**Erosion sous-glaciaire et érosion des versants dans le Massif du Mont Blanc : apport des isotopes cosmogéniques**

**1. Intérêt scientifique et état de l’art**

La période quaternaire est caractérisée par un accroissement de la production de sédiments (e.g. Kuhlmann et al., 2002). Cet accroissement de l'érosion des reliefs semble lié aux phases de glaciation, mais les processus exacts qui le contrôlent sont encore débattus: processus de versants accrus sous l'effet des conditions climatiques (Delunel et al., 2010), et/ou succession de phases de déséquilibres du relief sous l'effet des cycles successifs de glaciation/déglaciation (Molnar, 2004) ou érosion à la base des glaciers (Hallet et al., 1996)? Dans les glaciers, l’érosion sous glaciaire est fréquemment estimée à partir de la charge solide des torrents issus de la base de glaciers (Synthèse in Hallet et al. 1996). Si cette méthode ne pose pas de problème pour les glaciers de calotte, dans les glaciers de montagne, une question se pose : la charge solide des torrents sous-glaciaires provient-elle exclusivement de l’érosion à la base du glacier ou bien résulte-t-elle d’un mélange entre les sédiments issus de l’érosion sous-glaciaire et ceux fournis par les versants dominant le glacier?



*Fig. 1 : localisation des campagnes d’échantillonnage des torrents sous-glaciaires et de la charge supra-glaciaire du glacier des Bossons*

En effet, dans le massif du Mont-Blanc, l’étude de deux torrents issus du glacier des Bossons (torrents de Crosette et Bossons, Fig. 1) par la méthode de la géochronologie détritique (U/Pb sur zircon) comme traceur des sources (Godon et al., 2013) a permis de montrer que:

1. La charge supra- glaciaire est composée en majorité de clastes issus du pluton granitique daté à 303 Ma et qui constitue la partie sommitale de la face Nord du Mont-Blanc et de l’Aiguille du Midi.
2. Les sédiments transportés par le torrent de Crosette proviennent à plus de 90% de l’encaissant polymétamorphique entourant le pluton et constituant la majorité du substratum du glacier ; résultat cohérent avec un processus d’érosion sous-glaciaire.
3. Les sédiments transportés par le torrent des Bossons proviennent à moins de 50%  du substratum polymétamorphique; ceux-ci constituent exclusivement le substratum du bassin versant de ce torrent sous-glaciaire. Ces résultats sont cohérents avec un mélange de deux sources de sédiments : l’une d’origine sous-glaciaire (les polymétamorphiques), l’autre d’origine supra glaciaire (le granite issus de la partie supérieure du versant nord du Mont-Blanc).
4. L’application d’équations de mélange indique pour les deux torrents des résultats très différents : dans le cas du torrent des Bossons, une proportion de ~40 % de sédiments est lié à l’érosion sous glaciaire et le reste provenant de la charge supra-glaciaire alors que dans le cas du torrent de crosette, plus de 85 % provient de l’érosion sous-glaciaire.



*Fig. 2. Un schéma du flux de clastes en milieu glaciaire. Les clastes fournis par l'érosion des versants (Fh) sont soit incorporés dans le glacier (Fd) soit introduits dans les moraines latérales ou frontales (Fm). La charge de sédiments d'un cours d'eau sous-glaciaire (Fs) est le mélange de deux composants : l'érosion à la base du glacier tempéré (Ft) et les clastes fourni par l'érosion des versants et incorporés dans le glacier (Fd). L’érosion à la base du glacier froid (Fc) et la composante de l’érosion sous- glaciaire introduite dans le glacier sont négligeables (d’après Godon et al., 2013).*

Ainsi l’estimation de l’érosion sous-glaciaire grâce la charge des torrents sous-glaciaires nécessite d’étudier en amont la dynamique de transport des clastes par le glacier.

Outre la quantification respective des deux sources- sous ou supra glaciaire-, un contrôle potentiellement important de l’érosion sous-glaciaire sera également abordé **:**

L’efficacité de l’érosion sous-glaciaire est-elle contrôlée par la quantité des clastes incorporés dans la glace basale, et dans ce cas, l’intensité de l’érosion sous-glaciaire est-elle finalement contrôlée par l’importance des processus de versant environnants ?

Lorsque les clastes fournis par ces derniers processus alimentent le flux détritique à la base du glacier, ils pourraient en effet contribuer à accroitre l’érosion basale du glacier. L’érosion des versant serait donc un processus montrant une retraction positive sur l’érosion glaciaire.

On se propose d’utiliser les isotopes cosmogéniques du Berylium 10 Be pour répondre a cette question ; en effet :

1. les sédiments issus de l’érosion sous glaciaire (Ft, Fig. 2) sont protégés du rayonnement cosmique par l’épaisseur de la glace ; celle-ci ayant été présente depuis plusieurs dizaine de milliers d’années l’écrantage a perduré et l’érosion sous-glaciaire durant ces dizaines de milliers d’années a assuré plusieurs mètres d’érosion du substratum, l’amenant à des concentrations en isotopes cosmogéniques négligeables; ce point est détaillé dans un paragraphe plus loin) ;
2. Les clastes déposés par les processus de versants sur les glaciers (Fh, Fig. 2) ont été soumis aux rayonnements cosmiques et ont une concentration en 10Be non négligeables ; l’analyse statistique et/ou l’homogénéisation des poudres issus des échantillons permet d’estimer une valeur moyenne du taux d’érosion des versants surplombant le glacier (Ward and Anderson, 2011) ; Cette utilisation des concentrations des sables en isotope cosmogénique pour estimer l’érosion moyennes de bassins versant est déjà utilisée classiquement dans le cadre de bassins versant de rivière (e.g. Delunel et al. dont Carcaillet, 2010) bien que des effets de tailles soient mis en évidence (Aguilar et al. dont Vassallo, in press).
3. Les clastes incorporés dans le glacier et atteignant la base sont soumis à une comminution très rapide favorisant une homogénéisation des concentrations dans les fractions fines sous-glaciaires, en particulier dans les échantillons de sable ;
4. En fonction de l’apport respectif de chaque source, la concentration en isotope cosmogénique des effluents sous-glaciaires résulte d’une  dilution  de la production issue de l’exposition des versants par des sédiments non exposés provenant de l’érosion sous-glaciaire.

La mesure de la concentration de Be10 du substratum directement sous le glacier n'est pas possible, mais les considérations suivantes peuvent être prises en compte (Goehring et al., 2012) : 1) La production de deux 10Be est dominée par des réactions de spallation, qui sont fortement atténuées dans les matériaux de la surface terrestre (e.g. roche, glace) ; la production est presque nulle sous 30 m de glace. Un mécanisme de production secondaire est cependant lié aux interactions entre muons. Ces réactions ont une beaucoup plus grande profondeur de pénétration, et des nuclides sont produits même sous le couvert de glace ; Cependant, parce que la fraction des muons dans le spectre des rayons cosmiques est si petite, la production de 10Be par muons n'est pas assez grande pour affecter les résultats (voir Goehring et al., 2011); 2) aucune production pre-LGM n’est conservée, sauf si l'érosion glaciaire au cours de ce dernier événement glaciaire serait inférieure à 0,02 mm/an – une valeur trop faible pour être envisagée-; 3) bien que le glacier des Bossons est actuellement affecté par un retrait rapide (Nussbaumer et Zumbühl, 2012), pour la partie inférieure, une durée d'exposition ne peut être exclue pendant les optimums climatiques holocènes qui postdatent le LGM, ce qui a été mis en évidence sur certains glaciers suisses (e.g. Holzhauser et al., 2005). Toutefois, la durée d'exposition devrait être courte et seule une petite partie du substratum du glacier actuel pourrait avoir été exposée. Un analyse préliminaire d’un échantillon (Guillon et al., 2013) montre que la concentration en 10Be des sédiments du torrent de Crosette, dont l’analyse des sources a montré une provenance purement sous-glaciaire (Godon et al., 2013) est proche de la valeur d’un blanc analytique et confirmerai cette interprétation.

Brent M. Goehring, David A. Vacco, Richard B. Alley, Joerg M. Schaefer, Holocene dynamics of the Rhone Glacier, Switzerland, deduced from ice flow models and cosmogenic nuclides, Earth and Planetary Science Letters, 2012, 351-352, 27

Romain Delunel, Peter A. van der Beek, Julien **Carcaillet**, Didier L. Bourlès, Pierre G. Valla , 2010, Frost-cracking control on catchment denudation rates: Insights from in situ produced 10Be concentrations in stream sediments (Ecrins–Pelvoux massif, French Western Alps) Earth and Planetary Science Letters, Volume 293, Issues 1–2, 15 April 2010, Pages 72-83

Godon, C., **Mugnier J.L.,** Fallourd, R., Paquette, J.L., Pohl, A., Buoncristiani J.F., 2013, The Glacier des Bossons protects Europe's summit from erosion, Earth and Planetary Science Letters. <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2013.05.018>.

Guillon H., C. Godon, J.-L. **Mugnier, J.-F. Buoncristiani, J. Carcaillet**, J.L. Paquette, P. Van der Beek, R. Vassallo (2013, accepté) Origine supra ou sous-glaciaire des sédiments des torrents sous-glaciaires ? L’exemple des torrents de Crosette et Bossons (massif du Mont-Blanc). 14eme congrès de sédimentologie, 5-7 novembre, Paris;

Hallet, B., Hunter, L., Bogen, J., 1996. Rates of erosion and sediment evacuation by glaciers: A review of field data and their implications. Global Planet. Change 12, 213-235.

Holzhauser, H., Magny, M., Zumbûhl, H.J., 2005. Glacier and lake-level variations in west-central Europe over the last 3500 years. The Holocene 15, 789–801.

Ilja L. de Winter, Joep E.A. Storms, Irina Overeem, Numerical modeling of glacial sediment production and transport during deglaciation, Geomorphology, 2012, 167-168, 102.

Kuhlemann, J., W. Frisch, B. Székely, I. Dunkl, and M. Kázmér (2002), Post-collisional sediment budget history of the Alps: tectonic versus climatic control, *Int. J. Earth Sci.*, *91*, 818-837.

Molnar, P. (2004), Late Cenozoic increase in accumulation rates of terrestrial sediment: How might climate change have affected erosion rates?, Ann. Rev. Earth Planet. Sci., 32, 67-89.

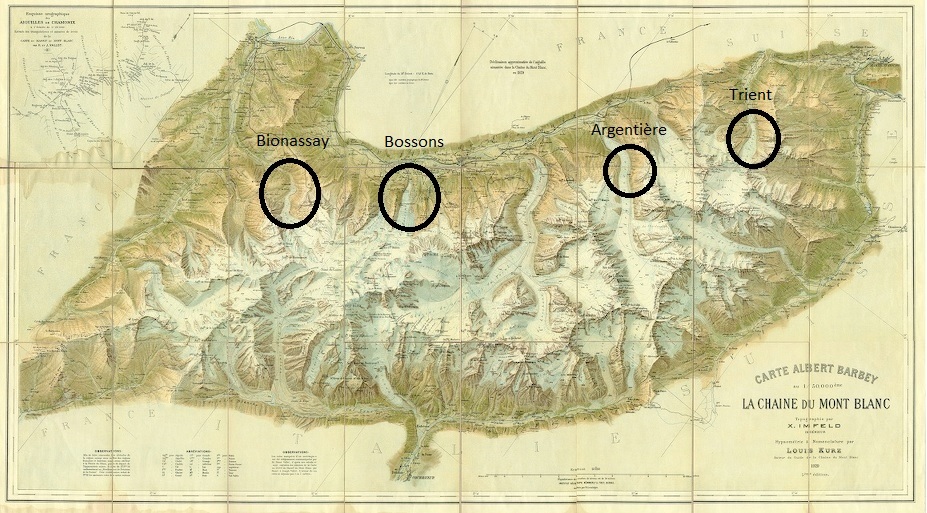
Nussbaumer, S.U., Zumbühl H.J., 2012. The Little Ice Age history of the Glacier des Bossons (Mont-Blanc area, France): a new high-resolution glacier length curve based on historical documents, Climatic Change 111, 301-334. doi:10.1007/s10584-011-0130-9.

Ward, D. J., R. S. Anderson, Z. S. Guido, and J. P. Briner (2009). Numerical modeling of cosmogenic deglaciation records, Front Range and San Juan mountains, Colorado. Journal of Geophysical Research, Earth Surface, 114(F01026).

Ward D.J. and Anderson R. S., 2011. The use of ablation-dominated medial moraines as samplers for 10Be-derived erosion rates of glacier valley walls, Kichatna Mountains, AK Earth Surf. Process. Landforms 36, 495–512 (2011).

**2. Plan de recherche et calendrier de réalisation**

**La zone d’étude** a été choisie dans le massif du mont-blanc, car c’est là que sont situés les plus grands glaciers français ; ceux-ci sont faciles d’accès et nous avons une bonne connaissance de ce système glaciaire et du substratum rocheux (Projet ANR 2009\_2013 et thèse C Godon).



*Fig. 3 : localisation des quatre sites d’étude*

Quatre glaciers du massif du Mont-Blanc, dont les bassin-versant montrent des caractéristiques orographiques et lithologiques différentes, seront échantillonnés dans ce projet (Fig. 3):

* Trient, situé en versant nord et à faible altitude. Il est actuellement recouvert par aucune charge supra-glaciaire significative, et seul les sédiments de son exutoire seront échantillonnés ;
* Argentière ; dont les torrents sous-glaciaires sont facilement accessibles grâce aux captages sous glaciaires réalisés par la société d’Emosson (Echantillons prélevés par L. Moreau).
* Bossons, dont deux des exutoires sont actuellement instrumentés pour mesurer débit et concentration de la charge en suspension, avec piège à sédiments
* Bionnassay, recouvert par d’importantes moraines, et dont le torrent sous-glaciaire est aisément accessible ;

**Le protocole** sera identique pour chaque glacier et permettra d’échantillonner deux zones différentes : les clastes surpra-glaciaires et les clastes sous-glaciaires. Ainsi, trois échantillons supra-glaciaires seront récoltés si possible dans les bédières ( Ces torrents coulant sur le glacier permettent en effet une bonne intégration des différentes zones de versant produisant des clastes par mélange lors du transport torrentiel sur le glacier) et trois échantillons seront prélevés à l’exutoire des torrents sous-glaciaires. L’échantillonnage sera réalisé de manière à récolter suffisamment de sable pour pouvoir séparer par simple tamisage, sans broyage au laboratoire, la fraction comprise entre 200 et 500 µm, fraction habituellement utilisée pour la dissolution du quartz lors de la préparation des échantillons pour datation cosmogénique. Cette fraction sableuse est plus fine que celle utilisée par Ward et Anderson (2011) et permettra d’obtenir une moyenne correspondant à un grand nombre (quelques milliers) de grains. Elle est cependant plus grossière que celle de la fraction en suspension sur laquelle est basée nombre d’études des flux sédimentaires en provenance des glaciers (e.g. Kuhlmann et al., 2002). Aussi, des dissolutions seront également réalisées sur des fractions plus fines afin de prendre en compte un éventuel biais lié à la granulométrie; cependant compte tenu des temps de préparations allongés dus à de nécessaires phases de décantation, seuls quelques échantillons de matériel fin seront ainsi analysés.

**L’étude morphologique des versants**, dont sont issus les clastes, sera réalisée afin d’estimer leurs taux de production (voir méthode développée par Delunel et al. dont Carcaillet, 2010) ; Ainsi la mesure de la concentration en isotope cosmogénique des échantillons supra-glaciaire combinée à l’étude des taux de production des versants fournira, en utilisant les hypothèses statistiques testées par Ward et al. (2009 ; 2011) une valeur moyenne de l’érosion de ces versants ;

Les mesures effectuées sur les échantillons supra-glaciaire fourniront la composition du pole « supra-glaciaire » dans l’équation de mélange qui sera ensuite utilisée pour analyser les sédiments des torrents sous-glaciaires ;

Les échantillons issus des torrents sous-glaciaires étant considéré comme un mélange de supra et sous glaciaire, cette équation permettra alors d’estimer la proportion de sédiments issus de l’érosion sous-glaciaire.

Dans un dernier temps, en pondérant l’équation de mélange par le taux d’érosion moyen des versants, par les surfaces des domaines affectés par les processus de versant et celles affectées par l’érosion sous glaciaire il sera possible d’estimer le taux d’érosion moyen de ces derniers.

**Le test de la validité des résultats** issus des cosmogéniques sera réalisé en comparant ceux-ci avec les estimations des débits des matières en suspension et en charge solide obtenus pour certains de ces glaciers (exutoires Crosette et torrents des Bossons (voir résultats du projet INSU 2012 présenté plus loin ; données du torrent sous-glaciaire d’Argentière, en discussion avec la Société du barrage d’Emosson). Ceci permettra de vérifier que certaines de nos hypothèses simplificatrices (notamment sur la faible influence de la granulométrie retenue) n’affectent pas trop considérablement l’approche ici proposée.

**Le calendrier** est le suivant :

1. Glaciers des Bossons :
   * échantillonnage déjà réalisé ;
   * printemps 2014 : préparation des échantillons (dissolution quartz) ;
   * automne 2014 : premiers résultats ;
2. Glaciers de Bionnassay, d’Argentière, du Trient :
   * Printemps 2014 : calcul des taux de production dans les bassins versants considérés par H. Guillon (thésard), en collaboration avec R. Delunel (Univ. Bern) ;
   * Eté 2014 : Echantillonnage pour tous les glaciers ;
   * préparation automne (dissolution) ;
   * préparation complète et analyse de tous les échantillons dans le cadre d’un stage M2R (2014-2015) ;
   * comparaison avec les flux dans le cadre thèse H. Guillon.

**3. Résultats attendus**

Cette étude est inédite ; elle permettra de tester une méthode pour séparer simplement dans le signal d’érosion mesuré dans les torrents pro-glaciaires la part respective de l’érosion glaciaire de celle des versants à l’échelle d’un massif montagneux englacée.

En estimant les taux d’érosion respectifs (versant-sous-glaciaire) dans différents contextes, ce travail permettra également d’aborder l’impact des rétroactions entre érosion des versants et érosion sous-glaciaire, un impact jusqu’à lors négligé dans la création de reliefs dans les systèmes montagneux englacés.