

**Titre: TEMPS LONGS ET TEMPS COURTS DES INSTABILITES GRAVITAIRES PROFONDES : CONTRIBUTION A LA CONNAISSANCE DES PHENOMENES POUR LA GESTION DE L'ALEA EN MONTAGNE ALPINE**

- **directeur/co-directeur** : Jean-Philippe Malet (IPGS/EOST), avec co-direction F. Lacquement (BRGM)

- **encadrement** : F. Chabaux (LHYGES/EOST), J. van der Woerd (IPGS/EOST) et C. Bertrand (Chrono-Environnement/THETA)

**- description**

Les failles actives, les conditions climatiques et les effets locaux des glaciations sont les principaux facteurs qui contrôlent la localisation d'instabilités gravitaires profondes (en anglais, *DSGSD – Deep-Seated Gravitational Slope Deformation*; acronyme par la suite utilisé dans le texte) dans les massifs de montagne (Agliardi et al., 2001, 2009). La distribution spatiale de ces phénomènes à l'échelle d'une chaîne de montagnes a rarement été systématiquement analysée (Crosta et al., 2013 ; Pànek et Klimeš, 2016), alors qu'il a été reconnu que la plupart des ces instabilités profondes étaient à l'origine de grands glissements de terrain plus superficiels pouvant générer des risques importants ; c'est par exemple le cas des versants de La Clapière (Tinée, France ; Bigot-Cormier et al., 2005), de Beaufort (Aosta, Italie ; Barla et al., 2010) ou de Rossone (Piémont, Italie ; Amatruda et al., 2003) à l'échelle des Alpes.

En règle générale, les DSGSD sont classifiés comme des phénomènes dits de paléo-glissements pour les conditions climatiques actuelles. Les études récentes, combinant analyse géomorphologique et structurales, paléo-sismologiques et des datations géochronologiques suggèrent deux modes d'évolution des DSGSD, soit la succession de périodes d'activité et de stabilisation avec des réactivations épisodiques (Beck, 1968; Crosta et al., 2013; Wood et al., 2015), soit des déplacements très lents mais quasi-continus (de l'ordre du mm.an<sup>-1</sup>) le long de morpho-structures (McCalpin et Irvine, 1995 ; Ambrosi et Crosta, 2006 ; Agliardi et al., 2013 ; Pànek et Klimeš, 2016).

Caractériser ces modes d'activité historique et actuel est fondamental pour 1) mieux comprendre les relations entre tectonique, érosion, glaciations et climats anciens qui ont conduit à l'endommagement progressif de ces versants, et 2) mieux anticiper l'occurrence de ruptures catastrophiques dans une perspective de prévention du risque gravitaire.

**- programme de travail**

La recherche envisagée porte sur l'identification de "clés d'analyse génériques" (multi-méthodes; géomorphologie, géochronologie, géochimie du régolite, géodésie spatiale, géophysique) pour définir quels types d'instabilités gravitaires profondes (ou paléo-glissements) serait actuellement proche d'un état de réactivation majeure (accélération brutale) dans un temps plus ou moins court (1 ka).

Le projet est bâti sur les connaissances déjà acquises par les études précédentes (cf. section "Etat de l'art") sur divers secteurs de l'orogène alpine en France en ciblant deux secteurs d'étude majeurs choisis car 1) ils sont des clusters spatiaux à haute densité spatiale de paléo-glissements, 2) l'activité gravitaire historique et actuelle y est peu documentée, 3) et ils représentent des exemples de conditions de prédisposition (lithologie, climat, glaciations) particulièrement intéressants. Ces secteurs sont le Beaufortin et le Queyras (Fig. 1b, 1c).

Sur les deux secteurs, le projet consistera à :

**Tâche 1 : Réaliser un inventaire exhaustif complet des instabilités gravitaires profondes** à une échelle du 1/25.000 par l'analyse géomorphologique de divers documents photographiques anciens, et des observations in-situ. Ce travail sera complété par la représentation cartographique des instabilités gravitaires et des paramètres géologiques favorables et/ou défavorables au déclenchement des instabilités (e.g. nature de la roche, variations lithologiques, nature de la fracturation, structure et géométrie par l'analyse des plis, faille et schistosité, relations géométriques entre la structure du socle et la topographie de surface, état de l'altération, cartographie fine des dépôts du régolithe en termes de formations de pente, de dépôts glaciaires). Les travaux de cartographie seront intégrés aux bases de données du BRGM et permettront d'accroître la connaissance sur les secteurs étudiés.

**Tâche 2: Proposer une datation des ruptures initiales des instabilités** et, si possible, de leur **dynamique** intra-phase gravitaire, en combinant nucléides cosmogéniques (<sup>36</sup>Cl, <sup>10</sup>Be ; Braucher et al., 2003) et rapport U/Th (datation absolue, et identification des degrés d'altération) afin d'apporter de nouvelles contraintes sur la formation, l'érosion et la dynamique du régolithe. Pour cela, il s'agit de déterminer les taux de production et de dénudation du régolithe (Chabaux et al., 2013), et de proposer une chronologie de son évolution au cours du Quaternaire récent. L'état des paléo-altérations du massif sera en particulier étudié par des analyses géochimiques, minéralogiques (lames minces, diffraction des RX) et isotopiques sur les profils d'altération dans différentes zones (Ackerer et al. 2016). Ceci permettra également d'identifier les formations de pente et les formes de ruptures d'origine tectonique/structurale de celle d'origine gravitaire par l'analyse des systèmes régionaux de failles, et de proposer de nouvelles contraintes temporelles sur les relations entre les phases de déglaciations, les phases de fonte du permafrost, et des déclenchements des instabilités gravitaires.

**Tâche 3 : Caractériser la cinématique actuelle** des instabilités gravitaires profondes par interférométrie satellitaire InSAR (traitement PS-InSAR, Allievi et al., 2003 ; Ambrosi et Crosta, 2006 ; Colesanti et al., 2006 ; Saroli et al.,

2005) en utilisant les données satellitaires radar ERS (1990)-2000), ENVISAT (2000-2010) et Sentinelle (>2016) pour mesurer les taux de déplacement (déformation continue ou variable) sur les 30 dernières années (Schlögel et al., 2015, 2016). Localement, des investigations géophysiques par sismique réflexion, tomographie électrique et géoradar pourront être menées pour caractériser la forme des structures et les volumes des masses déplacées (Travelletti et al., 2012 ; Gance et al., 2012). Les masses d'eau en présence seront caractérisées avec comme double objectif l'établissement de schémas conceptuels hydrogéologiques et l'appréhension des processus d'altération récents ou actuels. Pour cela, une analyse hydrochimique de l'ensemble des sorties d'eaux identifiées sur les massifs sera réalisée (mesures des paramètres physico-chimiques et prélèvements d'eaux de surface, aux exutoires). Un suivi haute fréquence des paramètres physico-chimique pourrait (selon besoin) être mis en place sur au moins un point de sortie d'eau représentatif des circulations d'eau dans les instabilités (Vallet et al., 2015).

**Tâche 4: Interpréter et synthétiser l'ensemble des données acquises afin de proposer des clés d'interprétation génériques** et des modèles pour définir (hiérarchiser) l'état de maturité du versant vers une rupture brutale. Les clés d'analyses étant définies, il est envisagé de créer (a minima) des modèles conceptuels (coupes 2D) d'évolution spatio-temporelle de quelques versants représentatifs des secteurs étudiés. Ces modèles intégreront une reconstruction de l'état du versant avant déstabilisation (topographie anté-glaciations, lithologies et structures avant dégradation) ; pour cela une comparaison avec des montagnes jeunes (type Alpes Néo-Zélandaises, n'ayant pas connue de cycles de glaciations marqués) pourra être menée. L'effet de plusieurs cycles d'englacement/déglaciation pourra être analysé par des méthodes numériques (McColl et al., 2010 ; Riva et al., 2017)

**- Phasage des travaux**

Les travaux comprendront des observations, prélèvements et mesures de terrain, des analyses de laboratoire (en lien avec les personnels ingénieur de IPGS/LHyges/Chrono-Environnement) pour les datations, des traitements de données géophysiques (InSAR, données géophysiques) (en lien avec les personnels ingénieur de l'IPGS), et une phase d'interprétation des données. Des rendus cartographiques, la création de bases de données standardisées (travaux du doctorant, remis en forme par les personnels BRGM), et des publications scientifiques jalonneront le rendu des travaux.

	Année 1												Année 2												Année 3															
Tasks	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36				
1.1																					R																			
1.2																				R																				
1.3																	R																							
2.1																																								
2.2																				R																				
2.3																																								
3.1																				R																				
3.2																						R																		
3.3																																								
4																																								R

- 1.1 Cartographie géomorphologique / géologique / hydro-géologique
- 1.2 Prélèvements d'échantillons pour analyses géochimiques et hydrogéologiques
- 1.3 Interprétation des données
- 2.1 Analyse géochimique (10Be, 36Cl, U-Th)
- 2.2 Analyse hydro-géochimique
- 2.3 Interprétation des données
- 3.1 Analyse des données satellitaires (InSAR)
- 3.2 Mesures géophysiques (investigation sismique) (eventuel)
- 3.3 Modèles d'endommagement - conceptuel, numérique
- 4 Synthèse : clés d'interprétation, restitution cartographique, et rédaction du manuscrit de thèse