

Les variations récentes (1975-2000) de l'englacement dans le Massif de l'Aconcagua (Mendoza, Argentine)

Essai de régionalisation, perspectives de recherches et enjeux sur les usages des ressources en eau glaciaire

Etienne Cossart et Julie Le Gall



Édition électronique

URL : <https://journals.openedition.org/echogeo/2416>

DOI : 10.4000/echogeo.2416

ISSN : 1963-1197

Éditeur

Pôle de recherche pour l'organisation et la diffusion de l'information géographique (CNRS UMR 8586)

Référence électronique

Etienne Cossart et Julie Le Gall, « Les variations récentes (1975-2000) de l'englacement dans le Massif de l'Aconcagua (Mendoza, Argentine) », *EchoGéo* [En ligne], 4 | 2008, mis en ligne le 18 mars 2008, consulté le 31 juillet 2021. URL : <http://journals.openedition.org/echogeo/2416> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/echogeo.2416>

Ce document a été généré automatiquement le 31 juillet 2021.

EchoGéo est mis à disposition selon les termes de la licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International (CC BY-NC-ND)

Les variations récentes (1975-2000) de l'englacement dans le Massif de l'Aconcagua (Mendoza, Argentine)

Essai de régionalisation, perspectives de recherches et enjeux sur les usages des ressources en eau glaciaire

Etienne Cossart et Julie Le Gall

Introduction

- 1 La province argentine de Mendoza (fig. 1) est mondialement connue pour deux raisons. Tout d'abord le sommet de l'Aconcagua, point culminant des Amériques, s'y localise. Ensuite la province dispose d'un vignoble de renommée internationale, dont la qualité progresse chaque année. Rapprocher ces deux éléments n'est pas anodin. En effet, le massif de l'Aconcagua recèle près d'une centaine de glaciers, les fronts desquels descendent parfois sous les 4 000 mètres d'altitude. Ces glaciers, moins étudiés que leurs homologues des Andes tropicales (Pérou-Bolivie) ou de Patagonie, ont un rôle essentiel dans l'organisation des activités de la province de Mendoza, activités viticoles en particulier. Sur le piémont andin s'étendent des oasis (terminologie locale) dont la productivité dépend de la répartition des eaux en provenance de la Cordillère.
- 2 Or, à l'instar de nombreuses régions du monde, la tendance au réchauffement observée au cours du XX^e siècle est accompagnée d'un amenuisement des glaciers. La perspective d'une poursuite, voire d'une accélération, de la hausse des températures fait ainsi peser une menace sur les réserves d'eau stockées à l'état solide dans la Cordillère, menace qui pourrait se répercuter *in fine* sur les modes de gestion de la ressource en eau. Les glaciers libèrent de l'eau à l'état liquide lors des périodes chaudes, c'est-à-dire lors de la saison végétative, lorsque les besoins en eau pour l'agriculture sont maximaux. Dans quelle mesure une disparition des glaciers *mendocinos* peut-elle affecter les débits des cours d'eau et les stratégies d'irrigation ?
- 3 Des reconstitutions des variations glaciaires menées sur le secteur du Juncal montrent que la moitié de la superficie de ces appareils glaciaires a disparu depuis le Petit Âge de Glace (Cobos, 2002). Cependant les variations de l'englacement doivent être

appréhendées à une échelle régionale : cette approche permettrait de raisonner à l'échelle de bassins versants entiers et d'identifier les cours d'eau particulièrement menacés par une disparition prochaine des glaciers qui les alimentent.

- 4 Cet article propose un bilan de recherches préliminaires menées actuellement dans ce secteur. Une première synthèse des variations régionales de l'englacement et des enjeux liés à la gestion de la ressource en eau est proposée grâce au recours à des images satellites et à des investigations de terrain. Les pistes de recherches à poursuivre sont ensuite évoquées, prémisses d'un programme de recherche plus vaste en cours d'élaboration.

Figure 1 - Situation du secteur étudié



(d'après Espizua, 2002 modifié)

1. Les intérêts d'une approche géographique, régionale, de l'englacement

1.1. Approche géographique vs approche glaciologique

- 5 Deux approches, complémentaires, des variations glaciaires existent. La première, glaciologique, a pour objet de mesurer finement les variations géométriques de glaciers emblématiques, puis de modéliser la relation entre ces variations et des paramètres climatiques locaux. Dans les Andes, les travaux de l'UR Great Ice - IRD sur des glaciers de la Cordillère Royale (Bolivie), et sur *Glaciar Chacaltaya* en particulier, s'inscrivent dans cette démarche (pour une synthèse, on se référera à Francou et Vincent, 2007). Dans la province de Mendoza, quelques glaciers (Juncal, Los Horcones) ont fait l'objet de suivis attentifs et de mesures, notamment parce que leur comportement à « surge », pouvant engendrer des risques de débâcles, a éveillé la curiosité scientifique. Cette approche, résolument quantitative et modélisatrice a néanmoins deux limites. La première est de se concentrer sur quelques objets dont le comportement n'est pas toujours significatif de l'évolution régionale. La seconde est d'être dépendante des séries de mesures en cours :
- elle ne permet pas de remonter dans le temps au-delà du début des séries de mesure,
 - elle est dépendante du choix de glaciers effectué au début des séries de mesures (choix parfois dicté par des raisons d'accessibilité, et non pour des raisons scientifiques).
- 6 L'approche géographique et géomorphologique cherche à compléter en partie ces manques. Il s'agit de multiplier les observations sur un grand nombre de glaciers pour reconstituer leur évolution. Ces observations peuvent tout d'abord être effectuées par l'identification et la datation d'héritages glaciaires, marqueurs de l'évolution passée des glaciers (Cossart, 2007 ; Jomelli *et al.*, 2007). D'autres éléments peuvent être apportés par la consultation de cartes anciennes, de gravures, de photographies aériennes ou d'images satellites. Cette documentation iconographique peut être intégrée dans une base de données géographiques, des logiciels SIG permettant de mesurer l'extension

des glaciers. L'objectif est de calculer des paramètres synthétisant les variations glaciaires à une échelle régionale : la superficie englacée et l'altitude de la Ligne d'Equilibre Glaciaire notamment.

- 7 Les limites sont liées aux marges d'erreur des résultats obtenus. (1) Les héritages glaciaires peuvent avoir été remaniés et donner une vision *a minima* des extensions glaciaires passées (Cossart, 2007). (2) La précision de la cartographie des héritages glaciaires dépend de la précision du GPS utilisé sur le terrain : une marge d'erreur de l'ordre du décimètre est généralement à prendre en considération. (3) Dans le cas de l'exploitation de ressources iconographiques, la critique des documents doit être effectuée. Certaines cartes, peu déformées, peuvent être directement intégrées dans un SIG et donner lieu à une quantification précise des mensurations du glacier à la date du levé. D'autres documents (cartes déformées, gravures...) ne fournissent qu'une description qualitative de l'état du glacier (*i.e.* présence de crevasses, couverture neigeuse...) et une vision relative de son extension (*i.e.* position du front en comparaison avec divers éléments du relief). Enfin, les images satellites et les photographies aériennes peuvent aboutir à quelques confusions lorsqu'un manteau neigeux masque les différences entre un glacier et un simple névé, ou lorsqu'un glacier est recouvert de débris, masquant la position exacte de son front.
- 8 Au-delà de la critique des sources qu'imposent les limites évoquées, il faut avoir conscience que l'approche géographique aboutit à une estimation d'un ordre de grandeurs des variations glaciaires. De tels ordres de grandeurs sont d'autant plus appréciables que l'espace sur lequel ils sont estimés est vaste.

1.2. Méthodes de mesures des variations glaciaires 1.2.1. Mesures géométriques

- 9 Les variations de superficie peuvent être directement obtenues par les logiciels SIG. Dans le cas présent les cartes d'englacement ont été obtenues à partir d'une image satellite de 1975 (Landsat MSS prise le 13 février 1975) et une de 2000 (Landsat ETM+ prise le 5 février 2000). Des zones d'entraînement ont été définies pour effectuer une classification dirigée des pixels. Ces zones d'entraînement ont été choisies en effectuant une interprétation visuelle des images et en ayant recours à des cartes diachroniques effectuées dans le Massif du Juncal (Cobos, 2002 ; Espizua, 2002). Cette tâche a été facilitée par le fait que les images ont été acquises en fin d'été, lorsque le couvert neigeux est minimal.
- 10 Les zones englacées ont été vectorisées automatiquement par le recours au logiciel ©ARCGIS. Pour chaque individu, des variables géométriques simples ont été calculées : superficie, périmètre, mais aussi les altitudes minimale et maximale en croisant les cartes d'englacement avec un Modèle Numérique d'Altitude (MNA), correspondant à des données SRTM.

1.2.2. LEG

- 11 La Ligne d'Equilibre Glaciaire (LEG) représente la ligne théorique d'un glacier où le bilan de masse est nul : elle sépare les zones d'accumulation et d'ablation du glacier (Sugden et John, 1976 ; Meierding, 1982). L'altitude de la LEG peut être estimée par différents modèles à partir d'une simple reconstitution géométrique en deux dimensions du glacier : elle permet *de facto* la reconstitution de variations temporelles de l'englacement (Meierding, 1982 ; Nesje & Dahl, 2000). On détermine alors une altitude de la LEG reflétant un état d'équilibre théorique entre le glacier et le climat (« Steady State ELA », *in* Benn et Lehmkuhl, 2000).

- 12 A l'échelle locale, les lignes d'équilibre glaciaire reconstruites permettent de comparer les conditions topoclimatiques dans lesquelles évoluent les glaciers. A l'échelle régionale, elles sont utilisées dans des reconstitutions paléo-environnementales. Leur variation dans l'espace étant essentiellement due à des variations de quantités de précipitations, elles permettent notamment de mettre en évidence l'existence de paléo-gradients de précipitations (Porter, 1975 ; Nesje *et al.*, 2001)
- 13 Les méthodes de reconstitution des LEG se fondent pour la plupart sur l'hypothèse que les superficies des zones d'accumulation et d'ablation sont proportionnelles, et que le coefficient de proportionnalité reste quasiment constant pour un même glacier, même si son extension varie. La méthode THAR est une déclinaison de cette hypothèse. Elle permet de reconstituer l'altitude de la LEG avec des données accessibles : les altitudes minimales et maximales atteintes par le glacier (Meierding, 1982 ; Nesje, 1992). Un ratio correspondant au rapport entre la dénivellation de la zone d'ablation et la dénivellation totale du glacier est utilisé pour placer la LEG. Ce ratio est en général de l'ordre de 0,4 ou 0,45 (Burbank et Fort, 1985 ; Nesje, 1992 ; Benn et Evans, 1998). La valeur de 0,4, appliquée aux glaciers de type alpin, a été utilisée ici. Le calcul de l'altitude de la ligne d'équilibre peut se formaliser par l'équation suivante :
- 14 $ALEG = r.(Alt_{max} - Alt_{min}) + Alt_{min}$
- 15 où ALEG est l'altitude de la ligne d'équilibre glaciaire (mètres), r est le ratio utilisé (sans dimension), Alt_{max} est l'altitude de la rimaye du glacier (mètres), Alt_{min} est l'altitude du front du glacier (mètres).
- 16 A partir des altitudes des LEG nous avons cherché à établir une méthode de cartographie de leur évolution spatiale et temporelle. L'objectif est d'établir des cartes choroplèthes des LEG. Porter (1975) cartographie une LEG (ou un seuil de glaciation) moyenne, calculée pour plusieurs glaciers : il définit pour cela des « cellules » allant parfois jusqu'à plusieurs kilomètres de côté, regroupant plusieurs glaciers et calcule pour chaque « cellule » l'altitude de la LEG (ou le seuil de glaciation). Il faut cependant que les cellules restent de taille suffisamment réduites : il n'y aurait aucun intérêt à lisser complètement la variabilité des valeurs au sein de l'espace cartographié.
- 17 Une autre possibilité est d'obtenir une carte choroplèthe à partir des valeurs d'ALEG connues, par interpolation spatiale en ayant recours au logiciel ©ARCGIS, à l'image de ce qui est réalisé pour des Modèles Numériques de Terrain. Cette méthode représente un double avantage en comparaison de la carte choroplèthe « manuelle ». (1) Elle est parfaitement objective, car elle ne souffre pas d'un tracé arbitraire des isolignes qui pourrait fausser sa perception, et (2) le logiciel extrapole les valeurs entre chaque point de référence : il est ainsi possible de déterminer une valeur d'ALEG pour chaque pixel de la carte obtenue.
- 18 Nous avons préféré une interpolation des valeurs par tendance linéaire, la plus adaptée pour mettre en exergue les grandes tendances spatiales sans engendrer d'artefacts (Gratton, 2004). En effet, la forte variabilité des LEG à l'échelle fine peut engendrer de nombreux artefacts en appliquant des méthodes plus élaborées (Krigage ou IDW par exemple). La méthode par tendance linéaire fournit ainsi la plus faible erreur RMSE. La même méthode peut être appliquée pour chaque date, de manière à obtenir une cartographie diachronique. A l'aide du logiciel ©ARCGIS il est ensuite possible d'effectuer la soustraction des deux images : pour chaque pixel, la différence de valeurs

entre les deux cartes est mesurée. Le logiciel construit *in fine* une cartographie de variation des LEG sur l'ensemble du secteur étudié.

1.2.3. Cartographie des zones d'accumulation glaciaire potentielle

- 19 En recoupant les estimations de l'altitude de la LEG avec le MNA, il est possible d'isoler les secteurs où l'accumulation glaciaire est possible (altitude du terrain > altitude LEG). Cette cartographie représente une simplification, dans la mesure où l'extension des zones d'accumulation dépend de paramètres locaux (ensoleillement, mais aussi présence d'anfractuosités favorables à la concentration de la neige). Pour cette raison, nous qualifions cette zone d'accumulation glaciaire de « potentielle ». Elle permet d'observer quelles sont les principales « zones sources » des glaciers à une échelle régionale et d'effectuer leur suivi au cours du temps.

1.2.4. Prospective 2050

- 20 Des simulations de l'évolution de l'altitude de la LEG peuvent être effectuées. A précipitations constantes, il est admis qu'une hausse des températures moyennes de l'ordre de 0,6°C engendrerait une hausse des ALEG de près de 100 mètres (Ohmura *et al.*, 1992 ; Lowe et Walker, 1994). Dans le secteur de Mendoza, les prévisions des modèles indiquent une hausse des températures de l'ordre de 1°C à l'horizon 2050 (Masiokas *et al.*, 2008). Nous avons donc simulé une élévation des LEG de 150 mètres à partir des valeurs estimées en 2000, puis nous en avons déduit une cartographie des zones d'accumulation glaciaire potentielle. Il est alors possible d'identifier les bassins-versants qui risquent d'être entièrement désenglacés à moyen terme.

2. Le secteur étudié : présentation physique et enjeux scientifiques

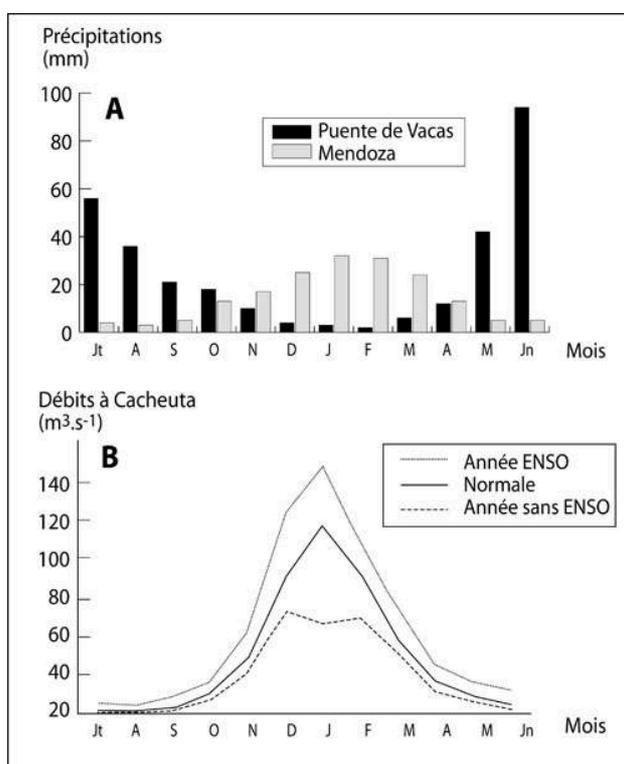
2.1. Le contexte physique

- 21 La province argentine de Mendoza (33°S ; 69°W) s'adosse sur la retombée orientale de la Cordillère des Andes. Ainsi protégée de l'influence océanique pacifique, l'essentiel de la province se situe en climat à connotation continentale, semi-aride : on mesure par exemple 177 mm de précipitations annuelles à Mendoza (fig. 2A). Cette valeur ne doit pas masquer le gradient des précipitations, qui décroissent d'ouest en est, de la Cordillère Centrale jusqu'au piémont andin. Cette décroissance reflète une discontinuité climatique :
- la haute Cordillère Centrale est principalement sous influence des masses d'air océanique, qui provoquent des précipitations lors de l'hiver austral (maximum de précipitations de mai à août) ;
 - le piémont et la Cordillère Frontale subissent davantage une influence tropicale. Les précipitations, généralement engendrées par des flux de nord est, correspondent à des orages estivaux (maximum de précipitations de novembre à mars).
- 22 Un autre gradient de précipitations se superpose à cette première tendance : les précipitations tendent à s'accroître vers le sud de la province. Cette augmentation correspond à une diminution de l'effet de blocage effectué par la Cordillère (les altitudes des cols et sommets diminuent vers le sud) et par un renforcement de la circulation d'ouest à mesure que la latitude s'élève. Les influences pacifiques sont donc progressivement plus marquées vers le sud.
- 23 Les débits mesurés sur une station du Rio Mendoza, à proximité de l'amont de l'oasis éponyme, sont à leur maximum en janvier (fig. 2B). Les débits sont certes soutenus par les quelques précipitations qui interviennent sur le piémont ou la Cordillère Frontale en cette saison, mais l'essentiel des bassins-versants s'étend dans la Cordillère Centrale, qui subit à cette époque une saison sèche marquée. Or cette saison, correspondant à

l'été austral, représente la période maximale de fusion glaciaire et du pergélisol (Schrott, 2002). Les apports liés au déstockage de réserves d'eau solide aboutissent à des débits maximaux en saison chaude, lors de la saison végétative. Cette ressource en eau estivale constitue le fondement de l'organisation de l'oasis de Mendoza puisqu'un important réseau de canaux s'est développé afin de dériver les eaux du Río et permettre une mise en culture de ces zones semi-arides.

- 24 Le suivi des stocks d'eau solide (glacier et pergélisol) dans le contexte du réchauffement climatique actuel est donc nécessaire pour évaluer la disponibilité de la ressource en eau, et éventuellement simuler son évolution future.

Figure 2 : Régimes pluviométriques (A) et hydrologiques (B).



D'après Norte et al., 1998. ENSO : El Niño Southern Oscillation

2.2. Les stratégies d'irrigation

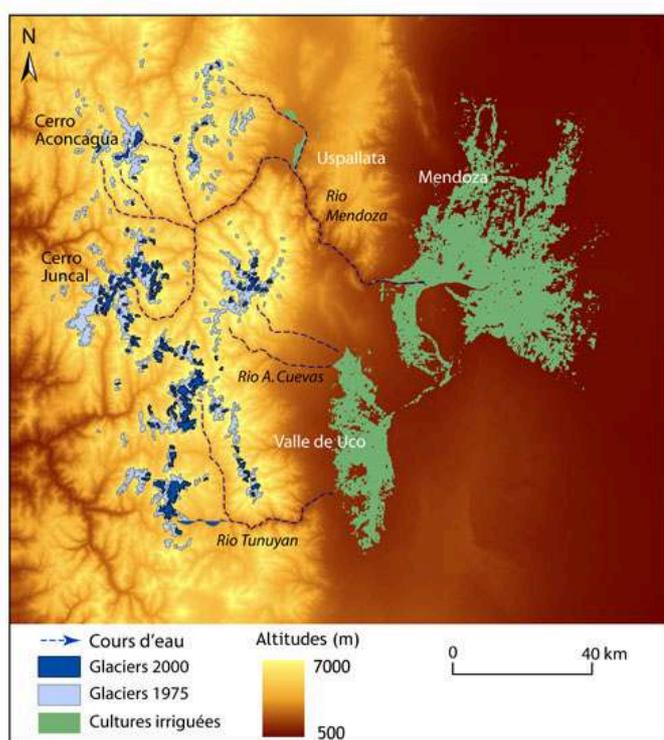
- 25 La majeure partie (95 %) de la population de la Province de Mendoza est concentrée sur les 3 % de superficie irriguée et le développement des trois oasis est conditionné par la possibilité de capter les cours d'eau de la Cordillère (Tulet, 2005). Les oasis se sont installées sur les cônes de déjection des cours d'eau, constitués de sédiments adéquats à une mise en cultures. L'Oasis Nord, où est située Mendoza, la capitale de la Province, est alimentée par le Río Mendoza et est occupée surtout par la vigne, les cultures maraîchères et les vergers. L'Oasis Centre, qui abrite la Vallée de Uco, est irriguée par le Río Tunuyán, et les arbres fruitiers, les noyers et les amandiers prédominent. Enfin, dans l'Oasis Sud, qui comprend les villes de San Rafael et va jusqu'à Malarguè, coulent les Ríos Diamante, Atuel et Malarguè, qui permettent d'associer la vigne, les oliviers et les arbres fruitiers, ainsi que les pommes de terre et les cultures fourragères (plus au Sud).

- 26 L'eau est apportée depuis les cours d'eau grâce à un réseau serré de canaux aux débits différents dont l'histoire est retracée par J. R. Ponte (2006). La ville et les cultures se sont étendues au fur et à mesure que les habitants développaient de nouvelles stratégies pour capter l'eau et étendre le réseau d'irrigation. Avant l'arrivée des Espagnols, les Indiens Huarpes puis Incas avaient mis en place un système d'irrigation par inondation dont les principes ont perduré. Ils dérivèrent l'eau du Río Mendoza mettaient à profit la pente du cône de déjection pour irriguer les cultures¹. Les archives recensent ainsi la présence de quatre canaux principaux au moment de la fondation de la ville de Mendoza par Pedro del Castillo en 1561, dont est resté le canal principal connu aujourd'hui comme Canal Zanjón Cacique Guyamallén. Ce système d'irrigation hérité, consolidé et élargi par les Espagnols, a permis d'alimenter la nouvelle ville en eau potable, tout en assurant l'approvisionnement en eau des zones rurales et le fonctionnement de moulins pour le blé nécessaire à la fabrication du pain. Au cours du XVIII^e siècle, le réseau secondaire s'est étendu bien au-delà des limites de la ville vers l'Est et l'Ouest, et au XIX^e siècle la superficie irriguée a augmenté de près de 200 % par rapport au siècle précédent. Parallèlement, le système d'irrigation s'est complexifié. Les canaux remplissaient des fonctions différentes : certains servaient à collecter les eaux alluviales, d'autres étaient utilisés uniquement pour l'eau potable et pour l'irrigation, ou enfin pour l'évacuation des eaux usées. A la fin du XIX^e siècle, par souci d'hygiène et de salubrité, sont installées des canalisations d'eau potable à domicile et les canaux concentrent les seules fonctions d'irrigation. Au XX^e siècle, le recours aux eaux souterraines a ensuite permis d'incorporer des zones arides à l'agriculture et d'étendre les espaces urbains. Les puits approvisionnent en eau les zones non alimentées par les canaux, comme les nouveaux quartiers urbains (jusqu'aux quartiers privés et *villas miserias* de ces dernières années). Ils limitent surtout les risques de pénurie dans les espaces agricoles stratégiques, notamment dans les secteurs de cultures viticoles dont le rôle est devenu prépondérant au cours du XX^e siècle. Mendoza détient en effet sur les espaces de piémont le quasi-monopole de la production de vin en Argentine. Alors que la viticulture s'est orientée depuis une vingtaine d'année vers la qualité, maîtriser et optimiser les ressources en eau est devenu un enjeu supplémentaire. Dans les exploitations les plus capitalisées, l'irrigation gravitaire, dont l'eau provient des cours d'eau ou des puits, est délaissée au profit de l'irrigation au goutte à goutte. L'innovation technologique en matière d'irrigation est parfois devenue un facteur dominant dans la course à la renommée internationale tandis que la viticulture constitue « le pivot autour duquel s'organise toute la vie politique, sociale, culturelle de la région de Mendoza » (Tulet, 2005).
- 27 L'ensemble de ces éléments fait dire à J.R. Ponte (2006) que Mendoza a construit un modèle de développement rural et urbain articulé à son système hydrologique. Le patron de la ville et le parcellaire rural sont associés soit au maillage des canaux d'irrigation, soit à la nécessaire exploitation de la pente. Optimiser la ressource a constitué un fil directeur dans la construction du territoire (tant urbain que rural) des oasis de Mendoza. Les évolutions climatiques pourraient remettre en question les fondements de cette organisation.
3. L'évolution récente de l'englacement : résultats préliminaires
- 3.1. Les variations récentes de l'englacement vues par satellite
- 28 La comparaison des images satellites de 1975 et de 2000 montre une diminution des superficies englacées de l'ordre de 40% dans les massifs de l'Aconcagua et de 30% dans

le Massif du Juncal (fig. 3). Dans le détail, cette décrue se caractérise par la disparition de glaciers dans la partie nord du secteur étudié (à proximité d'Uspallata) et par un morcellement généralisé de l'englacement. En effet, le nombre de grands glaciers, dont la superficie dépassait 10 km², est passé de 19 à 6 (fig. 4) ; parallèlement la superficie moyenne d'un glacier s'est abaissée de 6 km² à 4 km².

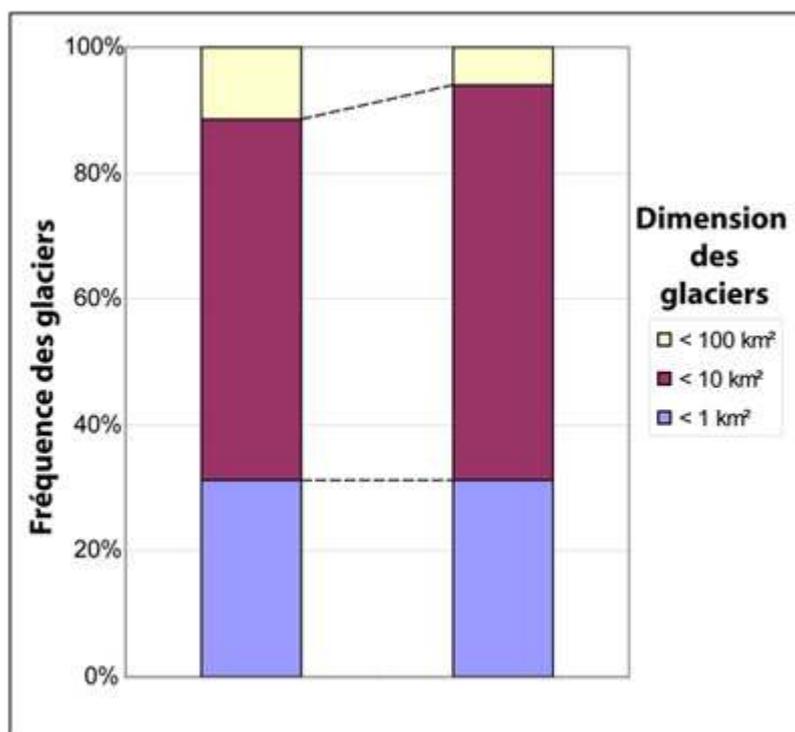
- 29 Le morcellement a une conséquence directe sur la vitesse de réaction des appareils glaciaires. Un glacier réagit avec d'autant moins d'inertie aux changements climatiques que son volume est faible. Les glaciers actuels risquent donc de répondre plus brutalement aux changements contemporains.

Figure 3 : Evolution de l'englacement entre 1975 et 2000



Des zones d'entraînement, définies sur le terrain et par le recours à des cartes levées par d'autres auteurs (Cobos, 2002 ; Espizua, 2002), ont permis de définir la signature spectrale des glaciers. La recherche de cette signature a été effectuée sur l'ensemble de l'image pour obtenir une cartographie thématique.

Figure 4 : Une disparition des grands organismes glaciaires



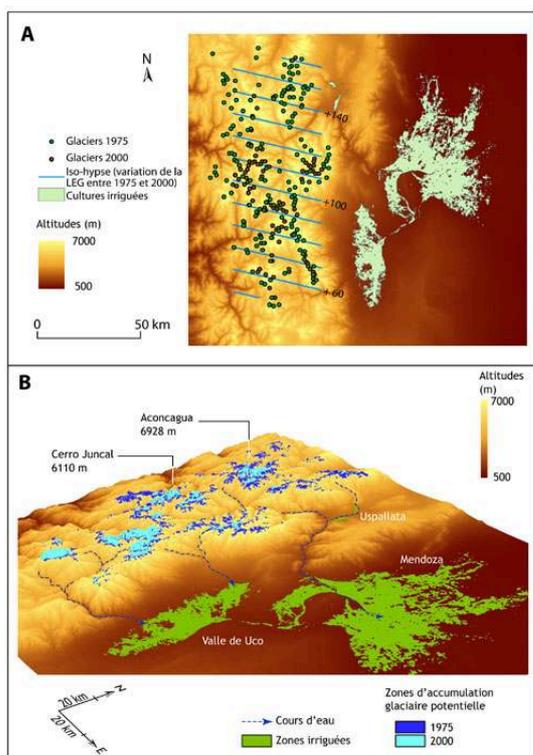
Les glaciers de dimension comprise entre 1 et 10 km² sont les plus fréquents. Noter la baisse de la fréquence de grands glaciers (i.e. > 10 km²) entre 1975 (à gauche) et 2000 (à droite), au profit des glaciers de dimension moyenne.

3.2. Une élévation de la LEG de plus de 100 mètres

- 30 La date d'acquisition des images satellites, à la fin de l'été austral (et donc de l'année glaciaire), facilite l'interprétation des LEG, qui peuvent ici s'approcher de la « steady state ELA » (*sensu* Benn et Lehmkuhl, 2000).
- 31 La tendance au retrait des glaciers correspond à une élévation de la LEG de l'ordre de 110 mètres : la LEG moyenne était de l'ordre de 4450 mètres en 1975, et de 4 560 mètres en 2000 (fig. 5A et 6). Ce rythme d'élévation est du même ordre de grandeur que celui estimé sur le versant chilien pour une même période équivalente (+ 120 m) (Carrasco *et al.*, 1998).
- 32 La tendance à la décrue glaciaire est amorcée dès la fin du XIX^e siècle (fin du Petit Âge de Glace) dans la province de Mendoza (Espizua, 2002). Il est cependant à noter que l'élévation de la LEG sur l'ensemble du XX^e siècle fut de l'ordre de 200 à 250 mètres. La moitié de l'élévation observée a donc eu lieu lors du dernier quart de siècle, montrant la tendance récente à l'accélération de la déglaciation.
- 33 Dans le détail, de très importantes disparités spatiales apparaissent : si la hausse de la LEG est modérée (< + 50 m) dans la partie sud de la zone étudiée, celle-ci est particulièrement significative (> + 150 m) dans la partie nord (proximité d'Uspallata). Les secteurs plus humides du sud de la région ont donc été moins réactifs. De même, la Cordillère Centrale a été moins affectée que la Cordillère Frontale (différence d'élévation des LEG de l'ordre de 20 m entre les deux) (fig. 5B).
- 34 Deux hypothèses explicatives (l'une n'excluant pas l'autre) peuvent être avancées. (1) Tout d'abord, les glaciers situés dans des secteurs soumis à de fortes quantités de

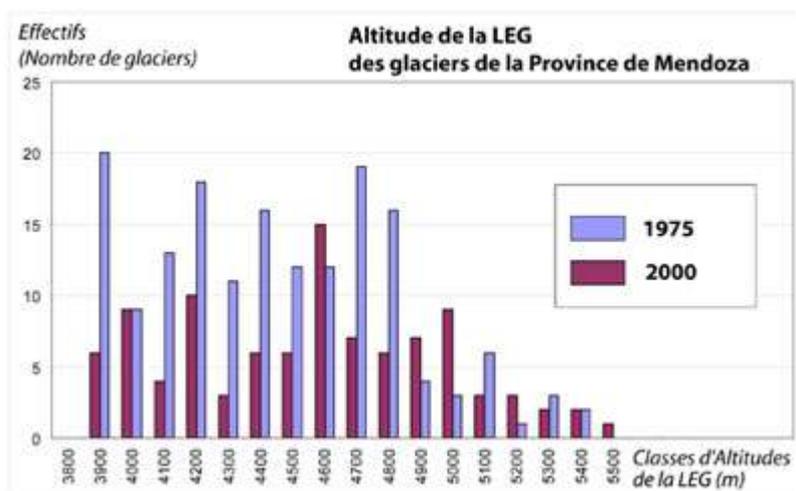
précipitations sont moins vulnérables à une hausse des températures (Francou et Vincent, 2007). (2) Le régime de précipitations du secteur est soumis à l'influence d'*El Niño Southern Oscillation* (ENSO). Ces événements ENSO sont particulièrement perceptibles dans les secteurs les plus exposés aux flux d'ouest pacifiques (partie méridionale de la province et Cordillère Centrale). Lors de ces événements les précipitations hivernales sont singulièrement importantes et il n'est pas rare de constater des accumulations neigeuses de plusieurs mètres en un événement d'une ou deux journées (> 1,80 m à Puente del Inca le 16 juillet 1987 ; > 2m à Las Cuevas le 31 mai 1991...). Dans la mesure où les séquences ENSO ont été particulièrement marquées à la fin du XX^e siècle, accompagnées de fortes chutes de neige hivernales, il est probable qu'elles aient limité l'élévation des LEG dans les secteurs les plus exposés de la Cordillère Centrale.

Figure 5 : Evolution des LEG entre 1975 et 2000



A : Evolution spatio-temporelle de l'élévation de la LEG. B : Diminution de la superficie des zones d'accumulation glaciaire potentielles. Noter l'amenuisement des zones d'accumulation glaciaire potentielle dans la partie nord de la province : secteur d'Uspallata et, dans une moindre mesure, dans le secteur de l'Aconcagua.

Figure 6 - Comparaison des LEG entre 1975 et 2000



Pour chaque gamme d'altitude de la LEG, le nombre de glaciers correspondant est indiqué. Moyenne : 4450 m en 1975, 4560 m en 2000. Ecart-type : 380 m en 1975, 450 m en 2000.

3.3. Prospective 2050

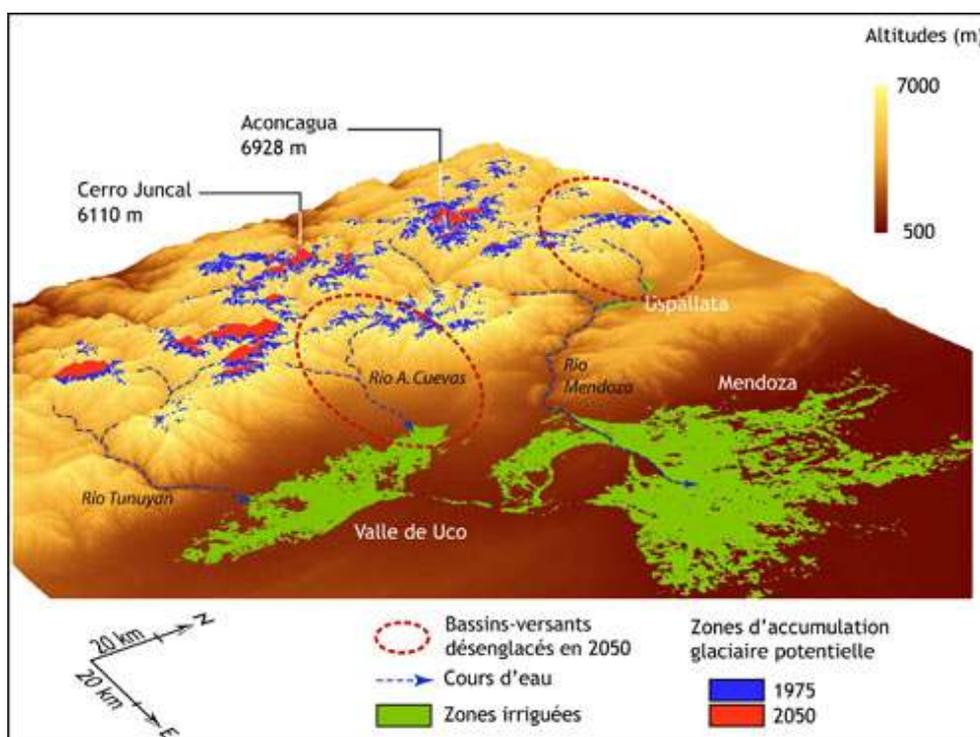
- 35 Les modèles prévoient une élévation de températures de l'ordre de 1°C dans le secteur de Mendoza (Masiokas *et al.*, 2008). Nous avons effectué une simulation des conséquences de ce réchauffement en simulant une élévation des LEG reconstituées en 2000 de 150 mètres. Nous pouvons ainsi obtenir une cartographie des secteurs où l'altitude reste suffisante pour autoriser le maintien des glaciers (fig. 7).
- 36 Deux bassins-versants seraient entièrement désenglacés : le bassin situé à l'amont d'Uspallata, et un bassin du secteur de Valle de Uco. Le secteur de l'Aconcagua serait lui aussi particulièrement affecté, avec une superficie des zones d'accumulation glaciaire potentielle qui diminuerait de 60 % entre 1975 et 2050. Cela suppose que l'englacement deviendrait nettement plus morcelé, avec une disparition des grands glaciers de vallée.
- 37 Bien sûr ce scénario ne prend pas en considération les singularités liées à la situation topoclimatique et géomorphologique de chaque glacier en fin de vie. Nous rappelons que le retrait glaciaire peut s'accélérer fortement ou, *a contrario*, être atténué par des « adaptations géomorphologiques » du glacier (couverture détritique, ...). L'intégration de ces paramètres locaux, bien mise en évidence par ailleurs (Benn et Evans, 1998), reste un travail à effectuer.
- 38 Les conséquences prévisibles la tendance à la déglaciation sur les débits seraient le passage d'un régime à connotation glaciaire vers une régime à connotation nivale :
- le pic des hautes eaux estivales serait atténué,
 - la période de hautes eaux serait plus précoce, se décalant vers le printemps voire la fin de l'hiver.
- 39 Cette tendance, caractéristique du passage d'un régime glaciaire à un régime nivale, est classique dans l'ensemble des secteurs en cours de déglaciation. Cette modification pose bien sûr un problème pour la gestion de la ressource en eau. Les hautes eaux estivales étaient centrées sur la saison végétative : elles étaient jusque là mises à profit pour être réparties dans l'espace par irrigation gravitaire. Si cette ressource estivale se tarit, ou si du moins le pic de hautes eaux devient plus précoce, il faut alors prévoir un stockage de l'eau dans le temps, en plus de prévoir sa répartition dans l'espace. Le

barrage de Potrerillos, construit en 2001, peut aider à gérer cette redistribution temporelle de la ressource en eau.

4. Perspectives de recherches 4.1. La disponibilité des ressources en eau

- 40 Ce rapide aperçu des variations glaciaires récentes montre le besoin de travailler sur l'évolution des réserves en eau stockée à l'état solide dans la province de Mendoza. Le traitement des images satellites est actuellement poursuivi (collaboration avec B. Anselme et Y. Drocourt) afin d'améliorer la précision de la détection des glaciers. Les bases de données acquises ponctuellement par les équipes du IANIGLA doivent également être complétées.
- 41 Ces compléments peuvent débiter par un travail estimant l'ampleur de l'englacement lors du PAG à l'échelle régionale, et calant chronologiquement les différents stades de ce PAG : la décrue glaciaire actuelle serait ainsi replacée dans un cadre chronologique plus large, nécessaire pour élaborer des *scenarii* d'évolution future. Ensuite, l'intégration des héritages glaciaires dans des Modèles Numériques de Terrain peut permettre d'obtenir des ordres de grandeur des volumes de glace disparus.
- 42 Par ailleurs, des études prospectant le pergélisol doivent être menées. Des travaux ont été menés plus au Nord, dans la province de San Juan, montrant le rôle de la dégradation du pergélisol dans les régimes hydrologiques (Schrott, 2002). Il faudrait donc faire le point sur :
- son extension actuelle à l'aide de mesures BTS (*Basal Temperature of Snow Cover*) ou de mesure de températures au niveau des sources,
 - sa vitesse de dégradation, éventuellement observable à travers des indices géomorphologiques de surface.
- 43 Enfin, une modélisation serait nécessaire pour simuler l'influence de la dilapidation de ces réserves d'eau à l'état solide. Un modèle de type degré - jour, estimant les abats d'eau libérés par un glacier en fonction de la fréquence mensuelle des jours de gel, pourrait être appliqué.

Figure 7 : Evolution des zones d'accumulation glaciaire potentielle à l'horizon 2050



- 44 Il apparaît que deux bassins-versants seraient entièrement désenglacés : le bassin amont d'Uspallata, et un bassin du secteur de Valle de Uco. Or, le premier alimente le drain principal qui sert de support à l'irrigation de l'oasis d'Uspallata, tandis que le second alimente en eau la partie septentrionale de l'oasis de Valle de Uco.

4.2. La gestion de la ressource

- 45 Un travail sur la gestion de la ressource en eau est en cours et il semble important d'approfondir ces recherches d'un point de vue juridique, et suivant les dimensions urbaines et rurales associées à la gestion de l'eau. Tout d'abord, l'accès à l'eau est codifié. Le droit à l'irrigation est régi par la loi de 1884 (*Ley de Aguas*) inscrite dans la Constitution provinciale qui affirme que le droit d'irrigation est indissociable de la terre. Elle a été promue par le Département Général de l'Irrigation (*Departamento General de Irrigación*) qui demeure la principale autorité en matière d'irrigation (usage et distribution de la ressource, travaux sur les canaux principaux). Son intervention n'empêche cependant pas d'autres structures publiques ou des associations d'usagers de participer à la gestion de la ressource. Les recherches pourraient permettre de comprendre comment les lois ont été fondées et comment elles sont maintenues ou adaptées pour assurer la maîtrise de la ressource sur le territoire de Mendoza. De plus, l'eau est prépondérante dans les représentations de la ville de Mendoza. Le contraste entre le paysage sec et rocailleux de la cordillère et l'importance des espaces verts dans la ville (parcs, rues et places arborées) est l'un des fondements de son charme et de sa renommée nationale et internationale. Un travail d'enquête auprès des élus chargés de l'environnement urbain, mais aussi des acteurs touristiques de la province, pourrait permettre de comprendre leur politique de gestion de l'eau. Enfin, analyser les usages de l'eau dans les espaces ruraux viserait à recenser les techniques utilisées pour l'irrigation et à saisir les enjeux d'une possible diminution de la ressource à toutes les échelles (pour les agriculteurs, pour la province, pour l'Argentine). Des entretiens ont

déjà été menés auprès de plusieurs viticulteurs, étant donné le rôle de cette activité pour la province de Mendoza. Il apparaît essentiel de diversifier les catégories de viticulteurs interrogés (par exemple selon leur degré d'insertion dans le système international), mais aussi de rencontrer d'autres producteurs car la gestion de l'eau varie selon le type de cultures.

- 46 Cette triple approche, juridique, urbaine et agricole, permettrait ainsi (i) de comprendre les jeux d'acteurs qui ont abouti à une stratégie de gestion de la ressource, (ii) d'évaluer les valeurs sociales attribuées à cette ressource en eau. Ce travail rétrospectif est nécessaire pour réfléchir avec les acteurs actuels sur les moyens d'anticiper les conséquences de pratiques agricoles plus intensives dans un contexte de raréfaction de la ressource.

Conclusion

- 47 Les résultats préliminaires obtenus sur les variations de l'englacement de la province de Mendoza montrent à quel point ce secteur d'étude est vulnérable face au changement climatique contemporain. La disparition progressive des glaciers remet en cause une stratégie de gestion de la ressource en eau, jusqu'à présent fondée sur une redistribution des eaux de fusion glaciaires, libérées au cœur de la saison végétative.
- 48 Ce travail met également en évidence l'intérêt d'une approche géographique de l'englacement, qui permettrait d'aboutir à une vision régionale de la déglaciation. L'intérêt serait de pouvoir raisonner à l'échelle de bassins-versants et donc de mettre en relation les glaciers avec leurs émissaires puis, *in fine*, avec les zones irriguées situées sur le piémont.
- 49 Coupler une approche de géographie physique, pour évaluer les réserves en eau stockées à l'état solide dans la partie amont des bassins-versants, et une approche plus sociale, et même juridique, permettrait de comprendre les jeux d'acteurs exploitant cette ressource. Les enjeux seraient dès lors de chercher à anticiper, avec les acteurs locaux, les modifications d'accès à la ressource si la tendance à la déglaciation se poursuit.

Remerciements

Les auteurs remercient les deux lecteurs de l'ensemble des remarques formulées, ainsi que Jean Marie Théodat et Maorie Seysset (UMR 8586 CNRS-PRODIG) de l'attention portée à l'édition de ce travail.

BIBLIOGRAPHIE

Benn D.I., Evans D.J., 1998. *Glaciers and glaciations*. New York, Oxford University Press, 734 p.

Benn D.I., Lehmkuhl F., 2000. Mass balance and equilibrium-line altitudes of glaciers in high mountain environments. *Quaternary International*, Vol. 65/66, p. 15-29.

Burbank D., Fort M., 1985. Bedrock control on glacial limits : examples of the Ladakh and Zaskar ranges, North-western Himalaya, India. *Journal of Glaciology*, Vol. 31, n°108, p. 143-149.

- Carrasco J., Casassa G., Rivera, A., 1998. Climatología actual del Campo de Hielo Sur y posibles Cambios por el Incremento del Efecto Invernadero. *Anales Instituto Patagonia*, Vol. 26, p. 119-128.
- Cobos D.R., 2002. Fluctuaciones glaciarias en la cuenca superior del río atuel, mendoza, argentina in Trombotto D et Villalba R. *IANIGLA, 30 years of basic and applied research on environmental sciences*. Mendoza, IANIGLA, p. 171-174
- Cossart E., 2007. Reconstitution de la géométrie 3D d'un glacier disparu et modélisation des conséquences de sa disparition - Le glacier durancien lors du Dernier Maximum Glaciaire. *Revue Internationale de Géomatique* (accepté, épreuves corrigées)
- Epizua L. 2002. Glaciaciones cuaternarias en el valle del río mendoza, andes argentinos, in Trombotto D et Villalba R. *IANIGLA, 30 years of basic and applied research on environmental sciences*. Mendoza, IANIGLA, p. 111-115.
- Francou B., Vincent C., 2007. *Les glaciers à l'épreuve du climat*. Paris, Belin, IRD, 278 p.
- Jomelli V., Grancher D., Brunstein D., Solomina O., 2007. Recalibration of the Rhizocarpon growth curve in Cordillera Blanca (Peru) and LIA chronology implication. *Geomorphology*, 93, p. 2001-2012.
- Gratton Y., 2004. *Le krigeage : la méthode optimale d'interpolation spatiale*. <http://www.iag.asso.fr>, 8 p.
- Lowe J.J., Walker M., 1994. *Reconstructing Quaternary Environments*. Hong-Kong, Longman, 446 p.
- Masiokas M.H., Villalba R, Luckman B.H., Lascano M.E., Delgado S., Stepanek P., 2008. 20th-Century Glacier recession and regional hydroclimatic changes in northwestern Patagonia *Global and Planetary Change*, Vol. 60 (1), p. 85-100.
- Meierding T.C., 1982. Late Pleistocene equilibrium-line altitudes in the Colorado Front Range : a comparison of methods. *Quaternary Research*, Vol. 18, p. 289-310.
- Nesje A., 1992. Topographical effects on the equilibrium-line altitude on glaciers. *Geojournal*, Vol. 27 (4), p. 383-391.
- Nesje A., Dahl S.O., 2000. *Glaciers and Environmental Change*. Arnold, London, 347 p.
- Nesje A., Matthews J.A., Dahl S.O., Berrisford M.S., Andersson C., 2001. Holocene glacier fluctuations of Flatebreen and winter-precipitation changes in the Jostedalbreen region, Western Norway, based on glaciolacustrine sediment records. *The Holocene*, Vol. 11 (3), p. 267-280.
- Norte F.; Simonelli S.; Heredia N., 1998. Impacto del fenómeno ENOS en el régimen hidrometeorológico de Mendoza, Argentina. *Bulletin de l'Institut Français d'Etudes Andines*, Vol. 27 (3), p. 761-770.
- Ohmura A., Kasser P., Funk M., 1992. Climate at the equilibrium line of glaciers. *Journal of Glaciology*, vol. 38, n°130, p. 397-409.
- Ponte J.R., 2006. Historia del regadío. Las acequias de Mendoza, Argentina", *Scripta Nova. Revista electrónica de geografía y ciencias sociales*. Barcelona: Universidad de Barcelona, 1er août 2006, vol. X, n°218 (07).
- Porter S.C., 1975. Equilibrium-line altitudes of Late-Quaternary glaciers in the Southern Alps, New Zealand. *Quaternary Research*, Vol. 5, p. 27-47.
- Schrott L., 2002 hidrología del permafrost de montaña y su relación con la radiación solar. estudio de una cuenca colectora en agua negra, altos andes de san juan (Argentina), in Trombotto D et Villalba R., *IANIGLA, 30 years of basic and applied research on environmental sciences*, Mendoza, IANIGLA, p. 83-87.

Sugden D., John B., 1976. *Glaciers and landscape*. Londres, Edward Arnold, 376 p.

Tulet J.-C., 2005. Le vignoble de Mendoza (Argentine), entre vin de table et vin de qualité. Bordeaux, *Cahiers d'Outre-Mer*, p. 281-200.

NOTES

1. Maïs, pommes de terre, fèves, courges constituaient alors la base de leur alimentation.

RÉSUMÉS

La région de Mendoza est particulièrement vulnérable au réchauffement climatique. Les glaciers du massif de l'Aconcagua ont amorcé un important retrait depuis la fin du Petit Âge de Glace. Or la disparition de ces glaciers risque d'entraîner une modification des régimes hydrologiques qui, jusqu'à présent, se caractérisaient par de hautes eaux estivales. Ce pic estival pourrait à l'avenir être atténué et remettre en cause les stratégies de gestion de la ressource en eau. Nous faisons ici le point sur les variations récentes de l'englacement et tentons de dessiner un scénario prospectif.

Mendoza area is highly vulnerable to the global warming. The glaciers of the Aconcagua massif are currently shrinking, this trend of retreat began at the end of the Little Ice Age. The disappearance of glaciers may modify hydrological regimes. The discharge is currently at maximum during summer (related to glacier melt), but the peak discharge may occur during spring (related to snow melt) in the next future. In this paper we synthesize the recent variations of the glaciers and propose a pattern of future variations.

INDEX

Mots-clés : Argentine, télédétection, Mendoza

Keywords : glacier, irrigation, remote-sensing

AUTEURS

ETIENNE COSSART

Etienne Cossart (etienne.cossart@univ-paris1.fr), est Maître de Conférences à l'Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne et est membre permanent de UMR 8586 CNRS-Prodig. Il a récemment publié : 1. Cossart E., Fort M., Jomelli V., Grancher D., 2006. Les variations glaciaires en Haute-Durance (Briançonnais, Hautes-Alpes) depuis le XIXe siècle : mise au point d'après les documents d'archives et la lichénométrie. *Quaternaire*, 17-1, (p. 75-92). 2. Cossart E., Braucher R., Fort M., Bourles D., Carcaillet J., 2008. The

consequences of glacial debuitressing in deglaciated areas : Pieces of evidence from field data and cosmogenic datings. *Geomorphology*, Vol 95/1-2, (p 3-26).

JULIE LE GALL

Julie Le Gall (juargall@gmail.com) est doctorante hébergée à l'UMR 8586 CNRS-PRODIG et Monitrice à l'Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne