

## I. Abstracts

a.

Long-term topographic changes at high altitude in the Alps, at different spatial and temporal scales, are challenging to quantify, often due to lack of direct evidence. Historic rockfalls are not always visually evident and their debris is frequently consumed by surrounding glaciers, and hanging glaciers leave no moraines to mark their evolution. Remote sensing techniques such as Light Detection and Ranging (LiDAR) have become powerful tools for precisely quantifying geomorphometric changes in the 21<sup>st</sup> century. However, rates of change based on the short time intervals of data produced since the advent of these modern techniques might not reflect longer-term trends. To extend the record of topographic changes of rock and glacier surfaces, Structure-from-Motion (SfM) photogrammetry techniques exploiting archival imagery can be used to create 3D models of past Alpine zone topography with which modern LiDAR can be combined to quantify longer-term rates of change. Combining archival SfM and recent LiDAR 3D models allows the estimation of historical erosion rates and glacier surface height change in the Mont-Blanc massif from the southeast face of Grand Pilier d'Angle (GPA; 4,243 m a.s.l.) from 1929-2021, the Brouillard Pillars (BP; 4150 m a.s.l.) from 1950-2021, the Aiguille du Midi (AdM; 3,842 m a.s.l.) from 1909-2022, and the

Aiguille Verte (4,122 m a.s.l.) from 1932-2021. 1-year-interval LiDAR surveys of the GPA and AdM from 2020-2021 and 2021-2022, respectively, provide high-resolution erosion rates for a reference against the rates calculated with the SfM method. The GPA had erosion rates of  $5.9 \pm 2.3 \text{ mm year}^{-1}$  and  $8.5 \pm 0.1 \text{ mm year}^{-1}$  for the 1929-2021 and 2020-2021 time-intervals, respectively. The BP had a rate of  $1.0 \pm 0.39 \text{ mm year}^{-1}$  for the period 1950-2022, and the AgM had a  $16.4 \pm 0.9 \text{ mm year}^{-1}$  rate from 2021-2022. The 6 hanging glaciers of the AdM north face had an average surface height change of  $-9.39 \text{ m}$  from 1909-2022. SfM models from archival photographs show an increase in the annual erosion rate of the GPA but more LiDAR scans are necessary to calculate the current rate of the Brouillard Pillar.

## b.

Les changements topographiques à long terme dans la haute montagne alpine à différentes échelles spatiales et temporelles sont difficiles à quantifier, souvent en raison du manque de données. Les écroulements rocheux peuvent laisser peu de traces si leurs débris est caché par les glaciers et si les cicatrices ne sont pas bien visible, et les glaciers suspendus ne laissent pas de moraines pour marquer leur évolution. Les techniques de télédétection, telles que le balayage laser (*Light Detection and Ranging* ; LiDAR), sont devenus des outils puissants pour quantifier précisément les changements géomorphométriques au XXI<sup>e</sup> siècle.

Cependant, les taux d'érosion basés sur les données existantes depuis l'avènement de ces techniques modernes pourraient ne pas refléter les tendances à plus long terme. Afin d'étendre la quantification des changements topographiques au niveau des parois rocheuses et des glaciers de versant, les techniques de photogrammétrie par « structure acquise à partir d'un mouvement » (*Structure from Motion* ; SfM) exploitant l'imagerie d'archive peuvent être utilisées pour créer des modèles 3D de la topographie passée avec lesquels le LiDAR moderne peut être combiné pour quantifier les taux de changement à plus long terme. La

combinaison de modèles 3D SfM d'archive et LiDAR récents permet d'estimer les taux d'érosion historiques et les changements du niveau de la surface des glaciers raides dans le massif du Mont-Blanc au niveau de la face sud-est du Grand Pilier d'Angle (GPA ; 4 243 m) de 1929 à 2021, des Piliers de Brouillard (BP ; 4150 m) de 1950 à 2021, de l'Aiguille du Midi (AdM ; 3842 m) de 1909 à 2022, et de l'Aiguille Verte (AV ; 4 122 m) de 1932 à 2021. Les levés LiDAR à intervalle d'un an du GPA et de l'AdM, respectivement en 2020-2021 et 2021-2022, fournissent des taux d'érosion à haute résolution et constituent une référence par rapport aux taux calculés avec la méthode SfM. Le GPA présente ainsi des taux d'érosion de 5,9 mm et de 8,5 mm par an pour les périodes 1929-2021 et 2020-2021, respectivement. Le BP avait un taux d'érosion de 1,0 mm par an pour la période 1950-2022, et l'AgM de 16,4 mm par an de 2021 à 2022. Les 6 glaciers suspendus de la face nord de l'AdM ont connu un changement de hauteur de surface moyen de -9,39 m entre 1909 et 2022. Les modèles SfM montrent une croissance de taux d'érosion dans le GPA mais plus de scans LiDAR sont nécessaires pour calculer le taux actuel dans le BP.