



TELLUS Appel d'offres 2021

Dossier Scientifique

(8 pages maximum pour le projet scientifique*)

Ce formulaire doit être obligatoirement rempli par le porteur du projet, signé par le directeur d'unité et joint à la demande informatique sur le site <https://sigap.cnrs.fr/>

sous format PDF

DATE LIMITE DE CANDIDATURE : 15 SEPTEMBRE 2020, A 17H

Titre du projet : Quelle progressivité de la déglaciation dans les Alpes lors de la transition climatique entre Younger Dryas et Holocène ?

Responsable du projet (Nom, Prénom, Qualité) : Mugnier Jean Louis, Directeur de Recherche CNRS, ISTerre

Type de projet : cocher un seul choix possible (cf texte des AO et guide des programmes nationaux)

Projet collaboratif (durée : deux à trois ans ; budget moyen annuel 10 à 30 k€ ; nombre d'unités impliquées ≥ 3) ⁽¹⁾ ⁽²⁾ ⁽³⁾

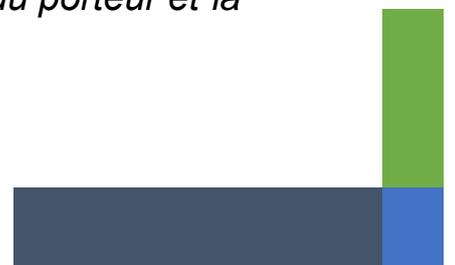
⁽¹⁾ Selon les résultats de l'évaluation scientifique des projets et le budget disponible, ou à la demande spécifique du porteur, les CS ont la possibilité de financer les projets pour une durée différente de celle demandée par le porteur, et notamment de ne financer que la première année du projet.

⁽²⁾ Un financement légèrement en-dehors de ces montants pourra être demandé et sera analysé au cas par cas. Pour les projets collaboratifs, un dépassement de ces montants est possible uniquement pour les projets qui ont été annoncés par une lettre d'intention au printemps 2020.

⁽³⁾ Dans le cas de très grandes unités, des projets pourront être examinés s'ils impliquent plusieurs équipes d'une ou deux unités.

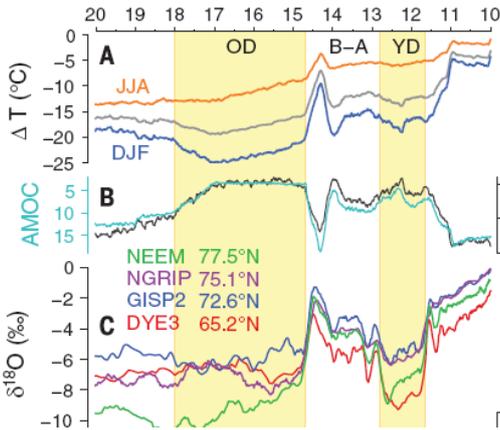
 **S'agit-il d'une re-soumission ? Non**

** n'inclut pas la première page du dossier avec le nom du porteur et la rubrique « Valorisation des travaux antérieurs »*



1. Intérêt scientifique et état de l'art

La question : le réchauffement en Europe à la sortie de la déglaciation. Il existe actuellement une controverse sur l'évolution à long terme des températures hémisphériques durant et au tout début de l'Holocène (ex. Liu et al., 2014) : en effet pour cette période, les proxies climatiques et les résultats issus de modèles montrent encore des tendances divergentes des températures entre les différentes reconstructions : les modèles climatiques couplés océan-atmosphère (ex. Buizert et al, 2014) ne réussissent pas à reproduire le réchauffement brutal à la fin du Younger Dryas, pourtant clairement



constaté dans des forages océaniques de l'Atlantique Nord ou dans la glace du Groenland (Rasmussen et al., 2006). De même, les reconstructions de la température continentale basées sur des proxies biologiques soit correspondent à un tel réchauffement brutal (par exemple, les enregistrements de chironomides de Heiri et al., 2015 ; Fig. 2), soit indiquent un réchauffement beaucoup plus progressif (par exemple, les enregistrements de pollen de Marsicek et al., 2018).

Figure 1 (d'après Buizert et al, 2014). A) Modélisation de l'évolution des températures. C) Evolution de la teneur en $\delta^{18}O$ des forages de la calotte du Groenland. Notez le décalage de la période de réchauffement le plus rapide (11.6 ka dans les forages ; 11 ka dans les modélisations).

Les glaciers Alpins en tant que marqueur de ce réchauffement. L'évolution des glaciers Alpins est susceptible de fournir des informations complémentaires sur ce réchauffement, en particulier sur la complexité spatiale du schéma de température en Europe continentale ; cette dernière semble mise en évidence par des données récentes remettant en question la signification d'une reconstitution moyenne globale de la température en Europe (par exemple Affolter et al., 2019). La distribution spatiale des glaciers à travers les Alpes permettrait ainsi d'étudier les gradients climatiques à l'échelle des Alpes.

Des études antérieures (par exemple, Ivy-Ochs et al., 2008 ; Schindelwig et al., 2012 ; Schimmelpennig et al., 2014, Wirsig et al., 2016), synthétisées dans la figure 2 (adapté de Protin et al., submitted) ont ainsi suggéré que les glaciers de la fin du YD montraient déjà une tendance à une déglaciation tandis que les glaciers de l'Holocène précoce se maintiennent ou progressent momentanément dans les Alpes ; ceci possiblement en réponse à des courtes vagues de froid brutales observées dans les carottes de glace du Groenland (Protin et al., submitted).

Tous ces stades glaciaires sont cependant de petits événements qui ponctuent le recul général qui s'est produit à la fin de la dernière glaciation sous l'effet d'un réchauffement hémisphérique (par exemple Shakun et al., 2012). Ces petits événements, qui sont des anomalies par rapport à la déglaciation générale, fournissent cependant des informations sur cette dernière : En étudiant systématiquement l'importance de ces anomalies dans l'évolution glaciaire (moraine de still-stand ou moraine d'avancée) et leur timing pour des glaciers répartis à travers les Alpes, il serait possible de préciser les conditions du dé-englacement général et des conditions climatiques associées. Pour cela il est nécessaire de développer une méthodologie qui sera appliquée de manière homogènes aux différents glaciers étudiés.

Cette méthodologie tiendra compte des acquis déjà existants dans différents domaines d'études et inclura : A) des études morphologiques sur les moraines et structures associées avec de préciser leur condition de dépôt ; B) des études géochronologiques pour les dater ; C) des reconstitutions de la géométrie (extension, profils transversaux et longitudinaux d'épaisseur.....) des paléoglaciers associés à ces moraines ; et D) des modélisations glaciaires afin d'estimer des paléotempératures et paléoprécipitations associées à ces géométries

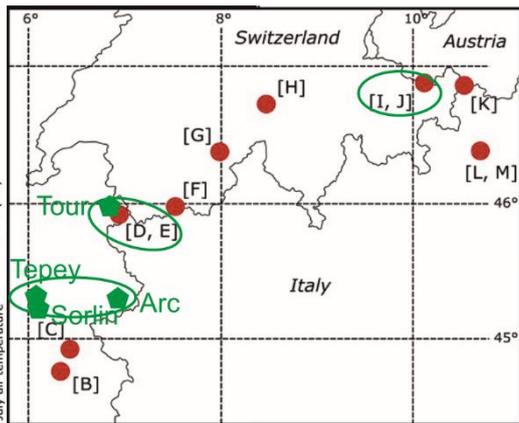
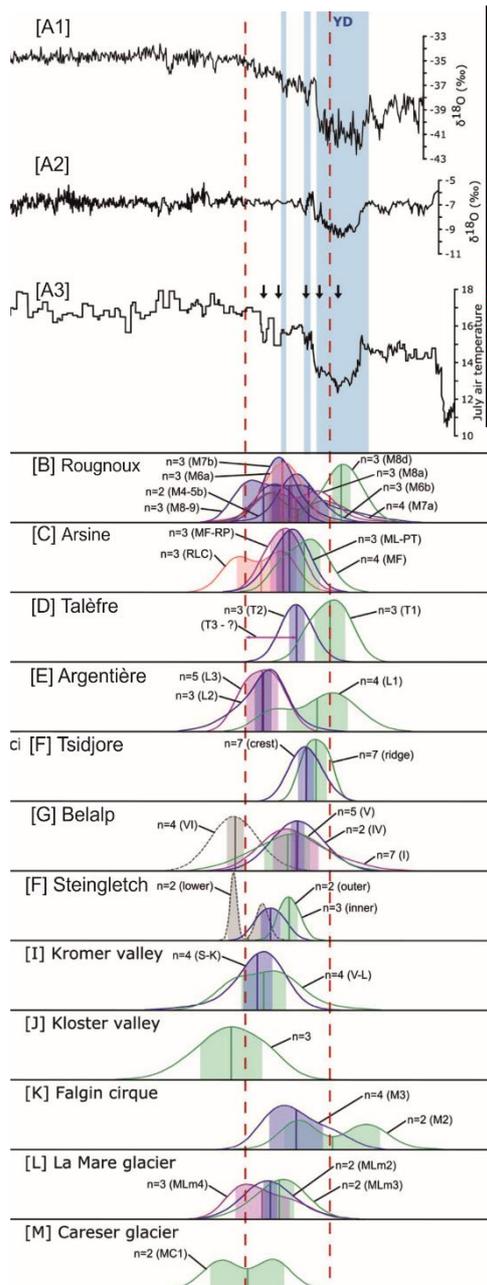


Figure 2 : Location des zones d'étude (en vert sur la carte) et comparaison de proxies paléo-climatiques avec la chronologie de stades d'avancées des glaciers alpins basée sur des âges ¹⁰Be. [A1]: Enregistrement δ¹⁸O dans la carotte du Groenland NGRIP (Rasmussen et al., 2006), les bandes bleues représentent le Younger Dryas et les pics de froid

pendant l'Holocène précoce identifiés dans la carotte de glace du Groenland, [A2] Enregistrement des isotopes de l'oxygène provenant des inclusions fluides dans des spéléothèmes en Suisse (Affolter et al., 2019) [A3] Température de l'air en juillet dans les Alpes, estimée à partir des chironomes (Heiri et al., 2015). Les glaciers alpins [B] à [M] sont présentés d'est en ouest, leur emplacement étant indiqué par des points rouges sur la carte. Les lignes verticales en pointillés délimitent la période de transition YD/EH entre 12 et 10 ka. Chaque moraine est représentée par une courbe de probabilité formée en additionnant celles des blocs datés (n=x), les lignes verticales et la bande colorée représentent les moyennes arithmétiques et les écarts types (1σ), les couleurs représentent l'ordre stratigraphique des moraines (de l'extérieur vers l'intérieur : vert, bleu, violet, rose). [B] (Hofmann, 2018), [C] (Schimmelpfennig et al., 2019), [D] (Protin et al., submitted) ; [E] (Protin et al., 2019), [F] (Schimmelpfennig et al., 2012), [G] (Schindelwig et al., 2012), [H] (Schimmelpfennig et al., 2014), [I] (Moran et al., 2016a), [J] (Moran et al., 2016a), [K] (Moran et al., 2016b), [L] (Baroni et al., 2017) et [M] (Baroni et al., 2017).

L'objectif de ce projet sera de compléter les données de terrain sur des sites déjà partiellement étudiés (voir tableau 1 et carte sur la figure 2) mais où il manque quelques données, essentiellement des datations, pour obtenir des reconstitutions fiables. Le second point sera d'étudier ces glaciers ainsi qu'un groupe de glaciers de l'extrême Est des Alpes pour réaliser une modélisation fournissant un gradient climatique à travers les Alpes. Une harmonisation des données sera nécessaire afin de pouvoir comparer l'évolution des glaciers à deux extrémités de la

chaîne alpine.

L'état de l'art dans l'étude des glaciers et des paléoglaciers.

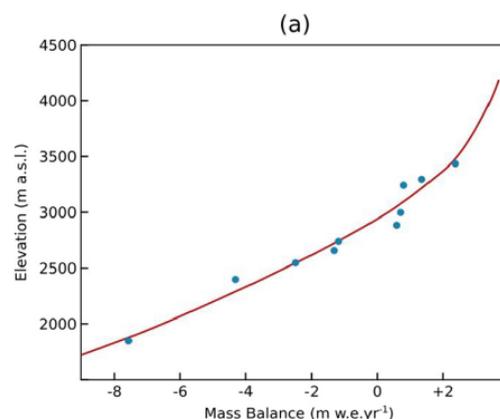
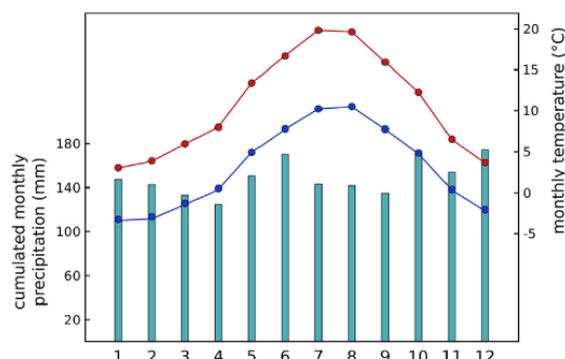
Depuis le milieu du XIXème siècle, l'étude des morphologies glaciaires (moraines et éventuellement dépôts associés et polis glaciaires) a montré des fluctuations de la taille des glaciers au cours du temps (e.g. Agassiz, 1840). Dans ce projet, nous ne tenterons pas de faire une synthèse à l'échelle des Alpes de la transition YD-EH (comprise au sens large entre ~12 et 10 ka) durant laquelle les édifices glaciaires issus de la dernière glaciation reculent définitivement. Nous nous proposons plutôt de se focaliser sur quelques zones clés déjà étudiées et distribuée à travers les Alpes afin de développer une méthodologie permettant de préciser les caractéristiques de l'événement majeur (le recul glaciaire) à partir des petits événements le ponctuant.

La datation des moraines et des roches moutonnées est actuellement un travail réalisé fréquemment en utilisant le ^{10}Be cosmogénique. De très nombreuses études ont montré le potentiel de cette méthode largement utilisée (Ivy-Och et al., 2009 ; Federici et al., 2012 ; Chenet et al., 2016 ; LeRoy et al., 2017).. Compte tenu de la précision d'une datation d'un seul cordon morainique, il est important de dater une succession spatiale de cordons morainiques proches ; c'est la différence d'âge entre ces cordons qui fixe la période pendant laquelle la déglaciation est étudiée. La fiabilité du résultat nécessite cependant de faire de multiples datations sur différents échantillons et d'éventuellement de croiser différentes approches (Prudhomme et al., 2020.)

Modélisations glaciologiques. L'estimation des températures et précipitations à partir de la géométrie des glaciers est un vaste domaine d'étude qui incorpore les problématiques d'équipes glaciologiques (Par exemple Vincent et al., 2019) alors que des approches géométriques très simples, voire simplistes, ont souvent été proposées.

L'on se propose dans ce projet INSU d'utiliser ici des modèles déjà développés et de complexité intermédiaire ; ils pourront ensuite, dans le cadre d'une ANR, être comparés à des modèles glaciologiques plus complexes.

Figure 3 : exemples (d'après Protin et al., 2019) : a) (en haut) de données climatiques actuelles pour le glacier d'Argentière ; b) (en bas) estimation des paramètres d'un loi PDD permettant de calculer un bilan de masse (courbe rouge) à partir des grandeur climatiques ci-dessus et simulant les données du bilan de masse mesurées (Points bleus).



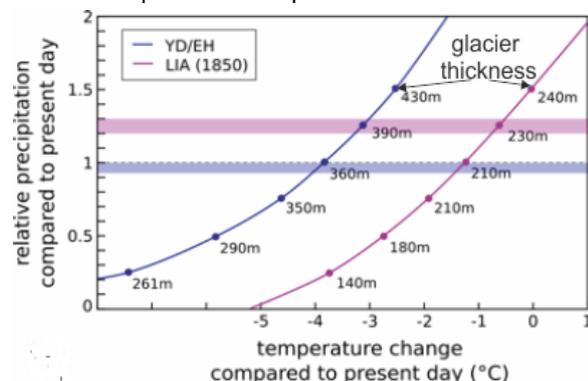
Calibration d'un modèle PPD caractéristique d'un site glaciaire

Des combinaisons de précipitations et de variations de température pour différentes extensions des glaciers ont déjà été déterminées à l'aide d'un modèle de bilan de masse PDD (Precipitation-Degree-Day) couplé à un modèle dynamique de flux de glace. Nous utiliserons celui décrit dans Blard et al. (2007). Ce modèle a déjà été utilisé pour les glaciers du Pacifique central par Blard et al. (2007), dans les Andes par Jomelli et al. (2011) et au Groenland par Biette et al. (2018) ou dans les Alpes (Protin et al., 2019).

Ce type de modèle nécessite de calibrer le bilan de masse à partir de données concernant les périodes récentes ainsi que de calibrer le modèle dynamique de flux de glace. Les paramètres PPD spécifiques au site seront déterminés pour chaque glacier à partir de la sensibilité moderne de leur bilan massique au climat : 1) les conditions climatiques modernes locales seront estimées à partir d'approches statistiques basées sur la méthode de réduction d'échelle, à une échelle infra-kilométrique pour ce qui est du massif du Mont Blanc Joly et al., (2018 ?) et à une résolution spatiale de 7km à l'échelle des Alpes (Ménégoz et al. 2020). 2) L'estimation des bilans de masse a connu ces dernières années une progression remarquable et il est maintenant possible d'avoir une estimation du bilan de masse de surface pour la plupart des glaciers alpins pour la période 2000-2016, ceci par télédétection spatiale optique (Davaze, 2019 ; Davaze et al., submitted), tandis que des données de terrain continuent d'être mesurés sur certains glaciers (service GLACIOCLIM) pour valider les approches satellitaires ; 3) Le paramètre du modèle dynamique de flux de glace utilisé (le cisaillement basal) sera estimé pour chaque glacier en ajustant les profils de surface calculés avec le modèle à des profils du glacier mesurés ou reconstitués.

Les coefficients du modèle PPD et du modèle d'écoulement glaciaire ayant été estimés pour un glacier donné, il sera alors possible de rechercher les triplets de solutions (changement de précipitation, changement de température, épaisseur moyenne du glacier) associés à chaque paléoextension de ce glacier. Une discussion, basée sur des estimations indépendantes de l'un des paramètres et de leur incertitude permettra de préciser les plages de solutions possibles.

Figure 4: Calcul des triplets (changement de précipitation, changement de température, épaisseur moyenne du glacier au niveau dusérac de Lognan) en fonction de l'extension du glacier d'Argentière à la transition YD/EH (en bleu) et au petit âge glaciaire (en rouge) (Adapté de Protin et al., 2019).



2. Plan de recherche et calendrier de réalisation

Organisation générale :

Ce projet INSU est prévu sur deux ans, basé sur l'encadrement de 2 M2R, et le soutien d'une thèse en cours de réalisation, avec la participation active de quatre laboratoires, ceci afin de développer une équipe cohérente à même de réussir les différentes étapes dans l'obtention puis la réalisation d'une l'ANR. La répartition des travaux est la suivante :

Géographiquement :

La partie terrain est prévue dans les Alpes française du nord sur trois sites :

- Le glacier du Tours (vallée de Chamonix), Celui-ci a déjà été étudié par Jaillet et Ballandras (1999) qui ont daté par ^{14}C la moraine la plus interne (la plus proche du glacier). il est prévu de dater la plus externe par ^{10}Be .
- Au glacier de Tepey (Massif de Belledonne); 7 échantillons ont déjà mesurés par ^{10}Be (Le Roy, 2012) sur 2 moraines différentes, mais un fort héritage oblige à ne conserver que 4 échantillons sur le total, ce qui laisse une forte incertitude sur l'estimation de l'âge des moraines. De plus plusieurs autres moraines n'ont pas été datées.
- Dans la haute vallée de Maurienne (Glacier de l'Arc) la Moraine de Villaron (Bessans) a été daté grâce à 5 échantillons (Nicoud, comm. Personnel) et des stades plus aval ont été reconnus et seront datés.

La partie reconstitution de la géométrie des glaciers et modélisation glaciaire portera sur trois régions:

- A) Dans les Alpes orientales, nous nous baserons sur le travail de Baroni et al. (2017), qui portent sur deux glaciers voisins avec des orientations distinctes (Glacier de La Mare, World Glacier Inventory code I4L00102517; WGMS 1989 et Carese, World Glacier Inventory code I4L00102519; WGMS 1989). Leur bilan de masse sera estimé à partir du travail de Davaze et al. (submitted).
- B) Dans le massif du Mont Blanc nous étudierons les trois glaciers voisins : 1) du Tour (données géomorphologiques complétées dans le cadre de ce projet), 2) d'Argentière (seule l'influence du shear stress nécessite d'être étudiée car sa modélisation glaciaire et climatique a été largement réalisée par Protin et al., 2019), et 3) de Talèfre-Mer de glace (dont les extensions ont été étudiées par Protin et al., soumis et Prudhomme et al., 2020 et dont le bilan de masse est étudié par le service d'observation GLACIOCLIM).
- C) A la latitude de Grenoble dans les Alpes occidentales : 1) En Maurienne les différents stades du Glacier de l'Arc sont en cours de reconstitution dans le cadre de la thèse de T. Roattino. Le bilan de masse des glaciers résiduels de ce grand paléoglacier (source de l'arc ; Moulinet ; Grand Méan, Evette) sera estimé à partir du travail de Davaze et al. (submitted) ; 2) A la transition entre Belledonne et Aiguilles Rousses, le Glacier du Tepey et 3) glacier de Saint Sorlin (Jomelli et al., soumis ; et dont le bilan de masse est étudié par le service d'observation GLACIOCLIM).

Distribution du travail entre les chercheurs et laboratoires

- ISTerre : Coordination et paléomodèles glaciaires : J.L. Mugnier
Glacier de l'Arc dans le cadre de la thèse de Th. Roattino ; direction de C. Crouzet.
Préparation des échantillons et chimie : J. Carcaillet
- EDYTEM : glacier du Tepey (Belledonne) : Philip Deline
- BioGeoscience : Glacier du Tour, structure des moraines : J.F Buoncristiani.
- IGE : bilan de masse des glaciers étudiés par GLACIOCLIM : D. Six.
bilan de masse des glaciers par télédétection : A. Rabatel
paleomodèle glaciaire : J.E Sicart

Calendrier de réalisation

- Echantillonnage : partiellement réalisé en 2020 ; complété en 2021
- Préparation des échantillons en 2021 et 2022 (dans le cadre des Masters, premier semestre 2021 et 2022)
- Résultats des datations des glaciers du Tour et de l'Arc 2021
- Résultats des datations du glacier du Tepey 2022
- Analyse sédimentologie des moraines: 2022
- Modélisation des glaciers des Alpes orientales et de la Mer de Glace : 2021
- 1 publication de comparaison des modélisation Alpes orientale, massif du Mont Blanc : 2022
- Modélisation des autres glaciers : 2022
- Synthèse des résultats : 2022
- 1 publication de synthèse : 2023

3. Résultats attendus et perspectives

Résultats :

- Une méthode combinant les glaciologiques actuelles et les observations morphologiques
- Pour 3 glaciers : de nouvelles données chronologiques ;
- Pour les 8 glaciers étudiées : une évolution climatique entre deux dates situées de part et d'autre de la limite YD/EH ;
- A l'échelle des Alpes : une comparaison du climat (paleoprecipitation d'hiver, paléotempérature d'été) à la transition YD/EH entre trois zones échelonnés entre les Alpes orientales et les Alpes occidentales.

Perspectives :

Ce projet devrait permettre la réussite de l'équipe proposante à une ANR. En 2019, un premier projet a été proposés sur le sujet « Building on the Little Ice Age to understand the Younger Dryas/Holocene transition in the Alps », mais les appréciations très mitigées des experts semblent indiquer que la route sera longue avant d'obtenir le financement de l'ANR. Le sujet de cette ANR est plus large que celui proposé dans ce projet INSU, et cette ANR implique les aspects suivants : A) la constitution d'une base de données sur une vingtaine de glaciers (pour le Petit Age Glaciaire et la transition YD/EH) ; B) des modélisations glaciologiques de l'évolution actuelle des glaciers afin de sélectionner un modèle robuste applicable au paléo-glaciers; C) l'application systématique de ce modèle à la base de données alpine sur les paléo-glaciers constituée dans le point A ; D) une comparaison des résultats obtenus sur les paléoglaciers avec des modélisations climatiques spécifiques (GCM pour la période YD/EH, avec descente d'échelle pour obtenir une meilleure résolution spatiale sur les Alpes).



4 bibliographie technique (En complément des références de l'équipe citées dans la section « valorisation des travaux antérieurs »)

- Agassiz L., 1840. Etude sur les glaciers. Jent et Gassmann, Soleure 346 p. + 1 atlas in-folio (32 pl)
- Affolter, S., Häuselmann, A., Fleitmann, D., Edwards, R.L., Cheng, H., Leuenberger, M., 2019. Central Europe temperature constrained by speleothem fluid inclusion water isotopes over the past 14,000 years. *Sci. Adv.* 5, eaav3809. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aav3809>
- Baroni et al., 2017, Double response of glaciers in the Upper Peio Valley (Rhaetian Alps, Italy) to the Younger Dryas climatic deterioration, *Boreas*, 46, 783–798;
- Blard et al., 2007. Persistence of full glacial conditions in the central Pacific until 15,000 years ago. *Nature* 449, 591–594. <https://doi.org/10.1038/nature06142>
- Buizert, C. et al., 2014. Greenland temperature response to climate forcing during the last deglaciation. *Science* 345, 1177–1180. <https://doi.org/10.1126/science.1254961>
- Jaillet S., Ballandras S. 1999. La transition Tardiglaciaire/Holocène à travers les fluctuations du glacier du Tour (vallée de Chamonix). *Quaternaire* 10, 15-23.
- Heiri, O., Ilyashuk, B., Millet, L., Samartin, S., Lotter, A.F., 2015. Stacking of discontinuous regional palaeoclimate records: Chironomid-based summer temperatures from the Alpine region. *The Holocene* 25, 137–149. <https://doi.org/10.1177/0959683614556382>
- Ochs S. 2008. Paleoclimate from glaciers: examples from the Eastern Alps during the late glacial and early Holocene. *Glob. Planet. Change.* 60, 58-71.
- Le Roy M. 2012. Reconstruction of Holocene glacier variations in the Western Alps. PhD thesis Grenoble university. 340 p.
- Liu et al., 2014. The Holocene temperature conundrum. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 111, E3501–E3505.
- Marsicek et al., 2018. Reconciling divergent trends and millennial variations in Holocene temperatures. *Nature* 554, 92–96.
- Ménégoz et al. 2020. Climate simulation over the Alps for the period 1902-2010 produced with the model MAR. [Website](#).
- Prudhomme et al., 2020. Paired ¹⁰Be sampling of polished surfaces and erratic boulders to improve glacial landforms dating. *ESPL*.
- Rasmussen et al., 2006. A new Greenland ice core chronology for the last glacial termination. *J. Geophys. Res.-Atmospheres* 111, D06102. <https://doi.org/10.1029/2005JD006079>
- Rea B.R. 2009. Defining modern day area-altitude balance ratios (AABRs) and their use in glacier-climate reconstructions. [Quat. Sci. Rev. 28, 3–4, 237–248. \]](#)
- Schimmelpfennig et al., 2014. A chronology of Holocene and Little Ice Age glacier culminations of the Steingletscher, Central Alps, Switzerland, based on high-sensitivity beryllium-10 moraine dating. *Earth Planet. Sci. Lett.* 393, 220–230. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.02.046>
- Schindelwig, I. et al. 2012. Lateglacial and early Holocene dynamics of adjacent valley glaciers in the Western Swiss Alps. *Journal of Quaternary Science* 27, 114–124.
- Shakun J. D. et al., *Nature* 484, 49–54 (2012)
- Wirsig C. et al. 2016. A deglaciation model of the Oberhasli, Switzerland. *J. Quaternary Science* 31(1) 46–59. [DOI: 10.1002/jqs.2831](https://doi.org/10.1002/jqs.2831).

MOYENS NECESSAIRES À LA RÉALISATION DU PROJET

1. Equipements disponibles ou nécessaires à la réalisation du projet. Indiquer les équipements déjà disponibles et ceux demandés par ailleurs ou dans la présente demande ; dans tous les cas, préciser dans quel laboratoire.

Déjà disponible à ISTerre :

- laboratoire de préparation des échantillons pour datation ¹⁰Be ;
- moyen de calcul pour fonctionnement programmes écrit en Matlab.

2. Instruments ou Equipements Nationaux sollicités (Instruments de parc national, heures de calcul sur un grand centre, demande de campagne à la mer, analyse AMS, SARM, nanoSIMS, microsonde électronique, etc.) :

- Instrument du parc national : ASTER (Aix en Provence)



1. Références bibliographiques – 2 pages maximum

références bibliographiques des demandeurs, en particulier sur le sujet de la demande

- Davaze, **Rabatel** et al. submit. Region-wide annual glacier surface mass balance for the European Alps from 2000 to 2016. *Frontiers in Earth Sciences - Cryospheric Sciences*.
- Deline**, P., Akçar, N., Ivy-Ochs, S., Kubik, P.W., 2015. Repeated Holocene rock avalanches onto the Brenva Glacier, Mont Blanc massif, Italy: a chronology. *Quaternary Science Reviews*, 126: 186–200.
- 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*. 375-1,135–147.
- Guillon H., **Mugnier** J.L., **Buoncrisiani** J.F., **Carcaillet** J., Godon C., Prud'homme C., Van der Beek P. et Vassallo R. 2015. Improved discrimination of subglacial and periglacial erosion using ¹⁰Be concentration measurements in subglacial and supraglacial sediment load of the Bossons glacier (Mont-Blanc massif, France). *Earth surface processes and Landforms* 40-9, 1202–1215.
- Guillon, H., **Mugnier** J.L., **Buoncrisiani**, J.F. 2018. Proglacial sediment dynamics from daily to seasonal scales in a glaciated Alpine catchment (Bossons glacier, Mont Blanc massif, France). *Earth Surface Process and Landform*. <https://doi.org/10.1002/esp.4333>.
- Kirkbride, M.P., **Deline**, P., 2018. Spatial heterogeneity in the paraglacial response to post-Little Ice Age deglaciation of four headwater cirques in the Western Alps. *Land Degradation and Development*, 29: 3127-3140.
- Le Roy, M., Nicolussi, K., **Deline**, P., Astrade, L., Arnaud, F., 2015. Calendar-dated glacier variations in the western European Alps during the Neoglacial: the Mer de Glace record, Mont Blanc massif. *Quaternary Science Reviews*, 108: 1–22.
- Le Roy, M., **Deline**, P., **Carcaillet**, J., Schimmelpfennig, I., Ermini, M., 2017. ¹⁰Be exposure dating of the timing of Neoglacial glacier advances in the Ecrins-Pelvoux massif, French Alps. *Quaternary Science Reviews*, 178: 118-138.
- Litt, M., J.E. **Sicart**, **D. Six**, P. Wagon, and W. D. Helgason (2017), Surface-layer turbulence, energy balance and links to atmospheric circulations over a mountain glacier in the French Alps, *The Cryosphere*, 11, 971-987.
- Millan, Mouginot, **Rabatel** et al. 2019. Mapping Surface Flow Velocity of Glaciers at Regional Scale Using a Multiple Sensors Approach. *Remote Sensing*, 11(21), 2498.
- Nguyen, T, N Méger, C Rigotti, C Pothier, E Trouvé, N Gourmelen, Noel Gourmelen, **Jean-Louis Mugnier**. 2018. A Pattern-Based Method For Handling Confidence Measures While Mining Satellite Displacement Field Time Series: Application to Greenland Ice Sheet and Alpine Glaciers. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. DOI: 10.1109/JSTARS.2018.2874499. p.1-13.
- Pohl, B., Joly, D., Pergaud, J., **Buoncrisiani**, J.F., Soare, P., Berger, A., 2019. Huge decrease of frost frequency in the Mont-Blanc Massif under climate change. *Sci. Rep.* 9, 4919.
- Protin M., Schimmelpfennig I., **Louis Mugnier** J.L et al. (2019) Climatic reconstruction for the Younger Dryas/Early Holocene transition and the Little Ice Age based on paleo-extents of Argentière glacier (French Alps). *Quaternary Science Reviews*. 221, 105863
- Protin M., Schimmelpfennig I., **Louis Mugnier** J.L et al. submitted. Millennial-scale synchronous glacier fluctuations across the European Alps during the Younger Dryas/Early Holocene transition – evidence from cosmogenic nuclide chronologies. *Earth and Planetary Science Letter*
- Rabatel**, A., B. Francou, A. Soruco, J. Gomez, B. Caceres, J. L. Ceballos, R. Basantes, M. Vuille, J.E. **Sicart**, C. Huggel, M. Scheel, Y. Lejeune, Y. Arnaud, M. Collet, T. Condom, G. Consoli, V. Favier, V. Jomelli, R. Galarraga, P. Ginot, L. Maisincho, J. Mendoza, M. Menegoz, E. Ramirez, P. Ribstein, W. Suarez, M. Villacis and P. Wagon (2013), Current state of glaciers in the tropical Andes: a multi-century perspective on glacier evolution and climate change, *The Cryosphere*, 7, 81-102

- Ravel, L., Magnin, F., **Deline**, P., 2017. Impacts of the 2003 and 2015 summer heatwaves on permafrost-affected rock-walls in the Mont Blanc massif. *Science of the Total Environment*, 609: 132–143.
- Ravier E., **Buoncrisiani** J.F., Clerc S., Guiraud M., Menzies J. et Portier, E. 2014. Sedimentological and deformational criteria for discriminating subglaciofluvial deposits from subaqueous ice-contact fan deposits: A Pleistocene example (Ireland). *Sedimentology* 61, 1382-1410.
- Sarr A-C., **Mugnier**, J.L., Abrahams, R., **Carcaillet**, J, Ravel, L. (2019) Sidewall erosion: insights from in situ-produced ^{10}Be concentrations measured on supraglacial clasts (Mont Blanc massif, France). *Earth Surface Processes and Landforms*. DOI: 10.1002/esp.4620
- Sicart** J.E., J.C. Espinoza, L. Queno, and M. Medina (2015), Radiative properties of clouds over a tropical Bolivian glacier: seasonal variations and relationship with regional atmospheric circulation, *International Journal of Climatology*, doi:10.1002/joc.4540.
- Six D.**, **Rabatel** et al. 2018. Relative performance of empirical and physical models in assessing the mass balance of Saint-Sorlin Glacier. *Cryosphere*. 12 1367–1386;
- Thomazo, C., **Buoncrisiani**, **J.-F.**, Vennin, E., Pellenard, P., Cocquerez, T., **Mugnier**, **J. L.**, & Gérard, E. 2017. Geochemical processes leading to the precipitation of subglacial carbonate crusts at bossons glacier, mont blanc massif (French alps). *Frontiers in Earth Science*, 5. <https://doi.org/10.3389/feart.2017.00070>
- Vincent, C. et al. (including **Six**, **Rabatel**). (2019). Déclin des deux plus grands glaciers des Alpes françaises au cours du 21ème siècle : Argentière et Mer de Glace (Massif du Mont-Blanc). *La Météorologie, Météo et Climat*, 2019

2. Liste des contrats obtenus au cours des trois dernières années dans le cadre d'une action spécifique INSU ou autre (une page par contrat)

Titre du projet : Stabilité long terme et érosion des parois rocheuses dans des bassins versants englacés.

Action/année : AO INSU TelluS 2019 TelluS/ALEAS (Déposé le 18/09/2018)

Crédits obtenus : 5 KEuros

Résumé des principaux résultats (20 lignes maximum) :

Les nucléides cosmogéniques terrestres (TCN) sont un outil important pour les sciences de la Terre, ils fournissent des informations sur la date et la durée d'exposition des matériaux. L'équilibre de la concentration des TCN entre un enrichissement continu et un appauvrissement dû à des processus comme l'érosion permet de quantifier ces processus. Dans le cas d'un bassin versant englacé, les données de l'export sédimentaire et de concentration en TCN permettent de comprendre comment l'érosion est distribuée entre les processus gravitaires de versants, continuellement exposés aux rayons cosmiques, et les processus sous-glaciaires, protégés des rayons cosmiques. De nouvelles méthodes automatisées ont été ici développées pour mieux comprendre la provenance des échantillons supraglaciaires et quelle est leur robustesse en terme de représentativité du taux d'érosion. Les mesures de concentration en TCN dans les massifs du Mont Blanc (FR) du Mont rose et du Pigne d'Arolla (CH) dans différents bassins versants ont permis de déterminer des taux d'érosions périglaciaires allant de 0.07 ± 0.01 [mm.a⁻¹] à 4.33 ± 1.17 [mm.a⁻¹]. Ces taux d'érosion dépendent principalement de la distribution des pentes dans le versant considéré et de son orientation moyenne. Les taux d'érosion sous-glaciaires s'étendent de 0.07 ± 0.003 [mm.a⁻¹] à 1.23 ± 0.18 [mm.a⁻¹] et dépendent principalement du régime thermique du glacier, froid ou tempéré de la partie supérieure du glacier et de la quantité de charge supra-glaciaire incorporée à la base du glacier. Ces différents éléments de la dynamique glaciaire contrôlent de fait quel est le processus érosif le plus efficace: processus sous glaciaire ou de versants.

Liste des publications :

Schwing, A., 2019, Erosion of sidewalls and glacial abrasion in the Mont Blanc Massif, contributions of cosmogenic nuclides. Master 2 thesis University Grenoble-Alpes, 43 p.

Sarr A-C., Mugnier, J.L., Abrahams, R., Carcaillet, J, Ravel, L. (2019) Sidewall erosion: insights from in situ-produced ^{10}Be concentrations measured on supraglacial clasts (Mont Blanc massif, France). *Earth Surface Processes and Landforms*. DOI: 10.1002/esp.4620.

BUDGET

Il s'agit d'expliciter ici les montants indiqués dans le tableau Budget du formulaire informatique SIGAP.

I. Demande à l'AO INSU TelluS

2021

Missions :

- sampling for ¹⁰Be moraines dating 15 days*3 Persons*100 Euros (including food, night or travel) 4.5

Equipements* :

- 1 poste de travail pour étudiants master (utilisé successivement les deux années) 1

Fonctionnement :

0.44

Analyses : 24 broyages et séparation minéraux lourds à 50 Euros 1.2

12 séparation ¹⁰Be pour préparation échantillons à 280 Euros 3.36

Total des crédits demandés à l'INSU TelluS en 2021 : **10.5**

2022

Missions :

participation to international meeting 2 participants 3

sampling for ¹⁰Be moraines dating 5 days*3 Persons*100 Euros (including food, night or travel) 1.5

Analyse morphologique et sédimentologique des terraces 5days*2 persons*100 Euros 1

Fonctionnement :

0.65

Analyses : 3 broyages et séparation minéraux lourds à 50 Euros 0.15

15 analyses à 280 Euros 4.2

Total des crédits demandés à l'INSU TelluS en 2022 : **10.5**

II. Co-financements

Outre les financements demandés à l'action spécifique TelluS pour ce projet, veuillez expliciter également les co-financements (accordés ou demandés) par ailleurs au niveau :

- **National : Une ANR** est en cours d'expertise sur le sujet « Building on the Little Ice Age to understand the Younger Dryas/Holocene transition in the Alps », impliquant A) la constitution d'une base de données sur une vingtaine de glaciers (pour le Petit âge glaciaire et YD/EH), B) des modélisations glaciologiques permettant de sélectionner, à partir de l'évolution actuelle des glaciers, C) un modèle robuste alors appliqué à la base de données sur les paléo-glaciers. ; D) une comparaison avec des modélisations climatiques spécifiques (GCM YD/EH et descente d'échelle sur les Alpes). Les rapports des experts externes semblent peu favorables à une réussite dès à présent. (636 kEuros demandés à l'ANR).

Ce projet INSU reprend certains éléments de ce projet et permettrait à l'équipe un travail collectif renforçant sa crédibilité.

- (autres programmes nationaux (INSU et hors INSU), demandes d'équipements, mi-lourds, demandes de campagne en mer, soutien interne d'organisme ou de laboratoires, heures de calcul sur un grand centre, ANR...)

Soutien par les crédits propres du laboratoire ISTerre (équipe, site Chambérien et/ou BQR action transversale) :

- 2 financements de stages de Masters
2021 : 3 KEuros ;
2022 : 3 KEuros ;
- Licence arcGIS

Signature du directeur d'unité :

Directeur de l'ISTerre
Phillppe ROUX



Dans le cas où votre projet serait financé, vous êtes engagé à remercier l'Action concernée dans les publications de vos résultats, et selon la phrase type qui vous sera proposée. Votre nom et le titre du projet apparaîtront sur le site de l'INSU (<http://www.insu.cnrs.fr/>) et sur le site des Programmes Nationaux de l'Institut (<http://programmes.insu.cnrs.fr/>). Si vous y êtes opposé, merci de le signaler à la chargée de programme TelluS.

