'adaptation aux changements globaux.** Il est demandé un financement afin d'assurer la venue de 2 représentants de l'IFR-ILEE sur Quito en octobre pour la rencontre Modélisation et la formation WEAP. Il pourra être ainsi discuté de l'opportunité de création d'un réseau *ACAR Eau (Adaptations aux Changements et Appui à la Répartition de l'Eau)* au sein du pôle Eau de Montpellier. Ce projet favoriserait les échanges méthodologiques entre les projets Andes, Garonne (cf. l'APR GICC 2008, *Les étiages et la gestion de l'eau dans le bassin de la Garonne à l'épreuve du changement climatique : Vers une stratégie d'adaptation des usages ?*, où l'UMR G-EAU est largement représentée), Volta et Niger (cf. les réponses de G-EAU et HSM aux Challenge Programs qui utilisent ou vont utiliser WEAP). Nous proposons ainsi la venue de personnes déjà impliquées dans ces projets : Flavie Cernesson de l'UMR TETIS, associée à l'APR GICC Garonne, Marjorie Le Bars ou Andrew Ogilvie de l'UMR G-EAU, associé au Challenge Program Niger.

Financements déjà obtenus ou en voie d'obtention

Ces financements s'élèvent au total à environ 77 000. \$ et à **55 000. \$**, salaires des personnels permanents et contractuels exclus, à savoir :

- (1) **Budget du contrat IRD – Banque Mondiale** "Assessing the Impacts of Climate Change on Mountain Hydrology: Development of a Methodology through a Case Study in Peru" signé le 25 juillet 2008, pour une durée de 9 mois.

	Montant total :	43 870. \$
Dont	Achat matériels et données :	9 000. \$
	Frais de missions :	7 000. \$
	<i>Contrats temporaires :</i>	<i>22 000. \$</i>
	Documentation et édition :	3 000. \$

- (2) **Financement par le Service de la Coopération Régionale Andine** de la venue de divers partenaires sud américains pour participer à la rencontre GTNH d'octobre 2009 à Quito. Un financement de **8 000 \$** est demandé dont le principe est déjà acquis.
- (3) **Financement de l'organisation de la rencontre GTNH d'octobre 2009 à Quito** par le Secrétariat de la Recherche et de la Technologie d'Equateur (www.senacyt.gov.ec). Un financement de **15 000 \$** est assuré dans la Convention EPN-SENACYT "Impact du changement climatique et de la variabilité climatique sur le régime hydrologique des bassins partiellement englacés. Cas d'étude : Volcan Antisana", convention gérée par Remigio Galarraga, Professeur à l'EPN, et Marcos Villacis.
- (4) **Financement de la formation de 2 jours "WEAP et le changement climatique"** d'octobre 2009 à Quito. Cette formation assurée par le Stockholm Environment Institute (www.sei-us.org) est évaluée à **10 000 \$** et va être co-financé par le FONAG (www.fonag.org.ec), le Projet d'Adaptation au Changement Climatique en Equateur (www.pacc-ecuador.org) et le SENAGUA, Secrétariat National de l'Eau d'Equateur.

Détails des dates et coûts des missions

Le tableau suivant présente le détail des différentes missions prévues et leurs coûts estimés à partir des prix des vols obtenus sur opodo (30 décembre 2008) et des frais de mission calculés sur la base de 120 € par jour.

mission	Départ		Retour		Coûts estimés
	lieu	date	lieu	date	
J.C. Pouget	Quito Mariscal Sucre (Equateur)	sam 7-fév-2009 7h30	Washington R Reagan National	sam 14-fév-2009 5h37	555.73 €
USA - février	Baltimore (Maryland)	lun 9-fév-2009 19h15	Boston Logan International	ven 23-fév-2009 17h	131.10 €
					840.00 €
				Sous-total	1 526.83 €
Thomas Condom	Lima J Chavez (Pérou)	lun 13-avr-2009 12h50	Quito Mariscal Sucre (Equateur)	dim 19-avr-2009 9h10	461.52 €
Quito - avril					840.00 €
				Sous-total	1 301.52 €
Edson Ramirez	La Paz El Alto (Bolivie)	dim 14-juin-2009 21h55	Lima J Chavez (Pérou)	ven 19-juin-2009 12h40	419.78 €
Lima – juin					720.00 €
				Sous-total	1 139.78 €
Marcos Villacis	Quito Mariscal Sucre (Equateur)	lun 15-juin-2009 9h10	Lima J Chavez (Pérou)	sam 20-juin-2009 12h50	443.20 €
Lima - juin					720.00 €
				Sous-total	1 163.20 €
Wilson Suarez, Cayo Ramos	Lima J Chavez (Pérou)	lun 12-oct-2009 12h50	Quito Mariscal Sucre (Equateur)	dim 18-oct-2009 9h10	443.20 €
Quito – octobre					840.00 €
			Pour 2 personnes	Sous-total	2 566.40 €
Jorge Molina	La Paz El Alto (Bolivie)	dim 11-oct-2009 21h55	Quito Mariscal Sucre (Equateur)	dim 18-oct-2009 9h10	535.44 €
Quito – octobre					840.00 €
				Sous-total	1 375.44 €
Membres IFR-ILEE	Quito Mariscal Sucre (Equateur)	lun 19-oct-2009 9h10	Lima J Chavez (Pérou)	sam 24-oct-2009 12h50	1 149.36 €
Quito - octobre					840.00 €
			Pour 2 personnes	Sous-total	3 978.72 €
				Total	13 051.89 €

Le coût total estimé de 13 000. € correspond à environ 16 500. \$ (taux de change de décembre 2008 : 0.79). Le total du financement correspond donc à (16 500. \$ + 55 000. \$), soit 71 500. \$. **Le cofinancement demandé à l'IFR-ILEE de 16 500. \$ est bien inférieur au 25% du financement total, correspondant à 17 900. \$, soit environ 14 000. €.**

Récapitulatif des demandes de financement de missions

- 1 500. € Mission de J.C. Pouget en février 2009, à Boston sur la définition de stratégies de développement logiciel avec Jack Sieber, le responsable informatique de WEAP, et David Purkey, le Responsable Eau de SEI-US, et à Washington pour une réunion avec la BID (Federico Basanes, FEDERICOB@iadb.org ; Fernando Soares, FERNANDOB@iadb.org)
- 1 300. € Mission de Thomas Condom à Quito en avril 2009, afin de travailler avec la Jeune Equipe de Marcos Villacis de l'EPN (Escuela Politécnica Nacional de Quito, www.epn.edu.ec) sur l'adaptation du modèle sur les bassins englacés de Quito et sur la rédaction d'articles avec J.C. Pouget.
- 2 300. € Missions de Marcos Villacis (EPN Quito) et Edson Ramirez (IHH de la Universidad Mayor de San Andrés de La Paz, www.umsa.bo) pour participer au Séminaire de restitution et de formation organisé par la Banque Mondiale à Lima en juin 2009
- 3 900. € Missions de Wilson Suarez et Cayo Ramos de Lima, et de Jorge Molina (IHH La Paz) pour participer à la rencontre GTNH sur la modélisation et à la formation "WEAP et le changement climatique" à Quito en octobre 2009
- 4 000. € Missions de 2 représentants de l'IFR-ILEE pour participer à la rencontre GTNH sur la modélisation et à la formation "WEAP et le changement climatique" à Quito en octobre 2009. Nous proposons la venue de Flavie Cernesson de l'UMR TETIS, associée à l'APR GICC Garonne, et Marjorie Le Bars ou Andrew Ogilvie de l'UMR G-EAU, associé au Challenge Program Niger.

Plan de valorisation scientifique

Publications : Deux articles sont prévus : un sur la méthodologie de modélisation, un sur la première application sur le bassin du Santa et vont être proposés à *Water Resources Research*. Les adaptations aux autres bassins andins, au Pérou, en Equateur et en Bolivie, devraient donner matière à plusieurs publications. D'autres revues seront ciblées : *Hydrology and Earth System Sciences*, *Hydrological Sciences*, *Global & Planetary Change*, *Water International*, etc.

Logiciels : Les développements en Javascript avec les API (Application Program Interface) Google Maps (<http://code.google.com/intl/fr/apis/maps/>) développés par J.C. Pouget (cf. www.mpl.ird.fr/divha/aguandes), qui visent à assurer la diffusion et le partage des informations sur les évolutions passées et prévues des systèmes étudiés afin d'aider à une gestion concertée des ressources en eau et à son adaptation aux changements globaux, vont faire l'objet d'une déclaration en logiciel libre (licence française de logiciel libre CeCILL, conforme à la GNU GPL). L'évolution du statut des codes développés sous WEAP sera discutée lors de la mission de J.C. Pouget à Boston en février 2009. Une stratégie d'évolution vers le logiciel libre devrait être proposée.

Références

- Bahr, D. B., M. F. Meier, and S. D. Peckham. 1997. The physical basis for glacier volume-area scaling. *Journal of Geophysical Research* 102:20355-20362.
- Condom, T., A. Coudrain, S. J.E., and T. Sylvain. 2007. Computation of the space and time evolution of equilibrium-line altitudes on Andean glaciers (10°N-55°S). *Global & Planetary Change* 59:189-202
- Pouget J.C., 2008. Construction orientée objet de composants de modélisation et aide à la gestion des ressources en eau, Doctorat Université Montpellier 2, (2008), 191 p.
- Pouget J.C., Calvez R., Le Goulven P., Lloret P., Villacis M., 2008. Challenges of water resources planning in the Andes - The case of Quito in Ecuador. XIIIth World Water Congress, Montpellier, France, 1-4 September 2008, 14 p.

- Schaefli, B., B. Hingray, i. M. Niggli, and A. Musy. 2005. A conceptual glacio-hydrological model for high mountainous catchments. *Hydrology and Earth System Sciences* 9:95-109.
- Suarez, W., P. Chevallier, B. Pouyaud, and P. Lopez. 2008. Modelling the water balance in the glacierized Paron Lake basin (White Cordillera, Peru). *Hydrological Sciences* 53.
- Vergara, W., Deeb, A. M. , Valencia, A. M., Bradley, R. S., Francou, B., Zarzar, A., Grünwaldt, A., Haeussling, S. M., 2007. Economic Impacts of Rapid Glacier Retreat in the Andes, *Eos Trans. AGU*, 88(25), (2007), 261
- Villacis, M., 2008. Ressources en eau glaciaire dans les Andes d'Equateur en relation avec les variations du climat : Cas du volcan Antisana, Thèse Université Montpellier 2, (2008), 219 p.
- Yates, D., J. Sieber, D. Purkey, and A. Huber-Lee. 2005. WEAP21 - A demand-, priority-, and preference-driven water planning model Part 1: Model characteristics. *Water International* 30:487-500.