

## Rôle respectif des écroulements rocheux de versants et de l'érosion sous-glaciaire dans les massifs alpins

Spécialité	Sciences de la Terre et de l'Univers et de l'Environnement
Ecole Doctorale	TUE (Terre, Univers, Environnement)
Laboratoire	ISTerre
Directeur de thèse :	Jean-Louis Mugnier
E-mail et téléphone :	<a href="mailto:jemug@univ-smb.fr">jemug@univ-smb.fr</a> ; 0678307066
Collaborations(s)	J. Carcaillet ; ISTerre-Grenoble (mesures isotopes cosmogéniques) J.F. Buoncristiani ; Biogéosciences, Dijon (sédiments glaciaires) <b>L. Ravanel ; EDYTEM, Chambéry (Ecoulement)</b>
Date prévisionnelle de début de contrat	Septembre 2018

Résumé : La haute montagne alpine est aujourd'hui confrontée à de profonds changements liés au réchauffement climatique entraînant une dégradation du permafrost et un retrait glaciaire important. Dans ce cadre, afin de comprendre l'évolution actuelle du relief il est crucial de déterminer le rôle respectif des écroulements rocheux depuis les parois supra- et péri-glaciaire et de l'érosion sous-glaciaire. Pour cela, nous analyserons les caractéristiques des sédiments résultants à ces deux processus d'érosion et transportés par les glaciers et les systèmes de drainage sous-glaciaire. Les sédiments en position sous-glaciaire correspondent à un mélange provenant de l'érosion du substratum sous-glaciaire et de clastes provenant des zones dominant le glacier issus des processus de versants (écroulements rocheux, avalanche...). La méthode utilisée sera basée sur la mesure de la concentration en isotopes cosmogéniques dans ses sédiments. Le signal isotopique résulte alors d'un mélange de deux pôles très différents: le premier correspondant au substratum sous-glaciaire qui est protégé du rayonnement cosmique par l'épaisseur du glacier, le second provient des versants et enregistrent une concentration en isotopes cosmogéniques dépendante de leur temps d'exposition, donc du taux d'érosion moyen des versants. Le glacier fonctionne à la fois comme un agent de transport des sédiments et un broyeur réduisant ainsi la taille des sédiments et les mélangeant parfaitement ; aussi en analysant la fraction sableuse, facile à échantillonner, il est possible à partir de quelques kilogrammes de roches représentatives de reconstituer l'évolution de tout un bassin-versant. Nous nous proposons dès lors d'étudier des glaciers dans différents contextes (massifs du Mont Blanc, du Mont Rose et de la Vanoise) pour lesquels serait mesurée la concentration en isotope cosmogénique  $^{10}\text{Be}$  de sables sous- et supra-glaciaires. Ceci permettra d'estimer pour ces glaciers : a) la proportion de sédiments issus de l'érosion sous-glaciaire; b) le taux d'érosion moyen des versants ; c) le taux d'érosion sous-glaciaire en tenant compte des surfaces respectives des zones sources dans l'équation de mélange. Les résultats de l'approche isotopique cosmogénique seront comparés avec la mesure directe du flux sédimentaire mise en place sur les torrents issus de certains de ces glaciers, permettant de conforter par une mesure directe les estimations obtenues indirectement. La comparaison des taux d'érosion moyens des différentes unités des bassins-versants et du taux de surrection régional permettra également de préciser l'évolution, à l'échelle millénaire, de l'altitude et du relief dans la zone considérée des Alpes. Finalement, La comparaison entre taux d'érosion glaciaire et modèles théoriques d'érosion glaciaire permettra de mieux contraindre la dynamique des processus d'érosion sous-glaciaire. Ce travail sera effectué dans le cadre d'une thèse réalisée à ISTerre sous la direction de Jean-Louis Mugnier. Les phases initiales de la préparation (les plus longues) seront réalisées au Bourget du Lac; les phases finales (impliquant l'usage d'acide HF) seront effectuées à ISTerre Grenoble sous la responsabilité de Julien Carcaillet (IR CNRS) et les échantillons seront finalement analysés grâce au spectromètre de masse du Centre national de mesure ASTER (Aix en Provence).

## 1. CONTEXTE ET POSITIONNEMENT DU PROJET

### Problématique

Le Quaternaire est caractérisée par un accroissement de la production de sédiments (*e.g.* Kuhlemann *et al.*, 2002). Cet accroissement semble lié à une évolution des processus contrôlant l'érosion des chaînes de montagnes durant les 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 encore l'érosion à la base des glaciers (Hallet *et al.*, 1996)? Suivant les interprétations, il est envisagé que le relief local (par définition la différence entre un sommet et les vallées adjacentes) est soit accru par le creusement des vallées (*e.g.* Kirkbride and Matthews, 1997) soit diminué par le recul des versants dans les cirques glaciaires (*e.g.* Oskin and Burbank, 2005) (Fig. 1).

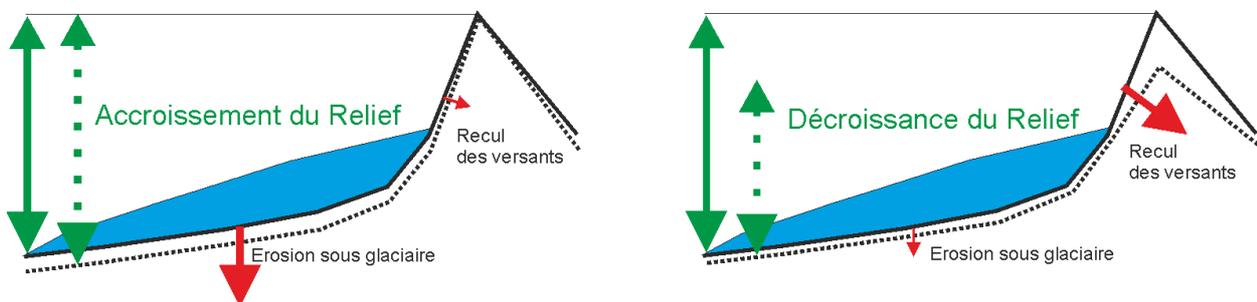


Fig. 1 : L'évolution du relief local en haute montagne : une compétition entre érosion sous-glaciaire et recul des versants sous l'effet des processus d'érosion (écroulements rocheux, avalanches...).

Ces modifications du relief sous l'effet de l'érosion ont tendance à réduire l'altitude tandis que la surrection tectonique a tendance à augmenter l'altitude d'une chaîne de montagne. Le problème se résume donc à une compétition entre trois principaux processus : la vitesse de surrection, le taux d'érosion sous glaciaire et la vitesse de recul des versants. La surrection tectonique dans les Alpes ou en Himalaya commencent à être bien estimée – elle est de l'ordre de 1,5 mm/an dans le massif du Mont-Blanc, de 1 mm/an dans le massif du Mont Rose et de 5 mm dans le massif de l'Everest. On se propose donc de quantifier dans différents bassins versants partiellement englacés et dont la surrection a déjà été estimée, les vitesses d'érosion glaciaire *ss.* et les vitesses d'érosion des versants étant en compétition (Fig. 1).

Ce travail a déjà débuté sur le massif du Mont Blanc où l'on montre pour le glacier des Bossons (face nord du Mont Blanc) que l'érosion sous-glaciaire est voisine de l'érosion à long terme des versants (~0,5 mm/an) mais inférieure à la surrection (1,5 mm/an). Le relief local semble donc stable mais les altitudes croissent d'environ 1mm/an sous l'effet d'une surrection supérieure à l'érosion. Dans le cas particulier du sommet du Mont Blanc, recouvert d'un glacier froid qui le protège de l'érosion, l'accroissement est encore plus marqué. Nos résultats, obtenus grâce à une méthode novatrice (voir ci-dessous), soulève la question de l'accroissement actuel de l'altitude des Alpes : la face nord du Mont Blanc est-elle un cas singulier ou cette évolution avec accroissement de l'altitude sous l'effet d'une surrection plus forte que l'érosion sous glaciaire et le recul des parois se retrouve elle dans d'autres hauts massifs ?

### Adéquation avec la politique scientifique du laboratoire et celle de l'OSUG

L'une des thématiques de l'équipe Tectonique-Relief-Bassin d'ISTerre est de répondre à la question : « Quelle a été l'influence des glaciations du Quaternaire sur l'évolution tectonique et morphologique des Alpes occidentales ? ». Le sujet que nous proposons s'intègre donc parfaitement dans cette thématique. Il faut de plus souligner que le CNRS soutient fortement cette thématique puisque Pierre Valla vient d'être recruté (CR) dans l'équipe sur le sujet. Cette thèse permettra par ailleurs de conforter la collaboration entre les deux plus gros laboratoires de l'OSUG (ISTerre et IGE) en combinant nos efforts pour instrumenter les flux hydro-sédimentaires au voisinage de différents glaciers.

## 2. DESCRIPTION SCIENTIFIQUE DU PROJET

### 2.1 Objectifs du projet

#### Résultats attendus et objectifs

Cette étude permettra de comparer quantitativement l'érosion des versants, l'érosion sous-glaciaire et la surrection en testant une méthode que nous développons, basée sur les mesures d'isotopes cosmogéniques sur les sédiments transportés par les torrents pro-glaciaires, et permettant de séparer le signal provenant de l'érosion glaciaire et celui issu de l'érosion des versants. Cette méthode permettra :

- de mieux comprendre les vitesses et processus d'érosion sous-glaciaire car la comparaison entre la dynamique des glaciers actuels et les taux d'érosion mesurés permettra de tester les lois d'érosion sous-glaciaire ;
- de mieux estimer la stabilité à long terme des parois rocheuses (enjeu majeur en termes de risque), ceci en fonction de leur orientation, de leur altitude, de leur lithologie et de leur contexte climatique puisque nous pourrions comparer les résultats obtenus pour les différentes parois de massifs situés dans des contextes différents ;
- de quantifier l'évolution du relief local et de l'altitude de différents massifs au cours du temps.

#### Méthode utilisée

L'érosion sous-glaciaire est fréquemment estimée uniquement à partir de la charge solide des torrents issus de la base de glaciers (synthèse *in* Hallet *et al.*, 1996). Cette méthode ne pose pas de problème pour les glaciers de calotte (absence de versants) ; par contre, pour les glaciers de montagne, la charge solide des torrents sous-glaciaires résulte d'un mélange entre les sédiments issus de l'érosion sous-glaciaire et ceux fournis par les versants dominants le glacier. Des études complémentaires doivent donc être réalisées pour estimer l'érosion spécifique à la base du glacier (Fig. 2).

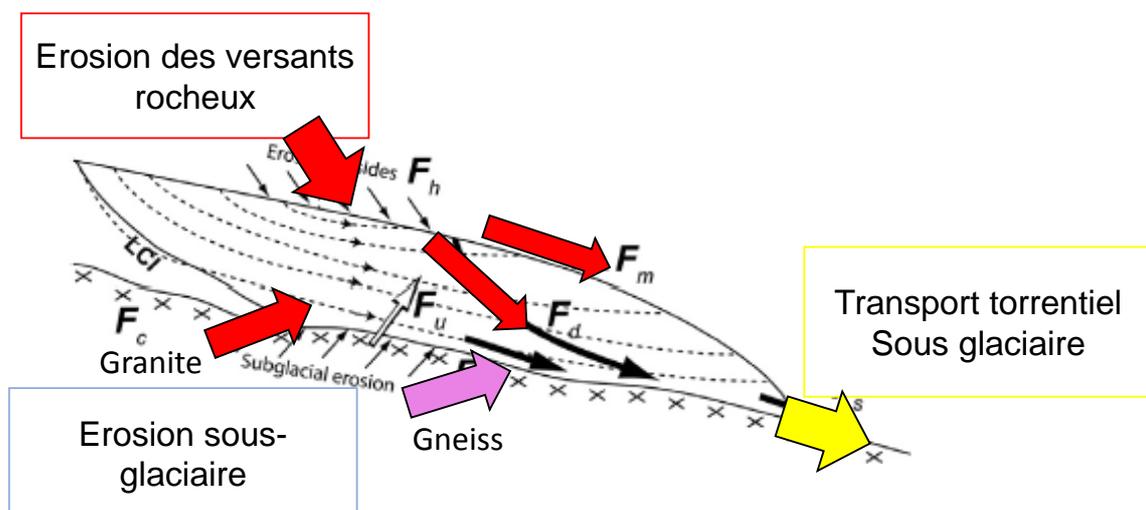


Fig. 2 : Principe de la méthode utilisée : 1) l'érosion des versants est inversement proportionnelle à la teneur en isotopes cosmogéniques ( $^{10}\text{Be}$ ) des sédiments déposés sur les glaciers ; 2) la composition isotopique des sédiments sous-glaciaires résulte d'un mélange entre des sédiments issus de l'érosion sous-glaciaire (concentration nulle) et ceux provenant de la surface du glacier ; 3) le flux de sédiment en provenance des versants dans le torrent sous-glaciaire peut être déduit en tenant compte de la surface des versants, du taux d'érosion des versants et de la proportion de sédiment venant de la surface du glacier ; 4) le flux de sédiments en provenance de l'érosion sous-glaciaire est déduit du flux de sédiment en provenance de sa surface et de sa proportion dans le torrent sous-glaciaire ; 5) le taux d'érosion sous-glaciaire est estimé à partir du flux de sédiments en provenance de l'érosion sous-glaciaire distribué le long de l'aire couverte par le glacier.

Nous avons développé une méthode originale permettant de tracer les différents processus d'érosion basée sur la mesure de la teneur en isotope cosmogénique des sédiments (Guillon *et al.*, 2015 ; Fig. 2). Cette méthode a déjà validée et appliquée avec succès dans le cas du massif du Mont Blanc (Godon *et al.*, 2013 ; Godon, 2013 ; Sarr, 2015 ; Guillon, 2016 ; Sarr *et al.*, soumis) grâce à une comparaison avec les estimations des débits des matières en suspension et la mesure de la charge de fond obtenus sur les torrents pro-glaciaires issus du glacier des Bossons (Guillon *et al.*, 2017).

## 2.2 Structuration du projet

### 2.2.1 Zones d'étude et échantillonnage

**Les zones d'étude** seront situées dans le massif du Mont Blanc et du Mont Rose (Fig. 3), massifs renfermant les sommets et les glaciers les plus élevés des Alpes. Des glaciers autour du Dôme de la Vanoise seront également étudiés. Nous excluons le glacier des Bossons, déjà étudié (Godon, 2013 ; Sarr, 2015 ; Guillon, 2016). La liste de glaciers ci-dessous est indicative mais correspondent à des cibles potentielles. La plupart de ces glaciers sont faciles d'accès et les travaux antérieurs fournissent une bonne connaissance de ces systèmes glaciaires et de leurs substratums rocheux.



Fig. 3 : Localisation des bassins versants étudiés (à droite : Mont Blanc, à gauche : Mont Rose).

Dans le massif du Mont Blanc, 6 nouveaux glaciers pourront être étudiés :

- les glaciers du Freney, du Brouillard et du Mont Blanc situés en face sud du Mont Blanc, ceci afin de mieux comprendre l'influence de l'orientation sur l'érosion à long terme des parois ;
- le glacier du Bourgeat, situé dans la face nord de l'Aiguille du Goûter et disposant d'un bassin versant exclusivement formé de gneiss et de schistes, ceci afin de mieux comprendre le rôle de la lithologie sur la fréquence et le volume des écroulements rocheux ;
- - le glacier d'Argentière et la Mer de Glace ; deux glaciers de vallée où l'échantillonnage des sédiments sous-glaciaire sera facilité par présence de galeries débouchant sous les glaciers et réalisées pour utiliser à des fins hydro-électriques (EDF) l'eau situées sous les glaciers.

Quatre glaciers proches du Mont Rose, dont les bassins-versants montrent des caractéristiques orographiques et lithologiques différentes, pourraient être sélectionnés dans ce projet (Fig. 3) :

- le glacier du Belvédère situé à la base de la face nord-est du Mont Rose, qui a la particularité d'être soumis à des crues glaciaires (Kaab *et al.*, 2004) rapides (appelées « surges ») et dont le bilan de masse est globalement positif, une anomalie par rapport au retrait général des glaciers alpins ;
- le Gornergletscher dont une des branches s'écoule depuis le sommet du Mont Rose; il sera de plus possible d'étudier ce glacier à la fois tout à fait à l'aval (2300 m), ainsi qu'à une altitude de 2700 m où un torrent sous glaciaire émerge latéralement ;
- le glacier de Ferpeclé, glacier de vallée situé en versant nord et à assez faible altitude.
- le glacier de Théodule, glacier de versant situé en versant nord et à assez faible altitude lui aussi.
- Le bilan sédimentaire des torrents issus des glaciers de Ferpeclé et du Gornergletscher a déjà été mesuré (Bezinge, 1987 ; Colins, 1990), ce qui permettra de comparer les résultats issus de notre approche méthodologique à ceux de nos prédécesseurs, afin de discuter la qualité des différentes approches.

Des glaciers de Vanoise pourront également être étudiés autour du Dôme de la Vanoise :

- le glacier de l'Arpont en versant est et celui de l'Arcelin en face ouest.
- le glacier de St Sorlin, suivi de longue date du point de vue glaciologique, sera lui aussi étudié.

**Le protocole d'échantillonnage** sera identique pour chaque glacier et permettra d'échantillonner deux zones différentes : les clastes supra-glaciaires et les clastes sous-glaciaires.

- Les torrents sous-glaciaires provenant de ces glaciers s'écoulent fréquemment (avec fluctuations selon les périodes) *via* de grands porches où il sera possible d'échantillonner les sédiments sous-glaciaires ; deux ou trois échantillons seront ainsi prélevés à l'exutoire des torrents sous-glaciaires (Fig.4).



Fig. 4 : Exemples de zones sous-glaciaires où seront échantillonnés les sables (de gauche à droite : porche sous glaciaire ; sables dans la glace basale ; sables dans le torrent sous glaciaire).

- Des échantillons en position supra-glaciaires seront récoltés sur chacun des glaciers, car ils jouent le rôle de collecteur d'un grand nombre d'écroulements rocheux depuis les versants (voir Fig.5). La surface et la quantité de sable sur laquelle l'échantillonnage sera réalisé tiendra compte des résultats basés sur une approche statistique prenant en compte différents paramètres (voir Fig.5). De plus, les échantillons seront si possible prélevés dans les bédrières (torrents supra-glaciaires permettant un bon mélange lors du transport).

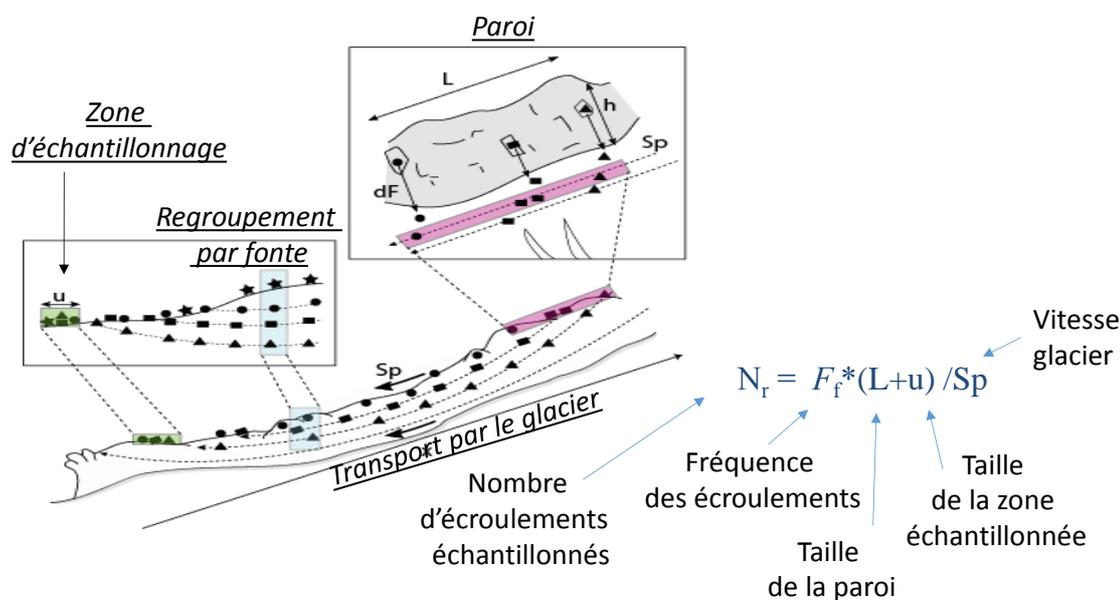


Fig. 5 : Nombre d'éroulement statistiquement échantillonnés en charge supra glaciaire en fonction des caractéristiques des parois, du glacier et de la fréquence des éroulements. Ceux-ci suivent classiquement une distribution de type puissance dont les caractéristiques peuvent être estimée à partir d'un catalogue des éroulements historiques.

### 2.2.2 Traitement et analyse des échantillons

L'échantillonnage sera réalisé de manière à récolter suffisamment de sables pour pouvoir séparer par simple tamisage (sans broyage en laboratoire), la fraction comprise entre 200 et 500  $\mu\text{m}$ , fraction habituellement utilisée pour la dissolution du quartz lors de la préparation des échantillons pour la datation cosmogénique. Cette fraction sableuse est plus fine que celle utilisée par Ward et Anderson (2011) pour ce même type d'étude. Nous avons en effet montré (Sar, 2015 ; Sarr *et al.*, soumis) qu'il n'y avait pas de différence significative entre cette fraction fine et une fraction grossière (blocs de 10 à 30 cm) dès lors qu'au moins 30 clastes était amalgamés. Les échantillons de sable permettront donc d'obtenir facilement une moyenne correspondant à un grand nombre (quelques milliers) de grains.

Les échantillons seront soumis à une succession de traitements chimiques afin de séparer la silice des autres composants. Les phases initiales de la préparation (les plus longues) seront effectuées au Bouget du Lac; les phases finales (impliquant l'usage d'acide HF) seront effectuées à ISterre Grenoble.

La mesure de la concentration en isotopes cosmogéniques ( $^{10}\text{Be}$ ) sera réalisée sur le spectromètre de masse du Service national de mesure (ASTER) basé à Aix en Provence. 5 à 10 échantillons seront sélectionnés par glacier. Julien Carcaillet et le doctorant participeront à la mesure, réalisée sous la responsabilité des ingénieurs d'ASTER.

### 2.2.3 Estimation des taux de productions en isotopes cosmogéniques des parois et de leur taux d'érosion

**L'étude géomorphologique des versants** dont sont issus les clastes, sera réalisée afin d'estimer les taux de production en isotopes cosmogéniques en fonction de leur orientation et des masques pouvant limiter le rayonnement (voir méthode développée par Delunel *et al.*, 2010 ainsi que Sarr *et al.*, soumis). Ce travail sera notamment effectué à partir de Modèles Numériques de Terrain haute résolution pour les versants suisses et français et à partir du MNT mondial dans les autres cas.

**La mesure de la concentration en isotopes cosmogéniques** des échantillons supra-glaciaires combinée à l'étude des taux de production des versants fournira une estimation du taux d'érosion; en utilisant l'analyse statistique développée par Ward et al. (2009, 2011) et Sarr *et al.* (soumis), il apparaît que le taux d'érosion est faiblement sous-évalué mais que cette sous-évaluation ne dépasse cependant pas de plus de 5 % la valeur moyenne de l'érosion de ces versants.

#### 2.2.4 Estimation de l'érosion sous glaciaire

**Une approche purement géomorphologique** sera utilisée pour estimer le taux d'érosion sous-glaciaire. Les échantillons issus des torrents sous-glaciaires représentent un mélange de sédiments d'origine supra- et sous-glaciaire, et une équation de mélange permettra d'estimer la proportion de sédiments issus de l'érosion sous-glaciaire. En effet, les sédiments sous-glaciaires ne contiennent pas d'isotope cosmogéniques et les mesures effectuées sur les échantillons supra-glaciaires fourniront la composition du pôle « supra-glaciaire » dans l'équation de mélange qui sera utilisée pour analyser les sédiments des torrents sous-glaciaires.

En pondérant l'équation de mélange avec le taux d'érosion moyen des versants, les surfaces des domaines affectés par les processus de versant et celles affectées par l'érosion sous-glaciaire, il sera possible d'estimer les flux de matières provenant respectivement du domaine supra- et sous-glaciaire et donc d'estimer le taux d'érosion sous-glaciaire.

**Les flux de sédiments mesuré au niveau des torrents sous-glaciaires** – lorsqu'il y a déjà des mesures (Bezinge, 1987 ; Collins, 1990) – seront comparés à ceux estimés à partir de l'analyse géomorphologique et des mesures isotopiques. De plus, trois stations hydro-sédimentaires, déjà utilisées dans l'étude du glacier des Bossons (Guillon *et al.*, 2017) seront disposés à proximité de nouveaux glaciers pour en mesurer les flux sortants.

#### 2.2.5 Modélisation de la dynamique des glaciers

Des modélisations simplifiées de la dynamique glaciaire ont été proposés et sont en cours de perfectionnement, notamment avec les équipes de Fribourg et Zurich (Suisse) avec lesquelles nous collaborons (Huss et Farinotti, 2012). Elles permettent de remonter, à partir d'observations de surface (pente, vitesse...), à des informations en profondeur (épaisseur, vitesse basale, etc.). Ces modélisations seront utilisées afin de nourrir l'approche statistique concernant la représentativité des échantillons de surface et afin de tester des lois d'érosion liant le taux d'érosion à la dynamique du glacier.

### **3. LE PROFIL DU CANDIDAT**

---

Culture générale en science de la terre et en mécanique nécessaire. Capacité informatique importante (traitement de données satellitaires, en particulier avec les logiciels développés dans le cadre de l'ANR EFIDIR; utilisation de logiciels de modélisation de l'écoulement des glaciers, en collaboration avec l'équipe de l'Université de Fribourg).

Capacités pour le travail de terrain nécessaire (mise en place et maintenance d'instrumentations pour mesurer les flux sédimentaires et les vitesses ponctuelles par GPS, échantillonnage au voisinage des glaciers).

#### 4. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES (de l'équipe proposante, uniquement sur le sujet).

---

- Buoncrisiani** JF et Campy M 2011. Quaternary Glaciations in the French Alps and Jura. In J. Ehlers, P.L. Gibbard and P.D. Hughes, editors: *Developments in Quaternary Science*, Vol. 15, Amsterdam, The Netherlands, pp. 117-126.
- Clerc S., **Buoncrisiani** JF., Guiraud M., Desaubliaux G., et Portier E. 2012. Depositional model in subglacial cavities, Killiney Bay, Ireland. Interactions between sedimentation, deformation and glacial dynamic. *Quaternary Science Review*, Volume 33, 6 February 2012, pp. 142-164.
- Delaney, I., Bauder, A., **Huss, M.**, and Weidmann, Y. (in press). Proglacial erosion rates and processes in a Swiss glacier's catchment. *Earth Surface Processes and Landforms*
- Fallourd, R. Harant, O., Trouve, E., Nicolas, J.-M., Gay, M., Walpersdorf, A., **Mugnier, J.-L.**, Serafini, J., Rosu, D., Bombrun, L., Vasile, G., Cotte, N., Vernier, F., Tupin, F., Moreau, L. and P. Bolon. 2011. Monitoring Temperate Glaciers by Multi-Temporal TerraSAR-X Images and Continuous GPS Measurements, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 4, 372-386.
- Farinotti, D., Brinkerhoff, D., Clarke, G.K.C., Fuerst, J.J., Frey, H., Gantayat, P., Gillet-Chaulet, F., Girard, C., Huss, M., Leclercq, P.W., Linsbauer, A., Machguth, H., Martin, C., Maussion, F., Morlighem, M., Mosbeux, C., Pandit, A., Portmann, A., Rabatel, A., Ramsankaran, RAAJ, Reerink, T.J., Sanchez, O., Stentoft, P.A., Kumari, S.S., van Pelt, W.J.J., Anderson, B., Benham, T., Binder, D., Dowdeswell, J.A., Fischer, A., Helfricht, K., Kutuzov, S., McNabb, R., Gudmundsson, G.H., Li, H., and Andreassen, L.M. (2017). How accurate are estimates of glacier ice thickness? Results from ITMIX, the Ice Thickness Models Intercomparison eXperiment. *The Cryosphere*, 11, 949-970, doi:10.5194/tc-11-949-2017
- Godon C. (2013) L'érosion dans les environnements glaciaires: exemple du glacier des Bossons (France), thèse université Grenoble, 244 p. <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00909603> Réalisée dans le cadre de l'ANR ERDAIp (Direction **J.L. Mugnier**).
- Godon, C., **Mugnier J.L.**, Fallourd, R., Paquette, J.L., Pohl, A., Buoncrisiani J.F., 2013, The Glacier des Bossons protects Europe's summit from erosion, *Earth and Planetary Science Letters*. 375, 135-147. Comments at [Nature](#).
- Guillon H. (2016) Origine et transport des sédiments dans un bassin versant alpin englacé (Glacier des Bossons, France) une quantification couplant mesures hydro-sédimentaires haute-résolution, suivi radio-fréquence de galets, teneur en nucléides cosmogéniques et méthodes probabilistes; thèse université Grenoble-Alpes, 269 p. (Direction **J.L. Mugnier**).
- Guillon, H., **Mugnier J.L.**, **Buoncrisiani, J.F.** 2017. Separating subglacial and proglacial inputs to the sediment export of a glaciated catchment using high-resolution monitoring (Bossons glacier, Mont-Blanc massif, France). *Earth Surface Process and Landform*.
- Guillon H., **J.-L. Mugnier**, C. Godon, J.-F. **Buoncrisiani, J.F.**, **Carcaillet, J.**, Paquette, L., P. Van der Beek, R. Vassallo (2015) Supra or subglacial origin for the sediment of the subglacial streams? The case of the Crosette and Bossons streams (Mont Blanc massif). *Earth Surf. Process. Landforms*, DOI: 10.1002/esp.371. Cet article a reçu le "2016 Wiley Earth Surface Processes and Landforms Award"
- Huss, M.** and Farinotti, D. (2012). Distributed ice thickness and volume of all glaciers around the globe. *Journal of Geophysical Research*, 117, F04010, doi:10.1029/2012JF002523
- Huss.**, M., Bookhagen, B., Huggel, C., Jacobsen, D., Bradley, R., Clague, J., Vuille, M., Buytaert, W., Cayan, D., Greenwood, G., Mark, B., Milner, A., Weingartner, R., and Winder, M. (2017). Toward mountains without permanent snow and ice. *Earth's Future*, 5(5), 418-435, doi:10.1002/2016EF000514
- Fanny Ponton, Renaud Fallourd, Andrea Walpersdorf, Emmanuel Trouve, Michel Gay, Flavien Vernier, Jean-Marie Nicolas and **Jean-Louis Mugnier (2014)** Observation of the Argentiere glacier flow variability from 2009 to 2011 by TerraSAR-X and GPS displacement measurements. *Journal of geodesy*. DOI: [10.1109/JSTARS.2014.2349004](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2014.2349004)
- Sarr Anta Clarisse (2015) Erosion des versants dans le Massif du Mont-Blanc : apports du <sup>10</sup>Be cosmogénique produit in-situ. Master 2 Recherche TUE Grenoble, 44 p. (Dirigé par J.L. **Mugnier**)
- Sarr, A., **J.-L. Mugnier**, R. Abrahami, **J.**, **Carcaillet, J.**, Ravanel L. (submitted) Sidewalls erosion in the Mont-Blanc Massif (France): insights from in-situ produced <sup>10</sup>Be concentration measured on supra-glacial clasts, *Earth and Planetary Science Letter*, submitted.

- Stange K. M., van Balen R., **Carcaillet J.**, Vandenberghe J. 2013 Terrace staircase development in the Southern Pyrenees Foreland: Inferences from  $^{10}\text{Be}$  terrace exposure ages of the Segre River. *Global and Planetary Change*. 101, 97-112. doi:10.1016/j.gloplacha.2012.12.007
- Thomazo, C., **Buoncrisiani, J.F.**, Vennin, E., Pellenard, P., Cocquerez, T., **Mugnier, J.L.**, Gerard, E., 2017, Geochemical processes leading to the precipitation of subglacial carbonate crusts of the Bossons glacier in the Mont Blanc Massif (French Alps). *Frontiers in Earth Science*, section Cryospheric Sciences.
- Valla P.G.**, van der Beek P.A., **Carcaillet J.** 2010 Dating bedrock gorge incision in the French Western Alps (Ecrins-Pelvoux massif) using cosmogenic  $^{10}\text{Be}$ . *J. Terra Nova*. 22(1), 18-25 doi:10.1111/j.1365-3121.2009.00911.x

**Autres références techniques citées dans le texte :**

- Azam et al. (2016) Meteorological Conditions, Seasonal and Annual Mass Balances of Chhota Shigri Glacier, Western Himalaya, India. *Annals of Glaciology*, 57 (71): 328-338 p.
- Bezinge, A., 1987. Glacial meltwater streams, hydrology and sediment transport: the case of the Grande Dixence hydroelectricity scheme. In: A.M. Gumell and M.J. Clark (Editors), *Glacio-Fluvial Sediment Transfer*. Wiley, Chichester, pp. 473-498.
- Collins, D. N. 1990. Seasonal and annual variations of suspended sediment transport in meltwaters draining from an Alpine glacier. *International Association of Hydrological Sciences Publication* 193, 439-446.
- Delunel, Romain, 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  $^{10}\text{Be}$  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
- 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.
- Huss, M., Farinotti, D., 2012. Distributed ice thickness and volume of all glaciers around the globe. *J. Geophys. Res.* 117, F04010, doi : 10.1029/2012JF002523.
- Kääb, A., A., Huggel, C., Barbero, S., Chiarle, M., Cordola, M., Epifani, F., Haeberli, W., Mortara, G., Semino, P., Tamburini A. and Viazzo G., 2004, Glacier hazards at Belvédère glacier and the Monte Rosa East face, Italian Alps : processes and mitigation, *Internationales Symposium INTERPRAEVENT 2004 – Riva/Trient*, 78 p.
- Kirkbride, M., Matthews, D., 1997, The Role of Fluvial and Glacial Erosion in Landscape Evolution: The Ben Ohau Range, New Zealand, *Earth surface processes and Landforms*, Volume 22, Issue 3, P. 317–327
- 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.
- J.M. Shea, P. Wagnon, W.W. Immerzeel, R. Biron, F. Brun & F. Pellicciotti (2015): A comparative high-altitude meteorological analysis from three catchments in the Nepalese Himalaya, *International Journal of Water Resources Development*, DOI: 10.1080/07900627.2015.1020417
- 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  $^{10}\text{Be}$ -derived erosion rates of glacier valley walls, Kichatna Mountains, AK *Earth Surf. Process. Landforms* 36, 495–512 (2011).