

Soutenance de thèse de Johan BERTHET, Campus universitaire de l'Université Savoie-Mont-Blanc, 21/06/2016

Titre de la thèse L'évolution géomorphologique des systèmes torrentiels proglaciaires de la vallée de Chamonix-Mont-Blanc, une approche du couplage sédimentaire de la fin du Petit Age Glaciaire au désenglacement récent

Etablissement : Communauté Université Grenoble Alpes

Ecole doctorale : SISEO - Sciences et Ingénierie des Systèmes de l'Environnement et des Doctorat Géographie

Composition du jury

M. Laurent ASTRADE	Université de Savoie	CoDirecteur de these
M. Jean-Jacques DELANNOY	Université de Savoie	Directeur de thèse
M. Jean-Luc PEIRY	Université Blaise Pascal	Rapporteur
M. Etienne COSSART	Université Jean Moulin Lyon 3	Président, Rapporteur
M. Frédéric LIÉBAULT	IRSTEA	Examineur
Eric BARDOU	DSM-Consulting	Examineur
Anne-Sophie DROUET	SM3A	Invitée

Mots-clés : torrent proglaciaire,Chamonix,retrait glaciaire,fourniture sédimentaire,connectivité sédimentaire,

Keywords : proglacial stream,Chamonix,glacier retreat,sediment supply,sediment connectivity,

Résumé :

Depuis la fin du Petit Age Glaciaire, les glaciers du massif du Mont-Blanc se retirent et libèrent ainsi d'importants volumes de sédiments. La fourniture sédimentaire grossière, qui est l'un des éléments de contrôle principaux de l'activité géomorphologique des torrents proglaciaires, peut être profondément modifiée. Dans le contexte de la vallée de Chamonix, où la pression urbaine est très forte, l'accélération du retrait glaciaire soulève des questionnements de la part à la fois des gestionnaires et des scientifiques sur l'évolution des risques et de la gestion des flux solides. L'objectif de ce travail de thèse est d'étudier le couplage sédimentaire entre les espaces libérés des glaces et les torrents jusqu'en fond de vallée, avec un double niveau de réponse. Le premier niveau permet de comprendre les trajectoires géomorphologiques des systèmes glacio-torrentiels depuis la fin du Petit Age Glaciaire et à l'échelle de la vallée. Il est étayé par une analyse géomorphologique et par l'étude de l'évolution du réseau hydrographique, qui s'appuie sur une modélisation et sur de nombreux documents d'archive. Cette étape souligne la diminution du potentiel du système torrentiel à remobiliser des sources sédimentaires. En conséquence, l'activité des torrents a fortement baissée depuis 150 ans. La seconde approche concerne l'étude des dynamiques récentes basée sur la comparaison diachronique de MNT LiDAR à haute résolution. Elle se focalise sur les trois systèmes glacio-torrentiels les plus grands de la vallée (Argentière, Mer de Glace et Bossons) dont les activités morphogènes ont pu être interprétées sous le prisme de crues d'occurrence décennale survenues en août 2014. Cette partie montre l'efficacité des processus de stockage sédimentaire au sein même des espaces désenglacés, ainsi que l'importance du forçage humain sur la morphogénèse torrentielle qui prime désormais sur l'influence du retrait glaciaire. L'état de la fourniture sédimentaire résulte actuellement de l'impact des différentes infrastructures, telles que les captages sous-

glaciaires ou l'autoroute d'accès au Tunnel du Mont Blanc. Nos résultats montrent donc une première phase de diminution de l'activité torrentielle, principalement causée par le retrait des glaciers de 1850 à 1950, puis les conséquences pression des activités humaines sur les évolutions hydromorphologiques. La baisse de la torrentialité est toutefois ponctuée de quelques évènements, comme la crue du septembre 1920 sur l'Arveyron de la Mer de Glace, dont nous avons reconstitué les conséquences géomorphologiques. Malgré leur intensité, les effets de ces crues restent néanmoins relativement limités à l'aval immédiat des glaciers. Contrairement donc aux hypothèses initialement soulevées, le retrait glaciaire n'implique pas une augmentation de la fourniture sédimentaire, mais au contraire une diminution des apports du fait de la déconnexion entre les espaces désenglacés et les systèmes torrentiels.

Summary :

Since the end of Little Ice Age, glaciers of the Mont blanc massif are retreating and large sediment volume are releasing from the ice. Thus, sediment supply, which is a main control factor of the proglacial stream geomorphic activity, could be deeply modified. Therefore, the consequences on the sediment fluxes and the risk management need to be understanding because of the present acceleration of glacier retreat and urban sprawl in the Chamonix valley. The goal of this thesis is to study the sediment coupling between stream systems and areas released by glaciers. A first approach allows understanding the geomorphic trajectory of proglacial system at the Chamonix scale since the end of the Little Ice Age. Our results supported by modelling and archives analyses, show the decreasing capacity of the hydrographic pattern to be connected with sediment sources. The second approach is lead on the LiDAR DEM multi-temporal comparison. It focuses on the three main proglacial systems: Argentière, Mer de Glace and Bossons, whom occurred a decennial flood during the 2014 summer. This part of our study underlines the storage efficiency into deglaciated areas and the increasing role of anthropic forcing. Present sediment yield to proglacial stream is leaded by facilities such as the Mont Blanc Tunnel substructure or the subglacial harnessing. Our results show that the decreasing geomorphic activity of proglacial stream in the Chamonix valley is mainly caused by glacier retreat from the early 18th Century to the middle 20th century, then it is leaded by the increasing human pressure. Nevertheless, the fall of stream activity is punctuated by extreme events, such as the 1920 flood in the Arveyron of the Mer de Glace that we reconstructed the geomorphic consequences. Despite their intensity, effects of that king of events are limited close to the glacier downstream. Contrary to our initial hypotheses, glacier retreat in the Chamonix Valley, is not follow by a geomorphic crisis of proglacial streams because of the disconnectivity between sediment released from the ice and stream systems.

Les notes de la séance de soutenance qui suivent ont été prises par R. Moutard

Dans son exposé, le doctorant rappelle que son étude s'inscrit dans le contexte du réchauffement climatique, donc du retrait en altitude des fronts glaciaires. Cette évolution les éloigne des zones où leurs émissaires déposent les charges sédimentaires, du fait de l'étirement de leurs parcours. Le propos essentiel porte sur l'appréciation des conséquences d'une telle évolution sur la plaine alluviale, dans une perspective de gestion des risques. Pour cela, il importe de connaître l'origine des dépôts devant faire l'objet de curages. Cela passe par la reconstitution de la « cascade sédimentaire » qu'ils ont suivie. Ses principales étapes se résument ainsi: permafrost, dépôts morainiques, prise en charge de ces dépôts par les torrents proglaciaires, et aboutissement dans les vallées.

Le diaporama présenté par Johan Berthet débute par la présentation d'images classiques schématisées des variantes d'appareils torrentiels avec leurs zones de fourniture de flux liquides et solides, leurs chenaux de transit, et les aires de dépôts constituant les cônes, tout à l'aval. La question est de savoir si l'on assiste ou non à un accroissement d'apports sédimentaires dans la vallée. Cela dépend de l'évolution de la connectivité entre stocks sédimentaires et vecteurs de drainages.

J. Berthet rappelle qu'en ce milieu montagnard, on a affaire à des processus d'érosion et de transports de nature polygénique.

Son ensuite présentées les méthodes d'étude mises en œuvre, les outils utilisés, principalement les modèles numériques de terrain à haute résolution et un LIDAR aéroporté

en juin et octobre 2013, puis en octobre 2014. Ceci, afin de quantifier des ratios entre volumes minéraux érodés et déposés.

Le chercheur a également consulté des sources documentaires plus classiques tels que la consultation de documents anciens, cartographiques et photographiques, qui ont permis d'établir une modélisation diachronique du réseau hydrographique. Tout cela, pour tenter de répondre à la question suivante : les espaces libérés par les dernières glaciations fournissent-ils un surcroît de dépôts solides ?

À cet effet, trois sites ont été plus particulièrement étudiés : le torrent de la Creusaz, l'Arveyron de la Mer de Glace et celui d'Argentière.

Le chercheur a pu observer les effets de la crue du 7 août 2014 avec la rupture d'une poche intraglacière pour La Creusaz, qui a généré une lave torrentielle causant l'interruption du trafic en direction du tunnel du Mont-Blanc. L'événement a été filmé. Toutefois, la mobilisation d'éléments provenant de la marge proglacière a été limitée.

Sur l'Arveyron d'Argentière, une partie seulement des alluvions a pu transiter vers la vallée principale. La moraine latérale de la Mer de Glace a subi une ablation.

La tendance commune relevée sur les trois sites est celle d'une assez faible mobilisation des stocks de matériaux.

Sur la marge proglacière de la Mer de Glace, l'efficacité de la rétention des sédiments est due aux lacs qui les piègent. Le suivi de leur remplissage conduit à une estimation volumétrique de l'ordre de 30 000 m³.

J. Berthet. présente une photographie de l'attaque de la moraine latérale droite de la Mer de Glace. Le cône qui en est résulté est resté à son pied.

Cette modération de la mobilisation sédimentaire s'explique par l'affaiblissement des flux liquides, suite aux captages sous-glaciaires, portant sur environ 80 à 90 m³/s, de sorte que même en temps de crue, le front de la Mer de Glace se trouve quasiment en état de « court-circuit hydraulique » de surface.

Les forçages anthropiques ne s'arrêtent pas là. Ils ont provoqué l'incision du lit de La Creusaz par érosion régressive. Les marques en sont fournies par des terrasses cachées, dominant de 14 mètres le lit actuel du torrent.

La modélisation des trajectoires géomorphologiques révèle une rétraction des cours des torrents venant du Plan de l'Aiguille, d'où un affaiblissement de la connectivité permettant les transports de sédiments.

Il en va différemment à l'aval du glacier du Tour, où le réseau s'est développé. Mais alors que depuis le milieu du XIX^e siècle il s'étendait sur des matériaux meubles, il le fait actuellement sur de la roche en place, où il ne mobilise presque rien. C'est le cas du torrent du Bisme.

Des torrents disparaissent, comme le Lavousset, émissaire secondaire de la Mer de Glace.

Sous le glacier de Taconnaz, le torrent de la Corruaz est maintenant déconnecté des réserves sédimentaires.

Globalement, on assiste à une baisse de la torrentialité depuis la fin du Petit Age de Glace, s'accompagnant d'une mobilisation sédimentaire modérée. Cela s'explique par le fait que le retrait glaciaire fragmente les hydrosystèmes et crée des pièges à sédiments, notamment par des lacs qui s'intercalent entre les fronts des appareils en rétraction, et les chenaux de transit de leurs émissaires. Ce résultat mérite d'être mis en perspective avec d'autres études menées en Suisse, qui semblent aller dans le même sens.

Réflexions des membres du jury.

L. Astrade.

Le recul des glaciers allonge les trajectoires torrentielles. À propos des sédiments « piégés » temporairement, dans les lacs, par exemple, il serait intéressant de déterminer à partir de quels niveaux des lignes d'eau il conviendrait que les gestionnaires de risques commencent les curages. Toujours dans la perspective de la surveillance des dangers, il convient de porter une attention particulière aux gorges de raccordement, aux sédiments qui pourraient s'y trouver bloqués, aux éventuels obstacles qui les encombrent.

J.J. Delannoy

Des effets de latence peuvent se constituer, durant lesquels se déroulent des phénomènes « silencieux » d'accumulations. Le danger se révèle lors de crises géomorphologiques.

A.S. Drouet

Les résultats des recherches consignés dans cette thèse vont permettre d'actualiser le protocole de surveillance des mobilisations sédimentaires qui a été adopté en 2004.

J.L. Peiry

Les recherches menées par l'auteur de la thèse remettent en question l'importance du stock alluvial rendu disponible depuis les dernières glaciations. Les quantités mobilisables se tarissent. C'est le résultat principal qui ressort de cette étude, menée en alliant des techniques d'analyse géomorphologiques classiques comme l'examen diachronique de cartes d'Etat-major puis IGN, de photos anciennes, et des mesures plus sophistiquées s'appuyant sur des MNT à haute résolution et des mesures LIDAR.

La reconstitution de l'histoire géomorphologique à partir de documents anciens a été guidée par des problématiques actuelles. Toutefois, tous n'ont pas été rigoureusement référencés.

La question essentielle traitée ici n'est pas vraiment neuve, puisqu'il s'agit du couplage entre versants et chenal, déjà abordée par J. Tricart dès les années 1960. Depuis, des travaux plus récents, notamment ceux de E. Cossart, ont repris ce thème de recherches.

Par certains côtés, les études approfondies de sites qui sont développées donnent une impression un peu monographique à la lecture de la thèse.

J. Berthet justifie cette conception de son mémoire par le souci de mener une approche comparative, axée sur le temps long pour aboutir à l'actuel. L'importance donnée aux études de cas était un moyen d'essayer de contourner la complexité des thèmes abordés.

J.L. Peiry conteste la terminologie employée à propos du bilan sédimentaire. Il ne saurait être *excédentaire* ni *déficitaire*, mais *équilibré*. Cette méprise se traduit par des figures qui ne montrent pas cet équilibre. On peut alors se demander où sont passées les quantités manquantes dans les bilans qualifiés de « déficitaires ».

J. Berthet invoque les incertitudes des levés topographiques, les approximations consécutives à l'emploi de l'outil LIDAR, et aussi le fait que les écoulements sous-glaciaires et intraglaciaires, difficiles à saisir et à mesurer, font que les glaciers se comportent en quelque sorte comme des « boîtes noires » lorsqu'il s'agit de quantifier les flux solides qui en sont issus.

J.L. Peiry admet que la quantification des flux dans les conditions décrites ici est sujette à incertitudes. Un modèle de fonctionnement des torrents proglaciaires pourrait être constitué. À ce propos, avec la déglaciation et l'éloignement vers le haut des fronts des appareils, on peut se demander si les systèmes torrentiels d'altitude ne vont pas évoluer en s'écartant des spécificités proglaciaires, et se rapprocher d'un mode hydrologique plus général.

Selon J. Berthet, sur les petits bassins versants, la rétraction des glaciers diminue le potentiel de transports sédimentaires. Il n'en va pas de même sur les bassins plus étendus. En milieu proglaciaire, les processus de crues sont davantage liés à la marge des glaciers qu'à ceux de l'ensemble du bassin.

E. Cossart évoque le cadre conceptuel mis en place par l'école proglaciaire, autour de la notion de connectivité entre les sédiments et les vecteurs de leur mobilisation. Il rappelle à ce propos les travaux de Mélanie Bertrand.

Est-il possible de mener des mesures, aboutissant à des indices de connectivité ?

J. Berthet répond que les résultats de telles mesures sont difficiles à interpréter. Les outils utilisés en hydrologie générale ne se transposent pas aisément en hydrologie proglaciaire, car on se sait guère où ressortent les eaux : on a toujours affaire à ce comportement des glaciers comme des « boîtes noires » hydrologiques internes.

E. Cossart confirme que les mobilisations sédimentaires interviennent surtout sur la marge des fronts, et moins en-dehors de cette zone. Par ailleurs, il constate que, dans les chapitres 5 et 6 de la thèse, il n'est plus guère question de la cascade sédimentaire. Or, il serait intéressant de préciser quels sont les facteurs qui la bloquent, et qui introduisent des temps de latence dans son fonctionnement. S'agit-il de zones tampons, de pavages de blocs, d'aires d'épandages, de barrières ? Quels phénomènes peuvent la réactiver ?

Selon J. Berthet, il faut chercher les causes du côté des lacs proglaciaires, avec des ruptures de barrages morainiques. Là, il faut prêter attention aux facteurs granulométriques – tout en sachant que l'hétérométrie domine – c'est-à-dire aux secteurs vulnérables qui peuvent correspondre à des fractions sédimentaires fines, alors que des armatures de blocs, elles, stabilisent d'autres segments. Reste à pouvoir identifier les effets de seuil entraînant d'éventuels débordements et ruptures.

D'un point de vue méthodologique, E. Cossart revient sur la question de la pertinence des données issues des campagnes LIDAR. Elles sont non seulement coûteuses, mais elles donnent aussi des résultats d'allure pointilliste. On peut alors se demander si des levés plus classiques ne seraient pas suffisants.

J. Berthet reconnaît que, si les mesures issues du système LIDAR permettent une couverture exhaustive, elles ne permettent pas de déceler des points sensibles qualitatifs comme la présence de gros blocs ou de segments à granulométrie fine. De toute manière, le chercheur a été amené à diversifier ses sources de mesures, en ayant recours à des MNT, plus « robustes ». Dans le domaine des outils plus classiques, il a constaté des distorsions cartographiques entre les documents dits d'Etat-major et les cartes IGN issues de photo-interprétations. Sur ces points méthodologiques, E. Cossart invite le chercheur à publier dès que possible.

E. Bardou intervient pour approfondir la discussion autour de l'outil LIDAR. Celui-ci donne en effet une image précise à un moment donné, à tel point qu'il permet de se rendre compte d'écart inter-saisonniers du terrain. Mais cette image n'est qu'une vue instantanée. Cette

dépendance de l'état des lieux à un moment où l'on procède au levé de terrain devrait obliger à se préoccuper de l'intensité des phénomènes étudiés et de leur fréquence.

J. Berthet en convient, et souhaite que l'on ait recours à un « monitoring » dans les mesures, pour savoir à partir de quand les débits prennent des effets morphogénétiques. Il serait intéressant notamment de connaître combien de temps un point d'appui morainique demeure stable, avant de céder à un effet de seuil. Se pose également la question d'étudier ce seuil en termes de position du point considéré, et de l'intensité du phénomène qui le fait franchir.

E. Bardou évoque la pertinence de créer une légende morphogénétique spécifique au milieu torrentiel et proglaciaire.

Frédéric Liébault, auteur d'une thèse sur la torrentialité dans les Alpes du Sud, note que J. Berthet a fait intervenir la notion de bilan de masse sédimentaire, notamment à la faveur des crues de l'été 2014. Sur cette base, serait-il possible de dresser des diagrammes conceptuels, permettant des généralisations ?

J. Berthet fait observer que lors de ces événements, on a eu affaire à des transferts rapides à Argentière et sur l'Arve, dont les données LIDAR ont permis de rendre compte. Toutefois, chaque site étudié ayant ses spécificités, la généralisation n'est pas facile.

Sur un plan méthodologique, F. Liébault discute le fait que J. Berthet n'ait pas cru utile de réaligner les nuages de points de ses graphiques issus des données fournies par les capteurs. Leur fiabilité a été testée par J. Berthet sur des surfaces planes et stables. F. Liébault insiste sur la nécessité de ce genre de test en surface plane, car l'erreur éventuelle se multiplie vite et peut atteindre l'ordre de plusieurs milliers de m³ dans un bilan sédimentaire, sur une surface d'environ 2 km² en zones de fortes déclivités comme dans les têtes de ravines. C'est ce que l'on pourrait appeler la notion de « rugosité altimétrique ». D'où l'importance d'un test en support plan.

J. Berthet a pu cependant identifier visuellement des zones stables et prendre en compte la géométrie d'objets concernés par des effets de seuil.

F. Liébault insiste sur les points-clés que constituent les gorges de raccordement, où peuvent se former des recharges sédimentaires suivies de purges. Ainsi, dans celle de la Creusaz, en 1920, une incision de 20 mètres a déterminé l'enlèvement d'une centaine de milliers de m³ de sédiments.

Les situations varient fortement d'un site à l'autre. Ainsi, depuis 1920, à la Mer de Glace, le stock sédimentaire, déconnecté du système hydrologique, ne s'est pas reconstitué.

Il n'en va pas de même à Argentière et à La Creusaz, où les gorges sont courtes.

J. Berthet rappelle les très fortes déclivités sous les Bossons, qui peuvent contribuer à la génération de laves : 20 %, voire 45 % en tête du bassin torrentiel. La pente devient ici un facteur déterminant.

S'agit-il d'ailleurs de gorges, ou de vallées perchées ?

À Argentière, on a affaire à des processus mixtes entre dynamique proglaciaire et torrentielle.

À La Creusaz, ce sont les processus torrentiels qui l'emportent.

F. Liébault conclut son intervention en soulignant l'importance de la surveillance des gorges de raccordement. En effet, J. Berthet a présenté le phénomène d'incision ayant affecté celle de La Creusaz en 1920 comme une manifestation d'érosion régressive. Mais cela pourrait tout aussi bien procéder d'une érosion progressive, notamment sous l'effet de passages de vagues

sédimentaires successives érodant les terrains encaissants. Il aurait été judicieux d'estimer le cubage des curages effectués sur ce site.

Pour justifier le processus d'érosion régressive qu'il évoque, J. Berthet se fonde sur des photos aériennes anciennes montrant l'évolution des positions de l'apex du cône par rapport aux gorges.

Après une brève synthèse de son président, le jury se retire afin de délibérer. Au terme de ses discussions, il décerne à Johan Berthet le titre de docteur en géographie, et lui adresse ses félicitations pour la qualité de ses recherches et de leur présentation.