

Un observatoire des résurgences karstiques de l'Alto Mayo, versant amazonien des Andes du Nord Pérou

Liz Hidalgo¹⁻², James Apaestegui³, Christelle Batiot-Guilhe⁴, Jean-Loup Guyot⁵, Hervé Jourde⁴, Naomi Mazzili⁶, Jean-Sébastien Moquet⁷, William Santini⁵, Abdel Sifeddine¹.

Introduction : problématiques étudiées

Les domaines karstiques occupent près de 12% des surfaces continentales (Ford et Williams, 2007) et du fait de la forte solubilité des lithologies carbonatées, ils jouent un rôle majeur à la fois dans les flux de transferts de CO₂ entre l'atmosphère et la zone critique (Gaillardet *et al.*, 1999 ; Liu et Zhao, 2000 ; Amiotte-Suchet *et al.*, 2003 ; Hartmann *et al.*, 2009) et dans la détermination des conditions de vie (conditions physico-chimiques et sources de nutriments) des milieux aquatiques et dans les bilans d'exportation de matières dissoutes vers les océans (Meybeck, 2003).

Dans le domaine andin du bassin amazonien, les zones karstiques ont un rôle prépondérant sur la géochimie du fleuve et sur les bilans de consommation de CO₂ liés aux processus d'altération (Moquet *et al.*, 2011) malgré la faible surface qu'elles couvrent (<0.5% du bassin de l'Amazone). Cependant ces zones permettent, sur un petit territoire, d'étudier de manière exemplaire ces phénomènes de transfert en domaine carbonaté. En effet, le Pérou concentre près de 90% de ces formations qui s'étagent des sommets de la cordillère (à plus de 5000 m d'altitude) jusqu'au piedmont amazonien (400 m) dans une grande variété d'écosystèmes tropicaux. Bien que ces zones représentent une source majeure de matières dissoutes exportées par l'Amazone, elles n'ont jamais été étudiées à l'échelle de l'aquifère karstique. Des reconnaissances récentes, réalisées dans le cadre d'un projet conjoint SO HYBAM – LMI PALEOTRACES (Apaestegui *et al.*, 2014), ont révélé l'existence de puissantes résurgences sur le piedmont amazonien du Pérou, probablement parmi les plus importantes de la planète.



Photo 1. Le massif du Cerro Blanco, vu depuis les rizières de la vallée de l'Alto Mayo. Source : Jean-Loup Guyot.

affluent du Rio Huallaga, lui-même affluent du Rio Marañón, formateur de l'Amazone au Pérou (Fig. 1). Le bassin de l'Alto Mayo est une vaste plaine située à 800-900 m d'altitude, bordée au Sud par les reliefs andins carbonatés jurassiques et crétacés du Cerro Blanco (Photo 1), et séparée du bas Rio Mayo par une importante faille active. Ces

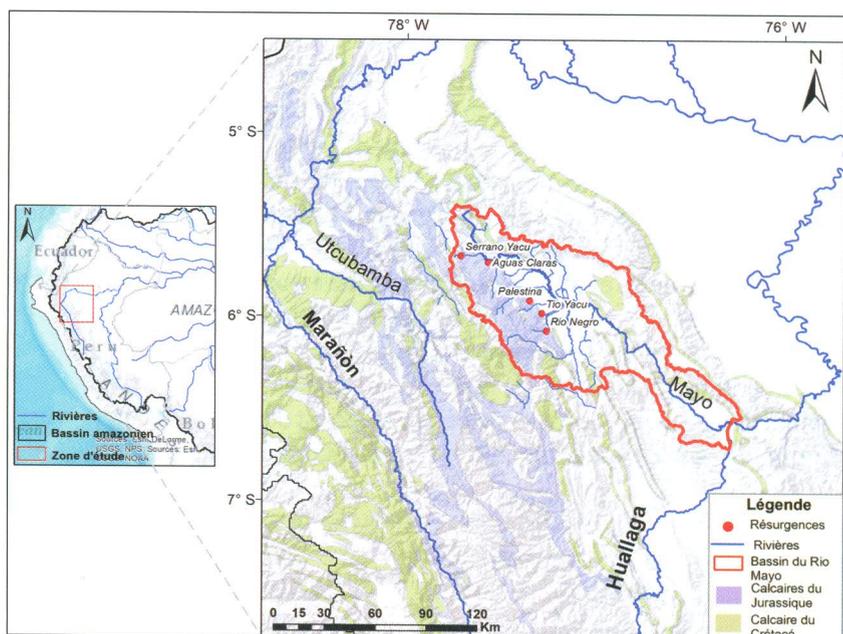


Figure 1. Carte de situation du bassin du Rio Mayo (Pérou), et des résurgences étudiées. Source : d'après la carte géologique au 1/100 000. Institut National Géologique, Minier et Métallurgique du Pérou.

Contexte géographique et climatique

Ces résurgences sont situées dans le haut bassin du Rio Mayo (Alto Mayo),

1. IRD-LOCEAN, Paris, France. Courriel : lizstefanny@hotmail.com

2. UNTRM, Chachapoyas, Pérou.

3. IGP, Lima, Pérou.

4. UM2-HSM, Montpellier, France.

5. IRD-GET, Lima, Pérou.

6. EMMAH-UAPV, Avignon, France.

7. IPGP, Paris, France.

reliefs de l'Alto Mayo, qui sont les premiers contreforts rencontrés par les masses d'air chaudes et humides provenant d'Amazonie, vont générer d'intenses précipitations.

Mise en place du réseau

Le réseau installé (voir figure 1) depuis 2015 concerne 3 résurgences importantes, situées dans la province de Rioja (région de San Martín, Pérou), qui sont du Nord au Sud : Rio Aguas Claras (Photo 2), Rio Tioyacu (Photo 3), et Rio Negro, et une 4^{ème} de plus faible débit, mais avec une chronique plus ancienne (Cueva de Palestina). À chaque résurgence, une sonde CTD (*Conductivity, Temperature and Depth*) a été installée pour la mesure du niveau d'eau,

de la température et de la conductivité électrique de l'eau (Tableau 1). Les jaugeages sont effectués par des techniques très variées suivant les sites et les conditions hydrologiques : courantomètre à hélice (modèle OTT C31 - Photo 4), à induction électro magnétique (modèle OTT, MF Pro), à effet Doppler (modèle RDI ADCP 1200 KHz sur flotteur - Photo 5), et radar de surface (VIATRONICS, SVR2). Toutes les stations sont à ce jour calibrées.

Un observateur recruté sur place échantillonne deux fois par mois l'eau des résurgences pour réaliser les déterminations physico-chimiques. Tous les échantillons sont analysés au laboratoire de l'UMR HSM (Hydro Sciences Montpellier).



Photo 2. Résurgence du Rio Aguas Claras, relevé de la CTD. Source : Jean-Loup Guyot.



Photo 4. Résurgence de la Cueva de Palestina, jaugeage de crue au moulinet. Source : Jean-Loup Guyot.



Photo 3. Résurgence du Rio Tioyacu. Source : Jean-Loup Guyot.



Photo 5. Résurgence du Rio Negro, jaugeage ADCP sur flotteur. Source : Jean-Loup Guyot.

Résurgence	Longitude	Latitude	Altitude	Superficie	CTD	Débit	Temp.	Cond.
Rio Aguas Claras	-77,5749	-5,7226	970	107	09/2014->	7,8	17,8	267
Cueva de Palestina	-77,3521	-5,9272	900	13	05/2011->	0,6	19,3	212
Rio Tioyacu	-77,2875	-5,9920	850	40	09/2016->	5,8	18,3	270
Rio Negro	-77,2626	-6,0876	870	448	06/2015->	24	16,5	305

Tableau 1. Résurgences de l'Alto Mayo (San martin, Pérou) : coordonnées (latitude, longitude, altitude) des stations, superficie estimée des bassins versants (km²), période d'observation, données moyennes de débit (en m³/s), de température (en °C), et de conductivité (en µS/cm). Source : d'après Grandjouan et al. (sous presse).

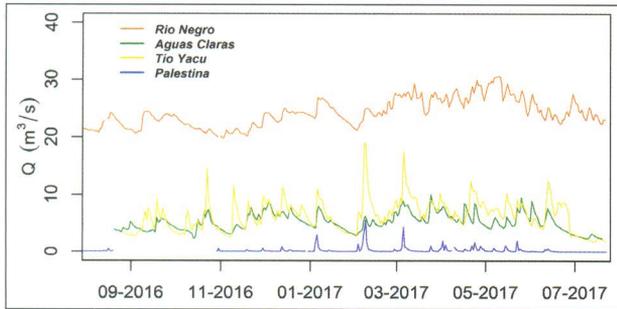


Figure 2. Hydrogramme 2016-2017 des 4 résurgences étudiées.

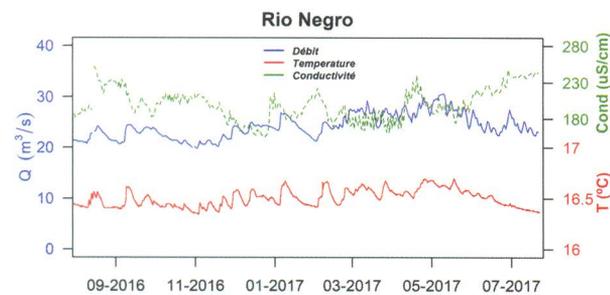


Figure 3. Résurgence du Rio Negro, données CTD 2016-2017.

Premiers résultats

Les tributaires de rive droite de l'Alto Mayo, provenant du massif karstique, apportent 60% du débit au Rio Alto Mayo, pour 35% de la surface du bassin. La plus grosse résurgence de ce massif en matière de débit (Rio Negro = 24 m³/s) présente une faible variabilité du débit pendant le cycle hydrologique et fait davantage penser à l'exutoire d'un aquifère poreux (Fig. 2 et 3).

Cette relative faible réactivité aux événements pluvieux est également observée sur la résurgence du Rio Aguas Claras. Par contre, les résurgences du Rio Tioyacu (Figure 4) et Palestina présentent un comportement plus typique des aquifères karstiques, avec une réponse rapide aux précipitations (Grandjouan, *et al.* sous presse).

Le tableau 1 présente la localisation des résurgences, les paramètres mesurés par les CTD, et le débit moyen. La conductivité électrique de l'eau des résurgences varie de 200 à 350 µS/cm. La mesure des températures des résurgences donne des indices sur l'origine des eaux : les plus froides proviendraient d'altitudes plus élevées (environ 2 000 m pour les 16°C du Rio Negro), selon le profil altitudinal régional de température.

La chimie de l'eau de ces résurgences est dominée par Ca²⁺ et HCO₃⁻. Cependant, la résurgence du Rio Aguas Claras présente des concentrations de SO₄²⁻ plus élevées (Figure 5), dont l'origine peut être liée à la présence de diapirs évaporitiques, comme cela est observé plus au Sud, dans la région de Moyobamba.

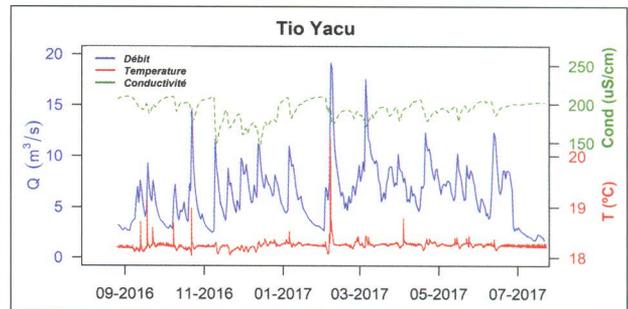


Figure 4. Résurgence du Rio Tioyacu, données CTD 2016-2017.

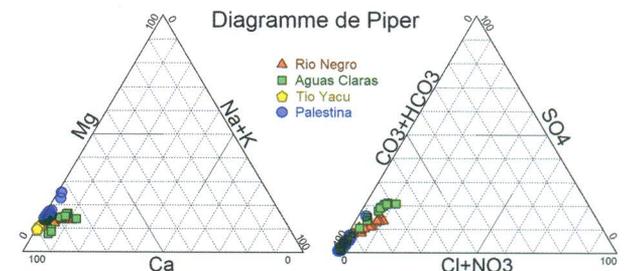


Figure 5. Diagramme de Piper des résurgences étudiées.

Conclusion : résultats attendus

L'observatoire mis en place sur les karsts du piedmont andino-amazonien de l'Alto Mayo, non affectés par l'action de l'homme, est un réseau d'observation et d'expérimentation. Les données obtenues permettront de connaître la variabilité temporelle du cycle hydrogéochimique, et donc d'évaluer plus précisément l'apport géochimique, et plus particulièrement l'apport en nutriments, du karst andin à l'Amazonie. Elles permettront également d'évaluer l'impact du changement climatique sur les ressources hydriques, sur les flux géochimiques et sur les bilans de consommation de CO₂ de ces aquifères karstiques du bassin de l'Amazonie. Enfin, ces données permettront d'estimer la vitesse actuelle d'altération des séries carbonatées dans cette région des Andes tropicales. L'ensemble de ces résultats et de leurs interprétations sont attendus pour fin 2018. Ils soulèveront d'autres questions scientifiques qui seront abordées dans les travaux de chercheurs et étudiants des différentes disciplines.

Références

- Amiotte Suchet P., Probst J.-L. et Ludwig W., 2003. Worldwide distribution of continental rock lithology: Implications for the atmospheric/soil CO₂ uptake by continental weathering and alkalinity river transport to the oceans. *Global Biogeochemical Cycles*, 17(2).
- Apaéstegui J., Da Cruz F.-W., Sifeddine A., Vuille M., Espinoza

- Villar J.-C., Guyot J.-L., Khodri M., Strikis N., Santos R.-V., Cheng H., Edwards R.-L., Carvalho E. et Santini W., 2014. Hydroclimate variability of the northwestern Amazon Basin near the Andean foothills of Peru related to the South American Monsoon System during the last 1600 years. *Climate of the Past*, 10: 1967-1981.
- Ford DC et Williams P., 2007. *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. Wiley, Chichester, 576 p.
 - Gaillardet J., Dupré B., Louvat P. et Allègre C.-J., 1999. Global silicate weathering of silicates estimated from large river geochemistry. *Chemical Geology, Special issue Carbon Cycle*, 7(159) : 3-30.
 - Grandjouan O., Hidalgo L., Apaéstegui J., Baby P., Cochonneau G., Condori E., Espinoza J.-C., Fraizy P., Huaman D., Jourde H., Mazzilli N., Morera S., Peña F., Renou F., Robert X., Santini S., Sifeddine A. et Guyot J.-L. (sous presse). Las resurgencias del Alto Mayo (San Martín, Perú): estudio hidrológico sobre un karst tropical andino-amazónico. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*.
 - Hartmann J., Jansen N., Dürr H.-H., Kempe S. et Köhler P., 2009. Global CO₂-consumption by chemical weathering: What is the contribution of highly active weathering regions? *Global and Planetary Change*, 69 : 185-194.
 - Liu Z. et Zhao J., 2000. Contribution of carbonate rock weathering to the atmospheric CO₂ sink. *Environmental Geology*, 39(9) : 1053-1058.
 - Meybeck M., 2003. Global occurrence of major elements in rivers. *Treatise on Geochemistry In: HD Holland, K.K Turekian (eds) Treatise on Geochemistry, vol 5 Surface and ground water, weathering and soils (J. Drever ed), Pergamon, 207-224.*
 - Moquet J.-S., Crave A., Viers J., Seyler P., Armijos Cardenas E.-N., Bourrel L., Chavarri Velarde E.-A., Lagane C., Laraque A., Lavado Casimiro W.-S., Pombosa Loza R., Noriega Flores L., Vera Bustamente A.-B., Guyot J.-L., 2011. Chemical weathering and atmospheric/soil CO₂ uptake in the Andean and foreland Amazon basins. *Chemical Geology*, 287(1-2) : 1-26.