

L'ENVIRONNEMENT ALPIN FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE : GLACIERS, RIVIÈRES ET PAYSAGES, QUELS ENJEUX ?

CHRYSTELLE GABBUD¹, MAARTEN BAKKER & NICHOLAS STUART LANE

Bull. Murithienne 135 / 2017 (2018): 39-53

Alors que tous s'accordent dans l'idée de conduire une gestion environnementale optimale, c'est-à-dire de déterminer des mesures efficaces qui permettent à la balance énergie-écologie de couvrir l'ensemble des objectifs, l'enjeu réside parfois dans le manque de connaissances concernant le fonctionnement des systèmes naturels, et des écosystèmes notamment. Les environnements alpins, moins bien maîtrisés, devraient faire l'objet d'une attention toute particulière, d'autant plus en cette année des Risques 2018. Cet article expose les principaux résultats de recherche du groupe AlpWISE (wp.unil.ch/alpenv) des scientifiques de l'Université de Lausanne, sous la direction du Professeur Dr. Stuart Lane. Il s'agit de déterminer les réponses des éléments du paysage au changement climatique rapide par une approche intégrative regroupant en particulier géographie, géomorphologie et écologie. La **figure 1** présente un résumé des interactions du paysage discutées, avec le Val d'Arolla pour terrain d'étude.

Die alpine Umwelt angesichts des Klimawandels: Gletscher, Gewässer und Landschaften, wo sind die Herausforderungen? Obwohl sich alle einig sind, dass wir den Umgang mit der Umwelt optimieren müssen, das heisst, dass wir effiziente Massnahmen zur Herstellung des Gleichgewichtes zwischen Energie und Ökologie ergreifen wollen, besteht das Problem manchmal darin, dass wir zu wenig über die Funktionsweise der natürlichen Systeme und der Ökosysteme im Speziellen wissen. Die alpine Umgebung, welche weniger bekannt ist, besondere Beachtung erhalten, umso mehr in diesem Jahr des Risikos 2018. Dieser Artikel beschreibt die wichtigsten Forschungsergebnisse der Gruppe AlpWISE der Wissenschaftler der Universität Lausanne, unter der Leitung des Professors Dr. Stuart Lane. Ziel ist es, die Reaktionen verschiedener Landschaftselemente auf den schnellen Klimawandel mit Hilfe einer integrativen Methode zu bestimmen, welche Geografie, Geomorphologie und Ökologie vereint. **Abbildung 1** zeigt eine Zusammenfassung der Prozesse in der Landschaft diskutiert, mit Hilfe des Val d'Arolla als Untersuchungsgebiet.

Mots clés:

Géomorphologie, écologie, glaciers, sédiments, connectivité, rivière, hydroélectricité, Val d'Arolla

Schlüsselwörter:

Geomorphologie, Ökologie, Gletscher, Sedimente, Konnektivität, Gewässer, Wasserkraft, Val d'Arolla

¹Institut des Dynamiques de la Surface Terrestre (IDYST), Faculté des Géosciences et de l'Environnement (FGSE), Université de Lausanne (UNIL), 1015 Lausanne
chrystelle.gabbud@unil.ch

INTRODUCTION

Depuis la fin du Petit Âge Glaciaire (PAG) dans la deuxième moitié du 19^e siècle, un réchauffement graduel des températures a été enregistré à l'échelle globale. En Suisse, une période de stabilisation du climat a été décelée entre la fin des années 1950 et le début des années 1980, suivie d'une période de réchauffement rapide depuis la fin des années 1980 (MÉTÉOSUISSE 2017) (**Fig. 2**). Sachant que la température diminue d'environ 1°C par 150 m d'élévation en moyenne et que l'augmentation globale de la température en Suisse s'élève à 2°C, cela signifie que les processus environnementaux prennent aujourd'hui place 300 m plus haut en altitude qu'au siècle dernier. C'est pourquoi les environnements de montagne, où les variations d'altitude peuvent être très grandes sur des distances horizontales très courtes, sont particulièrement sensibles aux impacts du changement climatique.

Afin de mieux comprendre l'impact de ce changement climatique sur les éléments du paysage à l'échelle du bassin versant, et de déterminer les enjeux qui en découlent, une recherche intégrée a été menée par le groupe AlpWISE (wp.unil.ch/alpenv) de scientifiques de l'Université de Lausanne, sous la direction du Professeur Dr. Stuart Lane, entre 2012 et 2017.

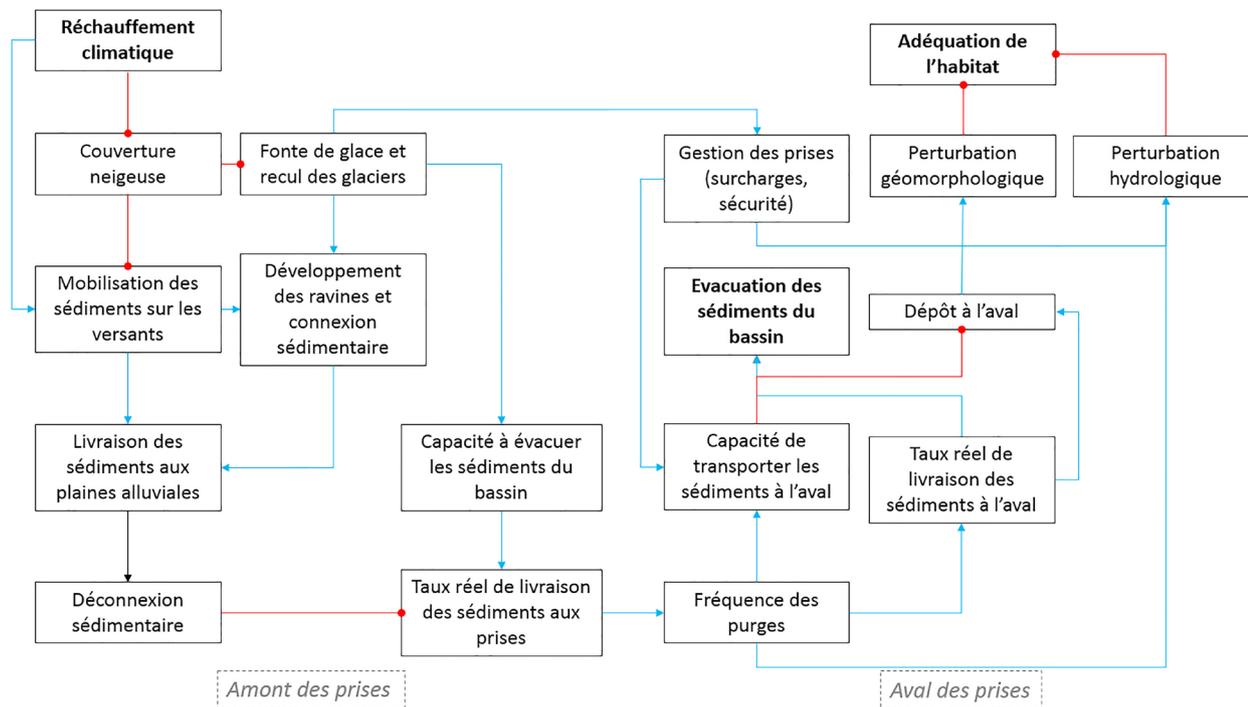
Cette recherche a pris place dans le Val d'Arolla. Véritable laboratoire à ciel ouvert et au cœur de près de 200 publications scientifiques (voir ebibalpin.unil.ch) depuis les années 1980, la réputation de ce bassin versant n'est plus à faire. La région est devenue un lieu incontournable des études en géologie, glaciologie et géomorphologie notamment, tant pour les scientifiques suisses qu'internationaux. Encore à ce jour, le Haut Glacier d'Arolla, l'un des glaciers les plus étudiés au monde (par ex. SHARP & al. 1993, NIENOW & al. 1998, HUBBARD & al. 2000, MAIR & al. 2003, GABBUD & al. 2015, 2016), reçoit la visite de centaines de chercheurs et d'étudiants

Figure 1 - Relations entre les éléments du paysage, de l'amont des prises d'eau (à gauche) à l'aval (à droite); les têtes en flèches (bleues) indiquent une relation positive [+ à +] ou [- à -], les têtes arrondies (rouges) indiquent une relation négative [- à +] ou [+ à -]; par exemple, la hausse du réchauffement climatique (+) cause la baisse de la couverture neigeuse (-) qui elle cause l'augmentation de la fonte de glace (+), alors que la hausse du réchauffement climatique (+) cause l'augmentation de la mobilisation des sédiments sur les versants (+).

universitaires par année. Les paysages de cette région, représentatifs des environnements de montagne de par leur diversité géomorphologique (REYNARD & al. 2012, LAMBIEL & al. 2015), sont soumis à la fois aux effets du changement climatique et à des modifications anthropiques (notamment pour la production hydroélectrique).

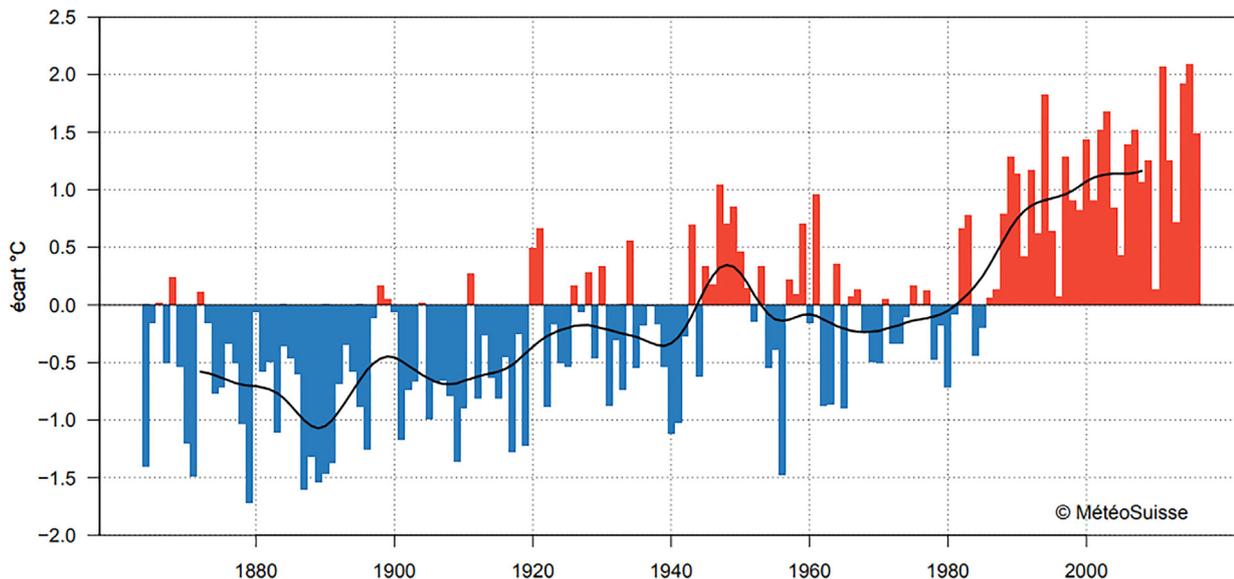
Trois observations sous-tendent les objectifs de ce projet de recherche. Premièrement, tant au niveau mondial qu'au niveau de la Suisse, les impacts du changement climatique sur les glaciers, le pergélisol, la géomorphologie et l'écologie sont traditionnellement traités de manière indépendante. Cependant, ce sont leurs interactions qui sont responsables du paysage et de son évolution. Il existe pourtant très peu d'études intégratives de l'évolution du paysage en lien avec le changement climatique. Deuxièmement, le changement climatique actuel est le résultat de processus naturels et de processus liés à l'homme (émissions de gaz à effet de serre), d'une façon indirecte. Mais les paysages alpins sont également directement impactés par l'homme, par exemple via l'abstraction de l'eau des rivières pour la production hydroélectrique. Réside donc la question de déterminer quels sont les impacts de ces processus relatifs et combinés sur le paysage alpin. Troisièmement, l'échelle temporelle de ces changements est courte, au vu du contexte de la variabilité climatique naturelle, qui elle-même influence également le paysage. Ainsi, pour mesurer ces processus et leurs changements associés, des analyses de haute précision

Figure 2 - Température moyenne annuelle en Suisse entre 1864 et 2016, en fonction de l'écart à la moyenne calculée sur la période de référence 1961-1990; en noir, évolution glissante de la moyenne pondérée sur 20 ans (MÉTÉOSUISSE 2017).



température annuelle – Suisse – 1864–2016

écart à la moyenne 1961–1990



- années au dessus de la moyenne 1961–1990
- années en dessous de la moyenne 1961–1990
- moyenne pondérée sur 20 ans (filtre gaussien passe-bas)

© MétéoSuisse

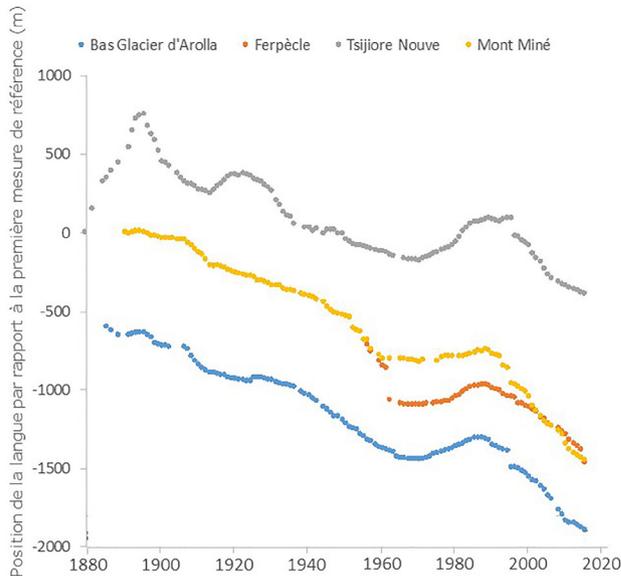


Figure 3a - Evolution de la position de la langue glaciaire pour 4 glaciers du Val d'Arolla (Bas Glacier d'Arolla, glaciers de Ferpècle, Tsijiore Nouve, Mont Miné) entre 1880 et 2016.

et à haute résolution sont nécessaires. Dans ce contexte, la recherche se focalise sur quatre questions clé: premièrement, quelle est la réponse des éléments du paysage au changement climatique rapide, surtout suite au recul des glaciers et à la fonte du pergélisol? Deuxièmement, est-ce que ces changements mènent à la modification du taux de livraison de l'eau et des sédiments vers l'aval? Troisièmement, quelle est l'influence des infrastructures anthropiques, principalement en lien avec la production hydroélectrique, sur ces transferts? Quatrièmement, quelles sont les conséquences pour les écosystèmes des cours d'eau? Ce manuscrit synthétise les réponses à ces questions.

RÉPONSE DU PAYSAGE ALPIN FACE AU RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE

Parmi les éléments du paysage alpin sensibles au réchauffement climatique, les réponses des glaciers sont particulièrement éloquentes. Les phases de crues/décrués, ou avancées/reculs des glaciers sont significativement corrélées avec les variations de températures. À titre d'exemple, la **figure**

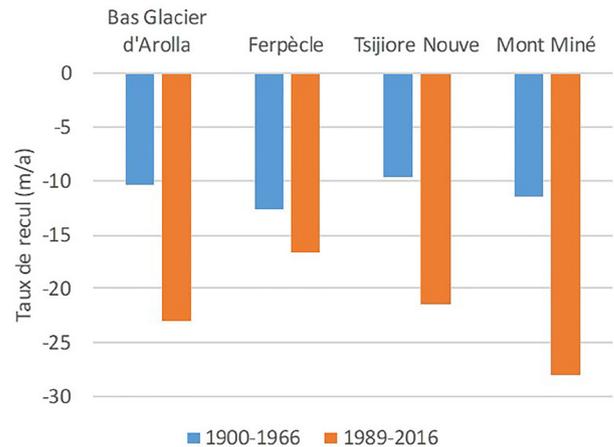


Figure 3b - Taux de recul comparé pour les périodes 1900-1966 et 1989-2016; adaptés d'après les données du VAW 2017.

3a montre la position de la langue du Bas Glacier d'Arolla, ainsi que des glaciers de Ferpècle, Tsijiore Nouve et Mont Miné (basé sur les données mise à disposition par le VAW 2017) dans le Val d'Hérens depuis les années 1880. D'abord marqués par une tendance au recul depuis la fin du PAG, ces glaciers affichent une phase de crue dans les années 1960-1980 en réponse à la stabilisation climatique (**Fig. 2**), suivie par une nouvelle phase de décrue parallèle au réchauffement climatique. Les deux périodes de recul glaciaire ne sont pourtant pas identiques: le taux de recul durant la période 1980-2016 est nettement plus élevé que durant la période 1900-1966 (**Fig. 3b**), jusqu'à deux fois plus élevée pour certains glaciers.

Entre 1973 et 2010, environ un tiers des surfaces englacées suisses a disparu (FISCHER & *al.* 2014). Le versant ouest du Val d'Arolla (crête Veisivi – La Tsa) montre un deuxième effet du réchauffement sur l'écoulement des glaciers vers l'aval: la fonte de la glace de surface permet à l'eau de s'infiltrer jusqu'au soubassement rocheux, entraînant une lubrification sous-glaciaire et l'écoulement du glacier. Ce phénomène touche principalement les petits glaciers, souvent suspendus.

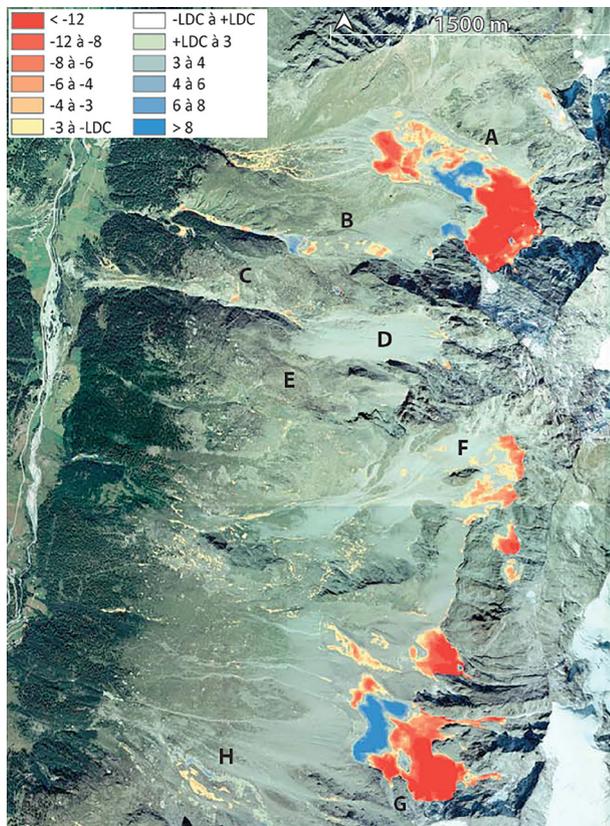


Figure 4 - Pertes (rouge) et gains (bleu) dans la hauteur (m) pour différentes formes géomorphologiques de la crête Veisivi – La Tsa: glacier de Tsarmine (A), glacier rocheux de Tsarmine (B), éboulement de Perroc (C), éboulis de Perroc (D), glacier rocheux de Lé Blâva, (E), glacier de Genevois (F), glacier de La Tsa (G), glacier rocheux de La Roussette (H); LDC pour limite de détection des changements; adapté d'après MICHELETTI & al. 2015.

À titre d'exemple, le glacier de Tsarmine affiche une fonte de près de 20 m entre 1967 et 2012 (MICHELETTI & al. 2015) (**Fig. 4**, zone A). MICHELETTI & al. (2015) montre aussi une accélération des glaciers rocheux sur ce versant. Outre les glaciers, le taux de changement des autres formes géomorphologiques présentes est assez peu élevé. Néanmoins, au vu du temps d'adaptation nécessaire, même si le taux de changement est peu élevé, le bassin versant est tout de même globalement devenu plus actif.

RÔLE-CLÉ DES GLACIERS ET DE LA CONNECTIVITÉ SÉDIMENTAIRE

La fonte générale en altitude engendre la libération d'un stock non seulement d'eau, mais également de sédiments vers l'aval. En effet, les moraines et versants en pente, libérés de glace, sont déstabilisés. Les sédiments, non consolidés,

sont livrés par gravité au pied des moraines. Ceux-ci sont alors remobilisés vers l'aval par les écoulements, à condition que la connectivité entre les versants et la plaine alluviale soit suffisante (LANE & al. 2017). Cette connectivité est influencée par deux processus clé: (1) les déconnexions géomorphologiques, engendrées par exemple par les moraines; et (2) les déconnexions hydrologiques. Une déconnexion géomorphologique se développe quand la pente diminue voire devient négative et que l'énergie nécessaire au maintien du transport des sédiments n'est plus suffisante. Le **figure 5** illustre l'accumulation potentielle (écoulement par gravité) dans une portion du bassin de la plaine alluviale du Haut Glacier d'Arolla. La zone B montre que la moraine latérale des années 1850 crée une rupture de pente et donc une accumulation sédimentaire: c'est la déconnexion dite géomorphologique. Dans la région D, la zone d'accumulation à l'amont devient plus diffuse à l'aval, ce qui va diminuer la capacité de l'eau à transporter les sédiments et engendrer une déconnexion hydrologique. Ainsi, même si le changement climatique provoque la libération de sédiments à l'amont de ces zones de déconnexion, ils ne sont pas forcément transférés à l'aval. Toutefois, la connectivité est dynamique, et la zone C pointe des ravines développées dans les moraines et les versants en pente déstabilisés suite au recul du glacier, qui permettent l'amélioration de la connectivité. Au contraire, les cônes alluviaux (par ex. zone D, **Fig. 5**) développés suite à la livraison des sédiments depuis l'amont, provoquent une diminution de la connectivité. Ainsi le potentiel de transfert des sédiments n'est pas qu'une fonction de la connectivité amont-aval mais aussi une fonction de l'évolution de la connexion et la déconnexion liée à l'érosion et au dépôt des sédiments (MICHELETTI & LANE 2016, LANE & al. 2017). La plaine alluviale (zone A, **Fig. 5**) elle-même joue un rôle

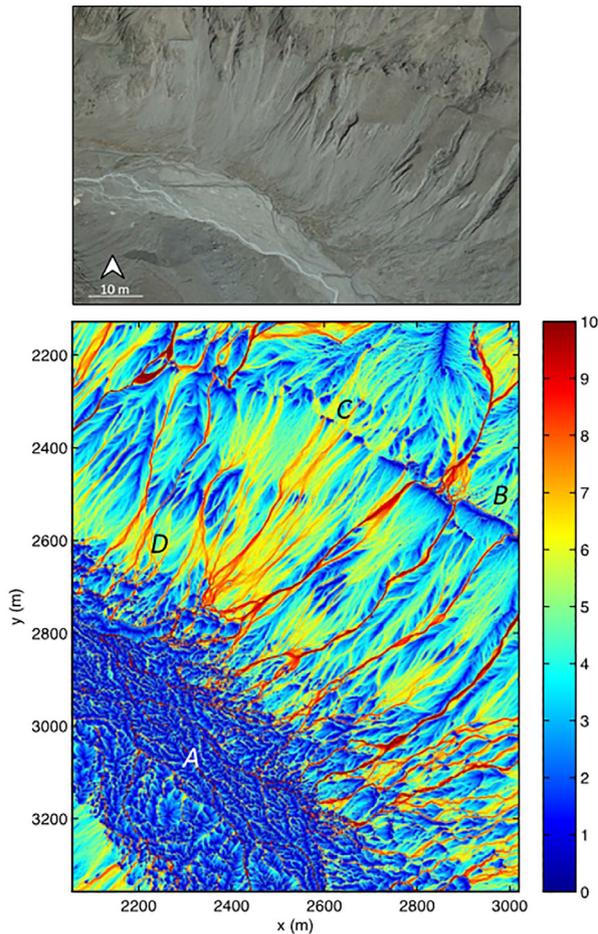


Figure 5 - Carte d'accumulation (logarithmique, m^2) potentielle (écoulement par gravité), pour une partie du bassin du Haut Glacier d'Arolla, illustré au-dessus par l'orthoimage 2018 (Fond de carte SwissTopo®, 2018); plaine alluviale du glacier (A), moraine du milieu des années 1850 (B), découpage de la moraine de 1850 par le développement de ravines suite au recul du glacier (C), dépôt des sédiments et formation d'un cône alluvial dans la plaine alluviale; adapté d'après MICHELETTI & al. 2015.

prépondérant dans ces processus car dans cette région, c'est la capacité de la rivière à éroder et à transporter les sédiments livrés depuis l'amont qui va déterminer si les sédiments sont stockés dans la plaine alluviale (dans les cônes alluviaux ou sous la forme de dépôts fluviatiles) ou transférés hors du bassin.

Pour les bassins les plus raides comportant des petits glaciers suspendus (par ex. Douves Blanches, Bertol), la déconnexion hydrologique est prépondérante (MICHELETTI & LANE 2016).

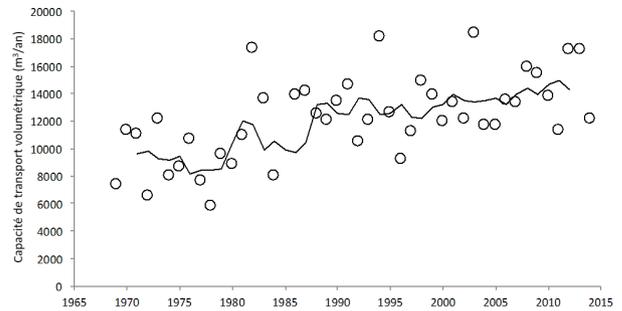


Figure 6 - Capacité de transport volumétrique des sédiments (m^3/an) calculée d'après LANE & al. 2017, avec moyenne mobile calculée sur 5 ans.

Les événements extrêmes comme les crues jouent également un rôle important pour relancer la connexion par la création de chenaux d'écoulement où l'évacuation des sédiments peut s'effectuer de façon plus efficace. Pour les bassins plus englacés, avec formation de plaines alluviales, c'est le volume d'eau relâché suite à la fonte de la glace qui est prédominant, en particulier durant la deuxième moitié de l'été lorsqu'il y a moins de neige sur les glaciers, car leur albédo est diminué et l'efficacité de la fonte augmentée. Les pics de débits journaliers augmentent la capacité de transport dans la plaine alluviale (LANE & al. 2017). La **figure 6** montre l'évolution de la capacité de transport volumétrique des sédiments pour le Haut Glacier d'Arolla entre 1969 et 2014, avec une augmentation assez marquée durant la deuxième moitié des années 1980, évolution aussi notée à l'échelle du bassin du Rhône (COSTA & al. 2018). Cette période marque le début du recul plus rapide du Haut Glacier d'Arolla dont l'interface neige-glace se déplace un peu plus à l'amont presque chaque année. Cela montre l'influence de l'accélération de la fonte de glace pour l'augmentation de l'évacuation des sédiments du bassin. À l'avenir, un seuil de rendement finira par être atteint, lorsque la quantité de glace à fondre ne sera plus suffisante et les glaciers trop petits (FARINOTTI & al. 2012); c'est le phénomène de «pic d'eau» (peak water; issu du terme «pic pétrolier» (peak oil), GLEICK & PALANIAPPAN 2010). Cette pénurie d'eau engendrera une diminution de la livraison sédimentaire. La situation actuelle est donc provisoire.

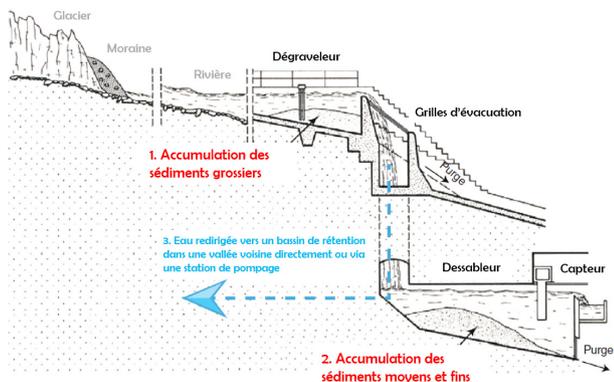


Figure 7a - Schéma typique d'une prise d'eau (adapté d'après BEZINGE & al. 1989).

IMPACTS DE L'HOMME ET GESTION SÉDIMENTAIRE LIÉE AUX PRISES D'EAU

À l'aval des glaciers alpins se trouvent fréquemment des infrastructures de production hydroélectrique. La majorité des infrastructures de prélèvement de l'eau en Suisse sont des prises d'eau, qui font partie d'un réseau de captages et redirigent généralement l'eau vers un bassin de rétention à l'amont d'un barrage via un réseau de conduits ou vers une station de pompage. Généralement, une prise d'eau est

constituée d'un ou deux bassins de rétention des sédiments pour leur gestion. S'il y en a deux, les sédiments plus grossiers se déposent dans un premier bassin, le dégraveleur, puis l'eau est acheminée vers un second bassin, le dessableur, où elle stagne afin de permettre le dépôt des sédiments plus fins, puis l'eau claire est utilisée pour la production hydroélectrique (BEZINGE & al. 1989), à l'instar de la prise d'eau de Bertol Inférieur par exemple (Fig. 7). Etant donnée leur faible capacité de stockage, ces bassins se remplissent rapidement, surtout durant la période de fonte (GABBUD & LANE 2016b). Afin d'assurer le bon fonctionnement de la prise d'eau, les bassins sont vidangés régulièrement, sous la forme de purges. Ces purges permettent de maintenir la connectivité sédimentaire entre l'amont et l'aval de la prise, contrairement aux barrages qui contiennent les sédiments derrière un mur pour de longues périodes (années).

Le bassin versant d'Arolla compte 11 prises d'eau. Directement implantée dans la Borgne d'Arolla, la prise d'eau de Bertol Inférieur est la plus fréquemment purgée, en

Figure 7b, c, d - Prise d'eau de Bertol Inférieur, b) vue de face, c) en vue aérienne (GRANDE DIXENCE SA 2006), d) lors d'une purge.



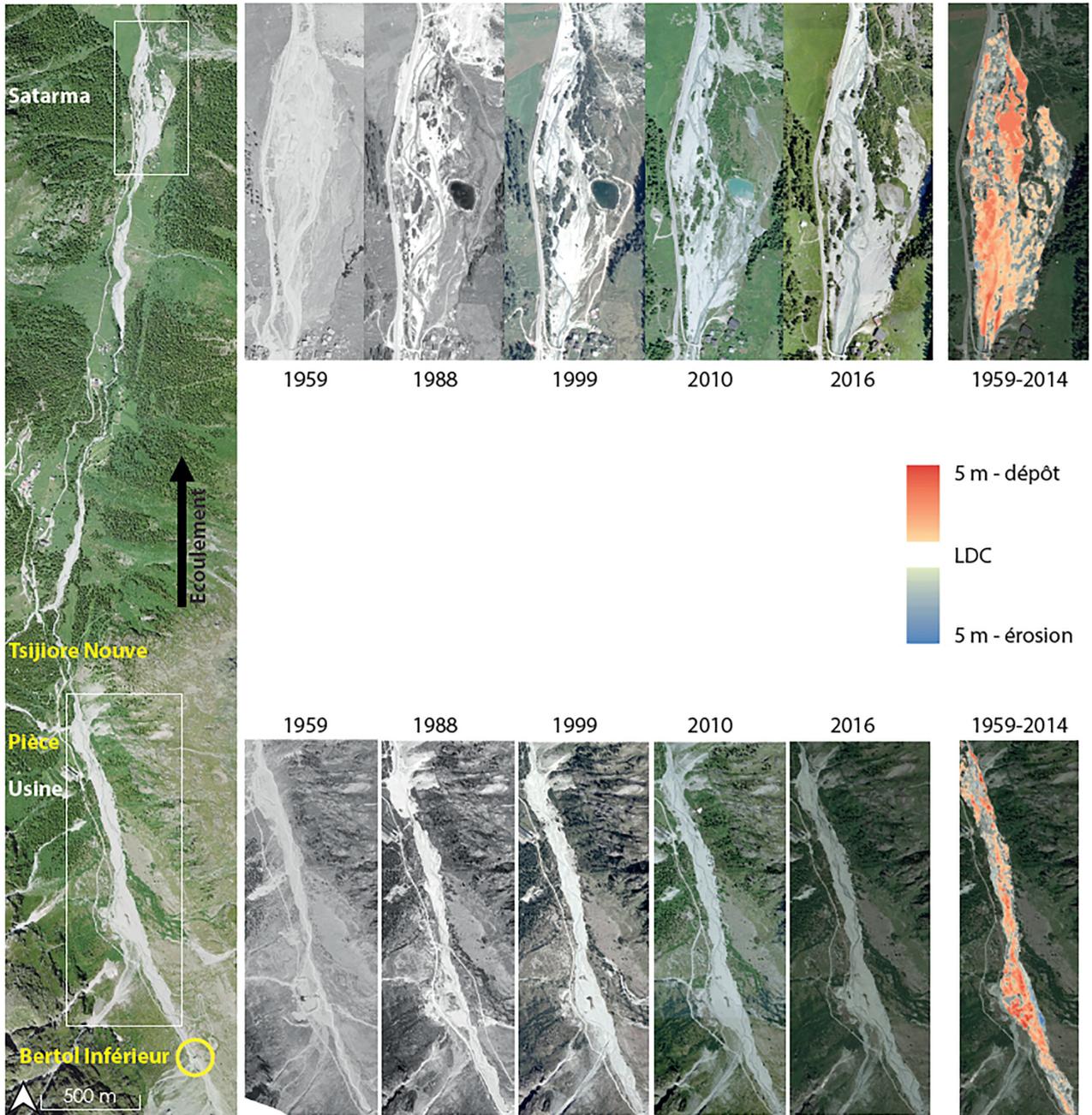


Figure 8 - À gauche, vue aérienne de la Borgne d'Arolla, entre la prise d'eau de Bertol Inférieur et la zone de Satarma (Google map); au centre, les orthophotos, fournies par SwissTopo®, montrent l'évolution historique de la zone la plus en amont et la plus en aval; à droite, modèle numérique de terrain (MNT) de différence des zones; LDC pour limite de détection des changements (adapté d'après LANE & al. 2014 et BAKKER & al. 2018).

moyenne entre 3 et 4 fois par jour en été, pour des durées comprises entre 15 minutes et 60 minutes majoritairement (GABBUD & *al.* en révision (b)), en fonction de la quantité de sédiments délivrés depuis l'amont et de la capacité de stockage des bassins. Ces vagues d'eau fortement chargées en sédiments provoquent une grande instabilité du chenal en aval car elles engendrent une succession de phases de dépôt et d'érosion, en fonction de la capacité de transport associée (LANE & *al.* 2014, BAKKER & *al.* 2018). Les recherches menées dans la Borgne d'Arolla ont permis de quantifier les changements morphologiques de ce cours d'eau à l'échelle des décennies grâce à la photogrammétrie aérienne (BAKKER & LANE 2016, **Fig. 8**). La soustraction de deux modèles numériques de terrain (MNT), soit la topographie du paysage en trois dimensions, à deux dates différentes, permet de mettre en évidence et quantifier les zones de dépôt et d'érosion dans le temps.

Depuis la construction des différentes prises d'eau, dans les années 1950-1960, le lit de la rivière s'est de façon générale élargi et surélevé, localement jusqu'à plus de 3 m en 50 ans (BAKKER & *al.* 2018), tant à l'aval direct de la prise d'eau qu'à Satarma à 5 km en aval. Cette aggradation nette a eu lieu de façon variable dans le temps suite à la mise en service des systèmes de production hydroélectrique, avec d'abord la réduction modérée de la largeur du chenal, suivie d'une phase d'aggradation sédimentaire massive entre 1988 et 1995, et après 2005, qui coïncident avec les périodes d'augmentation de l'apport sédimentaire en lien avec le réchauffement climatique (**Fig. 5**). L'expansion latérale du cours d'eau s'est également effectuée par étapes. La largeur du lit a d'abord diminué jusqu'en 1977, permettant une diminution des perturbations naturelles et la colonisation de la végétation primaire sur l'ensemble du secteur. Ensuite, en lien avec l'augmentation de la livraison sédimentaire, et donc de la fréquence des purges, le lit s'est élargi progressivement et les dépôts sédimentaires ont recouvert la végétation en place. Alors que l'aggradation

domine, l'érosion peut également survenir, notamment en lien avec des crues non régularisées, en particulier lorsque le système atteint sa capacité maximale, ce qui force les infrastructures à libérer de plus grandes quantités d'eau, peu chargées en sédiments en comparaison avec les purges, en aval. Cela arrive de plus en plus fréquemment, notamment depuis 2005, en lien avec l'accélération du réchauffement climatique et ce qui a conduit à l'érosion de la zone immédiatement à l'aval de la prise de Bertol inférieur.

Avec le transfert de l'eau vers le Lac des Dix, la capacité de transport dans la Borgne d'Arolla a fortement diminué, mais la connexion sédimentaire est restée maintenue aux prises, ce qui explique la tendance au dépôt. Néanmoins les analyses montrent que seuls 25% des sédiments livrés aux prises restent stockés dans la Borgne d'Arolla jusqu'à Satarma (BAKKER & *al.* 2018), ce qui signifie que les purges et les débits non régularisés assurent le transport d'environ 75% des sédiments livrés hors du système. La modélisation a démontré que cela est dû au fait que sans la prise d'eau, le taux de livraison des sédiments serait bien inférieur à la capacité de les transporter. La mise en place de la prise d'eau a diminué l'ampleur de la capacité de transport, bien que de façon peu importante. En résultat, la rivière est devenue plus sensible aux variations interannuelles de la fréquence des purges et des crues non régularisées. Cette augmentation dans la sensibilité de la rivière au climat et à sa variabilité est donc une conséquence directe de la gestion de l'eau dans le bassin (BAKKER & *al.* 2018). Vu qu'une augmentation de la livraison des sédiments implique aussi une augmentation de la fréquence des purges et donc de la capacité de transport, cela explique pourquoi il est possible de repérer les impacts du réchauffement climatique dans le taux de livraison des sédiments (fraction fine) aussi à l'aval, jusqu'au Lac Léman (COSTA & *al.* 2018), même si le bassin versant est fortement impacté par l'exploitation hydroélectrique.

MODIFICATIONS ÉCOLOGIQUES LIÉES À L'EXPLOITATION HYDROÉLECTRIQUE

Les purges des bassins de rétention induisent donc des modifications morphologiques importantes, créant une instabilité du chenal. Alors que les débits auraient naturellement augmenté et diminué dans le Borgne d'Arolla en l'absence de prélèvements d'eau en raison des cycles quotidiens de la fonte des glaciers, ces purges diffèrent en raison de leur fréquence, du taux d'augmentation et de diminution du débit et des concentrations exceptionnelles de charges en suspension et de charges de fond qu'elles contiennent. En particulier, ces concentrations élevées réduisent la pénétration de la lumière et la quantité d'oxygène dissous, peuvent obstruer les refuges, colmater le lit de la rivière et réduire les échanges avec la nappe phréatique, évacuer la matière organique et les ressources ou en réduire la disponibilité, modifier la température du cours d'eau et entraîner la dégradation de l'habitat (QUINN & *al.* 1992; GABBUD & LANE 2016a, 2016b). En termes de fréquence, certaines parties de la Borgne d'Arolla peuvent être touchées par ces inondations de courte durée (principalement entre 30 et 45 min) jusqu'à 17 fois au total en 24 heures (purges de graviers et sédiments fins confondues), et au moins 2 fois par jour entre la mi-juin à la mi-septembre (GABBUD & *al.* en révision (b)), ce qui représente un taux de perturbation beaucoup plus élevé en fréquence que le pic de débit diurne naturel que l'on trouve communément dans les rivières glaciaires. Les crues saisonnières impactent également le cours d'eau à grande échelle.

Des échantillonnages de macroinvertébrés (selon la méthode IBCH, voir OFEV 2010), organismes sans squelette mesurant en moyenne entre 0.5 et 2 cm et qui sont à la base de la chaîne alimentaire de nombreux poissons, amphibiens et oiseaux, ont été effectués. Ces organismes qui passent la majeure partie de leur vie dans l'eau sont considérés comme des bio-indicateurs,

soit des indicateurs de la qualité du milieu. Les prélèvements ont été effectués à la fois dans la Borgne d'Arolla, entre le Bas Glacier d'Arolla et la région de Satarma, et dans ses affluents principaux naturels (non perturbés par des mesures anthropiques), servant de systèmes de référence (**Fig. 9**).

La faune aquatique réagit de façon très sensible aux variations de la fréquence des purges (GABBUD & *al.* en révision (b)). Durant la période d'intensification de la fréquence des purges en été, et donc d'intensification de l'instabilité du chenal principal, aucun invertébré n'est détecté dans la Borgne d'Arolla, malgré le fait que les affluents nivaux et glaciaires latéraux, affichant une écologie plutôt riche et variée, puissent acheminer des invertébrés dans le chenal principal, en particulier les affluents possédant des caractéristiques comparables (régime, température, torrentialité, etc.) (GABBUD & *al.* en révision (a)). Par contre, sitôt la fréquence des purges diminuée en automne, une recolonisation rapide se met en place, associée majoritairement à la capacité du chenal principal à recruter des individus depuis les affluents qui l'alimentent, et à la mise en place d'habitats plus stables. Ce sont principalement les espèces de l'ordre des Diptères qui s'implantent, bien connues pour être omniprésentes, opportunistes et résilientes, avec une capacité de renouvellement rapide et une grande mobilité (JONES & *al.* 2012) et les Trichoptères. Ces communautés se développent et se diversifient rapidement pour produire des populations plus riches et plus grandes en hiver et au début du printemps, à très basse température, et commencent à inclure de nombreux Ephemères ainsi que les espèces les plus sensibles comme les Plécoptères, alors que les communautés des affluents permanents environnants varient peu (GABBUD & *al.* en révision (b)). Ainsi, malgré l'influence des purges en été, une écologie peut s'établir dans la Borgne d'Arolla sitôt le taux de perturbation diminué. La rapidité de recouvrement de la Borgne d'Arolla évoque qu'il se peut que les capacités de résistance et de résilience des macroinvertébrés alpins soient bien plus élevées que prévu (MILNER & PETTS 1994).

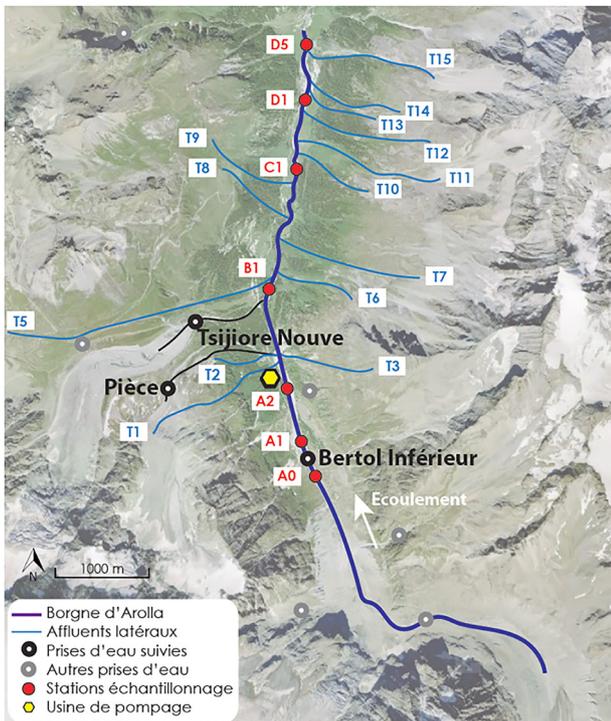
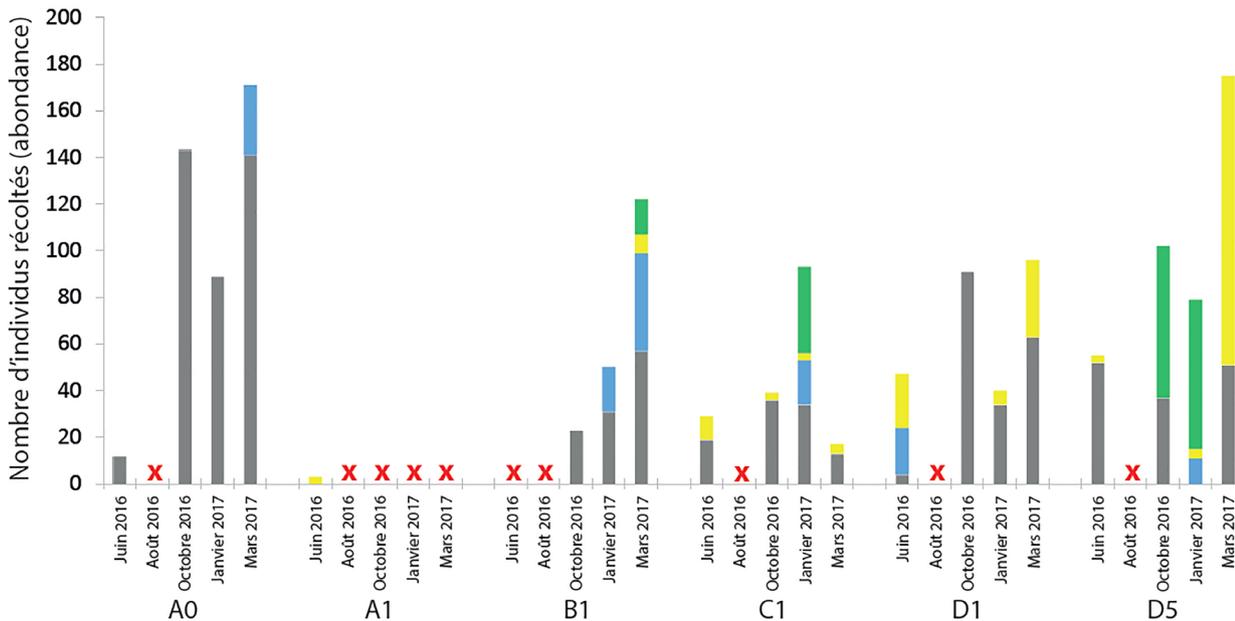
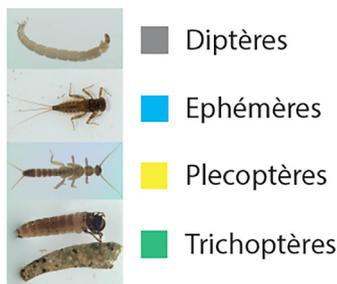


Figure 9a - La Borgne d'Arolla, du Haut Glacier d'Arolla à Satarma; en noir et en gris les prises d'eau du bassin versant; en rouge les lieux de prélèvements de macroinvertébrés dans la Borgne d'Arolla elle-même, avec A0 en amont de la prise d'eau de Bertol Inférieur; et en bleu dans les principaux affluents latéraux.

Figure 9b - Résultats des récoltes de macroinvertébrés dans la Borgne d'Arolla, de A0 à D5, pour les mois de juin, août et octobre 2016 et janvier et mars 2017; verticalement, la longueur des barres représente l'abondance, soit la quantité d'individus récoltés par station, x=0 individu; les couleurs se réfèrent aux ordres d'appartenance des macroinvertébrés, reportés et illustrés ci-dessous.



L'augmentation de la diversité des macroinvertébrés en hiver dans des rivières glaciaires tant non régulées que soumises à des prélèvements d'eau a été soulignée dans d'autres études (par ex. FÜREDER & *al.* 2001, ROBINSON & *al.* 2001, BROWN & *al.* 2015), expliquée par des conditions diurnes plus stables car moins perturbées en hiver. Les populations de macroinvertébrés de la Borgne d'Arolla sont non seulement plus nombreuses et plus riches en hiver qu'en été, mais peuvent même s'avérer plus abondantes et diversifiées que certains affluents permanents comparables du bassin versant. Des analyses statistiques utilisant l'indice de dissimilarité de Bray-Curtis, effectuées au niveau de la famille, révèlent même que les communautés de la Borgne d'Arolla en hiver sont similaires aux communautés de certains affluents environnants comparables en été (par ex. les affluents glaciaires T02, T06 ou T15) (GABBUD & *al.* en révision (b)). Cet enjeu renforce l'importance du débat concernant les stratégies d'échantillonnage pour évaluer la qualité biologique de l'eau, notamment en haute altitude, qui préconisent rarement l'échantillonnage en hiver, pourtant déterminant.

Dans ce contexte, des questions sur la mesure dans laquelle les débits environnementaux conduiront eux-mêmes à des améliorations de la macrofaune aquatique peuvent être soulevées. La zone amont (A1 et A2), entre la prise d'eau de Bertol Inférieur et l'usine de pompage d'Arolla, n'est alimentée par aucun affluent et est dépourvue de vie (c'est-à-dire que moins de 3, respectivement 10 individus pour des groupes en particulier selon les normes IBCH en vigueur ont été trouvés; voir OFEV 2010) pendant toute la période étudiée (mai à octobre 2015, 2016 et 2017, et janvier et mars 2017) même lorsque la fréquence de rinçage est réduite. Ici il est possible que le manque d'eau soit responsable du manque de vie, hypothèse à tester via l'étude d'autres têtes de bassins versants similaires à la fois naturels et anthropisés. L'introduction d'un débit minimum améliorera probablement en ce sens cette zone principalement en automne, bien que la température et l'oligotrophie puissent rester des facteurs

limitants. Pour les sites A1 et A2, les données (GABBUD & *al.* en révision (b)) suggèrent qu'il est peu probable que les débits minimums induisent un réel impact durant les mois d'été. Un débit permanent est par contre déjà assuré pour les sites B, C et D en aval grâce aux apports des affluents latéraux non régulés et de la nappe phréatique (**Fig. 9**). Étant donné que la seule possibilité de purger les apports sédimentaires est l'ouverture des pièges à sédiments, qu'il s'agisse de gravier ou de sable, il est hautement improbable que les bénéfices de débits plus élevés avec des charges de sédiments plus faibles puissent être réalisés. En effet, étant donné que les purges restent nécessaires, les refuges nouvellement évacués par l'eau claire seront probablement rapidement à nouveau remplis et la remobilisation des sédiments maintiendra l'instabilité de l'habitat. Le principal défi consiste à réduire la fréquence à laquelle il s'avère nécessaire de vider les bassins des prises d'eau, sans toutefois les éliminer, car certaines perturbations peuvent être précieuses pour ces écosystèmes. Les macroinvertébrés tolèrent un certain niveau de perturbation (ROBINSON & *al.* 2001, ESPA & *al.* 2015), mais les taux actuels semblent trop élevés pour qu'ils puissent y faire face.

La rétention des sédiments en amont, par le creusement de bassins directement dans les marges proglaciaires, dont l'étendue est de plus en plus marquée suite à la récession des glaciers, pourrait être propice en ne nécessitant que peu d'intervention d'ingénierie. Cette solution pourrait être particulièrement intéressante car elle permettrait de diminuer sans complètement stopper la quantité de sédiments arrivant dans les bassins de la prise d'eau, réduisant ainsi la fréquence des purges nécessaires à leur vidange. Cette diminution des perturbations permettrait ainsi la mise en place d'habitats plus durables qui pourront alors rapidement être colonisés par les macroinvertébrés en provenance notamment des affluents naturels environnants. Ces écosystèmes pourront alors faire face à un taux de perturbation plus faible et prospérer plus facilement. Néanmoins, ce type de solutions occasionne des modifications paysagères non négligeables et l'accumulation

de dépôts de matériaux peut aussi représenter un risque dû à leur remobilisation possible lors d'événements de grande ampleur. Une pesée des intérêts reste donc indispensable.

Le contexte de la gestion de l'eau en Suisse se doit de satisfaire de nombreux objectifs, parfois contradictoires. Dans le domaine de l'assainissement de la force hydraulique, des intérêts divergents doivent être gérés. En particulier, d'une part, la loi suisse sur l'eau, la LEau, via l'Office Fédéral de l'Environnement (OFEV), impose la mise en place de débits minimums à l'aval des infrastructures prélevant l'eau des rivières afin de garantir la sauvegarde des biotopes; d'autre part, le pays s'est également engagé, via l'Office Fédéral de l'Energie (OFEN), à la sortie du nucléaire à l'horizon 2050, en remplaçant une partie de cette énergie par l'hydroélectricité, avec comme objectif particulier celui d'augmenter le pouvoir hydroélectrique existant de 10%. Ainsi, les législations demandent à la fois de libérer plus d'eau pour les rivières en aval (OFEV), et moins d'eau pour les rivières en aval afin que celle-ci serve la production hydroélectrique (OFEN). La gestion de l'eau en Suisse doit donc aujourd'hui établir une stratégie qui garantisse à la fois la viabilité écologique des cours et l'avenir hydroélectrique du pays.

Des résultats infructueux ou négligeables de la régulation des rivières en haute altitude sur la composition des populations de macroinvertébrés ont déjà été mis en évidence par d'autres. BROWN & al. (2015), par exemple, ont constaté que même si le débit et la température de l'eau augmentaient grâce à l'introduction d'un débit minimum, les populations d'invertébrés ne s'amélioreraient pas de manière significative. Même si nous ne pouvons pas conclure que les effets de l'introduction du débit minimum seraient négligeables, nos recherches soulignent qu'il est nécessaire d'établir, dans ces rivières de haute altitude régulées par des prises d'eau, non seulement des directives de gestion de l'eau, mais également des considérations en termes de gestion des sédiments, afin de garantir des rivières alpines écologiquement durables.

REMERCIEMENTS

Ces recherches n'auraient jamais pu voir le jour sans le soutien de l'Université de Lausanne et du Fonds National Suisse (FNS) via les projets PNR 70 - Virage énergétique «HydroEnv - Optimizing environmental flow releases under future hydropower operation» et Synergia «SedFate - Sediment fate in a changing watershed during the Anthropocene». Nous remercions également les nombreuses personnes aidantes sur le terrain, HYDRO Exploitation SA et Alpiq SA pour les données fournies, ainsi que Régine Bernard pour sa relecture attentive et ses recommandations estimées.

RÉFÉRENCES

- BAKKER, M., A. COSTA, T. A., SILVA, L. STUTENBECKER, S. GIRARDCLOS, J.-L. LOIZEAU, P. MOLNAR, F. SCHLUNEGGER & S. N. LANE 2018. Combined flow abstraction and climate change impacts on an aggrading Alpine river. *Water Resources Research* 54: 223-242.
- BAKKER, M. & S. N. LANE 2016. Archival photogrammetric analysis of river-floodplain systems using Structure from Motion (SfM) methods. *Earth Surface Processes and Landforms* 42: 1274-1286.
- BEZINGE, A., M. J. CLAR, A. M. GURNELL & J. WARBURTON 1989. The management of sediment transported by glacial melt-water streams and its significance for the estimation of sediment yield. *Annals of Glaciology* 13: 1-5.
- BROWN, L. E., N. E. DICKSON, J. L. CARRICK & L. FÜREDER 2015. Alpine river ecosystem response to glacial and anthropogenic flow pulses. *Freshwater Science* 34: 1201-1215.
- COSTA, A., P. MOLNAR, S. STUTENBECKER, M. BAKKER, T. A. A. SILVA, F. SCHLUNEGGER, S. N. LANE, J.-L. LOIZEAU & S. GIRARDCLOS 2018. Temperature signal in fine sediment export from an Alpine catchment. *Hydrology and Earth System Science* 22: 509-528.
- ESPA, P., G. CROSA, G. GENTILI, S. QUADRONI & G. PETTS 2015. Downstream ecological impacts of controlled sediment

- flushing in an Alpine valley river: a case study. *River Research and Applications*, 31: 931-942.
- FARINOTTI, D., S. USSELMANN, M. HUSS, A. BAUDER & M. FUNK 2012. Runoff evolution in the Swiss Alps: projections for selected high-alpine catchments based on ENSEMBLES scenarios. *Hydrological Processes* 26: 1909-1924.
- FISCHER, M., M. HUSS, C. BARDOUX & M. HOELZLE 2014. The New Swiss Glacier Inventory SGI2010: Relevance of Using High-Resolution Source Data in Areas Dominated by Very Small Glaciers. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 46(4): 933-945.
- FÜREDER, L., C. SCHÜTZ, M. WALLINGER & R. BURGER 2001. Physicochemistry and aquatic insects of a glacier-fed and a spring-fed alpine stream. *Freshwater Biology* 46: 1673-1690.
- GABBUD, C., C. ROBINSON & S. N. LANE en révision (a). Sub-basin and temporal variability of macroinvertebrate assemblages in Alpine streams: when and where to sample? *Hydrobiologia*.
- GABBUD, C., C. ROBINSON & S. N. LANE en révision (b). Summer is in winter: disturbance-driven shifts in macroinvertebrate communities following hydropower exploitation. *Science of the Total Environment*.
- GABBUD, C., N. MICHELETTI & S. N. LANE 2015. Lidar measurement of surface melt for a temperate Alpine glacier at the seasonal and hourly scales. *Journal of Glaciology* 61(229): 963-974.
- GABBUD, C., N. MICHELETTI & S. N. LANE 2016. Response of a temperate Alpine valley glacier to climate change at the decadal scale. *Geografiska Annaler, Series A, Physical Geography* 98(1): 81-95.
- GABBUD, C. & S. N. LANE 2016a. Ecosystem impacts of Alpine water intakes for hydropower: the challenge of sediment management. *WIREs Water* 3(1): 41-61.
- GABBUD, C. & S. LANE 2016b. Impacts des prises d'eau alpines sur les écosystèmes – le rôle-clé de la gestion sédimentaire. *Wasser Energie Luft* 4: 285-290.
- GLEICK, P. H. & M. PALANIAPPAN 2010. Peak water limits to freshwater withdrawal and use. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107(25): 11155-11162.
- GRANDE DIXENCE SA 2006. Documentation technique. Sion.
- HUBBARD, A., I. WILLIS, M. SHARP, D. MAIR, P. NIENOW, B. HUBBARD & H. BLATTER 2000. Glacier mass-balance determination by remote sensing and high-resolution modelling. *Journal of Glaciology* 46(154): 491-498.
- JONES, J. I., J. F. MURPHY, A. L. COLLINS, D. A. SEAR, P. S. NADEN & P. D. ARMITAGE 2012. The impact of fine sediment on macroinvertebrates. *River research and applications* 28: 1055-1071.
- LAMBIEL, C., B. MAILLARD, M. KUMMERT & E. REYNARD 2015. La diversité géomorphologique du Val d'Hérens. *Bull. Murithienne* 132/2014: 57-67.
- LANE, S. N., M. BAKKER, D. BALIN, B. LOVIS & B. REGAMEY 2014. Climate and human forcing of Alpine river flow. In A. J. SCHLEISS & al. (Eds.), *River flow*. London: Taylor & Francis Group.
- LANE, S. N., M. BAKKER, C. GABBUD, N. MICHELETTI & J.-N. SAUGY 2017. Sediment export, transient landscape response and catchment-scale connectivity following rapid climate warming and Alpine glacier recession. *Geomorphology* 277: 210-227.
- MAIR, D., I. WILLIS, U. FISCHER, B. HUBBARD, P. NIENOW & A. HUBBARD 2003. Hydrological controls on patterns of surface, internal and basal motion during three «spring events»: Haut Glacier d'Arolla, Switzerland. *Journal of Glaciology* 49(167): 555-567.
- MILNER, A. M. & G. E. PETTS 1994. Glacial rivers: physical habitat and ecology. *Freshwater Biology* 32: 295-307.
- MÉTÉOSUISSE OFFICE FÉDÉRAL DE MÉTÉOROLOGIE ET DE CLIMATOLOGIE 2017. *Bulletin climatologique année 2016*. Berne.
- MICHELETTI, N., C. LAMBIEL & S. N. LANE 2015. Investigating decadal-scale geomorphic dynamics in an alpine mountain setting. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 120: 2155-2175.
- MICHELETTI, N. & S. N. LANE 2016. Water yield and sediment export in small, partially glaciated Alpine watersheds in a

- warming climate. *Water Resources Research* 52: 4924-4943.
- NIENOW, P., M. SHARP & I. WILLIS 1998. Seasonal changes in the morphology of the subglacial drainage system, Haut Glacier d'Arolla, Switzerland. *Earth Surface Processes and Landforms* 23: 825-843.
- OFEV OFFICE FÉDÉRAL DE L'ENVIRONNEMENT 2010. *Méthode d'analyse et d'appréciation des cours d'eau; Macrozoobenthos – niveau R (région)*. Berne.
- QUINN, J. M., R. J. DAVIES-COLLEY, C. W. HICKEY, M. L. VICKERS & P. A. RYAN 1992. Effects of clay discharges on streams. *Hydrobiologia* 248: 235-247.
- REYNARD, E., C. LAMBIEL & S. N. LANE 2012. Climate change and integrated analysis of mountain geomorphological systems. *Geographica Helvetica* 67: 5-14.
- ROBINSON, C. T., U. UEHLINGER & M. HIEBER 2001. Spatio-temporal variation in macroinvertebrate assemblages of glacial streams in the Swiss Alps. *Freshwater Biology* 46: 1663-1672.
- SHARP, M. J., K. S. RICHARDS, I. C. WILLIS, N. S. ARNOLD & P. NIENOW 1993. Geometry, bed topography and drainage system structure of the Haut Glacier d'Arolla, Switzerland. *Earth Surface Processes and Landforms* 18: 557-571.
- VAW VERSUCHSANSTALT FÜR WASSERBAU 2017. Rapport glaciologique (1881-2017), «Les variations des glaciers suisses». *Annuaire de la commission d'experts pour la cryosphère de l'Académie suisse des sciences naturelles (SCNAT)*. Disponible sur <http://www.glamos.ch>.