

Origine et transport des sédiments dans un bassin versant englacé alpin (Glacier des Bossons, Mont-Blanc, France)

Hervé Guillon^{1,2}

¹ Université Savoie Mont-Blanc, ISTerre, Le Bourget du Lac, France

² Université Grenoble Alpes, Institut des Géosciences et de l'Environnement, Grenoble, France

1 Enjeux sociétaux, cadre scientifique et questions ouvertes

Enjeux sociétaux

Dans le contexte du changement climatique actuel, les glaciers reculent à l'échelle globale. Un tel retrait est sans précédent ([Zemp et al., 2015](#)) et les projections pour la fin du 21^{ème} siècle indiquent une réduction drastique de la surface englacée dans les Alpes ([Huss and Farinotti, 2012](#)). Ainsi, les prévisions les plus *optimistes* en termes de scénario d'émission de gaz à effet de serre montrent une réduction de 80% des glaciers actuels d'ici à 2100. Pour les cryo-systèmes alpins, ce déséquilibre est le plus conséquent des derniers 9000 ans et implique des variations significatives de la ressource disponible en eau ([Huss et al., 2008](#)). Toutefois, si ces fluctuations futures des volumes d'eau de fonte sont une question clef, un problème non moins important est de relier quantitativement retrait glaciaire et export sédimentaire.

En effet, à l'échelle d'un continent, les zones englacées représentent la majeure partie de l'apport sédimentaire des hydro-systèmes aval et, au final, des océans ([Hay, 1998](#)). Or, la quantité de sédiment transféré aux rivières est projeté comme augmentant ([Knight and Harrison, 2014](#)), entraînant des impacts économiques et écologiques importants ([Walling, 1996](#)). Par exemple, les compagnies hydro-électriques expriment le besoin de planifier la réduction de capacité des réservoirs, ce qui affecte la production d'énergie et le volume de rétention des crues. Ces industries doivent également prévoir l'abrasion des pompes et des turbines par les particules transportées, notamment en installant de coûteuses installations piégeant les graviers et les sables ([Beziingue, 1989](#)). Par ailleurs, les flux sédimentaires contrôlent au premier ordre la bonne qualité physico-chimique et hydro-morphologique des rivières ([Newson and Large, 2006](#)). En conséquence, il existe un besoin décisif de quantifier les variations spatio-temporelles des flux sédimentaires dans les hauts paysages alpins dans le but de répondre aux problématiques soulevées à l'échelle européenne par la Directive Cadre sur l'Eau ([European Commission, 2000](#)), la Feuille de route pour l'énergie à l'horizon 2050 ([European Commission, 2016](#)) et, à l'échelle globale, pour l'adaptation au changement climatique ([IPCC, 2014](#)).

Cadre scientifique et questions ouvertes

Quantifier les composantes de l'export sédimentaire d'un bassin versant englacé apporte des clefs pour limiter les impacts du changement climatique mais enrichit également la compréhension plus large des interactions entre climat, relief et érosion. A ce titre, les rétro-actions entre érosion, tectonique et climat ont suscité un vif débat scientifique au cours des 25 dernières années ([Molnar and England, 1990](#); [Herman et al., 2013](#); [Willenbring and Jerolmack, 2015](#)). Au sein de cette problématique, les processus d'érosion glaciaire revêtent un intérêt particulier, d'une part par leur dépendance

aux conditions climatiques, et d'autre part par leur impact significatif sur le relief et les flux de matière.

Toutefois, contraindre et quantifier les processus d'érosion actuels dans les bassins versants englacés est fortement limité par le manque de mesures hydro-sédimentaires à long terme (i.e. plusieurs années) et à haute résolution (*Orwin et al., 2010*). De plus, la majorité des valeurs d'érosion glaciaire proposées dans la littérature correspondent à une valeur moyenne sur un bassin versant, éventuellement estimée sur plusieurs années voire à l'échelle séculaire (*Delmas et al., 2009*). Au total, les valeurs publiées prennent en compte de nombreux processus d'érosion, agissant sur des domaines géomorphologiques distincts, généralement au nombre de quatre. Ces derniers correspondent au domaine supraglaciaire, parois dominant le glacier, au domaine sous-glaciaire, substratum rocheux couvert de glace, aux versants proglaciaires, pentes récemment désenglacées et à une plaine alluviale proglaciaire, située à l'aval du glacier. En conséquence, les questions scientifiques suivantes restent largement ouvertes dans le contexte du changement climatique actuel:

- [1] Quelle est la réponse sédimentaire actuelle d'un bassin versant englacé?
- [2] Quels sont les apports issus des domaines supraglaciaire, sous-glaciaire et proglaciaire?
- [3] Aux échelles de temps considérées, quels processus contrôlent ces apports à l'export total?

Par ailleurs, cette thèse s'inscrit dans deux projets validés par l'Agence Nationale pour la Recherche. Le premier, *Erosion and Relief Development in the Western Alps* (ERD-Alps, 2008-2012), avait comme axe principal l'étude des interactions entre tectonique, climat et processus de surface. Le second, *Vitesses des Processus contrôlant les évolutions morphologiques et environnementales du massif du Mont Blanc* (VIP-Mont-Blanc, 2014-2019), s'attache à l'étude des impacts du changement climatique sur les processus morphologiques et environnementaux dans le massif du Mont-Blanc. Ces projets balisent la portée de ce travail de recherche et montrent l'intérêt des questions soulevées tant d'un point de vue scientifique que sociétal.

2 Difficultés rencontrées et développements innovants

Observation d'un système naturel en haute montagne alpine

Le système étudié correspond aux bassins versants de deux torrents issus du glacier des Bossons (massif du Mont-Blanc, France). Plusieurs points expliquent ce choix géographique. D'une part, l'importante différence d'altitude entre le sommet du Mont-Blanc (4810 m asl) et la langue terminale (1500 m asl) induit des conditions thermiques variées à la base du glacier, un paramètre d'importance pour l'érosion sous-glaciaire. D'autre part, le glacier des Bossons réagit significativement au changement climatique et a reculé en moyenne de 40 m.an^{-1} de 2005 à 2015. Enfin, la très faible anthropisation du bassin versant limite les impacts exogènes sur le signal sédimentaire. Toutefois, bien que le choix du glacier des Bossons soit pertinent pour les questions scientifiques proposées [1-3], y répondre directement est complexe.

Cette complexité est principalement liée aux difficultés inhérentes aux observations hydro-sédimentaires dans un environnement de haute montagne alpine. En particulier, les stations de mesures ont été installées dans des zones isolées, globalement en face Nord, présentant un ensoleillement réduit en hiver, des températures négatives limitant l'efficacité des batteries et des difficultés d'accès (enneigement, pierriers). En conséquence, dans ce contexte, l'alimentation en énergie et la télétransmission des données représentent un élément décisif du travail d'acquisition, afin notamment de pouvoir intervenir en cas de complication. Par ailleurs, en se rapprochant du glacier, la problématique du risque est omni-présente pour les agents sur le terrain comme pour le matériel : les capteurs et panneaux solaires de deux stations ont été détruits au cours du projet, les uns par une chute de blocs, les autres par une chute de séracs.

Pour l'un des torrents étudiés, ces aléas empêchent ainsi toute acquisition hydro-sédimentaire pérenne au front du glacier. En outre, dans le domaine proglaciaire, les écoulements s'effectuent sur une forte pente, de 5% à 40%, avec une turbulence importante compliquant significativement la mesure du débit. En conséquence, l'estimation à long terme du débit et de la concentration en matière en suspension n'est possible qu'à 1.5 km du glacier, à l'aval de la plaine alluviale proglaciaire. Enfin, dans l'environnement étudié, les mesures directes du charriage ne sont pas possibles.

Au total, les spécificités de la haute montagne alpine, associée à la simplification du système naturel considéré, nécessitent de répondre à la problématique générale au travers des questions intermédiaires suivantes :

- [4] Comment séparer les apports des domaines supraglaciaire et sous-glaciaire?
- [5] Comment séparer les apports des versants proglaciaires et ceux issus de la plaine alluviale?
- [6] Quel est le temps de transfert de la charge de fond dans la plaine alluviale et quelles sont les caractéristiques de son transport stochastique?

Développements innovants

[4] Traçage des sources sédimentaires dans le domaine glaciaire Les sédiments sortant du système de drainage du glacier sont à la fois issus de la surface et de la base du glacier. La différenciation de ces deux origines a été effectuée en analysant la concentration en nucléides cosmogéniques des sédiments supra-glaciaires et sous-glaciaires. Les nucléides cosmogéniques sont des isotopes, dérivant d'interactions entre roches et particules du rayonnement cosmique. Or, par atténuation des réactions nucléaires, la production en nucléides cosmogéniques décroît exponentiellement avec la profondeur et devient négligeable après une quinzaine de mètres de glace. En conséquence, la concentration en nucléides cosmogéniques mesurée à la sortie du glacier représente un mélange entre un pôle de concentration très faible, le substratum rocheux, et un pôle de forte concentration, les parois exposées dominant le glacier. En sortie du système, la valeur du mélange des concentrations fournit donc une estimation du mélange des sources sédimentaires.

[5] Séparation des sources de sédiments en suspension à l'aval du glacier Dans le domaine proglaciaire, les sédiments qui sont ajoutés à ceux provenant du domaine glaciaire sont issus de la plaine alluviale ou des versants proglaciaires. Or, ces derniers ne peuvent exporter de la matière que lors des événements de précipitation. La détection des périodes de pluie a été réalisée via des données pluviométriques, mais également par traitement du signal hydrologique mesuré dont le caractère à dominante périodique permet de détecter les événements transitoires correspondant aux précipitations. Une fois le signal sédimentaire séparé par condition météorologique, une analyse détaillée a été menée en évaluant l'hystérésis des relations débits-concentrations ainsi qu'en utilisant des modèles de régressions multi-linéaires. Cette dernière approche fournit des informations sur les corrélations entre les données mesurées en différents points du bassin versant et permet de combler les éventuels hiatus d'acquisition. Enfin, dans la perspective pluri-annuelle adoptée, le manque de données certaines années et la difficulté à modéliser l'hydraulique d'un système naturel complexe (nombreux chenaux, forte pente) a stimulé le développement d'une méthode probabiliste d'estimation du flux sédimentaire à l'amont de la plaine alluviale à partir des données mesurées à l'aval.

[6] Temps de transfert de la charge de fond Le transport de la charge de fond a été étudié par traçage radio-fréquence des particules grossières. Dans ce cadre méthodologique, plus de 1000 transpondeurs passifs ont été insérés dans des galets traceurs et introduits dans le domaine proglaciaire. Dans un second temps, les positions de ces traceurs ont été relevées au cours de 44 campagnes. La base de données des positions ainsi acquises apporte une compréhension phénoménologique du transport dans la plaine alluviale (influence de la pente, de la position, de la forme), mais a également

été exploitée de manière probabiliste afin de contraindre le temps de transport. Au cours des dix dernières années, des descriptions probabilistes initialement issues de la physique des particules et de la mécanique statistique ont progressivement été appliquées avec succès au transport solide. Ces descriptions correspondent basiquement à l'advection et à la diffusion d'une densité de probabilité de position des traceurs considérés. L'approche développée caractérise l'évolution temporelle de la distribution statistique décrivant la position des traceurs et contraint ainsi leur temps de transfert moyen dans la plaine alluviale ainsi que leur mode de diffusion.

3 Points forts, originalité et perspectives

Richesse des données et estimation des incertitudes Les mesures hydro-sédimentaires ont été précédemment utilisées par plusieurs auteurs afin de contraindre les flux de sédiments dans les environnements englacés. Parmi ces études, certaines utilisent des modèles statistiques (*Hodson and Ferguson, 1999*), d'autres des séparations météorologiques (*Leggat et al., 2015*), d'autres encore analysent l'hystérésis du flux sédimentaire (*Mao and Carrillo, 2016*). Toutefois, la plupart des auteurs se limitent à une échelle temporelle unique (année, saison de fonte, mois, événement) et utilisent des données horaires. Ainsi, l'étude réalisée se distingue ici par la combinaison des méthodes analytiques et par une compréhension allant de l'échelle de l'événement à celle de plusieurs années. Par ailleurs, cette recherche présentée s'appuie sur une exploitation numérique dont le point de départ est toujours la donnée brute mesurée par les instruments. Une telle approche est nécessaire face aux volumes des lots de données acquis : ~ 5 millions de points de données hydro-sédimentaires et $\sim 18\,000$ vecteurs déplacement de traceurs. L'approche numérique a de plus permis de mettre en oeuvre systématiquement des approches statistiques et probabilistes : modèles multi-linéaires, recherche de distributions de probabilités et méthode de Monte-Carlo. Elle a également permis de modéliser la production de nucléides cosmogéniques sous le glacier, de tenter de répondre à certaines questions par la modélisation hydraulique ou le traitement du signal, et de propager les incertitudes des mesures initiales aux résultats finaux. Un tel souci d'évaluation des incertitudes, souvent absent des études comparables, associe aux résultats produits un haut niveau de confiance en leur validité.

Mise en évidence d'un tampon sédimentaire proglaciaire Méthodologie mise en oeuvre le plus communément face à la problématique approchée, la mesure hydro-sédimentaire se distingue ici toutefois par la richesse des données acquises et leur exploitation statistique et probabiliste. Les résultats de ces analyses mettent en lumière le fonctionnement particulier de la plaine alluviale proglaciaire. Cette dernière fonctionne comme un tampon sédimentaire à l'échelle de la journée et de la saison, rempli par la crue glacière quotidienne et vidé lors d'événements de plus haute énergie. Ce mécanisme de stockage et déstockage est contrôlé par la capacité de transport du torrent, elle-même liée au débit, à la pente et à la concentration de sédiments issus du glacier. Par ailleurs, le glacier des Bossons est la source principale de l'export sédimentaire et les versants proglaciaires ne sont pas efficacement connectés au torrent en l'absence d'événements extrêmes.

Transferts de la surface à la base et drainage contrôlent l'export glaciaire Les nucléides cosmogéniques sont généralement utilisés comme un outil de datation et d'estimation de l'érosion à l'échelle millénaire (*von Blanckenburg, 2005*). Ici, ces isotopes cosmogéniques ont été utilisés pour la première fois comme traceur du transport des sédiments entre la surface et la base d'un glacier. La confrontation entre les résultats de la méthodologie développée et ceux d'une méthode lithologique distincte montre un accord remarquable. Par ailleurs, la comparaison entre les bassins versants des deux torrents instrumentés souligne le contrôle significatif de l'efficacité des transferts entre surface et base du glacier sur l'érosion sous-glaciaire : la présence d'un système de bédrières et moulins stimule l'érosion sous-glaciaire en favorisant le développement du réseau de drainage et

en apportant du matériel abrasif à la base du glacier. En outre, l'étude des données sur plusieurs années souligne la présence de stocks sédimentaires annuel et pluri-annuel, exportés par bouffées au gré du développement du système de drainage sous le glacier.

Temps de transfert et diffusion anormale de la charge de fond Le traçage radio-fréquence réalisé dans la plaine alluviale proglaciaire du glacier des Bossons présente un nombre de campagnes de mesures remarquable par rapport à la littérature. Cette richesse de données a encouragé le développement d'une approche probabiliste pour modéliser l'évolution des positions des traceurs au cours des trois années de mesure. La caractérisation du transport stochastique de la charge de fond fournit une estimation de son temps de transfert avec un haut niveau de confiance. Par ailleurs, la valeur décennale du temps de transfert a été confirmée par l'analyse diachronique de modèles numériques de terrain montrant la propagation vers l'aval d'une vague sédimentaire en lien avec des événements extrêmes ayant eu lieu au sein du domaine proglaciaire entre 2006 et 2008. Enfin, le lot de données, unique en son genre, a permis d'identifier pour la première fois et de manière décisive le comportement normalement diffusif prévu en théorie mais jusqu'à présent non observé.

Conclusions principales et perspectives Au total, la combinaison originale de méthodologie mise en oeuvre dans le bassin versant des Bossons souligne une réponse sédimentaire multi-fréquentielle, amortie par des stockages intermédiaires. L'export du domaine proglaciaire apparaît contrôlé par les événements extrêmes. En leur absence, le glacier est la source principale d'un export dont l'intensité est modulée par les remobilisations associées au développement du réseau de drainage et éventuellement stimulées par le retrait glaciaire. Par ailleurs, les outils et approches développés au cours de ce travail l'ont été d'un point de vue générique permettant un transfert dans d'autres bassins versants et une vision plus large de la réponse sédimentaire actuelle. Des projets de recherche sont actuellement développés dans ce sens avec la Suisse et les Etats-Unis.

References

- Bezingue, A. (1989), The management of sediment transported by glacial melt-water streams and its significance for the estimation of sediment yield, *Annals of Glaciology*, 13, X–X.
- Delmas, M., M. Calvet, and Y. Gunnell (2009), Variability of Quaternary glacial erosion rates - A global perspective with special reference to the Eastern Pyrenees, *Quaternary Science Reviews*, 28, 484–498.
- European Commission (2000), Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23rd October 2000: Establishing a framework for community action in the field of water policy, *Off. J. Eur. Communities*, (327), 1–72.
- European Commission (2016), European Parliament resolution of 14 March 2013 on the Energy roadmap 2050, a future with energy (2012/2103(INI)), *Off. J. Eur. Communities*, 59(C 36), 32–76.
- Hay, W. W. (1998), Detrital fluxes from continents to oceans, *Chemical Geology*, 145, 287–323.
- Herman, F., D. Seward, P. G. Valla, A. Carter, B. Kohn, S. D. Willett, and T. A. Ehlers (2013), Worldwide acceleration of mountain erosion under a cooling climate, *Nature*, 504(7480), 423–426.
- Hodson, J., Andrew, and I. Ferguson, Robert (1999), Fluvial suspended sediment transport from cold and warm-based glaciers in Svalbard, *Earth Surface Processes and Landforms*, (24), 957–974.
- Huss, M., and D. Farinotti (2012), Distributed ice thickness and volume of all glaciers around the globe, *Journal of Geophysical Research*, 117(F4), F04,010.
- Huss, M., D. Farinotti, A. Bauder, and M. Funk (2008), Modelling runoff from highly glacierized alpine drainage basins in a changing climate, *Hydrological Processes*, 22(19), 3888–3902.
- IPCC (2014), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Knight, J., and S. Harrison (2014), Mountain glacial and paraglacial environments under global climate change: Lessons from the past, future directions and policy implications, *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 96(3), 245–264.
- Leggat, M. S., P. N. Owens, T. A. Stott, B. J. Forrester, S. J. Déry, and B. Menounos (2015), Hydro-meteorological drivers and sources of suspended sediment flux in the pro-glacial zone of the retreating castle creek glacier, cariboo mountains, british columbia, Canada, *Earth Surface Processes and Landforms*, 40(11), 1542–1559.
- Mao, L., and R. Carrillo (2016), Temporal dynamics of suspended sediment transport in a glacierized andean basin, *Geomorphology*.
- Molnar, P., and P. England (1990), Late Cenozoic uplift of mountain ranges and global climate change: chicken or egg?, *Nature*, 346(6279), 29–34.
- Newson, M. D., and A. R. G. Large (2006), “natural” rivers, “hydromorphological quality” and river restoration: a challenging new agenda for applied fluvial geomorphology, *Earth Surface Processes and Landforms*, 31(13), 1606–1624.
- Orwin, J. F., S. F. Lamoureux, J. Warburton, and A. Beylich (2010), A framework for characterizing fluvial sediment fluxes from source to sink in cold environments, *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 92(2), 155–176.
- von Blanckenburg, F. (2005), The control mechanisms of erosion and weathering at basin scale from cosmogenic nuclides in river sediment, *Earth and Planetary Science Letters*, 237(3-4), 462–479.
- Walling, D. E. (1996), Erosion and sediment yield in a changing environment, *Geological Society, London, Special Publications*, 115(1), 43–56.
- Willenbring, J. K., and D. J. Jerolmack (2015), The null hypothesis: globally steady rates of erosion, weathering fluxes and shelf sediment accumulation during late cenozoic mountain uplift and glaciation, *Terra Nova*, 28(1), 11–18.
- Zemp, M., H. Frey, I. Gärtner-Roer, S. U. Nussbaumer, M. Hoelzle, F. Paul, W. Haeberli, F. Denzinger, A. P. Ahlström, B. Anderson, and et al. (2015), Historically unprecedented global glacier decline in the early 21st century, *JoG*, 61(228), 745–762.