



La télédétection de la neige dans les Andes comme outil de prévision des débits des rivières du Cuyo

Nicolas Delbart, Samuel Dunesme, Emilie Lavie, Malika Madelin et Régis Goma



Édition électronique

URL : <https://journals.openedition.org/rga/2861>

DOI : [10.4000/rga.2861](https://doi.org/10.4000/rga.2861)

ISSN : 1760-7426

Traduction(s) :

Remote sensing of Andean mountain snow cover to forecast water discharge of Cuyo rivers - URL : <https://journals.openedition.org/rga/2903> [en]

Éditeur :

Association pour la diffusion de la recherche alpine, UGA Éditions/Université Grenoble Alpes

Référence électronique

Nicolas Delbart, Samuel Dunesme, Emilie Lavie, Malika Madelin et Régis Goma, « La télédétection de la neige dans les Andes comme outil de prévision des débits des rivières du Cuyo », *Journal of Alpine Research | Revue de géographie alpine* [En ligne], 103-2 | 2015, mis en ligne le 04 septembre 2015, consulté le 08 décembre 2022. URL : <http://journals.openedition.org/rga/2861> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/rga.2861>

Ce document a été généré automatiquement le 8 décembre 2022.



Creative Commons - Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International
- CC BY-NC-ND 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

La télédétection de la neige dans les Andes comme outil de prévision des débits des rivières du Cuyo

Nicolas Delbart, Samuel Dunesme, Emilie Lavie, Malika Madelin et Régis Goma

Introduction

- 1 L'aridité de la région du Cuyo, avec ses 150 à 300 mm de précipitations annuelles, sur le piémont des Andes, n'a pas empêché l'installation humaine, puisque la Province de Mendoza compte 1,7 million d'habitants (Recensement INDEC, 2010), dont 97 % sont concentrés dans des oasis, essentiellement dans l'agglomération de Mendoza (1,5 million d'habitants), ou dans d'autres villes comme Tunuyán, San Martín ou San Rafaél. Quatre rivières (du nord au sud : Mendoza, Tunuyán, Diamante et Atuel) irriguent trois oasis¹ (l'oasis Nord, 2500 km² ; l'oasis Centre, également appelée Valle de Uco, 800 km² ; et l'oasis Sud, 1600 km²) et alimentent en eau les centres urbains. L'écoulement dans les oasis Nord et Sud est régulé artificiellement par les barrages situés en leur amont. Au contraire, l'oasis centrale ne dispose pas encore de tel barrage et de régulation de l'écoulement, les fermiers utilisent l'eau souterraine mais un nouveau barrage est prévu par les gestionnaires du bassin versant du Tunuyan supérieur pour réguler en amont l'écoulement dans la Valle del Uco.
- 2 La Province de Mendoza et son organisme en charge de la gestion de l'eau, le Département Général d'Irrigation (DGI for *Departamento General de Irrigación*) ont adopté une gestion dite « à la demande » (Lavie *et al.*, 2015), c'est-à-dire qu'ils cherchent à augmenter les volumes d'eau pour satisfaire les besoins et non à adapter la demande à l'offre disponible². Le stockage des débits d'étiage hivernaux (embâcle nival) dans de grands lacs de barrage, ou le refus de laisser un débit réservé aux rivières pour alimenter les zones humides situées en aval dans la plaine sont des exemples illustratifs de la politique hydraulicienne menée à Mendoza. Pour autant, depuis 2008, des hivers

pauvres en précipitations neigeuses et des étés très chauds ont obligé les gestionnaires à repenser leur politique en tentant de faire stagner, voire baisser, la demande, *via* des campagnes de conscientisation (Lavie et Beltrando, 2013).

- 3 Les volumes prélevés par les gestionnaires sont assez importants, en particulier à partir du début de la saison végétative (octobre), les besoins maximaux étant atteints en été, lorsque les besoins agricoles et domestiques sont à leur maximum. A partir de mars, les industries agro-alimentaires (mise en conserve de fruits, vinification du raisin pour la production de vins), prennent le relais en termes de consommation d'eau. Les trois oasis n'ont pas les mêmes besoins, mais pour toutes les prélèvements sont tellement importants que les écoulements en aval des oasis sont très faibles pour les quatre rivières étudiées (2,5 m³/s pour la rivière Mendoza par exemple³), alors que leur module moyen est de 30 à 50 m³/s en amont des zones irriguées. Les gaspillages sont importants et s'expliquent par une gestion à l'échelle fine peu efficace. Par exemple, l'eau domestique n'est pas payée à la consommation mais au forfait, ce qui peut pousser aux gaspillages ; l'irrigation se modernise (goutte-à-goutte, micro-aspersion) dans les nouvelles terres arables gagnées sur le piémont, mais reste majoritairement gravitaire, ce qui favorise l'évaporation.
- 4 Au-delà des questions de la gestion et de la consommation, savoir évaluer les volumes d'eau disponibles à court terme, c'est-à-dire l'offre, reste essentiel pour une société fondée sur l'irrigation. Le risque de pénurie en eau dans les oasis sud-américaines a été étudié depuis longtemps (Leiva, 1999 ; Cobos, 2002 ; Corripio *et al.*, 2008 ; Cossart *et al.*, 2010), la fonte des glaciers andins étant vue comme un enjeu pour la disponibilité à long terme des ressources en eau, nécessaires pour les cultures des piémonts péruvien, chilien ou argentin (Collin-Delavaud, 1968 ; Lavie, 2009 ; Poncet, 2011 ; Marshall, 2014). Cependant, l'eau de fonte annuelle des neiges représente la principale source d'alimentation des rivières et des aquifères (par ex. à hauteur de 85 % pour la rivière Mendoza, selon Abraham *et al.*, 2007). En effet, les variations des débits mensuels et annuels des rivières des Andes centrales (quatre en Argentine et six au Chili) se sont révélées significativement corrélées aux variations de l'accumulation nivale régionale estimée à partir des mesures de l'équivalent en eau du manteau neigeux effectuées pour six stations d'altitude entre 1955 et 2002 (Masiokas *et al.*, 2006). L'accumulation nivale régionale est elle-même corrélée aux précipitations à Santiago, à l'ouest de la cordillère, les fortes accumulations ayant généralement lieu durant les années *El Niño* (mais pas toujours), alors que la moitié des faibles accumulations relevées durant la période d'étude ont eu lieu durant les années *La Niña*. En conséquence, il est possible de prévoir les débits des rivières du Cuyo à partir de mesures de l'accumulation nivale si celles-ci sont disponibles, mais plus délicat à partir des indices atmosphériques tels que l'indice d'oscillation australe (ou SOI *Southern Oscillation Index*) puisque l'accumulation n'est que partiellement dépendante des conditions atmosphériques sur le Pacifique Sud (Compagnucci et Vargas, 1998).
- 5 Les mesures de terrain de l'accumulation nivale pourraient donc être à la base d'un système de prévision du débit des rivières, mais des questions à la fois techniques et d'accessibilité font que les séries de mesure sont souvent incomplètes, ce qui est le cas dans notre région d'étude (Masiokas *et al.*, 2006). La télédétection a souvent été utilisée pour estimer les propriétés du couvert neigeux saisonnier de manière synoptique (Nolin, 2010) et pour étudier l'effet de la variabilité du couvert neigeux sur le débit des rivières (par exemple Immerzeel *et al.*, 2009 ; Boudhar *et al.*, 2009). Plusieurs

technologies existent, chacune avec ses avantages et inconvénients. La télédétection micro-onde, active ou passive, permet d'estimer l'équivalent en eau du manteau neigeux (Grippa *et al.*, 2005 ; 2005, Kelly *et al.*, 2003 ; Nolin 2010) ou d'autres propriétés telles que les dates de gel/dégel (Bartsch, 2010). Cependant, la télédétection micro-onde passive a une résolution spatiale de l'ordre de 20 km ce qui rend difficile l'interprétation des données, surtout dans un contexte montagnard où l'altitude varie de manière importante dans ces 20 km. Quant à la télédétection active, les radars à ouverture synthétique disposent d'une résolution spatiale beaucoup plus fine, mais les capteurs existants n'utilisent pas encore les longueurs d'onde appropriées pour l'estimation de l'équivalent en eau, et les variations de pente complexifient fortement l'interprétation du signal. De plus, dans les deux cas, l'estimation de l'équivalent en eau n'est possible que si la neige est sèche. La télédétection optique permet de suivre la fraction enneigée de chaque pixel (Hall *et al.*, 2006 ; Salomonson et Appel, 2004 ; Chaponnière *et al.*, 2005), ou de fournir une information binaire (enneigé ou non) mais ne permet pas d'estimer l'équivalent en eau ou l'épaisseur de la neige. A moyenne résolution spatiale (à partir de 250 m), les images sont disponibles quotidiennement si les conditions nuageuses sont bonnes, ce qui permet de suivre les variations saisonnières du couvert neigeux.

- 6 Dans une précédente publication, nous avons confirmé le lien net existant entre les débits des rivières et la couverture du manteaux neigeux, grâce à l'utilisation d'images de télédétection de moyenne résolution spatiale, couvrant une large portion des Andes centrales (Delbart *et al.*, 2014). En particulier, nous y avons exploré les relations statistiques entre l'enneigement à chaque sous période (pas de temps hebdomadaire et mensuel) et le débit moyen mesuré pendant la période des hautes eaux (de septembre à avril) pour chacune des quatre rivières, montrant que ce débit est particulièrement corrélé avec l'enneigement en septembre et octobre. Ici, nous cherchons à affiner l'analyse du lien entre les variations annuelles et interannuelles de la surface enneigée et des débits, de 2001 à 2014, mais à l'échelle de chacun des quatre bassins versants séparément, et nous évaluons la possibilité d'utiliser la télédétection de la neige comme outil de prévision de débit et de la pénurie en eau.

Matériel et méthodes

- 7 Nous cherchons à analyser le lien entre les écoulements de quatre rivières, mesurés quotidiennement, et l'extension du manteau neigeux, estimée par télédétection tous les 8 jours, à l'échelle de chaque bassin versant, lui-même délimité par un Modèle Numérique d'Élévation (MNE). Toutes les données sont gratuites et disponibles facilement.

Délimiter les bassins versants

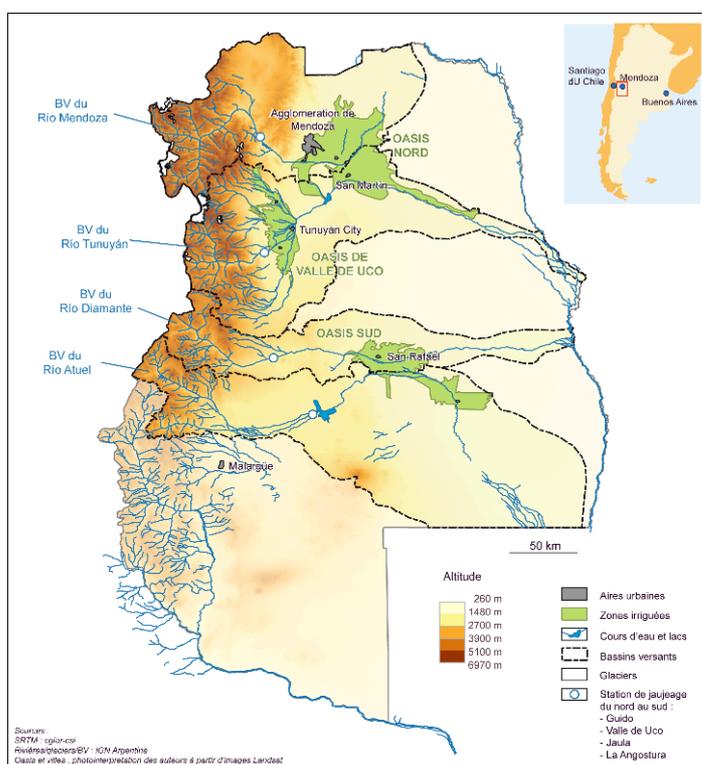
- 8 Les bassins hydrographiques ont été extraits à partir d'une procédure automatique intégrée au module « *Spatial Analyst* » du logiciel ArcGis© , appliquée au MNE issu des données du *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) disponible sur <http://earthexplorer.usgs.gov/>. Cette procédure consiste à :
 1. Comblent les cuvettes présentes sur le MNE, qui pourraient perturber la suite de l'analyse.
 2. Analyser la direction des pentes sur chaque pixel.

3. Déterminer, pour chaque pixel, l'accumulation des flux amont, afin d'aligner les points de drainage sur le réseau hydrographique issu du MNE (Fig. 2D pour le bassin versant (BV) de la rivière Mendoza) s'obtient en identifiant les pixels qui accumulent de larges quantités de flux amont.
 4. A partir des pentes, identifier automatiquement les crêtes et les limites de chaque BV en amont du point de drainage.
- 9 Les quatre résultats sont montrés sur la Fig. 2B. Les surfaces des bassins versants en amont des premiers barrages sont de 7108 km² (BV de la rivière Mendoza), 2460 km² (BV de la rivière Tunuyán), 2762 km² (BV de la rivière Diamante), 3035 km² (BV de la rivière Atuel).

Mesure des écoulements superficiels

- 10 Les données de débits sont issues d'une base de données libre et gérée par le Sous-secrétariat National aux Ressources en Eau. Plusieurs gestionnaires en charge des ressources contribuent à cette base en ligne, comme le Département Général d'Irrigation pour la Province de Mendoza. Parmi ces données, nous avons choisi les débits journaliers en m³/s puisque la base est complète depuis des années 1930 ou 1950 selon les rivières, jusqu'en juin 2014. Les débits sont automatiquement mesurés à midi pour trois des rivières, et à minuit pour la Diamante.
- 11 Cherchant à estimer les écoulements naturels pour chaque bassin, nous avons choisi les stations de jaugeage localisées juste en amont des premiers réservoirs ou barrage dérivateur (Fig. 1), soit :
- Sur la rivière Mendoza, la station Guido (32°54'55"S-69°14'16"W), en amont du lac de barrage de Potrerillos,
 - Sur la rivière Tunuyán, la station Valle de Uco (33°46'36"S-69°16'21"W), au barrage dérivateur,
 - Sur la rivière Diamante, la station Jaula (34°40'06"S-69°18'59"W), en amont du lac de barrage Aguas del Toro Lake,
 - Sur la rivière Atuel, la station La Angostura (35°05'59"S-68°52'26"W), en amont du lac de barrage El Nihuil.

Figure 1 : Les bassins versants étudiés dans la province de Mendoza.

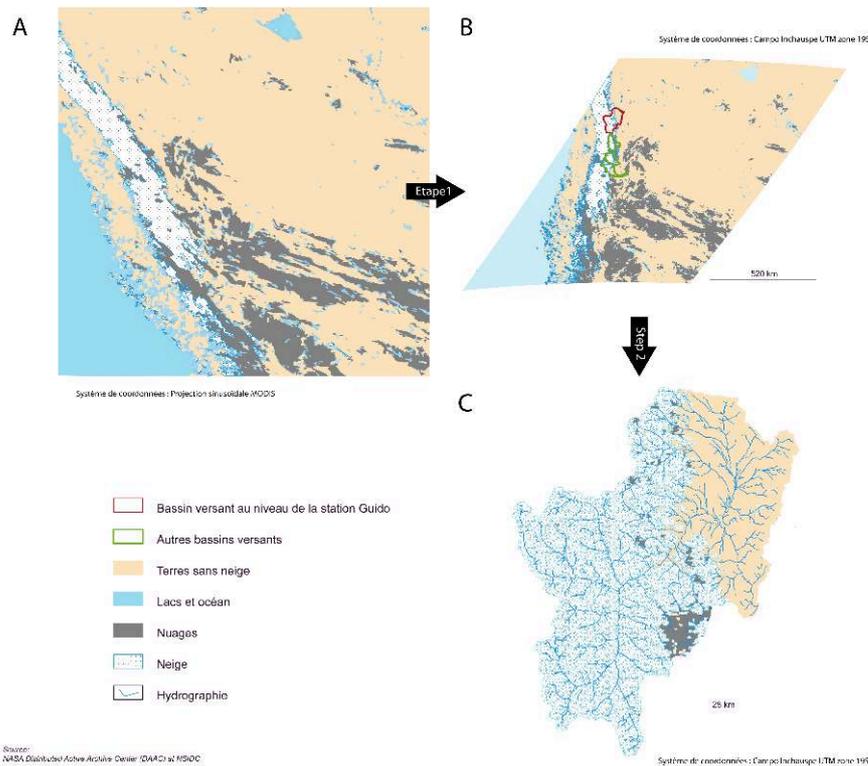


Estimer les surfaces enneigées

- 12 Des cartographies de l'extension du manteau neigeux sont fournies par le produit MOD10A2, disponible sur <http://reverb.echo.nasa.gov/reverb/>, créé à partir des données sur capteur MODIS. L'absence ou la présence de neige est dérivée pour chaque pixel de 1 km² de l'indice de neige par différence normalisée (NDSI pour Normalized Difference Snow Index) (Salomonson et Appel, 2004). Cet indice spectral combine les réflectances dans les bandes spectrales verte et moyen infrarouge, estimées à partir des mesures par satellite. Il est proche de 1 quand la neige occupe une grande partie de la surface de chaque pixel et proche de -1 quand il n'y a pas de neige. Nous utilisons la dalle référencée h12v12 (Hall *et al.*, 2006). Chaque image MOD10A2 8-jours est un composite issu de toutes les observations satellitaires valables sur une période de 8 jours : pour chaque pixel, la meilleure observation est utilisée pour détecter la neige ; cette sélection est faite pour minimiser les nuages ou d'autres effets atmosphériques. Malgré cette procédure composite, certains pixels sont classés comme « nuage », ce qui signifie qu'ils étaient nuageux pendant toute la période de 8 jours. De fait, un masque « nuage » est fourni avec les données, que nous avons utilisé pour exclure tous les pixels ainsi classés et donc inutilisables ici.
- 13 A partir de ce fichier de données, nous estimons la surface en neige et en nuage pour une période de 8 jours, et ce pour chacun des quatre bassins hydrographiques : Mendoza, Tunuyán, Diamante et Atuel. Pour extraire la surface enneigée pour chaque bassin versant à chaque date valide, nous avons développé un script Python pour exécuter automatiquement les 3 étapes présentées sur la figure 2. D'abord il re-projette tous les fichiers de données depuis la projection spécifique de MODIS vers le système de

coordonnées UTM 19S, grâce au module PyModis (<http://pymodis.fem-environment.eu/>). Ensuite, il vectorise l'image reprojétée et calcule la surface de chaque type de couverture (neige, nuage) en utilisant les modules GDAL/OGR (http://www.osgeo.org/gdal_ogr) pour chaque bassin. Ce script a été utilisé pour analyser les 674 images disponibles au moment du traitement.

Figure 2 : Des données sources aux cartes utilisables



A : Données MODIS en projection sinusoidale. B : Données MODIS reprojétées dans le système de coordonnées UTM 19S et converties du format raster en format vecteur. C : Données MODIS sélectionnées pour le BV de la rivière Mendoza et estimation des surfaces en neige et en nuages.

Analyse de la série temporelle

- 14 L'analyse des variations temporelles des surfaces enneigées et des écoulements sur la période 2001-2014 a été faite qualitativement et quantitativement. En hiver, les nuages couvrent une part significative des surfaces des bassins versants dans les images MOD12A2, jusqu'à une moyenne de 25 % pour le bassin de la rivière Tunuyán (Tableau 1), malgré la procédure de composition temporelle. Puisque les nuages peuvent cacher la neige, nous avons rejeté les estimations de surface enneigée dès que plus de 5 % de la surface du BV est donnée comme nuageuse, ce qui a eu pour conséquence de réduire fortement la quantité de données disponibles, en particulier de juin à août. Par la suite, nous avons visualisé la série temporelle des débits de chaque rivière et celle des surfaces enneigées sur le bassin versant correspondant, afin de vérifier si une relation existe entre le début de la fonte des neiges et l'amorce de la crue annuelle, et si le débit maximum annuel était directement lié à la surface maximale d'extension du couvert neigeux enregistré l'hiver précédent.

Tableau 1 : Pourcentage (%) de la couverture nuageuse moyenne par mois sur la période 2001-2013 pour chaque bassin versant

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Decembre
Mendoza	0,0	0,0	0,0	0,2	7,0	16,5	9,0	5,9	1,9	0,4	0,2	0,0
Tunuyán	0,1	0,0	0,0	2,1	15,8	25,3	17,1	12,1	4,0	1,0	0,4	0,1
Diamante	0,0	0,0	0,0	1,0	8,5	12,2	8,0	7,3	2,0	0,5	0,1	0,0
Atuel	0,0	0,0	0,0	0,2	5,7	7,5	4,9	4,7	1,4	0,2	0,1	0,0

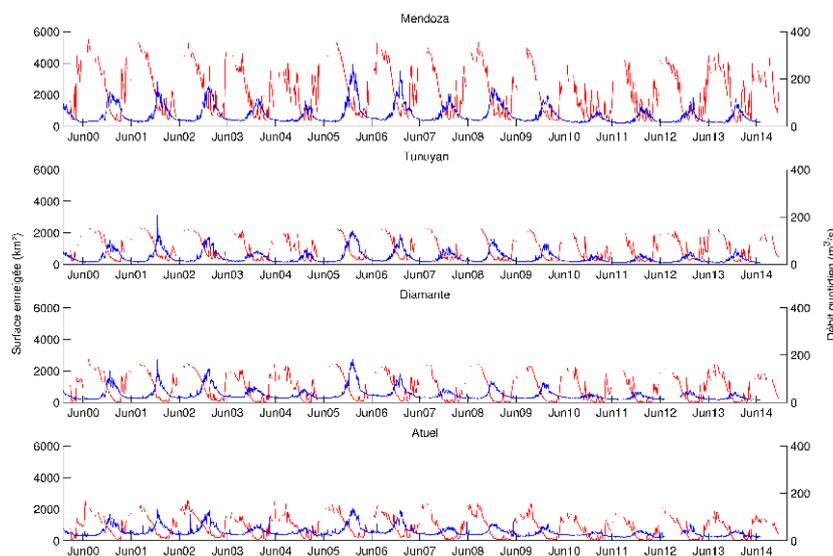
- 15 L'étape suivante a été d'analyser quantitativement comment le volume total d'eau écoulée pendant la période de hautes eaux, soit de septembre à avril, est contrôlé par la couverture neigeuse de l'hiver précédent. Nous avons alors résumé les données par huitaine sur la présence de neige sous forme de différents paramètres : surface maximale enregistrée du couvert neigeux pour chaque année et surface mensuelle moyenne d'enneigement, pour chaque année. De même, nous avons moyenné les écoulements sur la période septembre-avril. Nous avons de ce fait pu analyser la relation linéaire entre chacun des paramètres de la série temporelle d'enneigement et les débits moyens.

Résultats

Séries temporelles des écoulements journaliers et surfaces enneigées tous les huit jours

- 16 La figure 3 représente l'évolution temporelle de la surface enneigée et des débits des rivières. Chaque année, les débits augmentent clairement au début de la période de fonte nivale (soit fin septembre-début octobre), comme attendu pour des rivières de régime nivo-glaciaire. Entre les saisons hydrologiques 2000-01 et 2008-09, les hydrogrammes montrent une première crue de 2 à 4 semaines au printemps ; puis une stagnation des volumes écoulés, et enfin une seconde crue au début de l'été, qui correspond à la fusion des glaciers. Chaque année, ce pic (dû à la fois à la fonte des neiges et des glaciers), a lieu entre la mi-décembre et la mi-janvier, à 48 h d'écart pour les quatre cours d'eau.

Figure 3 : Relation entre la surface enneigée (rouge) et les débits des rivières (bleu)



Les débits journaliers sont mesurés sur les 4 rivières en amont des barrages. La surface enneigée sur une période de 8 jours est estimée à partir des données MODIS MOD10A2 pour chaque bassin versant. Aucune donnée n'est présentée si plus de 5 % du bassin est couverte par des nuages.

Sources des données : DGI / NASA LPDAAC pour NSDIC (https://nsidc.org/data/modis/data_summaries/index.html).

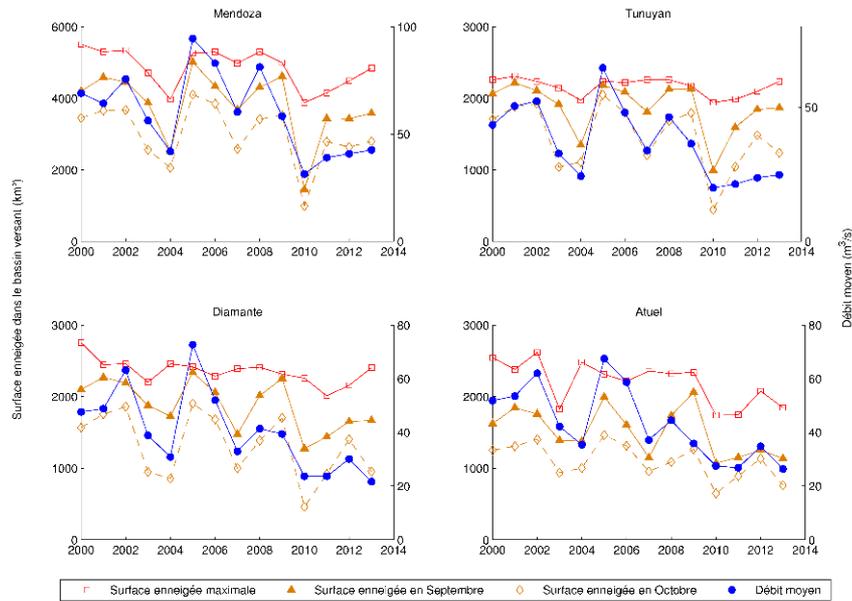
- 17 A partir de l'été 2009-10 (décembre 2009-février 2010), des années sèches (jusqu'à assez exceptionnelles comme en 2003-04), sont devenues plus fréquentes. D'une part, les volumes annuels ont baissé (par exemple pour la rivière Mendoza, le débit moyen est de 49,4 m³/s pour la décennie 2001-12 mais seulement de 27,3 m³/s entre juillet 2010 et juin 2011). D'autre part, le comportement saisonnier a changé : la crue de printemps existe toujours, mais on ne voit pas vraiment de stagnation des volumes écoulés avant la crue d'été. En d'autres mots, le régime hydrologique semble avoir muté de nivo-glaciaire à nival, peut-être même nivo-pluvial, mais des données climatiques sont nécessaires pour valider cette hypothèse et la période étudiée est trop courte pour conclure à un changement de régime significatif.
- 18 Si les comportements des cours d'eau sont globalement similaires, l'Atuel montre quelques différences : alors que la période de hautes eaux est comparable aux trois rivières septentrionales, il présente des variations erratiques en dehors, lors des basses eaux, avec des pics de crue pendant la saison de l'embâcle nival. Deux hypothèses peuvent être formulées ici : 1) des orages lors des pics de crue de printemps ; 2) une soudaine fonte des neiges lors des jours de foehn marqué. Le foehn de Mendoza (appelé *Zonda*) crée de hautes amplitudes thermiques diurnes, en particulier en hiver : les températures peuvent monter de 30 à 40°C en quelques heures (Norte, 1988). Cette hypothèse est la plus plausible, puisque ces hausses des volumes écoulés sont très brèves et toujours en lien avec une réduction de la surface enneigée dans ce bassin versant la même semaine.

- 19 Par ailleurs, les différences de débit entre les rivières vont de pair avec celles des surfaces enneigées pour chaque bassin hydrographique, elles-mêmes en lien avec les dimensions des bassins. Les variations interannuelles du module annuel semblent, pour les quatre cours d'eau, en partie liées à celles du manteau neigeux. Par exemple, pour le bassin versant de la rivière Mendoza, les relativement faibles surfaces enneigées relevées sur les périodes juin-septembre 2004 et juin-septembre 2010, sont suivies par un faible pic de crue dans la période de hautes eaux suivante (septembre-avril 2004-06 et 2010-11), alors que le fort enneigement de l'hiver 2005 est suivie par une année à forts écoulements en 2005-06. Pour autant, il n'y a pas de lien évident entre la surface maximale de la couverture neigeuse et le module annuel qui apparaissent entre les séries temporelles journalières (débits) et hebdomadaire (neige). De ce fait, nous avons choisi de nous intéresser à la moyenne des débits sur une période de huit mois, de septembre à avril, soit la période de hautes eaux.

Les effets de la couverture neigeuse hivernale sur les écoulements moyens pendant les hautes eaux

- 20 Les écoulements moyens entre septembre et avril sont peu liés à la couverture mensuelle moyenne en neige entre janvier et août (non illustré ici) et faiblement corrélés à l'extension maximale enregistrée (figure 4). Ceci nous empêche de conclure à une relation directe entre le total de précipitations neigeuses hivernales et les débits annuels. Pour autant, pour chaque bassin, les volumes moyens écoulés sur la période de hautes eaux sont particulièrement liés à la couverture neigeuse des mois de septembre (figures 4 et 5, tableau 2) et d'octobre (figure 4, tableau 2). Le volume total en septembre-avril semble directement lié à la surface du manteau neigeux au début de la période de fonte.
- 21 Pour chaque bassin versant, les débits moyens en septembre-avril et la surface enneigée en septembre et octobre montrent des variations interannuelles relativement similaires, et leur corrélation est d'environ 0,8 (figures 4 et 5, tableau 2). Les paramètres de la droite de régression sont presque identiques pour deux rivières (Tunuyán et Diamante), différent un peu pour l'Atuel, et beaucoup pour la rivière Mendoza. Ces différences démontrent qu'une unité de surface en neige ne se traduit pas en une quantité d'eau écoulée identique d'une rivière à l'autre. Les résidus de la régression linéaire pour les débits sont généralement un peu plus faibles si on refait la même analyse avec la couverture du mois d'octobre plutôt que celle de septembre (tableau 2).

Figure 4 : Surface de la couverture neigeuse et débits moyens des rivières en période hautes eaux (septembre-avril) pour la période 2001-13



Sources : DGI / NASA LPDAAC pour NSDIC (https://nsidc.org/data/modis/data_summaries/index.html).

Figure 5 : Débits moyens entre septembre et avril vs couverture neigeuse en septembre

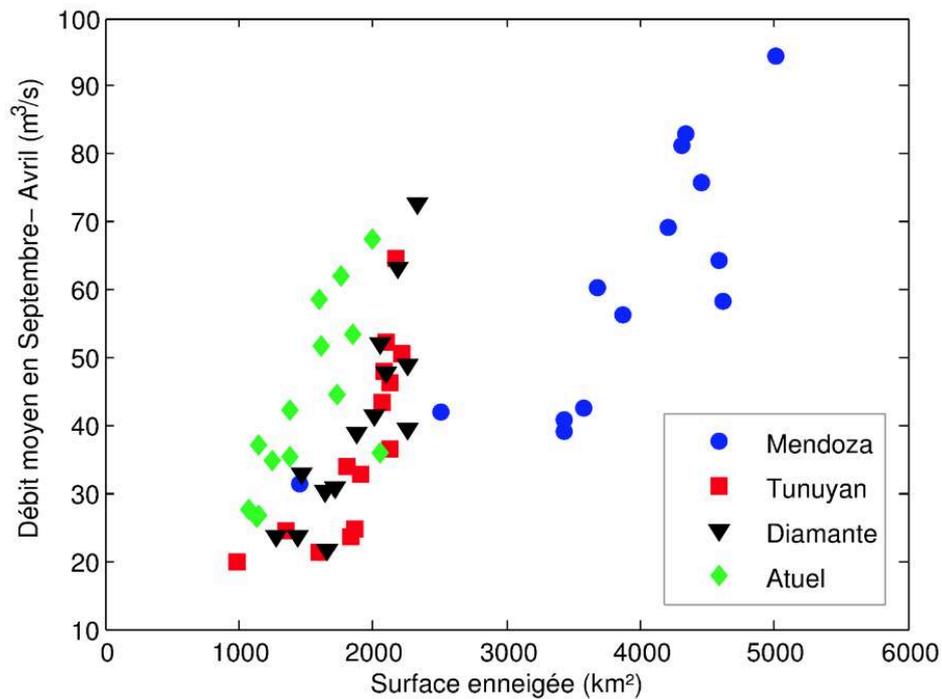


Tableau 2 : Paramètres de la régression linéaire

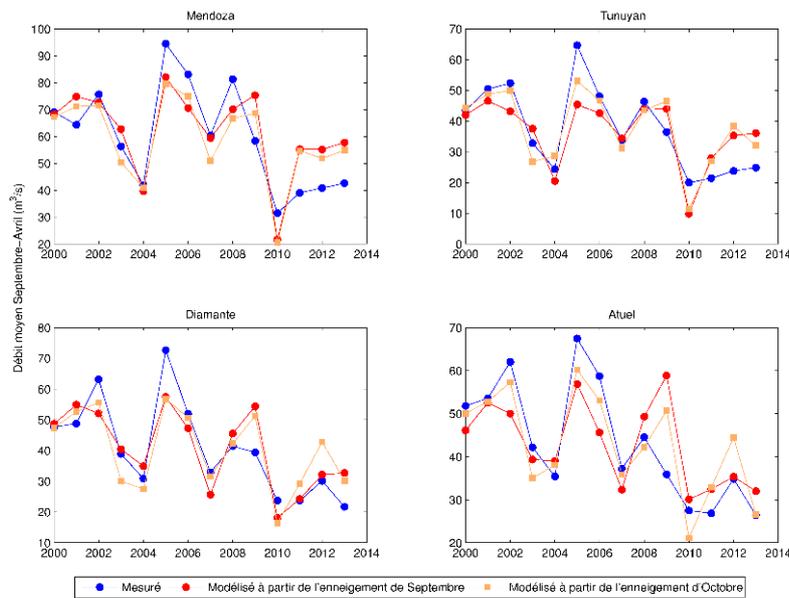
		Corrélation	Pente (a) (m ³ s ⁻¹ km ⁻¹)	Ordonnée à l'origine (b) (m ³ s ⁻¹)	Résidu absolu moyen (m ³ s ⁻¹), (Résidu relatif moyen)
Mendoza	Septembre	0,81	0,017	-3,8	9,5 (15,9%)
	Octobre	0,84	0,019	1,7	9,1 (15,1%)
Tunuyán	Septembre	0,77	0,03	-20,0	7,0 (18,7%)
	Octobre	0,85	0,026	-0,2	5,7 (15,2%)
Diamante	Septembre	0,84	0,037	-29,0	6,4 (15,8%)
	Octobre	0,84	0,028	3,5	6,4 (15,8%)
Atuel	Septembre	0,73	0,029	-0,96	6,9 (16,0%)
	Octobre	0,87	0,048	-10,0	5,1 (11,8%)

[Débit moyen] = a * [Surface enneigée mensuelle] + b, coefficient de corrélation, moyenne des valeurs absolues des résidus, et (entre parenthèses) erreur relative (moyenne des valeurs absolues des résidus divisée par le débit moyen).

Discussion

- 22 Le cumul annuel de précipitations dans les zones montagneuses va de 300 à 600 mm pour le bassin versant de la rivière Mendoza et de 500 à 800 mm pour les autres bassins versants, essentiellement sous forme neigeuse, alors qu'il n'est que de 150 à 250 mm aux plus basses altitudes où les oasis sont localisées (Norte, 2000). L'agriculture et les autres activités humaines dans les oasis dépendent de l'écoulement qui est tributaire de la surface enneigée au début de la fonte. Nous ne trouvons pas de lien fort avec la surface enneigée maximale en hiver, ce qui peut être dû à la persistance du couvert nuageux en montagne de juin à août qui nous a conduits à rejeter une quantité importante de données. Ce qui est nommé « surface enneigée maximale » est en fait la plus grande surface enneigée observable sous la contrainte de la couverture nuageuse.
- 23 Nos résultats indiquent qu'il est possible de prévoir le débit moyen de la période septembre – avril à partir des images MOD10A2, par exemple à partir des images de septembre (figure 6). Ces données sont disponibles gratuitement environ 10 jours après leur acquisition, il est donc possible d'anticiper un risque de pénurie durant la période septembre-avril dès fin septembre ou début octobre. Puisque les résidus sont plus faibles lorsque l'on utilise les données d'octobre, il est possible de fournir une seconde prévision un peu plus précise début novembre.

Figure 6 : Comparaison des débits moyens entre septembre et avril prédits avec ceux mesurés



- 24 Cependant de forts écarts existent entre le débit observé et le débit prévu, comme en 2009 pour la rivière Atuel, ce qui implique que notre méthode de prévision devrait s'accompagner d'une seconde méthode. Ces écarts signifient qu'une unité de surface enneigée ne se traduit pas par la même quantité d'eau tous les ans. Comme tout produit issu de la télédétection, MOD10A2 comporte des incertitudes, particulièrement quand le manteau neigeux est fin. Au-delà, la non prise en compte de l'épaisseur de la neige est très certainement l'explication principale de ces écarts. Les estimations de l'équivalent en eau du manteau neigeux par la télédétection micro-onde passive (Grippa *et al.*, 2005 ; Kelly *et al.*, 2003) pourraient nous permettre d'affiner nos modèles, mais ceci reste délicat en raison de la résolution spatiale de 20 km. Les écarts peuvent aussi s'expliquer par le fait que nous ne considérons ni les variations interannuelles des précipitations ni celles de la fonte de la glace. Ce sont potentiellement deux effets importants, liés aux variations de température. En particulier, les variations du rapport pluie/neige ou de l'altitude de transition entre les deux sont susceptibles de profondément modifier les modèles empiriques établis ici. Enfin, nous ne pouvons exclure des variations du taux de sublimation. Nous n'avons pas actuellement d'ordre de grandeur sur ces effets.
- 25 Les modèles linéaires changent d'un bassin versant à l'autre. Comparativement aux résultats antérieurs obtenus à l'échelle de la province de Mendoza (Delbart *et al.*, 2014) nous avons ici mis en évidence ces différences puisque les bassins versants sont traités séparément, ce qui amène de nouvelles questions mais représente une avancée. Plusieurs explications sont possibles, à commencer encore par d'éventuelles différences d'épaisseur de la neige entre les bassins versants qui pourraient ne pas recevoir les mêmes cumuls de précipitations. Deuxièmement les surfaces enneigées sont traitées comme des surfaces horizontales, sans prise en compte de la topographie. Les différences de pente influencent l'accumulation nivale. De plus, les versants nord étant plus éclairés que les versants sud, les différences de distribution des expositions

peuvent partiellement expliquer les différences entre les modèles empiriques entre les bassins versants.

- 26 En « nourrissant » un modèle hydrologique avec les données d'enneigement MOD10A2, de précipitation, et sous la contrainte des débits mesurés, Immerzeel *et al.* (2009) ont pu suggérer que l'eau de fonte des glaciers contribue au débit des rivières himalayennes. En plus de l'analyse, basée sur les données, des effets de topographie, d'épaisseur de neige et de variabilité de la pluie, une telle approche de modélisation pourrait nous permettre de mieux établir le bilan hydrologique des quatre bassins versants, ce qui nécessitent des données météorologiques fiables (Pellicciotti *et al.*, 2012) non nécessairement disponibles.

Conclusion

- 27 Malgré les limites décrites précédemment, les surfaces enneigées estimées par la télédétection optique au début de la période de fonte expliquent les débits moyens lors de la période des hautes eaux, alors que le déclin des surfaces enneigées en septembre et octobre observé en 2000-2014 expliquent la tendance décroissante des débits sur la même période (Fig. 6). La corrélation étant de 0,8 environ, nous avons pu proposer un modèle de prévision des débits qui explique plus de 60 % de la variance des débits, ce qui est mieux que les modèles proposés précédemment basés sur les indices climatiques du Pacifique sud. (Masiokas *et al.*, 2006, Compagnucci and Vargas, 1999). L'erreur moyenne est de 15 % sur les débits, et cette prévision peut être fournie tôt au printemps grâce à la disponibilité des données. Malgré ses imperfections cette méthode permet d'anticiper les volumes disponibles pour les oasis Nord et Sud dont le flux est géré grâce à des réservoirs. Cette méthode pourrait apporter une aide réelle à la DGI pour optimiser le stockage. De fait, connaître au début du printemps le volume d'eau disponible lors des hautes eaux peut s'avérer crucial pour les gestionnaires.
- 28 ABRAHAM E., ABAD J., LORA BORRERO B., SALOMON M., SANCHEZ C., SORIA D., 2007.- « Caracterización y valoración hidrológica de la cuenca del río Mendoza mediante elaboración del modelo conceptual de evaluación », in *XXIe Congreso Nacional del Agua (Conagua)*, Tucuman, Argentina.
- 29 BARTSCH A., 2010.- « Ten Years of SeaWinds on QuikSCAT for Snow Applications », in *Remote Sensing*, 2, pp. 1142-1156.
- 30 BLANCHON D., MAUPIN A., 2009.- « Géopolitique de l'eau en Afrique australe », in *Sécurité Globale*, 9, pp. 79-96.
- 31 BOUDHAR A., HANICH L., BOULET G., DUCHEMIN B., BERJAMY B., CHEHBOUNI A., 2009.- « Impact of the snow cover estimation method on the Snowmelt Runoff Model performance in the moroccan High Atlas Mountains », in *Hydrological Sciences Journal*, 54(6), pp. 1094-1112.
- 32 CAPITANELLI R., 1967.- « Climatología de Mendoza », in *Boletín de Estudios geográficos*, n° 54-57, UNC, Mendoza, 441 p.
- 33 CHAPONNIERE A., MAISONGRANDE P., DUCHEMIN B., HANICH L., BOULET G., ESCADAFAL R., ELOUADDAT S., 2005.- « A combined high and low spatial resolution approach for mapping snow covered area in the Atlas mountains », in *International Journal of Remote Sensing*, 26, pp. 2755-2777.

- 34 COBOS D.R., 2002.- « Fluctuaciones glaciarias en la cuenca superior del río Atuel ». In Trombotto D. & Villaba E. (Eds). IANIGLA, 30 years of basic and applied research on environmental sciences. Mendoza : Zeta Ed°.
- 35 COLLIN DELAUAUD C., 1968.- « Les régions côtières du Pérou septentrional ; occupation du sol, aménagement régional ». Lima : Institut Français d'Etudes Andines Ed°, 600 p.
- 36 COMPAGNUCCI R.H., VARGAS W.M., 1998.- « Inter-annual variability of the Cuyo rivers' streamflow in the Argentinean Andean mountains and ENSO events », in *International Journal of Climatology*, 18(14), pp. 1593-1609.
- 37 CORRIPIO J., PURVES R., RIVERAS A., 2008.- « Modeling climate-changes impacts on mountain glaciers and water resources in the central dry Andes ». In Orlove B., Wiegandt E., Luckman B.H. (Eds). *Darkening peaks : glacier retreat, science and society*. Berkeley (California). University of California Press.
- 38 COSSART E., DROCOURT Y., ANSELME B., 2010.- « Les variations glaciaires dans les Andes de Mendoza (Argentine) entre 1975 et 2007 », in *Mappemonde*, 97.
- 39 DELBART N., LAVIE L., GOMA R., 2014.- « Influence des surfaces enneigées sur les débits de cours d'eau du piémont andin argentin. Implications pour la gestion du risque de pénurie », in *Bulletin de l'Association des Géographes Français*, 3, pp. 338-354.
- 40 GRIPPA M., MOGNARD N., LE TOAN T., 2005.- « Comparison between the interannual variability of snow parameters derived from SSM/I and the Ob river discharge », in *Remote Sensing of Environment*, 98(1), pp. 35-44.
- 41 HALL D.K., SALOMONSON V.V., RIGGS G.A., 2006.- « MODIS/Terra Snow Cover 8-Day L3 Global 500m Grid. Version 5 ». [Tile h12v12]. Boulder, Colorado USA : National Snow and Ice Data Center.
- 42 IMMERZEEL W.W., DROOGERS P., DE JONG S.M., BIERKENS M.F.P., 2009.- « Large-scale monitoring of snow cover and runoff simulation in Himalayan river basins using remote sensing, in *Remote Sensing of Environment*, 113, pp. 40-49.
- 43 KELLY R.E.J., CHANG A.T.C., TSANG L., FOSTER J. L., 2003.- « A Prototype AMSR-E Global Snow Area and Snow Depth Algorithm », in *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(2), pp. 230-242.
- 44 LAVIE E., 2009.- *Activités anthropiques et qualité de l'eau dans l'oasis de Mendoza (Argentine) : diagnostic, enjeux et durabilité*. Ph-D, University of Bordeaux. 384 p.
- 45 LAVIE E., BELTRANDO G., 2013.- « La canopée urbaine de Mendoza (Argentine) à l'épreuve de la gestion de l'eau », in *Sécheresse*, 3(24), pp 224-231.
- 46 LAVIE E., MAUPIN A., BLANCHON D., 2015.- « La pénurie de l'eau : un discours à quelles fins ? ». In REDON M., MAGRIN G., CHAUVIN E., PERRIER-BRUSLÉ L., LAVIE E. (Dir.), *Ressources mondialisées, essai de géographie politique*. Presses de la Sorbonne.
- 47 LEIVA J., 1999.- « Recent fluctuations of the Argentinian glaciers », in *Global and Planetary Change*, 22, pp. 169-177.
- 48 MARSHALL A., 2014.- « Apropiarse del desierto. Agricultura globalizada y dinámicas socioambientales en la costa peruana. El caso de los oasis de Virú e Ica-Villacuri ». Lima : Institut Français d'Etudes Andines & Institut de Recherche pour le Développement Ed°, 417 p.
- 49 MASIOKAS M.H., VILLALBA R., LUCKMAN B.H., LE QUESNE C., ARAVENA J.C., 2006.- « Snowpack variations in the Central Andes of Argentina and Chile, 1951-2005 : large-scale

- atmospheric influences and implications for water resources in the region », in *Journal of Climate*, 19, pp. 6334-6352.
- 50 MAUPIN A., 2015.- « Les risques hydropolitiques en Afrique à travers la gestion des bassins transfrontaliers », in POMEL *et al.* (Dir.), *Risques en Afrique*, ouvrage de synthèse du programme quadriennal pluridisciplinaire de la MSHA, Bordeaux, Editions Karthala - MSHA.
- 51 NOLIN A.W., 2010.- « Recent advances in remote sensing of seasonal snow », in *Journal of Glaciology*, 56(200), pp 1141-1150.
- 52 NORTE F.A., 1988.- *Características climatológicas del viento Zonda en la región de Cuyo*. PhD Thesis, Buenos Aires University, 255 p.
- 53 NORTE F., 2000.- « Mapa climatico de Mendoza », in Abraham E. & Martínez F.R. (Eds). *Catálogo de los recursos humanos e información relacionada con la temática ambiental en la región andina argentina*. PAN/SDS Y PA-INTA-GTZ, IADIZA, Universidad de Granada. Mendoza, Argentina.
- 54 PELLICCIOTTI F., BUERGI C., IMMERZEEL W. W., KONZ M., SHRESTHA A.B., 2012.- « Challenges and uncertainties in hydrological modeling of remote hindy Kush-Karakoram-Himalayan (HKH) basins : suggestions for calibration strategies », in *Mountain Research and Development*, 32(1), pp. 39-50.
- 55 PONCET Y, 2011.- « Le développement des zones arides dans des contextes économiques avancés », in *Sécheresse*, 22, pp. 215-217.
- 56 SALOMONSON VV., APPEL I., 2004.- « Estimating fractional snow cover from MODIS using the normalized difference snow index », in *Remote Sensing of Environment*, 89(3), pp. 351-360.
- 57 TURTON A., MEISSNER R. 2002.- « The hydrosocial contract and its manifestation in society : A South African case study », in TURTON A., HENWOOD R. *Hydropolitics in the developing world : a Southern African perspective*. pp. 37-60.
- 58 VIALE M., NUÑEZ M.N., 2011.- « Climatology of Winter Orographic Precipitation over the Subtropical Central Andes and Associated Synoptic and Regional Characteristics », in *Journal of Hydrometeorology*, 12, pp. 481-507.
- 59 WANG X., XIE H., LIANG T., 2007.- « Evaluation of MODIS snow cover and cloud mask and its application in Northern Xinjiang, China », in *Remote Sensing of Environment*, 112, pp. 1497-1513.

NOTES

1. La Province de Mendoza a aussi deux petites oasis (Uspallata et Malargüe), mais les enjeux ne sont pas comparables à ceux des trois principales.
2. Pour plus d'informations sur la gestion de l'eau « par l'offre » ou « par la demande », voir Turton et Meissner 2002 ; Blanchon et Maupin, 2009 ; Maupin, 2015.
3. Il ne s'agit pas de suivi officiel, mais de mesures réalisées mensuellement entre 2003 et 2010.

RÉSUMÉS

Dans les Andes sèches d'Argentine, alors que la fusion des glaciers est un enjeu à long terme pour les cultures irriguées du piémont, à l'échelle annuelle la fonte du couvert neigeux est la principale ressource pour les cours d'eau et les aquifères. Dans cette étude, nous tentons d'analyser le lien qui existe entre, d'une part, les variations saisonnières et interannuelles sur la période 2001-2014 des écoulements mesurés en amont des premiers barrages régulateurs de quatre rivières (Mendoza, Tunuyán, Diamante, Atuel) de la région argentine du Cuyo (plus précisément ici la Province de Mendoza) et, d'autre part, celles de l'extension de la couverture neigeuse identifiée à partir de la télédétection (produit MODIS MOD10A2, fréquence hebdomadaire), à l'échelle de chaque bassin versant.

Étant donné le régime nivo-glaciaire de ces quatre rivières, les variations saisonnières des débits apparaissent logiquement comme directement liées à celles de la surface du manteau neigeux.

Nous observons que les débits en période de hautes eaux (septembre à avril), sont directement liés à la surface enneigée au début de la période de fonte des neiges, soit de septembre à octobre, avec une corrélation de 0,8. De plus, la tendance à la baisse de l'extension de la couverture neigeuse entre 2001 et 2014 explique clairement les diminutions observées du module annuel moyen sur la même période.

L'agriculture et les autres activités anthropiques de ces oasis dépendent majoritairement des écoulements superficiels des rivières, qui, comme le démontrent nos résultats, dépendent majoritairement de l'extension du couvert neigeux. Nos travaux montrent qu'il est possible d'utiliser la télédétection pour estimer les volumes moyens sur la période septembre-avril (hautes eaux annuelles) à partir d'images MOD10A2, avec une erreur moyenne de 15%. Les données MOD10A2 étant disponibles gratuitement 10 jours après leur acquisition, il est possible d'anticiper début octobre, le risque de pénurie pour l'été à venir.

In the Argentinian Dry Andes, although the melting of glaciers is seen as a threat for the long-term water availability needed by the piedmont crops, the annual snowmelt is the main source of superficial water and aquifer recharge. In this study, we analyse the link between the seasonal and interannual variations in the discharge measured upstream of the first dams on four rivers (Mendoza, Tunuyán, Diamante, Atuel) of the Argentinian Cuyo region (in the Federal Province of Mendoza) and those of the snow bed extent as mapped by optical remote sensing (MODIS MOD10A2 product) on a weekly basis in the 2001-2014 period, at the scale of each watershed.

For the four snow-glacier regime rivers, seasonal variations in the discharge appear directly related to those of the snow bed surface area in each watershed, as shown previously (Masiokas *et al.*, 2006). We observed that the high-water period (September-April) discharge is directly related to the snow extent at the beginning of the snowmelt period, i.e. in September and October, as revealed by a correlation of about 0.8. Moreover, the decreasing trend in the winter snow bed extent from 2001 to 2014 clearly explains the observed decreasing trend in the annual water discharge.

Agriculture and human activities in these oases mostly depend on river discharge, which from our results clearly depends on the snow extent. Our research indicates that it is possible to use remote sensing to forecast the average discharge in the September-April period (high-water season) from MOD10A2 images with an average uncertainty of 15%. As MOD10A2 data are freely available ten days after acquisition, it is possible to anticipate in early October the risk of water shortages in the coming summer.

INDEX

Mots-clés : débit, rivières, neige, télédétection, MODIS, Andes, Mendoza, Argentine

Keywords : discharge, rivers, snow, remote sensing, MODIS, Andes, Mendoza, Argentina

AUTEURS

NICOLAS DELBART

Université Paris-Diderot, CUE Sorbonne-Paris-Cité, UMR CNRS 8586 PRODIG. 5 rue T. Mann, UFR
GHSS-cc7001, 75205 PARIS Cedex 13.
nicolas.delbart@univ-paris-diderot.fr

SAMUEL DUNESME

Etudiant en Master 2 (TGAE Télédétection et Géomatique appliquées à l'environnement),
Université Paris-Diderot. 5 rue T. Mann, UFR GHSS-cc7001, 75205 PARIS Cedex 13

EMILIE LAVIE

Université Paris-Diderot, CUE Sorbonne-Paris-Cité, UMR CNRS 8586 PRODIG. 5 rue T. Mann, UFR
GHSS-cc7001, 75205 PARIS Cedex 13

MALIKA MADELIN

Université Paris-Diderot, CUE Sorbonne-Paris-Cité, UMR CNRS 8586 PRODIG. 5 rue T. Mann, UFR
GHSS-cc7001, 75205 PARIS Cedex 13

RÉGIS GOMA

Etudiant en Master 2 (TGAE Télédétection et Géomatique appliquées à l'environnement),
Université Paris-Diderot. 5 rue T. Mann, UFR GHSS-cc7001, 75205 PARIS Cedex 13