

Acronyme : GRAVE

Laboratoire(s) : ISTerre (Institut des Sciences de la Terre)

. Collaboration avec EDYTEM (Environnements, DYnamiques et Territoires de la Montagne)

Porteur du projet : Jean-Louis MUGNIER (DR CNRS)

Titre : **G**randes ruptures de **v**ersants rocheux dans la vallée de Chamonix : Origine et évolution

Précisez le champ et la thématique CSMB dans lesquels s'insère le projet :  
AAP Montagne 2021- Risques naturels

Projet pluriannuel déjà financé en 2019-2020

Ce dossier scientifique (10 pages) reprend en partie le dossier présenté en 2019.

Il a cependant été modifié en fonction des résultats déjà obtenus.

La structuration du projet et le calendrier de réalisation 2020-21 ont été totalement repris.

## 1. CONTEXTE ET POSITIONNEMENT DU PROJET

La thématique scientifique de ce projet se rattache à une meilleure compréhension d'un aléa naturel particulier ainsi qu'à l'évolution récente de la topographie de la chaîne alpine. Il a ainsi pour objectif de comprendre la dynamique des versants d'une vallée intra-alpine et leurs déformations gravitaires lentes ou soudaines.

Si le rôle majeur des instabilités gravitaires sur la formation des paysages actuels des versants alpins est avéré, la connaissance de leurs dynamiques passées et récentes ainsi que de leur distribution spatiale et temporelle n'est que partielle. Or, les écroulements de parois rocheuses et les ruptures de versants constituent un aléa majeur dans les zones de montagne, et leur distribution spatiale passée et actuelle nécessite d'être précisée afin de mieux cerner leurs impacts potentiels futurs sur l'aménagement des versants de montagne et des fonds de vallée.

Les ruptures de versants rocheux correspondent à des instabilités gravitaires de grande ampleur qui affectent une épaisseur souvent importante de terrain et dont la mise en mouvement ou la réactivation sont liés à de multiples facteurs (séismes, fortes précipitations, dégradation du permafrost, décompression lors de la fonte des glaciers, etc.). Le glissement de Séchilienne en Isère fournit un bon exemple de ce qu'est une grande instabilité de versant tandis que son évolution actuelle fait courir des risques très importants aux systèmes de transport dans la vallée et a dû être prise en compte dans l'aménagement du territoire. Pourtant, son évolution a débuté il y a ~8000 ans (Schwartz *et al.*, 2017) et correspond à une succession de phases de latence et de réactivation.

À l'occasion d'un travail qui a débuté sur les essais sismiques et la signature morphologique de la faille de Vallorcine (Thomasset, 2019 ; Vassallo *et al.*, 2019) dans le cadre du projet SISM@ALP-Swarm, nous avons pu mettre évidence des ruptures gravitaires d'ampleur kilométrique sur les versants du massif des Aiguilles Rouges dominant la vallée de Chamonix (Fig. 1), structures également mentionnées par Blondeau *et al.* (2018). Elles ont été cartographiées en détail durant la première année de ce projet (Tavernier, 2020). Ces ruptures de versant, tout comme les traces des failles actives mises en évidence dans la continuité de la faille de Vallorcine sont distinctes des structures type « sackung » déjà décrites dans certaines parties du massif (Petetin, 2019). Si leur origine, l'âge de leur initiation, tout comme leur

fonctionnement actuel, restent encore inconnus, ces éléments restent essentiels pour définir l'aléa naturel possiblement associé à ces structures.

On se propose donc de préciser ces éléments – initiation, quantification des déplacements et évolution de ceux-ci au cours du temps au niveau de ces structures. Cette étude des ruptures de versant est menée en parallèle de i) celle portant sur les essais sismiques et l'activité de la faille de Vallorcine développée dans le cadre du projet SISM@LP-Swarm, ii) celle qui vise à connaître la distribution actuelle du permafrost dans le massif des Aiguilles Rouges et iii) celle étudiant le grand écroulement du vallon de la Balme (versant NO du massif des Aiguilles Rouges). Ces projets complémentaires, souvent menés avec le gestionnaire de la Réserve Naturelle des Aiguilles Rouges (ASTERS), permettront de mieux appréhender les relations entre failles actives et ruptures de versant jusqu'à présent mal comprises dans les Alpes (Hyppolithe *et al.*, 2006 ; Sanchez *et al.*, 2010). Ils fourniront par ailleurs un cas d'étude pour la thèse de P. André qui débute cette année, financée pour moitié par l'USMB.

Compte tenu des conditions de terrain (sites inaccessibles de novembre à mai), du temps nécessaire pour préparer et obtenir des datations  $^{10}\text{Be}$  (plusieurs mois), nous avons déposé un projet pluriannuel 2020-21. Les premiers résultats obtenus sur les mouvements actuels affectant les structures

étudiées (André, 2020) suggèrent une activité actuelle qu'il est important de préciser.

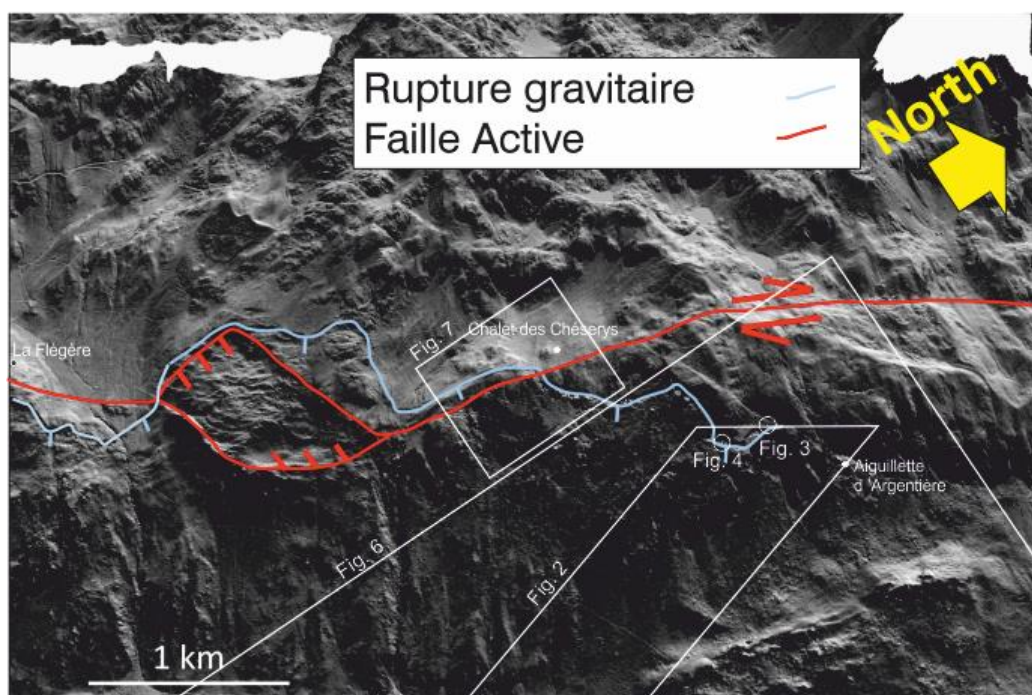


Fig. 1 : Localisation d'une grande rupture de versant entre la Flégère et le col des Montets d'après un travail préliminaire de Vassallo *et al.* (2019) à partir du MNT issu de campagnes LiDAR aéroportée réalisées par le CEMAGREF (IRSTEA) en 2008 pour l'étude des couloirs d'avalanche. Deux types de structures se superposent : en rouge la structure très linéaire associée à la continuation vers le Sud-Ouest de la faille de Vallorcine (appelée faille de la Remuaz par Cara *et al.*, 2017) et, en bleu, la structure très contorsionnée associée à une grande rupture de versant, également décrite par Blondeau, 2018.

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

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 ? ». Par ailleurs l'équipe GRE (Géophysique des Risques et de l'Environnement) du même laboratoire se focalise sur l'estimation des risques naturels (séismes et glissements de terrain) et l'identification des processus qui contrôlent leur déclenchement. Le sujet que nous proposons s'intègre donc dans ces deux thématiques.

Au niveau de l'établissement USMB, notre projet rentre pleinement dans le champ « Sciences Fondamentales, Terre, Environnement » (SFTE) et dans la thématique « Montagne/ aménagement-sport-tourisme ». En effet, il porte sur une meilleure compréhension de l'environnement de montagne, basée sur une approche quantitative. Enfin cette étude scientifique dispose de retombées pratiques directes pour les pouvoirs publics de la vallée de Chamonix : ces écroulements sont-ils des structures fossiles ou leur activité/réactivation doit-elle être envisagée ? En outre, les nouvelles connaissances que permettra le projet iront enrichir la connaissance de la géologie de la Réserve Naturelle des Aiguilles Rouges.

## 2. DESCRIPTION SCIENTIFIQUE DU PROJET

### 2.1. Objectifs du projet

L'objectif de ce projet est d'analyser les processus à l'origine des ruptures de versant dans la vallée de Chamonix et d'en préciser les évolutions passées afin de mieux cerner leur évolution future. Si la fonte des glaciers et la décompression associée des versants sont souvent citées (Cossart *et al.*, 2008), de nombreux exemples alpins indiquent que les périodes de fortes précipitations sont favorables à ces ruptures (Schwartz *et al.*, 2017). De plus, le rôle des séismes, la dégradation du permafrost ou le couplage entre évolutions thermiques et fortes précipitations ont également été invoqués comme facteurs de déstabilisation (Sanchez *et al.*, 2010 ; Pavlova *et al.*, 2014 ; Köpfli *et al.*, 2018). Compte tenu de l'évolution climatique actuelle favorisant les événements météorologiques extrêmes, la fonte des glaciers et les sources sismiques déjà définies dans la région de de Chamonix et les massifs avoisinants (Cara *et al.*, 2017), le risque associé à ces ruptures de versant ne peut être *a priori* négligé. Cette étude rentre donc pleinement dans le défi sociétal lié à l'estimation des risques naturels associés aux vallées alpines.

Pour analyser la dynamique de ces ruptures de versant, on précisera dans un premier temps leur géométrie et les éléments chronologiques de leur formation.



Fig. 2 : Photo aérienne prise à partir d'un hélicoptère à l'extrémité Nord-Est de la rupture dominant Argentière (Localisation sur la Fig. 1). On note une cicatrice amont avec mouvement de l'ordre de 8 à 10 m (voir Fig. 3) ainsi que des blocs déjà découpés et ayant partiellement glissés. Les trajectoires de ce type de blocs ont déjà été analysées (Tavernier, 2020).

L'analyse géométrique et topographique permettra d'estimer la valeur des déplacements en surface le long des ruptures, les relations spatiales entre ruptures et traces des failles actives ainsi que la fracturation découpant des blocs instables à proximité de l'escarpement sommital. Ce dernier point est important car, quel que soit l'âge du fonctionnement principal des escarpements de surface, ceux-ci découpent en amont des blocs qui sont en positions apparemment instables (Fig. 2) et susceptibles de dévaler les versants, notamment au niveau des couloirs d'avalanche.

L'analyse chronologique sera réalisée de manière à préciser l'initiation et l'évolution du déplacement au cours du temps sur ces structures ainsi que leur activité récente.

Au total, 4 approches distinctes mais complémentaires sont utilisées :

#### 1) Blocs découpés au voisinage de la cicatrice amont des ruptures et estimation des risques associés

La détermination des blocs fracturés (voir Fig. 2), de leur taille et de leur forme, a été réalisée à partir d'une analyse structurale de terrain. L'analyse des trajectoires des blocs a été effectuée dans cadre

du stage de Master 1 de L. Tavernier (2020) en utilisant le logiciel RAMMS (*Rapid Mass Movement System* ; Christen, 2012) qui permet la simulation numérique des phases de déclenchement et de propagation à partir d'un MNT. C'est un logiciel couramment utilisé pour des études d'aléa. L'aspect probabiliste est obtenu en lançant aléatoirement ~10 000 blocs et en analysant la distribution de leurs trajectoires et positions finales. Les résultats obtenus (Fig. 6) pour les blocs de l'extrémité nord-est de la grande rupture montrent que l'éperon rocheux situé au-dessus du village d'Argentière constitue une protection naturelle efficace, protégeant ainsi le cœur du village mais il existe au sud une zone affectée par un aléa lié à la chute des plus gros blocs. Un travail complémentaire de vérification de la présence sur le terrain de tels blocs s'avère nécessaire.

## 2) Cartographie et analyse topographique 3D de la rupture majeure située dans les versants dominant le village d'Argentière

L'étude préliminaire concernant la géométrie des failles et des ruptures de versant (Fig. 1) a été réalisée à partir d'un MNT LiDAR dont la résolution actuelle est métrique. Afin de pouvoir quantifier les déplacements des compartiments rocheux au voisinage de la grande rupture de surface, il est nécessaire d'acquérir un MNT de plus haute résolution.

Pour cela, nous utiliserons, durant la période 2020-2021, deux approches :

1) l'analyse des données brutes du Lidar aéroporté a montré que plus de 50 points de mesures ont été acquis au m<sup>2</sup> dans la zone étudiée, ce qui permettrait théoriquement d'obtenir un MNT fiable avec une résolution de 25 cm. Pour cela, un retraitement est nécessaire et sera réalisé.

2) les méthodes stéréo-photographiques permettent de construire des modèles 3D de la surface sur des zones de quelques hectares et au relief peu/pas accessible. Nous avons envisagé dans le projet 2019-2020 l'usage d'un drone permettant d'obtenir des données d'imagerie/cartographie, ceci en collaboration avec des ingénieurs de la filiale Altimetris de la SNCF. Malheureusement, la situation sanitaire liée à la COVID n'a pas permis sa réalisation.

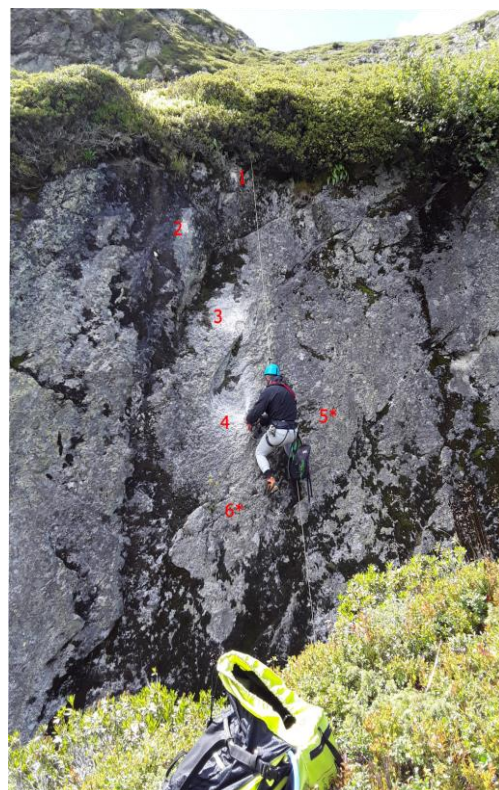
Nous nous sommes rabattus sur une solution avec prise de vue à partir d'un hélicoptère. Les ~1000 images acquises à partir de l'hélicoptère seront traitées durant la période 2020-2021 dans le cadre d'un stage de Master 1, ceci avec les logiciels de photogrammétrie disponibles à ISTerre: Pix4D et Agisoft Photoscan.

### 3) Datation de l'initiation des grands écroulements de versant dominant le village d'Argentière

On se propose de préciser les éléments chronologiques – initiation, évolution du déplacement au cours du temps – sur la cicatrice située au sommet de la rupture (Fig. 3) en utilisant la méthode des isotopes cosmogéniques, une méthode déjà utilisée sur ce type de structures (Bigot-Cormier *et al.*, 2005; Schwartz *et al.*, 2017).

En effet, les isotopes cosmogéniques sont formés par des réactions principalement de spallation à la surface de la Terre sous l'effet du rayonnement cosmique et leur concentration augmente avec le temps d'exposition (Dunai *et al.*, 2009).

*Fig. 3 : Cicatrice amont de la rupture de versant dominant Argentière (localisation sur Fig. 1) ; les numéros correspondent aux points d'échantillonnage le long du glissement. Les \* représentent les emplacements pas encore découpés lors de la prise de la photo*



Or, l'histoire de l'exposition de la cicatrice amont de la rupture est la suivante : d'abord une période initiale sans production d'isotopes cosmogéniques car la rupture est enfouie en profondeur, puis une mise à l'air libre lors de l'évènement gravitaire. Cette exposition est permanente jusqu'à la date de l'échantillonnage. La partie la plus en amont de la cicatrice est exposée au rayonnement depuis l'initiation du glissement, la partie la plus basse seulement lors des derniers mouvements. Ainsi, la mesure de la concentration en isotopes fournira les éléments sur la chronologie de la structure.

Deux profils ont été choisis là où les conditions sont les plus adaptées (escarpement le plus haut, et le moins affecté par l'érosion; Fig. 3). Pour chaque profil, 6 échantillons ont été prélevés.

De plus, la surface (ancien poli glaciaire) décalée par les cicatrices amonts sera datée afin d'obtenir une vitesse minimale de glissement et de manière à contraindre l'héritage ante-initiation de l'escarpement. Pour cela, 7 échantillons ont été prélevés sur les polis glaciaires. Les datations seront réalisées dans le cadre d'un stage M2R.

### 4) Mouvements actuels

La fraîcheur de certains affleurements (Fig. 4) suggère une activité sub-actuelle des grandes ruptures sur le versant Aiguille Rouges de la vallée de Chamonix (Blondeau, 2018).



Fig. 4 : Faille de 8,849 m d'ouverture mesurée à l'aide d'un extensomètre à ruban. Le compartiment affaissé comporte un mur paravalanche datant du début du 20<sup>ème</sup> siècle en position aujourd'hui étrange (à l'aval d'un fossé naturel de plusieurs mètres).

De plus, les premières analyses de données INSAR d'images du satellite Sentinel 1 suggèrent des déplacements supérieurs

au mm/an au niveau du versant Aiguilles Rouges dominant la vallée de Chamonix (Stage de Master 2 ; P. André, 2020 ; Fig. 5). Pour préciser ces résultats préliminaires, il est prévu de réaliser une analyse temporelle des résultats INSAR déjà obtenus à partir de 250 images d'une passe Sentinel1 (acquises tous les 6 jours) et en utilisant de plus une deuxième passe en complément de celle déjà traitée. Le travail sera effectué dans le cadre de la thèse de Pauline André.

Il est donc très important de réaliser des mesures de terrain permettant d'affirmer ou d'infirmer l'hypothèse d'un fonctionnement actuel. Pour cela, nous avons commencé à réaliser des mesures extensométriques sur quatre sites où un mouvement récent peut être envisagé (Fig. 4). La distance entre les ancrages placés de part et d'autre des structures étudiées seront re-mesurés tous les 4 à 6 mois. Ces mesures seront réalisées dans un premier temps durant les deux ans du projet, mais cette instrumentation nécessitera probablement un suivi sur un plus long terme.

De plus, cette structure est découpée par un très grand nombre de crevasses de largeur inframétrique. Afin de disposer d'une vision plus globale de la déformation de ce réseau de crevasses, nous souhaitons installer, durant la période 2020-2021, un système de repères géodésiques (une quinzaine) que nous mesurerons par GPS, avec 2 campagnes de mesure annuelles. Enfin, l'un de ces sites est susceptible d'être repris pour l'installation d'un GPS permanent à télétransmission.

## 2.2. Structuration du projet

*Si la nature du projet est adaptée, indiquer la décomposition en tâches (grandes phases du projet) et présenter les liens entre les différentes tâches (calendrier prévisionnel).*

Le projet est principalement structuré à partir des objectifs et méthodes présentées ci-dessus. De plus, les liens entre les différentes tâches sont favorisés de manière à faciliter la réalisation des missions de terrain et des stages d'étudiants prévus dans le cadre de ce projet. En effet, une grande partie du travail sera réalisé dans le cadre des stages de Master décrits ci-dessous. Dans la suite de la présentation, **les travaux déjà effectués en 2019-2020 sont rappelés et indiqués en vert.**

### 1) Estimation des risques associés aux blocs situés à l'intersection entre les talwegs et la cicatrice amont des ruptures

- **Reconnaissance de terrain : automne 2019**
- **Analyse par modélisation numérique (RAMMS): 2<sup>ème</sup> trimestre 2020**
- Cartographie dans la partie basse de la vallée des blocs de lithologie caractéristique du versant.

## 2) Cartographie et analyse topographique 3D de la rupture majeure située dans le versant dominant le village d'Argentière

- Campagne de reconnaissance : automne 2019
- Acquisition des données stéréo-photographiques par hélicoptère : fin été 2020
- Calcul du MNT et interprétation : automne 2020
- Retraitement des données LiDAR : printemps 2021

## 3) Datation de l'initiation des grands écroulements de versant dominant le village d'Argentière (versant SW des Aiguilles Rouges)

- Reconnaissance des sites d'échantillonnage : automne 2019
- Echantillonnage : été 2020
- Préparation des échantillons : automne 2020
- Analyse sur l'accélérateur ASTER (moyen national) : printemps 2021

## 4) Mesure des mouvements actuels sur les ruptures de versant

- Analyse INSAR d'images Sentinel 1 (valeur moyenne des déplacements) : été 2020
- Séries temporelles de déplacement issues de l'analyse INSAR d'images Sentinel 1 : printemps 2021
- Reconnaissance des sites à instrumenter : automne 2019
- Instrumentation des sites : fin été 2020 et premières mesures avec l'extensomètre à ruban
- Nouvelles mesures extensomètre à ruban (a minima) : printemps 2021, automne 2021
- Installation de plots pour mesures GPS : automne 2020
- Première mesure GPS : automne 2020.
- Re-mesure GPS : printemps 2021 ; automne 2021

### Stages de Master

Compte tenu de la Covid, les stages étudiants ont été adaptés, en particulier, le stage Master 2 2019-2020, initialement prévu sur la structure de Chamonix, n'a pas pu être réalisé tel que prévu mais a conduit à une étude plus régionale, ceci exclusivement à partir de données satellitaires.

#### Travail de l'étudiant de M2 (stage 5 mois, février-juillet 2020):

- Calcul d'interférogrammes à l'échelle des Alpes
- Participation à l'étude de terrain (juillet 2020)
- Calcul des interférogrammes INSAR et déplacements spécifiques à la zone (Juillet 2020)

#### Travail de l'étudiant de M1 (stage 2 mois, 15 juin-15 août 2020):

- Participation à l'étude de terrain pour l'analyse de la taille et de la forme des blocs pouvant s'effondrer (une journée, automne 2020)
- Prise en main du logiciel « RAMMS » et modélisation de la trajectoire de blocs (fin printemps 2020)
- Instrumentation des sites : fin été 2020 et premières mesures avec l'extensomètre à ruban

#### Travail de l'étudiant de M2 (stage 6 mois, février-août 2021):

- préparation des échantillons cosmogéniques
- retraitement des données Lidar permettant d'obtenir un MNT de résolution infra-métrique ;
- Interprétation des âges obtenus en lien avec l'évolution glaciaire et climatique de la vallée de Chamonix.

### 2.3. Moyens humains

Nom	Statut (*)	Financement (**)
MUGNIER Jean-Louis	DR CNRS	Permanent ISTERre
RICCARDO Vassallo	MC USMB	Permanent ISTERre
CARCAILLET Julien	IR CNRS	Permanent ISTERre
RAVANEL Ludovic	CR CNRS	Permanent EDYTEM
ZERATHE Swann	CR IRD	Permanent ISTERre

Doin Marie-Pierre	DR CNRS	Permanent ISTerre
ANDRE Pauline	Thésarde	Doctorant ISTerre obtenu
Etudiant	M1 (2020-2021)	Stage 2 mois non rémunéré
Etudiant	M2	Demandé pour 2020-2021 (Credit ISTerre)

### 3. VALORISATION DES RÉSULTATS

*Stratégies de valorisation des résultats ; pour l'AAP Montagne leurs retombées pour les acteurs montagne et territoires :*

Ce travail fournira une meilleure connaissance géologique et géomorphologique dans zone de la Réserve Naturelle des Aiguilles Rouges. Des contacts ont été pris et une présentation orale est programmée à l'automne 2020 devant la commission "Geosystème" du comité scientifique de la Réserve Naturelle des Aiguilles Rouges.

De même, des contacts ont été pris avec Bruno Laily, Directeur du RTM74, pour compléter l'inventaire des structures à risques dans le département de la Haute-Savoie.

- *Communication scientifique ;*

Il est prévu de diffuser les résultats de cette étude dans la communauté scientifique dans la revue *Natural Hazards* (plan de l'article en cours de discussion).

*Retombées scientifiques et techniques et autres retombées (normalisation, information des pouvoirs publics, ...)* ;

La préfecture de Haute Savoie a été informée de notre travail et a donné son accord pour la réalisation d'une « étude sur les grandes ruptures de versant dominant la vallée de Chamonix » dans le cadre de l'arrêté n°DDT-2020-0904 du 3 Juillet 2020.

Des contacts ont été pris avec la Communauté de Communes de la Vallée de Chamonix Mont-Blanc et les résultats 2019-2020 de cette étude ont transmis à cette structure, *via* Ludovic Ravel, en charge des relations avec la communauté de commune pour les études portant sur les instabilités gravitaires. Les résultats de la suite du projet seront transmis en 2021.

*La communication auprès du grand public, le cas échéant.*

La communication auprès du grand public sera réalisée en collaboration avec l'observatoire du Mont Blanc (CREA). Le lien probable entre grande rupture de versant et climat (décompression post-glaciaire + précipitation) sera mis en valeur dans en réalisant des pages spécifiques de l'« Atlas du Mont Blanc ».

### 4. JUSTIFICATION SCIENTIFIQUE DES MOYENS DEMANDÉS

*On présentera ici la justification scientifique et technique des moyens demandés. On distinguera les différents postes de dépenses selon le canevas suivant ; Dans la mesure du possible présenter un budget global du projet qui précise la part de financement demandé ainsi que les autres sources de financement*

#### 4.1. Présentation du financement du projet

<b>Budget global 2019-2021</b>	<b>21 000 Euros</b>
<b>Prévu dans le projet 2019-2020 :</b>	
<b>Total Prévu dans le Projet 2019-2020</b>	<b>12 915 Euros</b>
AAP Montagne 2020	9 765 Euros
SISM@lp-Swarm:	650 Euros
Ressources propres Laboratoire ISTerre :	2 500 euros
<b>Budget effectif 2019-2020 :</b>	<b>8 000 Euros</b>

AAP Montagne 2020	6 000 Euros
Ressource propre labo ISTerre (mission et complément équipement)	800 Euros
Ressource propre labo Biogeoscience (vol hélicoptère)	1 200 euros
<b>Prévu dans le projet 2020-2021</b>	<b>13 000 Euros</b>
AAP Montagne 2020	
(Re-mesure des extensomètres, travail de terrain complémentaire, mesure géochimiques)	10 000 Euros
Ressource propre laboratoire (indemnités stagiaire M2R, participation à congrès)	3 000 euros

#### 4.2. Dépenses de fonctionnement

---

Seules les dépenses 2021, demandées à l'AAP Montagne 2021 sont détaillées par la suite.

##### • Missions

---

- Installation plots GPS	2 jours, 2 personnes	
- mesure et re-mesure GPS	4 jours, 3 personnes	
- Re-mesure des extensomètres	2 jours, 2 personnes	
- Cartographie des blocs	2 jours, 2 personnes	
Il est prévu un forfait de 70 Euros/jours de missions à partir de Chambéry :		
pour 24 jours :		1680 Euros

##### • Autres dépenses de fonctionnement

---

- Analyses (préparation datation cosmogéniques <sup>10</sup> Be incluant tamisage, dissolution quartz, séparation <sup>10</sup> Be): 19 échantillons à 350 Euros	6650 Euros
- petit matériel pour fixation des plots géodésiques GPS	770 euros
- relecture d'un article scientifique	900 euros

#### 4.3. Dépenses d'équipement

---

**Pas de dépense pour de nouveaux équipements**, Ceux-ci sont déjà disponibles dans les laboratoires :

- EDYTEM : . Extensomètre à ruban (Soil Instruments)
- ISTerre : . Stations GPS haute précision ;  
. Logiciels de traitement de données stéréographiques, de système d'exploitation Géographiques (ArcGIS et QGIS) et de traitement de données INSAR ;  
. Laboratoire de préparation des échantillons pour analyse isotopes cosmogéniques.

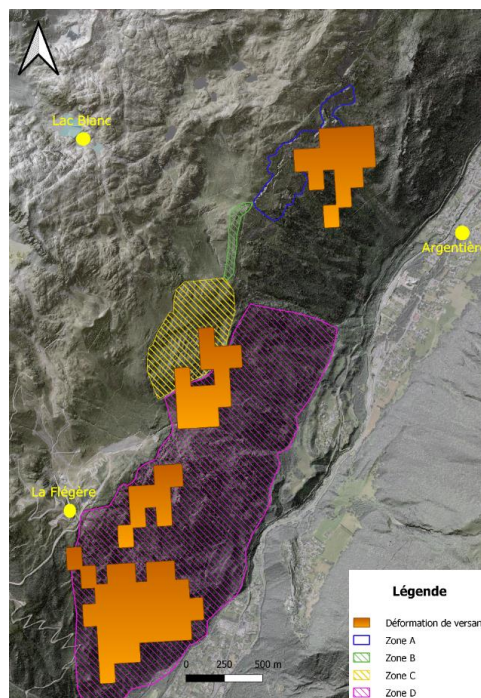
## 5. PROJETS PLURIANNUEL - BILAN ANNÉE ANTÉRIEURE

### Liste des « produits de la recherche »

- *Etudes réalisées dans le cadre de l'encadrement d'étudiants :*
  - . Rapport de stage réalisé dans le cadre du Master 1 « Géosciences Appliquées à l'Ingénierie de l'Aménagement » (GAIA, USMB) par Lucas Tavernier : « Etude structurale et trajectographique de la rupture de versant rocheux des Chéserys », 36 p.
  - . Rapport de stage réalisé dans le cadre du Master 2 « Sciences de la Terre et des planètes, Environnement, » (UGA) par Pauline André : « Measurement of the Alps deformation by radar interferometry: large-scale inventory of deep-seated gravitational slope deformations », 20 p.

Figure 5 : Carte des zones montrant des déplacements supérieurs à 1 mm/an d'après un traitement d'images InSar (adapté de André, 2020).

- *Communications :*
  - . Résumé accepté pour présentation orale au congrès « 27<sup>ème</sup> Réunion des Sciences de La Terre, Lyon, 18-22 octobre 2020 » : Tavernier. L, Mugnier J.L. et al., « Résultats préliminaires concernant une grande rupture de versant dominant le village d'Argentière (massif des Aiguilles Rouges) »
  - . Présentation du projet programmée devant la commission "Geosystème" du comité scientifique de la Réserve Naturelle des Aiguilles Rouges (automne 2020).
- *Base de données :*
  - . les mesures extensométriques réalisées (14 mesures) ont été placées dans une base de données internationale afin d'être sauvegardées et disponibles pour toute re-mesure dans l'avenir.
  - . un système d'information géographique (SIG), réalisé sous QGIS, regroupe l'ensemble des informations actuelles
  - . une photothèque (1000 photos) couvrant la zone étudiée a été réalisée.



### Résultats majeurs :

Les résultats préliminaires majeurs obtenus durant la première année de ce projet sont les suivants :

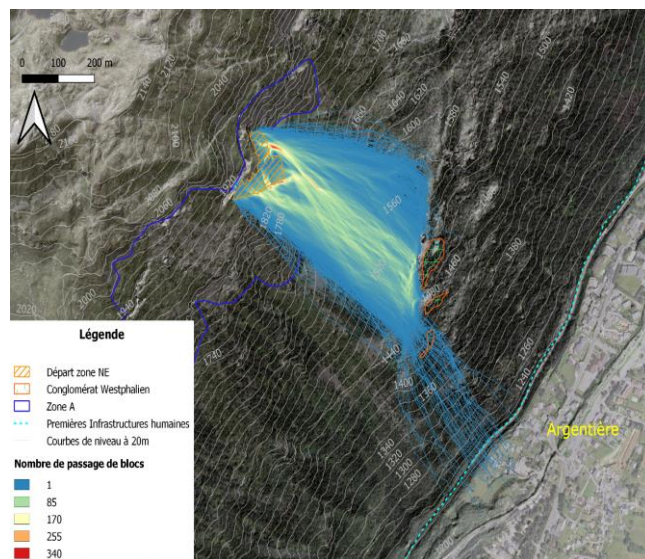
#### 1- Activité actuelle de la grande rupture mise en évidence par interférométrie radar

Les mouvements actuels ont été estimés à partir de 218 images satellitaires radar Sentinel 1 acquises entre 2014 and 2020 (André, 2020). Il ressort que des mouvements supérieurs à 1 mm se produisent dans une partie des versants à l'aval de la cicatrice majeur (Figure 5).

#### 2- Aléa gravitaire lié aux chutes de blocs de taille inférieure à 100 m<sup>2</sup>

La trajectoire potentielle de blocs de 100 m<sup>3</sup> a été déterminés grâce au logiciel RAMMS (*Rapid Mass Movement Simulation*). La Fig. 6 montre que l'éperon rocheux situé dans la pente au-dessus du village d'Argentière constitue une protection naturelle efficace, protégeant ainsi le cœur du village mais il existe au sud une zone affectée par un aléa lié à la chute des gros blocs. Au total 0,3 % des blocs pourraient traverser la voie ferrée et atteindre les secteurs anthropisés.

Fig. 6 : Modélisation de la trajectoire des chutes de blocs avec le logiciel RAMMS à partir de l'extrémité nord-est de la grande rupture dominant Argentière (Tavernier, 2020) ; simulation basée sur 10 745 blocs. L'échelle des couleurs (de rouge, forte probabilité de passage, à bleu, faible probabilité) indique la probabilité de passage de blocs dans un pixel. Les rochers les plus au SW sont accélérés par le passage d'une paroi secondaire et sont moins ralentis par le Westphalien qui s'efface : au total 0.28 % des blocs simulés traversent la voie ferrée.



### 3- Genèse de la grande rupture de versant

La grande rupture de surface des Chéserys se termine vers le Sud par une « queue de cheval » formée de plusieurs branches parallèles. Une relation génétique complexe avec la faille tectonique active de la Remuaz, située dans le prolongement de la faille de Vallorcine est probable : La branche Est de la « queue de cheval » abaisse le compartiment Ouest et se situe dans la continuité de la faille des Chéserys qui décale également les polis glaciaires.

Fig. 7 : MNT Lidar haute résolution (taille du pixel : 0,5 m) au niveau du chalet de Chésery.

#### REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- André, P. (2020). *Measurement of the Alps deformation by radar interferometry: large-scale inventory of deep-seated gravitational slope deformations*. Rapport Master 2 « Sciences de la Terre et des planètes, Environnement », UGA, 20 p.
- Ballantyne, C. K., Sandeman, G. F., Stone, J. O., & Wilson, P. (2014). Rock-slope failure following Late Pleistocene deglaciation on tectonically stable mountainous terrain. *Quaternary Science Reviews*, 86: 144-157.
- Bartelt, P., Bieler, C., Bühler, Y., Christen, M., Christen, M., Dreier, L., Gerber, W., Glover, J., and Schneider, M. (2015). RAMMS: ROCKFALL User Manual.
- Bigot-Cormier et al. (2005). Chronological constraints on processes leading to large active landslides. *Earth and Planetary Science Letters*, 235: 141–150.
- Blondeau, S. (2018). *Ruptures de Versant Rocheux (RVR) à l'échelle des Alpes occidentales : inventaire systématique, analyse spatiale, perspectives patrimoniales*. Thèse de Doctorat, Université Lyon 2, 588 p.
- Cara M., Van der Woerd, J., Alasset P., Benjuemea J., Mériaux A., (2017). The 1905 Chamonix earthquake: active tectonics in the Mont Blanc and Aiguille Rouge massifs. *Swiss Journal of Geosciences*, 110 : 631-651.
- Christen, M., Bühler, Y., Bartelt, P., Leine, R., Glover, J., Schweizer, A., Feistl, T. (2012). Integral hazard management using a unified software environment. In: 12<sup>th</sup> Congress Interpraevent, pp. 77-86.
- Cossart E., Braucher R., Fort M., Bourlès D.L., Carcaillet J. (2008). Slope instability in relation to glacial debuttressing in alpine areas (Upper Durance catchment, southeastern France): Evidence from field data and <sup>10</sup>Be cosmic ray exposure ages. *Geomorphology*, 95: 3-26.
- Dunai, T., Stuart, F.M., (2009). Reporting of cosmogenic nuclide data for exposure age and erosion rate determinations. *Quat. Geochronol.*, 4: 437–440
- Hippolyte, J.C. et al. (2006). The recent fault scarps of the Western Alps (France): tectonic surface ruptures or gravitational sacking scarps? A combined mapping, geomorphic, levelling, and <sup>10</sup>Be dating approach. *Tectonophysics*, 418 (3–4): 255–276.
- Köpfler et al. (2018) The Oeschinensee rock avalanche, Bernese Alps, Switzerland: a co-seismic failure 2300 years ago? *Swiss Journal of Geosciences*, doi: 10.1007/s00015-017-0293-0
- Pavlova, I. et al. (2014). Debris flow activity related to recent climate conditions in the French Alps: A regional investigation. *Geomorphology*, 219 (4): 248-259.
- Petetin M. (2019) [www.geologie-montblanc.fr/Sackungs.htm](http://www.geologie-montblanc.fr/Sackungs.htm)
- Sanchez, G. et al. (2010). Relationships between tectonics, slope instability and climate change: cosmic ray exposure dating of active faults, landslides and glacial surfaces in the SW Alps. *Geomorphology*, 117(1-2) : 1-13.
- Ravanel L, Deline P. (2013). *Climat et écroulements rocheux dans le massif du Mont Blanc: vers une augmentation de l'aléa*. Mémoires de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles, 2013, pp. 139-147.
- SISM@lp-Swarm (2019). Les essais sismiques en France et ailleurs. Observation, processus, analyses, conséquences. Journée Scientifique - Institut des Sciences de la Terre (Grenoble) 21 mai 2019.
- Swartz S. et al. (2017). Cosmic ray exposure dating on the large landslide of Séchillienne (Western Alps): A synthesis to constrain slope evolution. *Geomorphology*, 278: 329-344.
- Tavernier, L. (2020). *Etude structurale et trajectographique de la rupture de versant rocheux des Chéserys*. Stage Master 1 « Géosciences Appliquées à l'Ingénierie de l'Aménagement », GAIA, USMB, 36 p.
- Thomasset, C. (2019). *Approche morpho-tectonique par imagerie Lidar de la faille de Remuaz associée à l'essai sismique de Vallorcine*, Stage de Master 1, Université Paul Sabatier, Toulouse, 22 p.
- Vassallo, R., Thomasset C., Mugnier, J.L. (2019). *La faille de la Remuaz à Chamonix : Evidences morphologiques d'une réactivation quaternaire*. Journée Scientifique- Les essais sismiques en France et ailleurs. Observation, processus, analyses, conséquences. - Institut des Sciences de la Terre (Grenoble) 21 mai 2019.
- Vincent, C. et al. (2019). Déclin des deux plus grands glaciers des Alpes françaises au cours du 21<sup>ème</sup> siècle : Argentière et Mer de Glace (Massif du Mont-Blanc). *La Météorologie*, 106 : 49-58.
- Zerathe, S., Lebourg, T., Braucher, R., & Bourlès, D. (2014). Mid-Holocene cluster of large-scale landslides revealed in the Southwestern Alps by 36Cl dating. Insight on an Alpine-scale landslide activity. *Quaternary Science Reviews*, 90: 106-127.

