

Projet ANR-09-RISK-008

Acronyme et/ou nom du projet

Programme RISKNAT 2009

A	IDENTIFICATION	2
B	RESUME CONSOLIDE PUBLIC	2
B.1	Résumé consolidé public en français	2
B.2	Résumé consolidé public en anglais.....	5
C	MEMOIRE SCIENTIFIQUE	6
C.1	Résumé du mémoire	6
C.2	Enjeux et problématique, état de l'art	6
C.3	Approche scientifique et technique.....	7
C.4	Résultats obtenus	8
C.5	Exploitation des résultats	13
C.6	Discussion/CONCLUSION.....	13
C.7	Références.....	14
D	LISTE DES LIVRABLES	15
E	IMPACT DU PROJET	18
E.1	Indicateurs d'impact	18
E.2	Liste des publications et communications.....	18
E.3	Bilan et suivi des personnels recrutés en CDD	23
F	ANNEXE : BILAN TÂCHE PAR TÂCHE	24

A IDENTIFICATION

Acronyme du projet	SLAMS
Titre du projet	Etudes Multidisciplinaires du Mouvement de Séchilienne : aléa, risques associés et conséquences socio-économiques
Coordinateur du projet (société/organisme)	Stéphane GARAMBOIS (ISTERRE, UJF)
Période du projet (date de début – date de fin)	Janvier 2010-Décembre 2013
Site web du projet, le cas échéant	Pas de besoin exprimé

Rédacteur de ce rapport	
Civilité, prénom, nom	Stéphane GARAMBOIS
Téléphone	04 76 63 51 74
Adresse électronique	Stephane.Garambois@ujf-grenoble.fr
Date de rédaction	22 février 2014

Liste des partenaires présents à la fin du projet (société/organisme et responsable scientifique)	<ol style="list-style-type: none">1. ISTERRE, Université Joseph Fourier, Stéphane GARAMBOIS2. GEOAZUR, Université Sophia-Antipolis & CNRS, Frédéric CAPPÀ3. CETE-LYON, Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées, Siegfried MAIOLINO4. DECROP E&R, entreprise, Geneviève DECROP5. PARN, Pôle Alpin des Risques Naturels, Vincent BOUDIERES6. CEREGE, Université Aix-Marseille & CNRS, Didier BOURLES7. INERIS, Pascal BIGARRE
---	---

NB : le 1er janvier 2014, le CETE de Lyon est devenu la direction territoriale Centre-Est du CEREMA (DTER Centre-Est). Le CEREMA (Centre d'Etudes et d'expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement) réunit les compétences de onze services : 8 CETE le CERTU, le CETMEF et le SETRA.

B RESUME CONSOLIDE PUBLIC

B.1 RESUME CONSOLIDE PUBLIC EN FRANÇAIS

Vers une meilleure appréhension des gros mouvements de terrain ?

Une approche multidisciplinaire et multi-temporelle du grand mouvement de terrain emblématique qu'est Séchilienne.

La prévention des risques collectifs met en jeu plusieurs disciplines scientifiques et plusieurs acteurs dont l'articulation est complexe du fait de la diversité des approches et de la gestion des incertitudes. L'ambition et la nouveauté de ce projet étaient de proposer un dispositif adapté à ce contexte en dépassant la pluridisciplinarité scientifique classique, via des questionnements interdisciplinaires. Au-delà, le projet visait également à lever les verrous qui bloquent la compréhension des mouvements de terrains de grande ampleur, caractérisés par de fortes complexité et hétérogénéités spatio-temporelles,

et qui sont également source de blocages en matière de gestion du risque et de gouvernance politique. Cette approche multidisciplinaire repose sur l'observation multi-paramètres, la mesure in-situ et en laboratoire et la modélisation numérique thermo-hydro-mécanique. Ce projet a nécessité des développements en termes d'acquisitions et de traitement des signaux ainsi qu'en termes de modélisations numériques, qui ont constitué des défis importants dans un contexte d'instabilité gravitaire emblématique des questions épineuses soulevées depuis 30 ans pour la gestion du risque. Ce projet se caractérise par une forte présence des sciences humaines et sociales étudiant l'évolution de l'offre de gestion du risque et de la politique de décision.

Une méthodologie basée sur des observations multi-physiques et sociologiques couplées à des développements numériques, statistiques et interprétatifs

Une ambition du projet était de faire du site de Séchilienne un observatoire multi-paramètres unique sur les mouvements de terrain afin de mieux comprendre les facteurs contrôlant la dynamique actuelle et la cinématique passée du mouvement de Séchilienne. Ceci a été possible par l'apport de données originales, complémentaires au dispositif de surveillance opérationnel, qu'elles soient sismologiques, hydrologiques, géophysiques et cosmogéniques. Ces approches ont été couplées à des études menées à plus petite échelle permettant de préciser les caractéristiques mécaniques des roches en jeu et de comprendre le rôle des pressions fluides sur l'endommagement mécanique des zones fracturées et sur la génération d'événements sismologiques. La dimension interdisciplinaire a été concrétisée par une analyse rétrospective et actuelle de la politique de décision, en s'interrogeant sur deux problématiques sociétales modernes : l'accès libre aux données et la problématique de l'expertise. Enfin, l'offre de gestion du risque (structuration, configuration, faiblesse et robustesse), a été interrogée notamment dans l'optique de la satisfaction et de l'importance perçues par les acteurs vis-à-vis de cette offre.

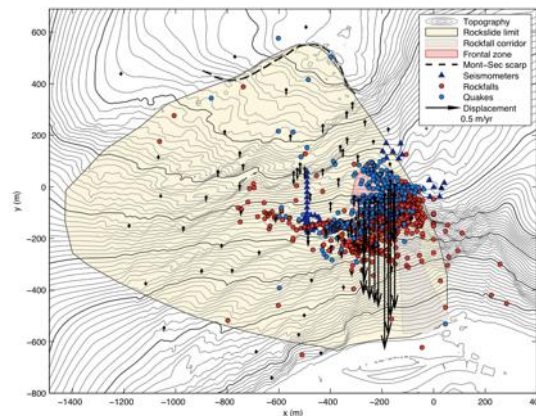
Résultats majeurs

L'approche observationnelle a permis de montrer une forte corrélation entre activité sismologique du mouvement, pluviométrie efficace et déplacements. Il a été notamment montré une forte évolution de la réactivité du mouvement aux forçages climatiques, ainsi que le rôle des couplages hydromécaniques sur la déstabilisation et la dynamique du mouvement. Une géométrie 3D de la zone affectée par le mouvement et ses caractéristiques mécaniques et hydrologiques ont pu être établies tandis qu'une reconstitution complexe de la cinématique de mouvement depuis la dernière glaciation a pu être proposée. Il a été montré également que la prise en compte de l'incertitude, une des caractéristiques des risques complexes, demande une refonte des modalités de la constitution de l'expertise et un renforcement des liens entre acteurs opérationnels, décisionnels et de recherche.

Production scientifique

Ce projet a donné lieu à de nouvelles données originales, qui seront pour la plupart diffusées en accès libre au niveau international sur des plateformes internet. Il a également permis de produire 13 publications dans des revues internationales et donné lieu à 44 communications nationales ou internationales. Il a créé une synergie de recherche entre différents acteurs académiques et de collaboration avec des acteurs opérationnels.

Illustration



Légende : Carte des éboulements (cercles rouges) et microséismes (cercles bleus) localisés par le réseau sismologique. Les flèches montrent les vecteurs déplacements mesurés par le CETE Lyon.

Informations factuelles

Le projet SLAMS est un projet de recherche fondamentale coordonné par Stéphane Garambois du laboratoire ISTERRE (Univ. J. Fourier & CNRS, Grenoble). Il associe GéoAzur (Univ. de Nice & CNRS auquel a été rattachée une équipe du laboratoire Chrono-Environnement de l'université de Besançon), le CETE de Lyon (Centre d'Etudes Techniques de L'Equipement), G.Decrop Etudes & Recherches, associée au laboratoire PACTE, le PARN (Pôle Alpin des Risques Naturels), le CEREGE (Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement, Univ. Aix-Marseille & CNRS) et l'INERIS (Institut Nationale de L'Environnement INdustriel et des riSques). Le projet a commencé en janvier 2009 pour une durée initiale de 36 mois, qui a été étendue à 48 mois. Il a bénéficié d'une aide de 700 371 € pour un coût total de 2 425 215 €. Le projet a bénéficié en outre de données de suivi temporel acquises au sein de l'observatoire sur les mouvements de terrain (OMIV-INSU) et du système de surveillance mis en place par le CETE de Lyon, ainsi que d'une bourse de doctorat (Université de Besançon, rattachée à Geoazur).

B.2 RESUME CONSOLIDE PUBLIC EN ANGLAIS

Towards a better understanding and management of large landslides?

Multidisciplinary and multi-temporal approaches of the huge Sechilienne iconic landslide

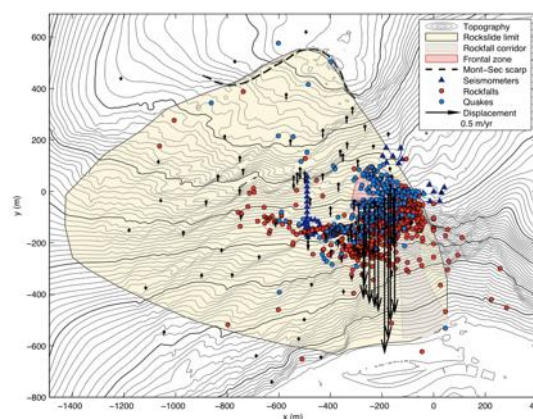
Collective risks involve several scientific disciplines and several actors whose articulation is complex because of the diversity of approaches and how to manage uncertainties. The ambition and the novelty of this project were to provide a strategy adapted to this context with an interdisciplinary approach. In addition, the project also aimed at breaking down the barriers that block understanding of huge landslides, characterized by high complexity and heterogeneities in both space and time, and influence the risk management and political governance. This multidisciplinary approach is based on multi-parameter observation, in-situ and laboratory measurements and thermo-hydro- mechanical numerical modeling. This project required specific developments in terms of acquisition, monitoring, signal processing and / or numerical modeling, which has been an important challenge in the context of this iconic gravitational instability that has posed issues for 30 years for risk management. This project is characterized by a strong presence of social sciences studying the evolution of supply risk management and policy making.

[A methodology based on multi-physical and sociological observations coupled with numerical modelling, statistics and interpretative developments](#)

Ambition of the project was to make the Sechilienne site a single multi-parameter landslides observatory to better understand the factors controlling the dynamics and past kinematics of movement. This was made possible by the acquisition of original data, which complement the operational monitoring device, whether seismological, hydrological, geophysical and dating. These approaches have been coupled with studies performed at a smaller scale to establish the mechanical properties of rocks and understand the role of fluid pressure on the mechanical damage of fractured zones and on the generation of seismological events. Interdisciplinary dimension was performed by a retrospective and current analysis of policy -making, questioning two modern societal issues: access to data and expertise. Finally, the supply of risk management (structuring, configuration, weakness and strength), was questioned in particular in terms of satisfaction and importance perceived by the actors.

Main results

The multiparameter monitoring has shown a strong correlation between seismic activities, effective rainfall and surface deformation. It was shown an evolution of the reactivity of the movement to climate forcing, as well as the role of hydromechanical coupling on the destabilization and on the dynamics of the landslide. The 3D geometry affected by the movement and its hydrological and mechanical characteristics could be established, while a complex reconstruction of the kinematics of movement since the last glaciation has been proposed. It was also shown that the uncertainty at the heart of risk management requires an overhaul of the constitution and terms of expertise and strengthen the links between operational actors, policy and research.



Caption: Rockfalls and earthquakes map located using the seismological network. The arrow display the amplitude and orientation of displacements measured by CETE Lyon.

Scientific production and comments

This project has resulted in new and original data, which will be mostly free accessible internationally on internet platforms. It has also produced 13 publications in international journals and resulted in 44 national and international communications. It created a research synergy and network between different academic research actors and made a bridge between academic departments and people in charge of the hazard surveillance.

Factual information

The SLAMS project is a fundamental research project coordinated by Stéphane Garambois of ISTerre laboratory (Univ. J. Fourier & CNRS, Grenoble). It gathers GéoAzur (Univ. of Nice & CNRS with additional team of Chrono-Environment lab of the University of Besançon), CETE de Lyon (Technical Studies of The Equipment), G.Decrop Etudes & Recherches, associated to PACTE laboratory, the PARN (Alpine Division of Natural Hazards) CEREGE (European Centre for Research and Teaching of Environmental Geosciences, Univ. Aix- Marseille & CNRS) and INERIS (National Institute for industrial Environment and Risks). The project started in January 2009 for an initial duration of 36 months, which was extended to 48 months. He received a funding from ANR of € 700,371 for a total cost of € 2,425,215. The project benefited from monitoring data acquired within the French national observatory of landslides

(OMIV-INSU) and within the surveillance monitoring system set up by the CETE of Lyon, as well as a doctoral fellowship (University of Besançon).

C MEMOIRE SCIENTIFIQUE

Mémoire scientifique confidentiel : non

C.1 RESUME DU MEMOIRE

La prévention des risques collectifs met en jeu plusieurs disciplines scientifiques et plusieurs acteurs dont l'articulation est complexe du fait de la diversité des approches et de la gestion des incertitudes. L'ambition et la nouveauté de ce projet étaient de proposer un dispositif adapté à ce contexte en dépassant la pluridisciplinarité scientifique classique, via des questionnements interdisciplinaires. Au-delà, le projet visait également à lever les verrous qui bloquent la compréhension des mouvements de terrains de grande ampleur, caractérisés par de fortes complexité et hétérogénéités spatio-temporelles, et qui sont également source de blocages en matière de gestion du risque et de gouvernance politique. Cette approche multidisciplinaire repose sur l'observation multi-paramètres, la mesure in-situ et en laboratoire et la modélisation numérique thermo-hydro-mécanique. Ce projet a nécessité des développements en termes d'acquisitions, de traitement des signaux et de modélisations numériques, qui ont constitué des défis importants dans un contexte d'instabilité gravitaire emblématique des questions épineuses soulevées depuis 30 ans pour la gestion du risque. Ce projet se caractérise par une forte présence des sciences humaines et sociales étudiant l'évolution de l'offre de gestion du risque et de la prise de décision politique.

L'approche observationnelle a permis de montrer une forte corrélation entre activités sismologiques du mouvement, pluviométrie efficace et déplacements. Il a été notamment montré une forte évolution de la réactivité du mouvement aux forçages météorologiques, ainsi que le rôle des couplages hydromécaniques sur la déstabilisation et la dynamique du mouvement. Une géométrie 3D de la zone affectée par le mouvement et ses caractéristiques mécaniques et hydrologiques ont pu être établies tandis qu'une reconstitution complexe de la cinématique de mouvement depuis la dernière glaciation a pu être proposée. Il a été montré également que l'incertitude au cœur de la gestion du risque demande une refonte des modalités de la constitution de l'expertise et un renforcement des liens entre acteurs opérationnels, décisionnels et de recherche. Ces différents aspects sont résumés ci-après et détaillés dans une annexe qui synthétise, tâche par tâche, les problématiques, méthodologies et résultats obtenus.

C.2 ENJEUX ET PROBLEMATIQUE, ETAT DE L'ART

La notion de risques collectifs implique le fait que le clivage jusqu'alors classiquement admis entre d'un côté, des risques largement amalgamés à des menaces extérieures et de l'autre, des instances chargées de les gérer, ne semble plus si évident. Le risque constitue de fait une réalité construite et une préoccupation collective autour de laquelle les acteurs s'engagent dans une action dite de gestion. Parmi ces risques, le déclenchement de grands mouvements de terrain est susceptible d'entraîner des conséquences catastrophiques pour les populations et la vie économique d'une région. Les mécanismes complexes et variés à l'origine de ces grandes instabilités gravitaires et les facteurs externes les affectant (effets climatiques, séismes, influence anthropique) sont toujours actuellement difficiles à identifier ou évaluer (Korup et al., 2007) au niveau scientifique. L'évaluation et la gestion du risque nécessitent la collaboration des différents acteurs issus d'organismes opérationnels, de la puissance publique et du monde de la recherche scientifique qui alimentent tous dans leur domaine et pour une part l'offre de gestion du risque sur un site donné. C'est dans ce contexte que le projet a été positionné sur un site de mouvement de terrain, emblématique des questions récurrentes qui se posent sur cet aléa et sa gestion, le site de Séchilienne.

Ce mouvement gravitaire est complexe et implique l'ensemble du versant, qui s'étend depuis 600 m d'altitude pour la partie la plus active et instable jusqu'à l'escarpement sommital du Mont Sec (1100 m). Depuis la fin des années 1980, le site a fait l'objet de nombreuses reconnaissances géologiques, géodésiques, géotechniques, géophysiques et hydrogéologiques (Vengeon, 1998, Guglielmi et al., 2002; Durville et al. 2004 ; Meric et al., 2005). Malgré les reconnaissances réalisées et le système de surveillance mis en place et géré par le CETE de Lyon, le mécanisme de déformation du versant de Séchillienne n'est toujours pas bien compris et les scénarios de risque doivent être régulièrement revus, en fonction des nouvelles données et observations.

L'objectif premier de ce projet était d'apporter des réponses à des questions qui continuent à être posées à la fois au niveau des mécanismes contrôlant la dynamique du mouvement, de sa gestion et de ses conséquences sociales.

Au niveau de la compréhension de la dynamique du mouvement actuelle, nous avons choisi d'évaluer l'apport d'observables originales (sismologiques, géodésiques, photos, scan-laser, forages), combinées à de nouvelles techniques de traitement de données pour une éventuelle intégration dans le système de surveillance. La dynamique de nombreux mouvements de terrain est en général largement contrôlée par la pluviométrie, même si en milieux très hétérogènes, les relations qui existent entre les mouvements de fluides et les déformations qui mènent à la rupture des versants sont encore mal comprises [Guglielmi et al., 2002; Cappa et al., 2004; Guglielmi et al., 2005; Duranthon et al., 2003]. Nous avons ainsi proposé de combler le manque de connaissances d'un point de vue hydrologique (nappe phréatique, propriétés des circulations d'eau) et sur les couplages hydromécaniques qu'ils génèrent. Enfin, sur la base d'un atelier interdisciplinaire, qui se voulait transversal à l'ensemble de la recherche, des questionnements plus retroints ont été abordés quant à l'accessibilité des données et aux processus d'expertises. Des développements ont également été effectués en matière de gestion du risque et de communication via le Web (iCrisis).

Nous avons également proposé un retour sur le passé à travers une approche historique à court terme considérant un retour sur 25 ans de gestion de crise d'un point de vue socio-économique et gestionnaire, mais également à travers une tentative de reconstitution de la cinématique du mouvement depuis son initiation jusqu'à son état présent.

Nous avons initialement proposé une approche prospective incluant l'étude de scénarios de forçages exceptionnels (pluviométrie, sismicité, ablation de la zone frontale), des conséquences en termes d'éboulements et des procédures de scénarisation de la menace. Cet aspect a dû être fortement revu à la baisse, notamment en raison de fortes difficultés liées aux modélisations numériques. Ainsi, c'est plutôt vers la construction d'un arbre de décision, basé sur des événements comparables à l'échelle mondiale ainsi que sur la manière dont sont structurés l'offre de gestion et le processus de décision associé que les travaux ont portés. En particulier, l'accent a été mis autour de la question de la décision en univers incertain, avec une approche à la fois analytique, interprétative et normative selon les activités et les corpus mobilisés, ceci afin de proposer des pistes de réflexion pour une évolution de cette offre.

C.3 APPROCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

Notre approche s'est voulue multidisciplinaire voir interdisciplinaire et a permis de rassembler des personnes issues de la recherche académique, opérationnelles et des Sciences Humaines et Sociales.

Cette approche intégrée a reposé primordialement sur l'observation et la mesure. Celles-ci ont été conduites par suivi temporel multi-paramètres (géodésique, hydrologique, hydro-mécaniques, sismologique), ou de manière ponctuelle via des mesures in-situ et en laboratoire (datations, essais mécaniques, géophysiques) des enquêtes et interviews auprès des acteurs de la gestion du risque et par modélisation numérique ou statistique pour comprendre leur signification et étendre leur interprétation. Dans chacune des tâches proposées (voir Annexe pour le détail, tâche par tâche), ces développements ont constitué un défi intéressant et ont également permis une confrontation entre données (par exemple pour évaluer l'évolution de la réactivité du mouvement aux pluies efficaces).

A un niveau plus technique, le réseau d'observation mis en place à Séchilienne à partir de 1985 a été complété depuis 2007 pour les activités de recherches (sismologie, hydrogéophysique) dans le cadre de l'Observatoire National OMIV de l'INSU/CNRS (<http://omiv.osug.fr/SECHILIENNE>). De plus, plusieurs forages ont été réalisés et instrumentés (inclinomètres, piézomètres) en 2009 et 2010 dans la zone instable.

La connaissance de l'état de déstructuration du massif a bénéficié de nouvelles campagnes géophysiques (sismiques et électriques) tandis que la compréhension du rôle des fluides sur la déstabilisation des versants a pu être affinée par un suivi hydrogéologique prévu sur le long-terme et par des expériences analogues en conditions contrôlées à petite échelle. En particulier, un protocole de suivi hydrogéologique et hydrochimique dédié à la détermination des circulations d'eaux souterraines à l'échelle pluri-kilométriques autour du versant de Séchilienne et à l'échelle décamétrique dans le volume instable a été proposé. Ces travaux ont permis le développement d'un modèle conceptuel des écoulements et une simulation des effets des mouvements de la nappe souterraine sur la déstabilisation du mouvement instable, en 2D et en 3D, ce mécanisme potentiel n'étant cependant pas forcément l'unique cause originelle de déstabilisation.

Afin de reconstruire la cinématique du mouvement depuis le retrait des glaciers et son évolution spatiale, la méthode utilisée pour la datation des escarpements rocheux constitués de micaschistes a été la mesure de la concentration du nucléide cosmogénique ^{10}Be produit in situ s'accumulant au sein des minéraux de quartz. Cette évolution a également été étudiée de façon numérique, par approche thermo-mécanique en implémentant un modèle de formation de permafrost au sein de la masse rocheuse dans le code éléments finis « Comsol » (software (<http://www.comsol.com>)).

Au niveau prospectif, la partie conceptuelle des étapes de l'arbre de décision est amorcée. Il a été basé sur la lecture statistique de cas mondiaux, en se focalisant notamment sur l'évaluation de la susceptibilité du mouvement à un séisme et la probabilité de rupture d'un éventuel barrage.

Concernant, l'analyse de l'offre de gestion du risque, les travaux ont été articulés autour de l'approche pragmatique par les distances, l'analyse satisfaction/importance et la lecture des vulnérabilités actives avec une enquête de terrain. Le travail sur la vulnérabilité active, qui postule le fait que le niveau général de risque tient bien entendu à la présence située et conjointe d'une menace (aléa plus ou moins caractérisable) et d'enjeux physiques et humains présentant une vulnérabilité (elle aussi plus ou moins caractérisable), mais aussi aux modalités, pratiques et configurations même de l'offre de gestion, a mobilisé une enquête de terrain par entretiens.

L'aide à la gestion de crise (sur la base du logiciel iCrisis) s'est traduite par un exercice de simulation de crise, proposé à titre pédagogique. La relecture de l'histoire du risque de Séchilienne a visé à comprendre la genèse de l'expertise, son évolution et ses rapports d'une part avec la gestion du risque et les vécus sociaux et d'autre part avec la recherche académique en géosciences. Ceci a permis de recentrer les questionnements de l'atelier interdisciplinaire autour des processus d'expertise et de l'articulation entre l'expertise et la recherche.

C.4 RESULTATS OBTENUS

A partir de la méthodologie multidisciplinaire décrite auparavant, certains résultats méritent d'être mis en avant, l'ensemble de ceux-ci étant exposés plus en détail dans l'annexe décrivant les avancées tâche par tâche et via les livrables.

4.1 OBERVATOIRE MULTI-PARAMETRES

Au niveau observationnel, l'apport d'un observatoire multidisciplinaire est indéniable. Le réseau sismologique a notamment permis de détecter, caractériser et localiser (Lacroix & Helmstetter, 2011) de manière quasi-automatique des milliers d'évènements sismiques liés à des micro-séismes ou des chutes de blocs (Figure C1, livrables 1.1 et 1.2). Ceux-ci ont pu être corrélés de manière quantitative

avec d'autres observables telles que la pluie et les déplacements (Helmstetter & Garambois, 2010). On pourra souligner que ce dispositif d'écoute sismique permet de détecter en temps quasi-réel des éboulements et d'estimer leur volume, ce qui est rendu complexe pour les techniques d'observations classiques notamment lors de conditions météorologiques mauvaises ou de luminosité déclinante. (Livrable 1.4). Il reste difficile d'obtenir un modèle de vitesse sismique 3D en utilisant le réseau sismologie, ce qui nuit à la précision des localisations (Livrable 1.4).

Il a été également mis en évidence d'importants effets de site sismiques liés à la déstructuration du massif, qui sont susceptibles d'accroître le risque de déclenchement de la rupture du mouvement sous l'effet d'un séisme (Garambois et al., 2014, livrable 1.3).

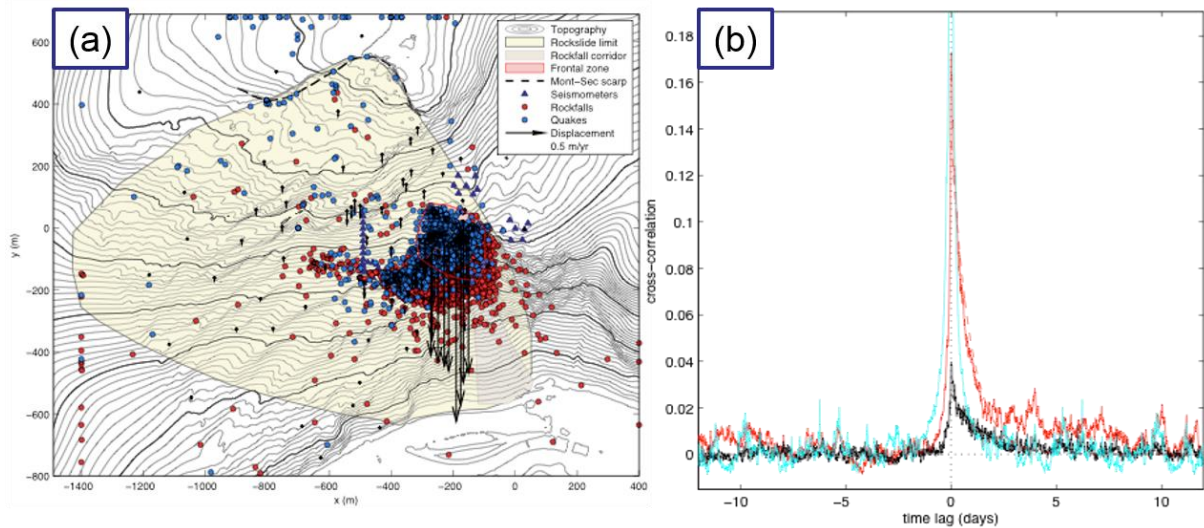


Figure C1. (a) Carte des éboulements (cercles rouges) et microséismes (cercles bleus). Les flèches montrent les vecteurs déplacements mesurés par le CEREMA Lyon (CETE). (b) Inter-corrélation entre les précipitations horaires et le nombre d'éboulements (rouge) ou de microséismes (noir), et auto-corrélation des précipitations (en bleu).

Les différents instruments (distance-mètres optique et radar, extensomètres, inclinomètres, GPS) ainsi que l'imagerie (LIDAR, photographies de face) permettent de mesurer le déplacement en 3D, sa variation temporelle et spatiale, en surface et en profondeur (inclinomètre en forage). Les pics d'activité micro-sismique au printemps et à l'automne 2012 coïncident avec une accélération des déplacements. L'analyse de deux MNT successifs LIDAR acquis en 2011 et 2012 a notamment permis de permettre d'étudier l'évolution du mouvement et d'en visualiser le mécanisme (Figure C1, livrable 1.6).

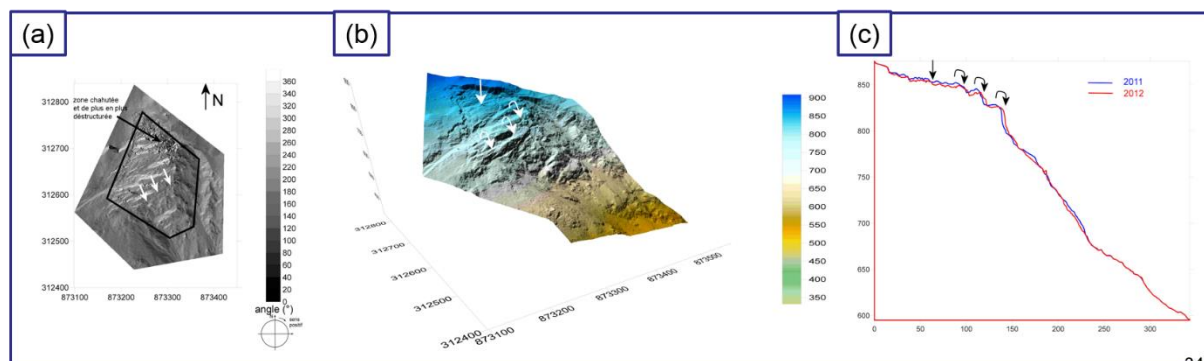


Figure C2. (a) Evolution de l'état de déstructuration de la surface – carte des pentes ; (b) Identification des mécanismes par superposition des surfaces 3D (c) Identification des mécanismes - profils.

La comparaison des données de déplacement, écoute sismique et météo a montré une accélération

significative du mouvement induite par les précipitations. L'influence de la pluie sur les déplacements a été étudiée en considérant une nouvelle approche (Chanut et al., 2012, Chanut et al., 2013, livrable 1.5). Pour cela, on raisonne sur les variations du déplacement autour de la tendance et on relie cette grandeur avec une grandeur représentative des apports d'eau : la pluie efficace est utilisée au lieu des apports d'eau bruts (Vallet et al., 2013). La mise en place de ce modèle valable sur une dizaine d'années rend compte de la commande hydraulique des déplacements qui intervient comme un facteur multiplicatif, et ceci de façon assez constante depuis 2003.

Les différentes mesures ont aussi montré une accélération très nette du mouvement depuis 2009. Cette évolution suggère que la rupture de tout ou partie de la zone frontale (3 millions de m³) est probable à l'échelle de quelques années. L'instrumentation du site doit donc absolument être poursuivie jusqu'à la rupture. On aura ainsi un jeu de données unique permettant d'identifier les précurseurs de la rupture d'un mouvement rocheux de grande ampleur. Ces observations pourraient alors permettre d'identifier les paramètres pertinents pour la surveillance et la prévision d'autres versants rocheux instables.

4.2 HYDROLOGIE ET HYDROGÉOPHYSIQUE

Au niveau hydrologique, les campagnes ont fourni une meilleure connaissance des écoulements d'eaux souterraines et permis de définir un schéma conceptuel des écoulements à l'échelle du massif (Figure C.3, livrable 2.1). Ils mettent en évidence des écoulements préférentiels, réactifs et rapides dans les zones fracturées et des écoulements plus diffus, inertiels et lents dans la roche moins fracturée. Il a été enregistré également une variation de la chimie des eaux des sources liée à l'endommagement mécanique des fractures du versant (Livrable 2.1, Vallet et al., 2014).

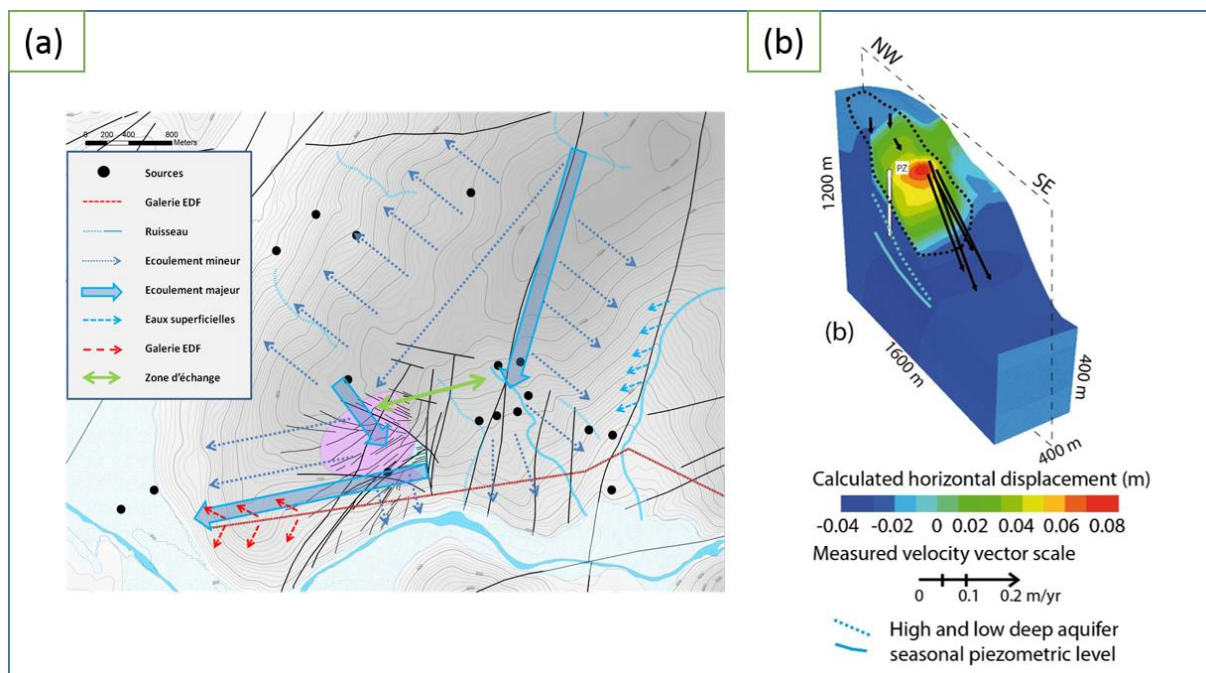


Figure C3. (a) Schéma conceptuel des écoulements d'eaux souterraines dans le massif du Mont Sec. Le mouvement de versant de Séchilienne est représenté en rose. Les points noirs correspondent aux points d'échantillonnage des eaux. (b) Déplacements calculés par modélisation hydromécanique.

Au cours d'une expérimentation in-situ effectuée dans une zone de faille du laboratoire à Bas Bruit de Rustrel, visant à injecter des fluides dans une zone de fractures pour simuler les effets potentiels d'une pluie sur un versant, il a été montré qu'une suppression de fluides localisée peut générer des déformations sismiques dans les zones sèches éloignées du volume pressurisé, comme observé par le réseau sismologique. Ces nouvelles observations permettent de mieux comprendre les mécanismes de couplage hydromécaniques dans des mouvements de versants de grande ampleur. A partir de ces

observations à petite échelle, un phénomène de couplage hydromécanique a pu être défini et testé dans le versant de Séchilienne par modélisations hydromécaniques afin de contribuer à répondre à ces questions. Les modèles reproduisent correctement les déformations mesurées en surface du versant, et la géométrie de la zone rompue cartographiée par la géologie et imagée par la géophysique (Figure C3B, livrable 2.2, Cappa et al., 2014). Ces mouvements produisent un endommagement mécanique du volume instable par transfert de contraintes poro-élastiques et un affaiblissement de la friction. Cette modélisation permet donc de mettre en évidence une altération non prévue du champ de contrainte près de la surface du versant et un affaiblissement qui mène à la rupture au-dessus de la nappe. Ce résultat sans précédent dans la communauté fournit des clés qui aideront à la quantification plus fiable de l'aléa gravitaire.

4.3 CINEMATIQUE PASSEE ET ETAT ACTUEL DU MOUVEMENT

De nouveaux résultats portant sur la caractérisation mécanique du mouvement ont été obtenus notamment en mesurant les paramètres géomécaniques sur des échantillons issus des forages (livrable 5.3). Les grands profils géophysiques, pour certains retraités, ainsi que les forages profonds ont montré que la zone déstructurée pouvait atteindre un volume total de 60 ± 10 millions de m^3 , associé à une épaisseur maximale de 100 à 200 m selon les endroits (Figure C4, livrables 5.2 et 5.3, Leroux et al., 2011). La géométrie 3D du mouvement a été déterminée à partir d'une limite de porosité de fissures.

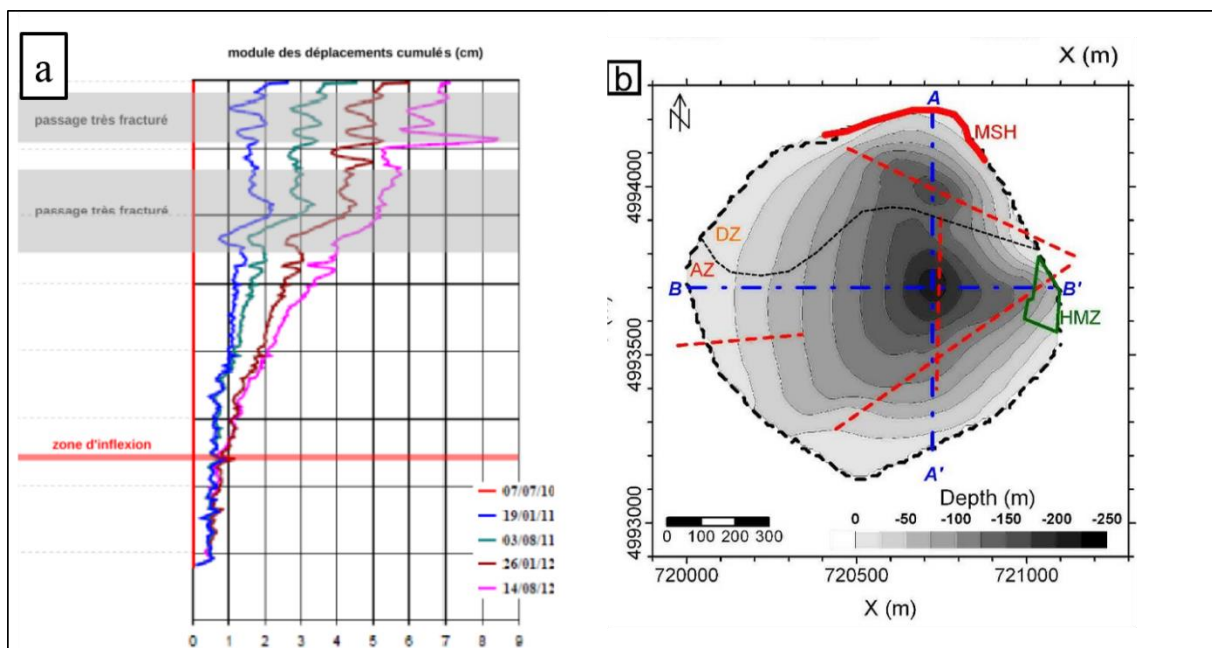


Figure C4. (a) Relevés inclinométriques réalisés dans le forage SD2 entre le 7/7/2010 et le 14/08/2012. Ces derniers montrent une zone d'inflexion à 112 m. (b) Carte 2D montrant la géométrie du mouvement de terrain (iso-profondeurs) avec les limites des zones, la localisation des profils sismiques (tirets rouges)

Les datations par la mesure de la concentration en nucléide cosmogénique ^{10}Be produit in situ accumulé dans les roches superficielles ont montré que le désenglacement du versant de Séchilienne a commencé à partir de 17ka pour se terminer en fond de vallée aux environs de 14ka. Le retrait du glacier s'est effectué dans la partie sommitale à une vitesse de l'ordre de 0,076m/an. Les escarpements sommital et latéral Est semblent s'être créés entre 5 et 8 ka, durant la période climatique de l'Optimum Climatique Holocène, et la déformation s'est ensuite propagée vers l'Ouest (4-5 ka), puis à l'intérieur du mouvement (initiation d'escarpements mineurs entre 2-4 ka) (Figure C5, livrable 5.1). Enfin, les

modélisations numériques thermiques (Lebrouc et al., 2013) ont montré que le pergélisol a pu persister jusqu'à 11 ka et a donc pu jouer un rôle dans le délai de plusieurs milliers d'années observé entre la disparition du glacier (14-17 ka) dans la vallée et l'initiation de l'instabilité gravitaire (5-8 ka). Un point important est que la profondeur maximale atteinte par le pergélisol correspond à l'épaisseur de la zone déstructurée mise en évidence par les reconnaissances profondes. Ce résultat suggère que le pergélisol a pu jouer un rôle de fissuration du massif (par ségrégation de lentilles de glace) contribuant à affaiblir le versant.

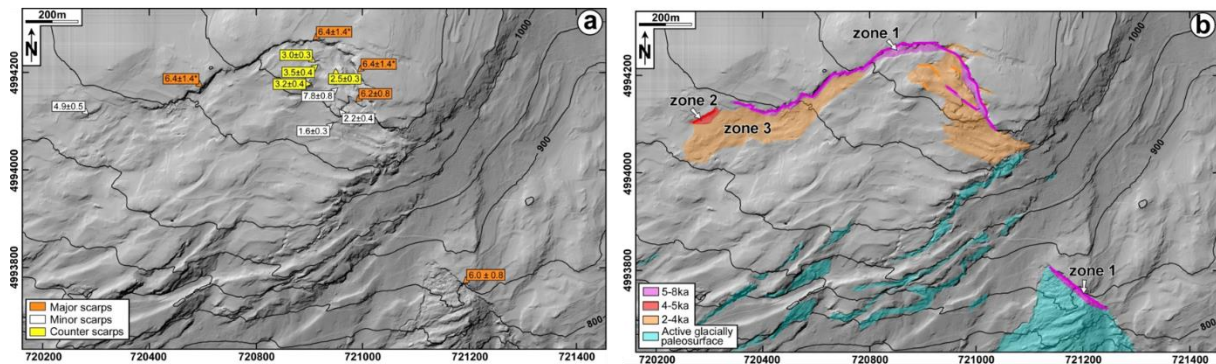


Figure C5. Synthèse des datations par durée d'exposition au rayonnement cosmique. a) Ages d'exposition ^{10}Be en fonction du type d'escarpement. b) Interprétation en terme de zone d'activation.

4.4 ANALYSES DE LA SCÈNE GESTIONNAIRE DU RISQUE : POUR UNE MEILLEUR INTEGRATION

Une rétro-analyse fondée sur la bibliographie et le recueil de témoignages des acteurs principaux configurant la scène gestionnaire du risque a permis de dégager plusieurs observations portant notamment sur le rôle, l'importance et le fonctionnement de l'expertise. On pointera notamment l'absence de transparence, le manque de débats contradictoires malgré le poids des incertitudes, l'absence d'évaluation et le manque d'ouverture vers la recherche académique (livrables 4.1 et 4.2, Decrop, 2014). Ces résultats, ainsi que les réflexions engagées autour de la démarche interdisciplinaire au sein du projet, ont conduit à

- mettre à la disposition des acteurs opérationnels un outil de gestion efficace de l'information pertinente, transparente, homogène, validée techniquement et accessible rapidement à tout ou partie des acteurs, notamment en situation de pré-alerte et de gestion de crise (livrable 3.2).
- investiguer différents documents relatifs à la conduite de l'expertise (chartes, témoignages, guides) aboutissant à la rédaction d'un guide de bonnes pratiques en matière d'expertise du risque mouvements de terrain (Livrable 3.4, Decrop, 2014).

L'analyse des configurations et des structures de l'offre de gestion actuelle et des processus de décision associés a été effectuée par différentes approches (évaluative : satisfaction/importance, descriptive : distographe, interprétative : vulnérabilité active) et a permis de montrer que l'offre de gestion des risques est articulée et bénéficie d'une forte cohérence de type « top down ». La structuration hiérarchique est toutefois fortement dépendante de la capacité du comité d'expert à caractériser et définir un scénario de menace appréhendable par l'ensemble de la chaîne de gestion (surveillance, alerte, préparation sauvegarde, zonage, travaux, ...). Cependant, l'importante robustesse de l'offre de gestion du risque de Séchilienne constatée (Figure C6), caractérisée par un fort degré d'intégration et de cohérence, ne doit pas masquer le fait que les fondements de cette offre de gestion reposent essentiellement à la fiabilité du scénario retenu.

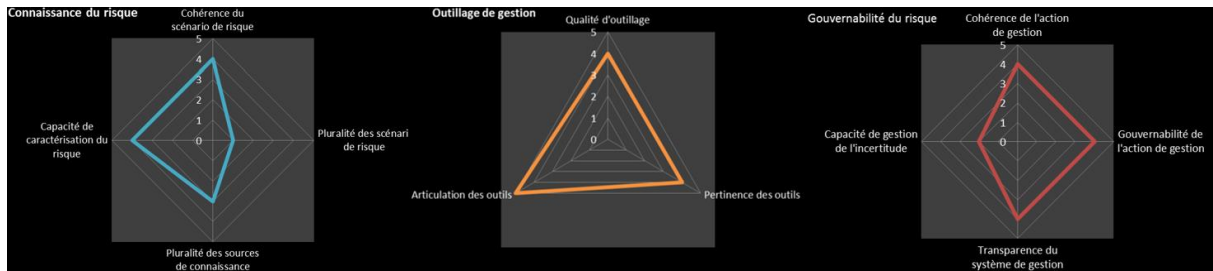


Figure C6. Evaluation de la vulnérabilité active associée à la connaissance du risque (gauche), à l'outillage lié à l'action de gestion (milieu) et à la gouvernabilité (droite) par évaluation de la satisfaction au moyen de questionnaires adressés aux acteurs principaux.

En ce qui concerne l'aléa, un travail préliminaire d'aide à la décision par construction d'un arbre de décision, incorporant les incertitudes, a été entrepris. Il s'est concentré principalement sur les scénarii envisagés par les entités en charge des alertes et donc du risque (telles qu'accessibles via les rapports ouverts), qui semblent minimiser tant l'impact d'un séisme sur la cinématique du mouvement de Séchilienne que la possibilité de rupture du lac barrage consécutif à l'effondrement d'une partie du versant (livrable 8.2, Schmidt et al., 2014).

En effet, actuellement le passage en vigilance dite de "phase 1" est effectué lors de l'occurrence d'un séisme de Magnitude $M > 4$ à moins de 20 km de distance. La justification de cette règle empirique n'apparaît dans aucun des documents à notre disposition ni dans les communications orales ou écrites avec les organismes en charge de la gestion du risque impliqués dans le projet SLAMS. L'étude réalisée dans le contexte de SLAMS (Tatard and Grasso, 2013) justifie l'utilisation de seuils basés sur des distances normalisées (Distance réelle / taille du séisme). En effet un séisme de magnitude 5-6 au-delà de 20 km de distance a une forte probabilité d'affecter le glissement, ceci étant non pris en compte dans les seuils actuels. Ces résultats fournissent une base scientifique qui permet aux services en charge du risque d'actualiser et d'intégrer les nouvelles règles d'interactions séismes glissement de terrains.

Dans le contexte de la formation de lac barrage, l'étude des bases de données internationales, met en évidence le non contrôle des temps de rupture des lacs-barrages (ces derniers étant organisés en loi de puissance). Si la mise en place d'une déviation de la route de vallée actuelle, réglerait à court terme les problèmes socio-économiques liés, en amont, à l'obstruction de la vallée, cette déviation ne règle pas en aval les problèmes d'inondations liées à la rupture de ce lac-barrage.

C.5 EXPLOITATION DES RESULTATS

Les résultats nombreux ont pour certains servi de base d'entrée à d'autres études. On pourra citer l'analyse historique de 25 ans de la gestion des risques, qui a permis d'élaborer un programme de constitution d'un collège d'experts. Egalement, il est notable que sans un modèle conceptuel d'écoulement de l'eau souterraine, il serait difficile de modéliser les conséquences des couplages hydromécaniques sur la déstabilisation du versant. Les résultats ont permis de fournir des livrables nombreux qui ont été communiqués lors de colloques nationaux ou internationaux à de nombreuses reprises (cf. éléments de valorisations). Plus d'une dizaine d'articles ont déjà été publiés auxquels s'ajouteront environ 5 articles en cours de finalisation.

C.6 DISCUSSION ET CONCLUSION

Le projet était ambitieux à plus d'un titre. Tout d'abord, il se proposait de réunir des acteurs ayant des activités, missions et préoccupations scientifiques différentes - opérationnels, sociologues, académiques- autour d'un projet de recherche se focalisant sur le mouvement de terrain de Séchilienne, qui reste un site sensible. Cette ambition s'est peu à peu concrétisée après des

tâtonnements portant notamment sur le contenu du volet interdisciplinaire, qu'il a fallu recentrer. Ensuite, ce projet était réellement multidisciplinaire dans sa construction de recherche, regroupant des compétences en sociologie, géographie humaine, sciences de la terre, hydrologie et mécanique. Les nombreuses réunions de travail ont montré que ces clivages étaient heureusement poreux et que les collaborations nécessaires ont été effectives dans plusieurs domaines. Dans chacune des disciplines, des verrous importants ont été levés aux niveaux scientifiques et sociétaux, et des données originales ont été acquises, nécessitant des développements importants de traitement du signal ou de modélisations numériques dans les communautés respectives. On pourra notamment citer l'originalité des approches sismologiques comme outil de surveillance, la compréhension d'un phénomène hydromécanique important sur la déstabilisation d'un mouvement de versant, les difficultés et apports liés à la reconstruction cinématique par datation, ou les propositions liées à l'expertise et la gestion des risques.

Des difficultés ont été rencontrées au cours du projet, liées à des problèmes d'instrumentation (sismologie comparative entre 2 réseaux différents, mesures hydrogéologiques en forage perturbées), de volonté et d'engagement interdisciplinaire de certains des acteurs ou de moyens humains qui ont particulièrement fait défaut lors des expériences numériques initialement programmées. Enfin, la construction d'un arbre de décision cohérent, intégrant l'ensemble des incertitudes était finalement beaucoup trop ambitieuse pour être mené à terme.

Quoi qu'il en soit, la plupart des livrables ont pu être fournis, certains non prévus au départ ayant été ajoutés. La plupart des résultats, que ce soit au niveau technique ou au niveau de la gestion des risques, auront un impact important dans le domaine des glissements de terrains, mais également au-delà, que ce soit sur les problématiques d'expertise et de données libres que sur les avancées en sismologie ou en hydromécanique qui concerneront d'autres types de risques naturels, voire de formation réservoir.

C.7 REFERENCES

Seules les références externes au projet sont reprises ici, les autres étant mentionnées dans la partie valorisation.

- Cappa F., Guglielmi Y., Merrien-Soukatchoff V., Mudry J., Bertrand C., and Charmoille A., 2004. Hydromechanical modeling of a large moving rock slope inferred from slope levelling coupled to spring long-term hydrochemical monitoring : example of the La Clapière landslide (Southern-Alps, France). *J Hydrol*, 291(1-2):67-90.
- Duranthon, J.-P., Effendiantz, L., Mémier, M., and Prévitali, I. 2003. Apport des méthodes topographiques et topométriques au suivi du versant rocheux instable des Ruines de Séchilienne. *Revue XYZ*, 94: 31-38.
- Guglielmi, Y., Vengeon, J.M., Bertrand, C., Mudry, J., Follacci, J.P., Giraud, A., 2002. Hydrogeochemistry: an investigation tool to evaluate infiltration into large moving rock masses (case study of La Clapière and Séchilienne alpine landslides). *Bull. Eng. Geol. Env.*, 61 (4), 311-324.
- Guglielmi Y., Cappa F., and Binet S., 2005. Coupling between hydrogeology and deformation of mountainous rock slopes : Insights of La Clapière area (Southern-Alps, France). *C R Géosciences*, 337:1154-1163.
- Korup, O., Clague, J.J., Hermanns, R.L., Hewitt, K., Strom, A.L., Weidinger, J.T., 2007. Giant landslides, topography, and erosion. *Earth Planet. Sci. Lett.* 261, 578–589.
- Meric O, Garambois S, Jongmans D, Wathelet M, Chatelain JL, Vengeon JM (2005). Application of geophysical methods for the investigation of the large gravitational mass movement of Séchilienne, France. *Canadian Geotechnical Journal*, 42:1105-1115.
- Vengeon, J.-M. 1998. Déformation et rupture des versants en terrain métamorphique anisotrope, PhD Thesis, University of Joseph Fourier, Grenoble.

D LISTE DES LIVRABLES

La liste des livrables est fournie ci-dessous. En rouge, les livrables abandonnés et en vert, les livrables non prévus au départ. Les livrables sont de natures différentes. Au final, 3 livrables ont été ajoutés par rapport à ce qui était prévu au départ, notamment dans les tâches 1 et 5. En revanche, 7 livrables ont dû être abandonnés, notamment dans les parties interdisciplinaires et numériques. La raison a été leur caractère trop ambitieux ou des problèmes de moyens humains (départs, problèmes de doctorats).

Les rapports sont disponibles par ftp à l'adresse suivante :

<ftp://ftp-isterre.ujf-grenoble.fr/pub/isterre/garambos/ANRSLAMS/LIVRABLES/>

État *	N°	Titre	Nature	Partenaires	Commentaires
Livré et mis à jours tous les 3 mois (site WEB OMIV)	1.1	Catalogue de signaux sismiques (éboulements, microfractures, séismes)	Catalogu e	<u>ISTERRE</u>	En accès internet http://omiv.osug.fr/SECHILIENNE/SISMO/catalogs.html
Livré, mis à jours	1.2	Mise en accès des données sismologiques sous BDSIS	Base de données	<u>ISTERRE</u>	En accès internet http://f1.ujf-grenoble.fr/BDisis/
Livré M48	1.3	Effets de site sismiques	Rapport	<u>ISTERRE</u>	Site ftp dédié
Livré M39	1.4	Intérêt de la sismologie comme moyen de surveillance	Guide	<u>ISTERRE</u> , <u>INERIS</u>	Site ftp dédié,
Livré M36	1.5	Relation entre apports hydriques et déplacements de surface – analyse statistique	Rapport	<u>CETE- LYON</u>	Site ftp dédié
Livré M44	1.6	Intérêt du scan-laser et imagerie optique pour la surveillance	Rapport	<u>CETE- LYON</u>	Site ftp dédié
Livré M36 Non prévu	1.7	Détection des mouvements de versant à partir d'images terrestres : finalisation de la méthode automatique de traitement	Rapport	<u>CETE- LYON</u>	Site ftp dédié
Livré M28 Non Prévu	1.8	Sondages et diagraphies	Comptes -rendus	<u>CETE- LYON</u>	Site ftp dédié, données sur demande
Livré M48	2.1	Modèle hydrogéologique global	Article	<u>GEOSCIEN CES AZUR</u>	Ces travaux font l'objet d'un article soumis à « Hydrogeology Journal », site ftp dédié.
Livré, M48	2.2	Simulations hydromécaniques	Article	<u>GEOSCIEN CES AZUR</u>	Ces travaux font l'objet d'un article publié à GRL, site ftp dédié.
Livré, M36	3.1	Graphiques matrice satisfaction/importance	Rapport	<u>PARN</u>	Fusionné avec le livrable L81, site ftp dédié
Livré M22	3.2	Gestion du risque par WEB information/communication	Site WEB + Note techniqu e	<u>INERIS</u>	http://cenaris.ineris.fr/SYTGEMweb/web/requeteurGeo.php/login Site ftp dédié
Changement de nature	3.3	Ateliers interdisciplinaires	Actes	<u>DECROP E&R</u>	Les ateliers ont eu lieu avec des CR. Les actes ont été abandonnés.
Livré, M42	3.4	pour un guide de bonnes pratiques de l'expertise publique en matière de Mouvements de terrain	Guide	<u>GD E&R ISTERRE</u>	Changement de l'interdisciplinaire vers l'expertise Site ftp dédié

État *	N°	Titre	Nature	Partenaires	Commentaires
Livré M30	4.1	Synthèse de l'histoire du risque des Ruines	Rapport	<u>GD E&R</u> <u>PARN</u>	Site ftp dédié
Livré M18 puis actualisé	4.2	Base documentaire des travaux disponibles	Rapport + données + base WEB	<u>PARN</u>	Site ftp dédié + site web
Livré M48	5.1	Carte de taux de déplacements en fonction du temps	Carte	<u>ISTERRE</u>	Site ftp dédié
Livré M24	5.2	Image 3D de pourcentage de vides avec validation de terrain	Image 3D dans article	<u>ISTERRE</u>	Article publié Site ftp dédié
Livré M35	5.3	Tableau des paramètres géotechniques	Tableau	<u>CETE-LYON</u> <u>ISTERRE</u>	Site ftp dédié
Abandonné	5.4	Images 3D montrant l'évolution temporelle de la déformation gravitaire	Rapport	<u>ISTERRE</u>	Trop ambitieux
Livré M42 Non prévu	5.5	Exploitation des données sismiques et sismologiques	Rapport	<u>ISTERRE</u>	Site ftp dédié

État *	N°	Titre	Nature	Partenaires	Commentaires
Abandonné	6.1	Conséquences de forçages extérieurs extrêmes	Rapport	<u>ISTERRE</u>	La partie numérique a été peu développée – manque moyens humains
Abandonné	6.2	Conséquence ablation zone frontale	Rapport	<u>CETE-LYON</u>	difficultés liées à la forte dépendance au confinement du module de Young et des changements de logiciels de calculs aux éléments finis au CETE de Lyon.
Abandonné	7.1	Cartes de vulnérabilité/zonage d'éboulements	Rapport	<u>ISTERRE</u>	La partie numérique a été peu développée
Abandonné	7.2	Jeu de données d'entrée de dépôts d'éboulements à la communauté scientifique	Base de données	<u>ISTERRE</u>	La partie numérique a été peu développée
Livré, M36	8.1	Vulnérabilité active	Graphiques « radar »	<u>PARN</u>	Fusion avec L31, Site ftp dédié
Livré, M48	8.2	Construction arbre de décision	Rapport	<u>ISTERRE</u>	Site ftp dédié
Abandonné	8.3	Responsabilité et accessibilité	Actes	<u>PARN</u>	Trop ambitieux

E IMPACT DU PROJET

E.1 INDICATEURS D'IMPACT

Nombre de publications et de communications (à détailler en E.2)

On distinguera dans la liste les publications/communications mono-partenaire, de celles pluri-partenaires.

		Publications multi-partenaires	Publications mono-partenaire
International	Revue à comité de lecture	2	7
	Ouvrages ou chapitres d'ouvrage		
	Communications (conférence)	4	23
France	Revue à comité de lecture	1	
	Ouvrages ou chapitres d'ouvrage		
	Communications (conférence)	4	14
Actions de diffusion	Articles vulgarisation		
	Conférences vulgarisation		
	Autres		

E.2 LISTE DES PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS

PUBLICATIONS MULTI-PARTENAIRES

Cappa, F., Y. Guglielmi, S. Viseur, and S. Garambois, Deep fluids can facilitate rupture of slow-moving giant landslides as a result of stress transfer and frictional weakening, *Geophysical Research Letters*, VOL. 41, 1–6, doi:10.1002/2013GL058566, 201.

Leroux O., Jongmans D., Kasperski J., Schwartz S., Potherat P., Lebruc V., Lagabrielle R and Meric O., 2011, Deep geophysical investigation of the large Séchilienne landslide (Western Alps, France) and calibration with geological data, *Engineering Geology*, 120, 18-31.

PUBLICATIONS MONO-PARTENAIRE

Decrop G., 2014, L'expertise en question dans la gestion des risques naturels, le cas des Ruines de Séchilienne, *Nature Sciences Sociétés*, accepté.

Derode, B., F. Cappa, Y. Guglielmi, and J. Rutqvist (2013), Coupled seismo-hydromechanical monitoring of inelastic effects on injection-induced fracture permeability, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 61, 266-274, doi:10.1016/j.ijrmms.2013.03.008.

Helmstetter, A. and S. Garambois, 2010, Seismic monitoring of Séchilienne Rockslide (French Alps): analysis of seismic signals and their correlation with rainfalls, *J. Geophys. Res.*, 115, F03016, doi:10.1029/2009JF001532.

Kasperski J., Delacourt C., Allemand P., Pothérat P., Jaud M., Varrel E. (2010) - Application of a Terrestrial Laser Scanner (TLS) to the Study of the Séchilienne Landslide (Isère, France), *Remote Sens.* 2010, 2, 2785-2802; doi:10.3390/rs122785.

- Lacroix, P. and A. Helmstetter (2011), Localisation of seismic signals associated with micro-earthquakes and rockfalls on the Séchilienne landslide, French Alps, *Bull. Seism. Soc. Am.* 101(1), 341-353, doi: 10.1785/0120100110.
- Lebrouc V., S. Schwartz, L. Baillel, D. Jongmans, J.F. Gamond, 2013, Modeling permafrost extension in a rock slope since the Last Glacial Maximum: Application to the large Séchilienne landslide (French Alps), *Geomorphology*, 198, 189-2000.
- Tatard L. & Grasso J.-R., 2012, Controls of earthquake faulting style on near field landslide triggering: the role of coseismic slip amplitude and orientation, *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, VOL. 118, 2953–2964, doi:10.1002/jgrb.50215, 2013.
- Vallet, A., C. Bertrand, et J. Mudry, (2013), Effective rainfall: a significant parameter to improve understanding of deep-seated rainfall triggering landslide - a simple computation temperature based method applied to Séchilienne unstable slope (French Alps), *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 10 (7) (juillet 10): 8945-8991. doi:10.5194/hessd-10-8945-2013.

PUBLICATIONS EN FINALISATION

- Garambois S, Voisin C., Massey C. & P. Guéguen, Assessment of site effects on landslides, a comparative study, 2014, to be submitted to *Natural Hazard and Earth Systems*.
- Schmidt A., Grasso J.R. & A. Helmstetter, 2014, Rockfalls predictability in the Séchilienne corridor (France), in preparation, to be submitted to *Natural Hazard and Earth Systems*.
- Vallet, A., C. Bertrand, D. Varron, & J. Mudry, Hydrogeological threshold using effective rainfall and support vector machine (SVM) applied to a deep seated unstable slope (Séchilienne, French Alps), in preparation, planned to submit January 2014.
- Vallet, A., J.-B. Charlier, C. Bertrand, & J. Mudry, Seasonal and long term analysis of precipitation-displacement relationships on a deep seated unstable slope (Séchilienne, French Alps), in preparation, planned to submit February 2014.

COMMUNICATIONS PLURI-PARTENAIRES

- Chanut, M.-A. A.Vallet, L.Dubois, J.-P. Duranthon, Mouvement de versant de Séchilienne : relations entre déplacements de surface et précipitations – analyse statistique, Journées Aléas Gravitaires, 17-18 Septembre 2013, Grenoble.
- Grasso, J.-R. , S. Garambois, D; Jongmans, A. Helmstetter, T. Lebourg, J.-P. Malet, W. Berolo, R. Béthoux, L. Daras, and P. Ulrich, The OMIV Observatory on landslides - Observing with Multi-parameters the Instability of Versants, EGU Vienna, 2-7 May 2010.
- Kasperski, J., Jongmans, D., Lagabrielle, R., Pothérat, P., Méric, O., 2010. Apport des reconnaissances profondes par méthodes géophysiques sur le mouvement de versant de Séchilienne (Isère). Actes du Rock Slope Stability symposium, Paris, 24-25 novembre 2010.
- Lebrouc V., S.Schwartz, L. Baillel, D. Jongmans, J.F Gamond, J. Carcaillet, O. Le Roux, D.Bourlès, R.Braucher, 2011, Dynamic characterisation of gravitational movements affecting the southern edge of Belledonne massif(French Alps) : contribution of CRE dating and thermal modeling. , EGU, Vienne (Austria).
- Lebrouc V., S.Schwartz, L. Baillel, D. Jongmans, J.F Gamond, J. Carcaillet, O. Le Roux, D.Bourlès, R.Braucher, CRE dating on the scarps of large landslides affecting the Belledonne massif (French Alps), EGU, Vienne (Austria), 2012.
- Lebrouc V., S.Schwartz, L. Baillel, D. Jongmans, J.F Gamond, Julien Carcaillet, O. Le Roux, D.Bourlès, R.Braucher, 2011, Caractérisation dynamique des mouvements gravitaires affectant la bordure sud du massif de Belledonne : apport des datations cosmogéniques ¹⁰Be et de la modélisation thermique, Journées Aléa Gravitaire, Strasbourg.
- Vallet, A., J.-B. Charlier, M.-A. Chanut, C. Bertrand, & J. Mudry (2013), Impact of rainfall and snowmelt on unstable slope destabilisation using wavelet analysis (Séchilienne, French Alps), Poster présenté à *European Geosciences Union: general assembly*, avril 7, Vienna, Austria.

Vallet, A., J.-B. Charlier, M.-A. Chanut, L. Dubois, & J. Mudry (2013), Analyse saisonnière et long terme des relations précipitation-déplacement d'un mouvement de terrain de grande profondeur (Séchilienne, Alpes françaises), In : *Journées Aléa Gravitaire 2013. Grenoble, France.*

COMMUNICATIONS MONO-PARTENAIRE

Baudement, C., C. Bertrand, Y. Guglielmi, S. Viseur, A. Vallet, et F. Cappa (2013a), Quantification de la dégradation mécanique et chimique d'un versant instable : approche géologique, hydromécanique et hydrochimique », In : *Journées Aléa Gravitaire 2013. Grenoble, France.*

Baudement, C., C. Bertrand, Y. Guglielmi, S. Viseur, A. Vallet, et F. Cappa (2013b), Quantification de la dégradation mécanique et chimique d'un versant instable : approche géologique, hydromécanique et hydrochimique. *Oral présenté à Journée OSU THETA, octobre 18, Frasnès, France.*

Bertrand, C., V. Marc, A. Vallet, J. Mudry, et A.-D. Schmitt (2013), Apport de l'hydrogéochimie pour la caractérisation des mouvements gravitaires. In : *Journées Aléa Gravitaire 2013. Grenoble, France.*

Bertrand, C., A. Vallet, & J. Mudry (2013), Approche hydrochimique de la dégradation mécanique du versant instable de Séchilienne. In : *Journées Aléa Gravitaire 2013. Grenoble, France.*

Bigarré P., Verdel T., Klein E., Gueniffey Y. Cloud monitoring: an innovative approach for the prevention of landslide risks, Proceedings of the Second World Landslide Forum – 3-7 October 2011, Rome.

Chanut M.-A., Barthelet V. & Kasperski J. (2011) Contribution de l'imagerie de face pour l'analyse des mouvements de terrain : application au versant de Séchilienne. Journées aléa gravitaire, 07-08 septembre 2011, Strasbourg, France.

Chanut M.-A., Barthelet V. & Kasperski J. (2012) Corrélation d'images : méthode originale de tri automatique des photographies. Journées Nationales de Géotechnique et Géologie de l'Ingénieur JNGG2012, 04-06 juillet 2012, Bordeaux, France.

Chanut M.-A., Kasperski J., Bièvre G. & Duranthon J.-P. (2012) Analyse cinématique actuelle des ruines de Séchilienne. Journées Nationales de Géotechnique et Géologie de l'Ingénieur JNGG2012, 04-06 juillet 2012, Bordeaux, France.

Derode B., Cappa F., Guglielmi Y., Gaffet S., and Monfret T., 2011. Seismicity and hydromechanical behavior of a fractured porous rock under a high-pressure fluid injection, EDP Sciences, doi: 10.1051/idust/201101003.

Derode B., Cappa F., and Guglielmi Y., 2012. Quantifying the effect of fluids and mechanical weakening of fractures and the implications for the rupture of large landslides. 74th EAGE Conference

Derode B., Cappa F., and Guglielmi Y., 2012, Different seismic signatures of fractures slip and their correlations with fluid pressures in in-situ rupture experiments, EGU2012-4457.

Derode B., Cappa F., and Guglielmi Y., 2012. Seismicity triggered by stress transfer from a fluid injection-induced fracture activation, EGU2012-4473

Derode B., Cappa F., Guglielmi Y., Gaffet S. and Monfret T., 2011. Seismicity and hydromechanical behavior of a fractured porous rock under a high pressure fluid injection. Geophysical Research Abstracts, vol. 13, EGU2011-6448-1, EGU General Assembly 2011, Vienna. (Poster).

Derode B., Cappa F., Guglielmi Y., Gaffer S., and T. Monfret, 2010, Poroelastic waves distortion related to the damage of an unsaturated fractured-porous carbonate rock by high pressure fluid injections, conferences IDUST, June 9-11, Apt, Provence, France. (Oral)

Dünner C., Klein E., Charmoille A., Bigarré P., 2010, Stratégie de surveillance multi- paramètres appliquée aux versants instables : exemple des Ruines de Séchilienne (Isère, 38), Rock Slope Stability Symposium, November 24-25, 2010, Paris.

Dünner C., Klein E., Bigarré P., 2011, Surveillance multi-paramètres appliquée aux versants instables : exemple des Ruines de Séchilienne (Isère, 38). Journées "aléa gravitaire", jag 2011 – 7 & 8 Septembre 2011, Strasbourg, France, p. 91-97.

- Garambois S., Jongmans D. & A. Helmstetter, 2012, Seismic characterization of landslides and the emergence of seismic monitoring, EAGE, 74th Cong of EAGE, Copenhagen, juin 2012.
- Grasso J.-R. Tatard L., Gorum T. & Van Westen C., 2011, Static versus dynamics triggering of Earthquake-induced Landslides: implication for prediction of triggered landslide locations, International Symposium on Earthquake Induced Landslides and Disaster Mitigation at the 3rd anniversary of the Wenchuan Earthquake, May 12-15, 2011, Chengdu, China.
- Grasso J.-R., L. Tatard, T. Gorum, and Cees Van Westen, 2011, Seismically induced landslides and seismic landslide hazard analysis - Are earthquake-induced landslides driven by the permanent deformation of slope?, WLF2-2011- world landslide forum, Roma, Italia, October 2011, L25.
- Grasso J.-R., 2011, Seismically induced landslides and seismic landslide hazard analysis - Early response to earthquake landslide interactions in mountain area: fast identification of earthquake-induced landslide prone area using early aftershocks, WLF2-2011- world landslide forum, Roma, Italia, October 2011, L25.
- Grasso J.-R., Early response to earthquake landslide interactions in mountain area: Fast identification of earthquake-induced landslide prone area using earthquake magnitude, faulting style and early aftershocks, Triggered landslide workshop, ITC, Twente University, Netherlands, 4-5 July 2011.
- Helmstetter, A., S. Garambois, J. Kasperski, J-P Duranthon, and P. Pothérat, Seismic monitoring of the Séchilienne Rockslide (French Alps): analysis of seismic signals and their correlation with rainfalls, EGU Vienna, 2-7 May 2010.
- Helmstetter A. and S. Garambois, Seismic monitoring of Séchilienne rockslide, ESC, Sept 2010, Poster Presentation, Montpellier.
- Helmstetter, A., S. Garambois, and P. Lacroix, Seismic monitoring of Séchilienne Rockslide (French Alps): micro-seismicity, rockfalls, and triggering by rainfall, Congress on physico chemical processes in seismic faults, Padova, Italy, Nov 2010 (conf. Invitée)
- Helmstetter, A. Ecoute sismique du mouvement de terrain de Séchilienne. Séminaire INERIS Nancy, 16 Février 2011.
- Helmstetter, A. et S. Garambois, Ecoute sismique du mouvement de terrain de Séchilienne. Soumis, Journées "aléa gravitaire", jag 2011 – 7 & 8 Septembre 2011, Strasbourg, France.
- Helmstetter, A., Landslides deformation : scaling and triggering mechanisms, workshop "Materials Deformation : Fluctuations, Scaling, Predictability", Les Houches, 23-26 Janvier 2012 (conf invitée).
- Helmstetter, A., Landslides deformation : scaling and triggering mechanisms, workshop "Materials Deformation : Fluctuations, Scaling, Predictability", Les Houches, 23-26 Janvier 2012 ([pdf](#)) (conf invitée)
- Helmstetter, A., Ecoute sismique des mouvements gravitaires, Journées Aléas Gravitaires, 17-18 Septembre 2013, Grenoble.
- Kasperski, J., Pothérat, P., Duranthon, J.-P., 2010. Le mouvement de versant de Séchilienne : point sur l'activité du phénomène. Actes du Rock Slope Stability symposium, Paris, 24-25 novembre 2010 ;
- Kasperski, J., Pothérat, P., Duranthon, J.-P., 2010, Le mouvement de versant de Séchilienne : apport de nouvelles techniques à la connaissance cinématique, JNGG, Grenoble, 7-9 Juillet 2010.
- Kasperski J. & E. Varrel, 2010, Characterization of the active zone of the Séchilienne landslide using terrestrial laser scanning, 11th International Association for Engineering Geology congress, Auckland, NZ, septembre 2010.
- Klein E., Occhiena C., Pirulli M., Dünner C., Bigarré P., Scavia C., Analysis of potential rock mass movement through microseismic monitoring, Proceedings of the Second World Landslide Forum – 3-7 October 2011, Rome.
- Lacroix, P. and A. Helmstetter, Location of seismic signals associated with micro-earthquakes and rockfalls on the Séchilienne landslide, French Alps, ESC, Sept 2010, Poster Presentation, Montpellier.
- Maiolino, S., 2013. A general criterion for geomechanics: extension to jointed rocks masses. ASEM2013, Jeju, Korea.
- Pothérat P. & Duranthon, J.-P., 2010, The monitoring of unstable rock masses applied to risk management, 11th International Association for Engineering Geology congress, Auckland, NZ, septembre 2010.

- Schwartz S., D. Jongmans, V. Lebruc, L. Baillet, J.F. Gamond, Modélisation thermique de l'extension du pergélisol depuis le dernier maximum glaciaire, application au versant de Séchilienne (Alpes Occidentales), Journées Aléa Gravitaire, septembre 2013, Grenoble.
- Vallet, Aurélien, Catherine Bertrand, Davit Varron, et Jacques Mudry (2014), Hydrogeological threshold using effective rainfall and support vector machine (SVM) applied to a deep seated unstable slope (Séchilienne, French Alps), *In : IAEG XII CONGRESS: Engineering Geology for Society and Territory. Turino, Italia.*

E.3 BILAN ET SUIVI DES PERSONNELS RECRUTES EN CDD (HORS STAGIAIRES)

Identification				Avant le recrutement sur le projet			Recrutement sur le projet				Après le projet				
Nom et prénom	Sexe H/F	Adresse email (1)	Date des dernières nouvelles	Dernier diplôme obtenu au moment du recrutement	Lieu d'études (France, UE, hors UE)	Expérience prof. Antérieure, y compris post-docs (ans)	Partenaire ayant embauché la personne	Poste dans le projet (2)	Durée missions (mois) (3)	Date de fin de mission sur le projet	Devenir professionnel (4)	Type d'employeur (5)	Type d'emploi (6)	Lien au projet ANR (7)	Valorisation expérience (8)
LEBROUC V.	H	vincent.lebrouc@ujf-grenoble.fr	Suivi journalier	M2P	Univ. Montpellier	/ /	ISTERRE	Doctorant	87 mois financés par le projet	Thèse soutenue le 25 octobre 2013	En recherche d'emploi	/	/	/	/
CHAMOND L.	H	/	Décembre 2010	M2P	Univ. Montpellier	/	ISTERRE	Doctorant	8 mois (démission)	Décembre 2010	Inconnu	Inconnu	Inconnu	Inconnu	Inconnu
DERODE B.	H	derode@geoazur.unice.fr	Janvier 2014	M2 recherche	Univ. De Nice	/	GEOAZUR	Doctorant	36	Juin 2013	Post-doctorant	Université Chili, Santiago	Chercheur	oui	oui
SENECHAL P.	F	derode@geoazur.unice.fr	Janvier 2014	Thèse	Univ. Pau	Post- Doc, IR	ISTERRE	Post-doc	19	Juillet 2013	CDI	Université Pau	Ingénieur	Oui	Oui
SCHMIDT A.	F	ASchmid@ntu.edu.sg	Juin 2012	Thèse	Univ. J. Fourier	Thèse	ISTERRE	Post-doc	1.2	Mai 2012	Research fellow	Académique, Earth observatory of Singapour	Chercheur	Oui	oui
BOTTELIN P.	H	Pierre.Bottelin@ujf-grenoble.fr	Février 2014	Ingénieur	France	Ingénieur	ISTERRE	Ingénieur	3	Décembre 2013	Doctorant puis Post-doctorant	CNRS	Chercheur	Oui	Oui

ANNEXE 1

RESULTATS ET PERSPECTIVES PAR TACHE

Le projet était initialement structuré en 8 tâches distinctes qui sont résumées dans la figure ci-dessous. Si certaines tâches portant sur le volet numérique ont eu des difficultés et n'ont pas pu être complètement finalisées (tâches 6 & 7), d'autres ont eu des avancées significatives qui ne pouvaient être résumées facilement dans le rapport principal. On propose dans cette annexe de fournir une description plus détaillée des avancées majeures dans les l'ensemble des tâches (Figure 1), tout en les repositionnant dans le contexte initial et en proposant des perspectives à moyen terme. Cette annexe sera ainsi constituée de 7 parties pour chacune des tâches menées à bien, les tâches 6 et 7 étant rassemblées.

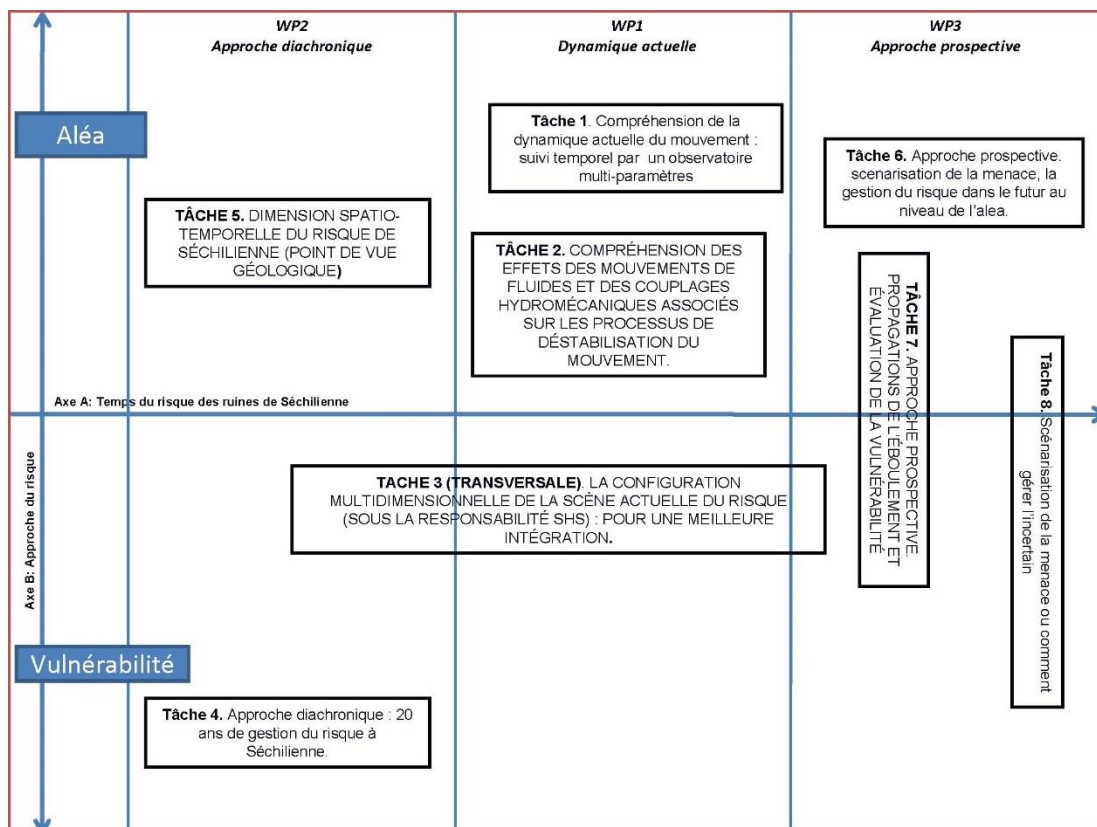


Figure 1. Schéma organisationnel initial du projet et structuration.

Tâche 1 - Compréhension de la dynamique actuelle du mouvement. Suivi temporel par un observatoire multi-paramètres.

Coordinateur : Agnès Helmstetter (ISTerre)

1. Enjeux et problématiques, état de l'art

Un réseau de surveillance a été mis en place à Séchilienne à partir de 1985 par le CEREMA de Lyon (<http://www.versant-sechilienne.developpement-durable.gouv.fr/>) pour mesurer les déplacements superficiels ainsi que les données météorologiques. Ce réseau, qui permet de quantifier la cinématique 3D des mouvements, est la base du système d'alerte. Depuis 2007, des activités de recherches (sismologie, hydrogéophysique) sont menées sur le site dans le cadre de l'Observatoire National OMIV de l'INSU/CNRS (<http://omiv.osug.fr/SECHILIENNE>) pour apporter des mesures complémentaires visant à mieux appréhender le mécanisme de déformation en profondeur du versant de Séchilienne. Avec la réalisation en 2009 de plusieurs forages profonds en 2009 dans la zone instable (équipés de sismomètres, inclinomètres, piézomètre), le mouvement de terrain de Séchilienne est l'un des mieux instrumentés à l'échelle mondiale. L'ensemble des observations montrent une accélération du mouvement depuis 1985; le phénomène s'amplifie depuis la fin de l'année 2009.

2. Objectifs scientifiques

Les objectifs fixés au démarrage de cette tâche étaient les suivants :

- délimiter le volume de la zone instable, en particulier en profondeur ;
- suivre et prédire l'évolution temporelle du mouvement (mouvement et endommagement) ;
- identifier les facteurs externes (précipitations, gel/dégel, séismes) qui influencent la dynamique du mouvement.

Pour y répondre, de nouveaux instruments ont été installés dans le cadre du projet SLAMS (caméra, appareils photos, sismomètres et GPS), en complément des mesures existantes. Des études de tomographie active ont également été réalisées. Enfin, de nouvelles méthodes de traitement des données ont été également testées puis mises en œuvre pour améliorer l'expertise des données multi-paramètres en temps réel.

3. Sismologie

Les principaux résultats obtenus en sismologie sont :

- la détection, classification, caractérisation et localisation quasi-automatique des événements sismiques (éboulements, microséismes). En particulier, l'écoute sismique permet de détecter en temps quasi-réel des éboulements et d'estimer leur volume.
- la mesure des vitesses des ondes sismiques dans le versant, utile pour identifier les zones instables et améliorer la localisation des sources sismiques.
- la mise en évidence d'effets de site (amplification du mouvement du sol pendant un séisme), qui augmentent le risque de déstabilisation du mouvement par un séisme.

3.1 Réseaux sismologiques

Le suivi sismologique a été réalisé par deux dispositifs (Figure 1) :

- celui géré par ISTERre, installé en Mai 2007 dans le cadre d'OMIV : composé de trois antennes en surface et dans la galerie de reconnaissance. Il a été complété en Juillet 2012 et Août 2013 par trois stations supplémentaires financées et gérées par le RAP,
- celui installé par l'INERIS fin 2009 dans le cadre du projet d'expertise et appui technique au MEDDE CENARIS et composé uniquement de capteurs en profondeur (dans un forage profond et la galerie de reconnaissance).

La figure 1 montre une carte de tous les capteurs sismologiques installés.

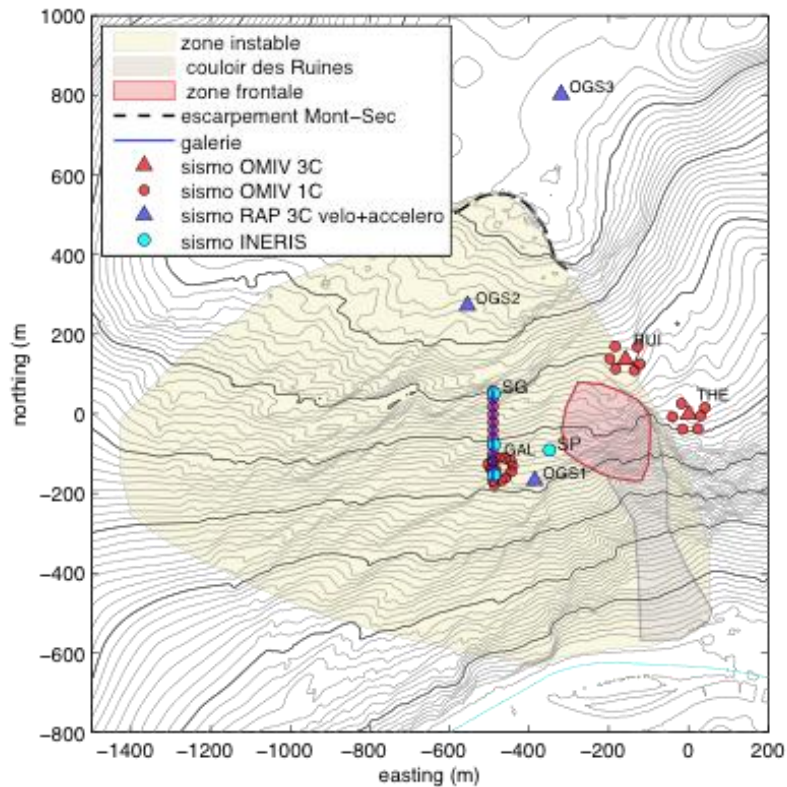


Figure 1 : Plan du réseau sismologique. Certains capteurs sont en profondeur dans la galerie ou dans un forage (stations SG, GAL et SP).

3.2. Détection et classification des sources sismiques

Les données des stations RAP et OMIV sont rapatriées et traitées en temps réel. On utilise ensuite des méthodes de détection en temps quasi-réel (mise à jour chaque heure). Les signaux sont détectés automatiquement en analysant le spectrogramme du signal. Les événements sont ensuite

classifiés de manière partiellement automatique en fonction de leur forme, contenu fréquentiel, durée et de la vitesse apparente des ondes (Helmstetter et Garambois, 2010).

Les signaux liés à l'activité microsismique du versant, présentent une grande variabilité en termes de formes d'ondes, de contenu fréquentiel, d'amplitude. D'une manière générale, on distingue principalement 3 classes d'enregistrements :

- des éboulements qui se caractérisent par des durées de quelques dizaines de secondes à plusieurs minutes), avec une suite de pics (impacts et rebonds de blocs), et un contenu fréquentiel entre 1 et 100 Hz. La position de la source se propage vers le bas de la pente,
- des micro-séismes caractérisés par des signaux plus courts (quelques secondes), associés à l'ouverture de fractures ou à du glissement,
- des chutes de blocs en fond de galerie de reconnaissance qui se manifestent par des signaux hautes fréquences et de courte durée et qui sont associées soit au vieillissement naturel des parois de la galerie soit à un mécanisme de déformation en grand de l'encaissant de la galerie.
- des séismes locaux et régionaux, externes au glissement. Les sismogrammes associées présentent alors des ondes P et S distinctes et une vitesse apparente élevée (angle d'incidence élevé) ;

Pour la majorité des événements internes au glissement, les sismogrammes présentent des arrivées d'ondes émergentes, ce qui complique le pointé des temps d'arrivée et le calcul des angles de polarisation.

La liste des événements détectés par le réseau sismologique d'ISTerre est disponible sur la page web : <http://omiv.osug.fr/SECHILIENNE/SISMO/rap.html>. Cette page donne aussi accès aux données sismologiques, aux figures des sismogrammes et spectrogrammes pour chaque événement ainsi qu'à l'évolution temporelle du taux d'activité pour différents périodes de temps.

La comparaison des catalogues obtenus par ISTerre et par l'INERIS montre globalement des résultats similaires. Les deux dispositifs enregistrent une augmentation significative de l'activité microsismique sur la durée du projet (Figures 2 et 8). La fin de l'année 2013 a été particulièrement active, avec un pic sans précédent d'activité (en nombre d'événements par jour) en octobre 2013. Le 7 décembre 2013 un éboulement de quelques milliers de mètres cube (volume estimé entre 2500 et 3000 m³), le plus important depuis 2007, a également été observé.

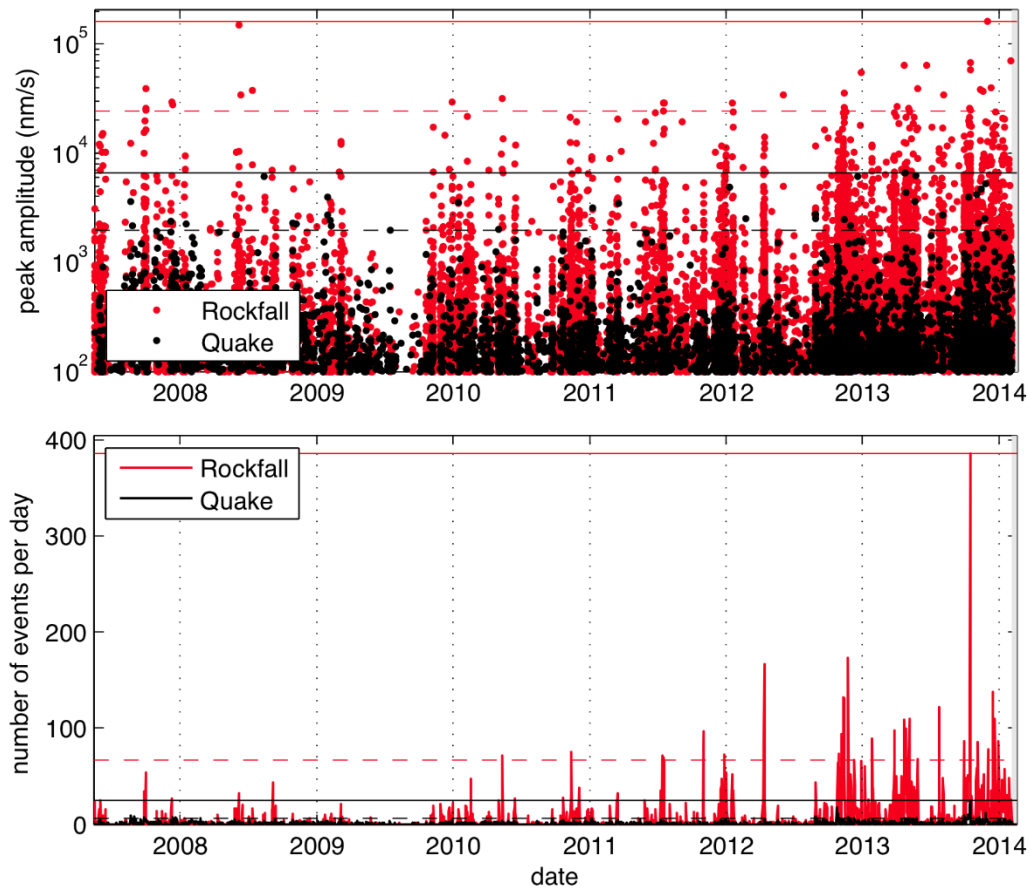


Figure 2 : variation temporelle de l’amplitude et du nombre d’événements internes au glissement (éboulements en rouge et micro-séismes en noir) depuis l’installation du réseau sismologique OMIV.

3.3 Localisation des sources sismiques

La localisation des sources sismiques à Séchilienne est difficile à cause de l’hétérogénéité des vitesses des ondes sismiques au sein de glissement. La localisation nécessite un modèle de vitesse, mais celui-ci est encore très mal contraint.

Le réseau sismologique OMIV, constitué de 3 antennes, permet de localiser les sources sismiques en analysant la corrélation entre traces (Lacroix et Helmstetter, 2011). Ces méthodes de localisation ont l’avantage d’être automatiques et bien adaptées aux signaux peu impulsifs tels que ceux enregistrés à Séchilienne. Ces méthodes ont été validées à l’aide des tirs. L’erreur de localisation (en horizontal et vertical) à l’intérieur du réseau est de l’ordre de 50 m (Lacroix et Helmstetter, 2011), mais pourrait s’améliorer dès qu’un modèle de vitesse 3D sera disponible. Un certain nombre d’éboulements ont aussi été visualisés sur les images de la caméra de surveillance du CEREMA Lyon. Ces observations ont permis de valider la classification de ces signaux et leur localisation. La plupart des éboulements sont localisés dans les Ruines, mais aussi plus à l’Ouest (Figure 3). Les micro-séismes sont essentiellement localisés dans la zone active, où le déplacement atteint plusieurs m/an.

L’INERIS utilise une méthode de localisation différente, basée sur le pointé des temps d’arrivée et la polarisation du signal sur les capteurs 3C. Le calibrage du dispositif d’écoute microsismique a été réalisé à l’aide de 32 tirs de surface réalisés en juin 2010 lors d’une campagne de mesure sismique haute-résolution en bordure Nord-ouest de la zone active (Dunner et al., 2010). Ce calibrage a permis d’élaborer un modèle de vitesse d’ondes sismiques présentant des contrastes

importants entre les couches superficielles ($V_p \sim 1400 \text{ m.s-1}$) et les couches plus profondes ($V_p \sim 4000 \text{ m.s-1}$ à 80 m de profondeur). Ce modèle a permis de relocaliser les tirs avec une erreur de l'ordre de 50 m dans le plan horizontal et de 45 m dans le plan vertical. Toutefois, comme la grande majorité des sismogrammes présente des arrivées d'ondes émergentes, l'analyse en localisation des événements par inversion des temps d'arrivées n'a pas pu fournir les résultats attendus. Les travaux de localisation des sources par analyse de forme d'ondes sont encore en cours à la date du présent rapport.

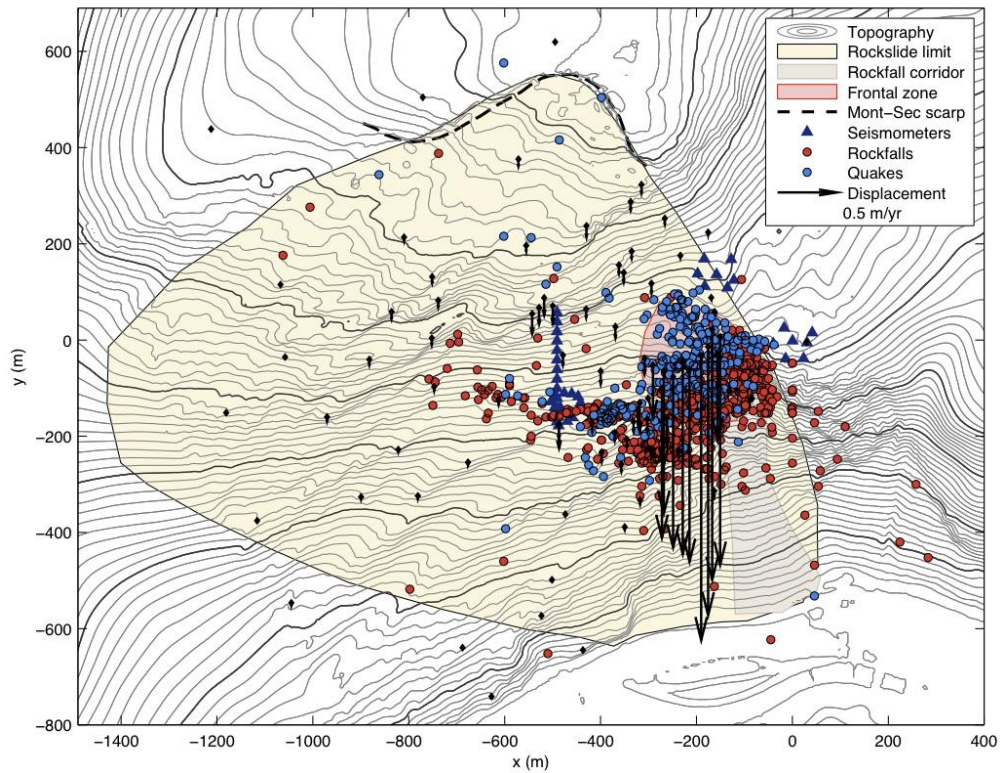


Figure 3 : Carte des éboulements (cercles rouges) et microséismes (cercles bleus). Les flèches montrent les vecteurs déplacements mesurés par le CEREMA Lyon.

3.4 Estimation du volume des éboulements à partir des signaux sismiques

L'écoute sismique, comme aussi le radar ULB (Pothérat et al., 2010), permet la détection des éboulements par tous les temps, aussi bien de jour comme de nuit. Plus de 35000 éboulements ont été détectés entre 2007 et Janvier 2014. Pour certains, une estimation du volume est disponible (observations sur le terrain, photos, vidéo). Il a ainsi été possible d'établir empiriquement une relation entre le volume V de l'éboulement et la magnitude m du signal sismique $V \approx 18.10^{(1.5m)} m^3$.

3.5 Effets de site sismologiques à Séchilienne

Nous avons étudié l'amplification du mouvement du sol pour des capteurs dans la zone instable (OGS1 et OGS2) par rapport à une station de référence en dehors du mouvement de versant (OGS3, Mont-Sec). Pour cela, nous avons comparé différentes données sismologiques (accélérogrammes et vélocimétriques) et différentes méthodes (rapports spectraux composante/composante et méthode H/V). L'ensemble de ces analyses est résumé dans le livrable 1.3. Cette comparaison a montré des résultats cohérents sur les spectres d'amplification, et on a fait le choix des capteurs vélocimétriques pour leur contenu fréquentiel et leur sensibilité pour des excitations modérées. Quatre séismes présentant des azimuts différents ont été analysés.

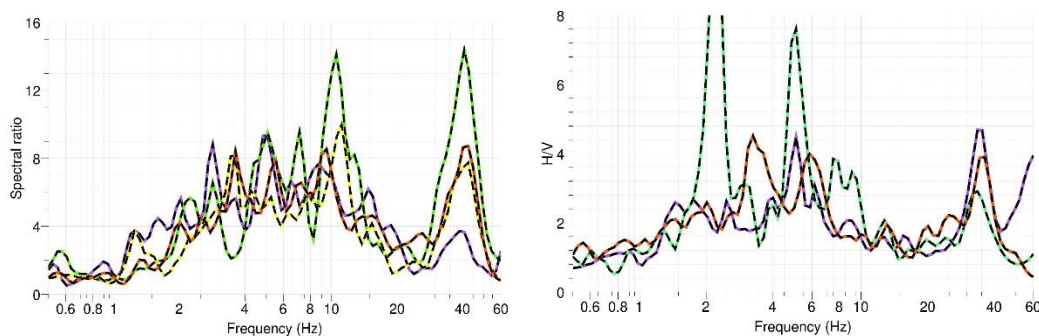


Figure 4 : Spectres d'amplifications des composantes Est-Ouest pour les stations OGS1 (gauche) et OGS2 (droite).

La figure 4 résume ces analyses pour les composantes Est-Ouest. Elle montre qu'il existe une variabilité de l'amplification spectrale dépendante du séisme, mais celle-ci est tout de même limitée. Ainsi, on voit assez bien que la station OGS1 située au sein du glissement dans la partie la plus active montre le spectre d'amplification le plus fort, atteignant plus de 8 pour la composante E-W (perpendiculaire aux structures). L'amplification présente 2 plages, une étalée entre 1.5 et 15 Hz avec un pic autour de 4 à 5 Hz et l'autre centrée sur 40 Hz.

Pour OGS2 (Fig. 4, droite), la variabilité semble plus marquée, peut-être en raison d'effets 3D plus prononcés. L'amplification dépasse rarement un facteur de 4 et plusieurs pics semblent apparaître, un à 35 Hz, un vers 1.5-2Hz et un entre 3 et 6 Hz, mais la plage basse fréquence (1.5-10 Hz) reste complexe.

Quoi qu'il en soit, il semble exister un fort effet de site dû au mouvement, sans doute en raison de la présence de roches altérées reposant sur une formation plus dure et moins fracturée. Cette amplification spectrale devra être prise en compte si l'on veut simuler l'effet de séismes sur les mouvements superficiels.

3.6 Tomographie avec réseau sismologique

Dans l'optique de caractériser en 3 dimensions le mouvement de terrain des "Ruines de Séchilienne" afin d'obtenir un modèle à 3 dimensions de la zone en mouvement et la répartition spatiale des vitesses d'ondes P au sein de ce mouvement, nous avons tenté d'exploiter l'ensemble des données sismiques et sismologiques à notre disposition. Dans le but de densifier ces données, d'avoir la possibilité d'obtenir un modèle de vitesse sismique en 3 dimensions et de bénéficier d'illuminations différentes (notamment à grands offsets), la base de données a été complétée en utilisant les enregistrements de tirs locaux enregistrés par le réseau OMIV, mais qui ne bénéficient pas d'une référence temporelle identique. Malgré ces difficultés, une base de données globale (active et réseau sismologiques), avec 176 sources et 326 récepteurs a été créée et une tentative d'inversion a été tentée sur l'ensemble des données sélectionnées en utilisant une méthode tomographique basée sur le calcul des temps de trajet effectué par résolution de l'équation Eikonal par différences finies (méthode de Potvin-Lecomte). Différentes modélisations directes et une étude des résidus résultants ont d'abord été effectuées afin de définir l'influence du modèle initial, de contraindre les vitesses des ondes P, l'épaisseur de la zone déstructurée et de mettre en évidence d'éventuelles anomalies liées aux sources ou aux stations (Figure 5). Les résultats finaux, plutôt décevants en raison du manque d'illumination et donc de contrainte sur la grille 3D, sont résumés dans le livrable 5.5.

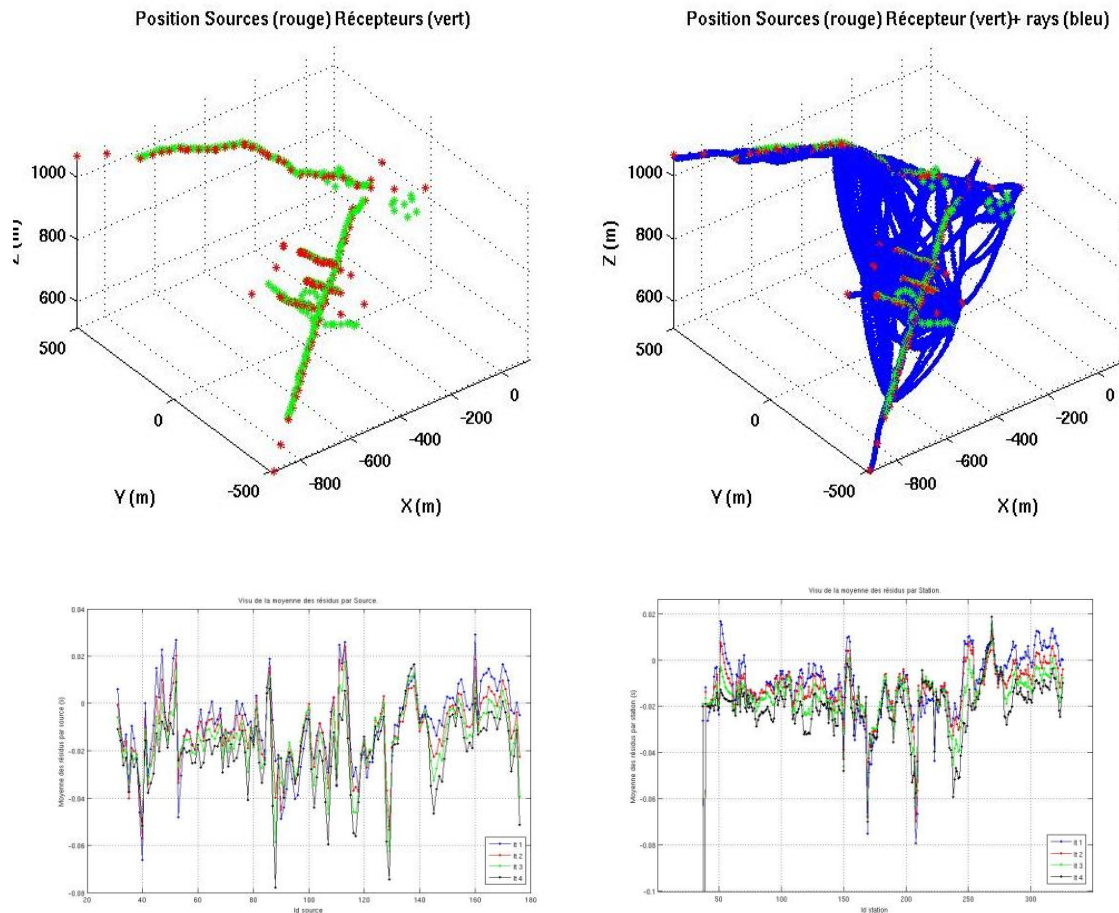


Figure 5. Exemple de résultats de l'inversion obtenus avec un modèle initial à gradient de vitesse de 850-4000 m/s et avec une épaisseur de 96 m pour la zone déstructurée homogène latéralement. Données utilisées : profils PS1 -PS7+ stations sismologiques 2010 avec correction de Δt de 30 ms. (a) Positions des sources et récepteurs utilisés + rayons obtenus (It 4) (b). Résidus par sources (c) et stations (d).

Les différents tests effectués en modélisation directe avec le logiciel de tomographie en 3 dimensions TOMO-TV ont mis en évidence plusieurs points :

- La nécessité avec Tomo-TV d'utiliser un gradient dans l'air pour minimiser les problèmes de convergence au niveau du passage à la surface libre.
- Une vitesse 4000 m/s dans la zone saine paraît plus adaptée qu'une vitesse de 3000 m/s.
- Les dispositifs des profils PS5, PS6 et PS7 ne permettent pas d'atteindre la zone saine et permettent de contraindre le gradient de vitesse dans cette zone. Le gradient de vitesse qui minimise les résidus est un gradient de 850 à 4000 m/s avec une épaisseur moyenne de la zone déstructurée d'au moins 80 m.
- Il existe des variations d'épaisseur notamment sous PS3 et PS1 qui varient entre quelques dizaines de mètres à plus de cent mètres d'épaisseur. Par contre, sous l'extrémité Est de PS3, les résidus montrent une faible épaisseur alors que sous l'extrémité Nord de PS2, les résidus montrent une épaisseur de près de 100 m. Il y a donc un fort contraste sur une courte distance qui peut correspondre à la limite de la zone déstructurée.

Le nombre de couples sources-récepteurs n'est pas suffisamment dense dans le cube 3D étudié.

4. Principaux résultats : mesures de déplacement

Les différents instruments (distance-mètres optique et radar, extensomètres, inclinomètres, GPS) ainsi que l'imagerie (LIDAR, photographies de face) permettent de mesurer le déplacement à 3D, sa variation temporelle et spatiale, en surface et en profondeur (inclinomètre en forage). Ces mesures permettent d'identifier les mécanismes de déformation et les zones les plus déstructurées. Ces mesures ont aussi permis de mettre en place une méthode de détection des déplacements précurseurs d'éboulements (application aux éboulements de Novembre 2006 et Juillet 2011). La figure 6 montre les trois types de dispositifs automatisés indépendants et complémentaires : l'extensométrie, la distancemétrie optique et la distancemétrie radar qui constituent les moyens de télésurveillance déployés par le CEREMA (ex-CETE) pour assurer le suivi des déplacements de surface.

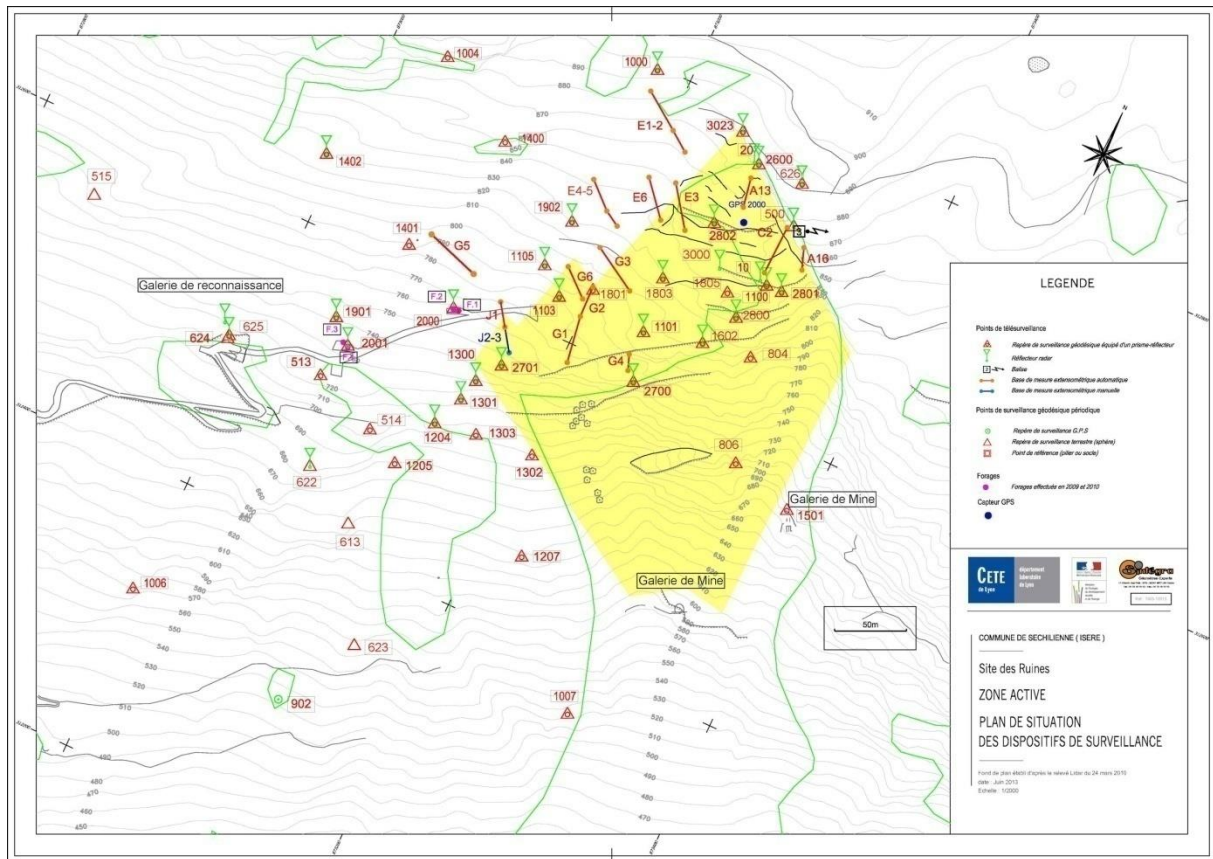


Figure 6 : localisation des différents dispositifs de mesure du CEREMA (ex CETE) au niveau de la zone frontale du mouvement de versant de Séchilienne

4.1 GPS

Des mesures de déplacements par GPS différentiel précis (RTK) sont effectuées 2 à 4 fois par jour selon des cycles de mesure de 30 minutes avec une précision de ± 10 mm dans les trois directions et ce sans traitement a posteriori. En avril 2013, il a été nécessaire de déplacer la balise GPS-RTK située en bordure Ouest du secteur des Ruines, le secteur s'étant considérablement dégradé depuis son installation deux ans auparavant (Tableau 1). Le nouveau point de mesure se situe dans un secteur qui évolue également très vite (Figure 7).

Déplacement cumulé de la balise GPS (m)	Du 29/04/11 au 23/04/13	Du 29/04/11 au 29/04/12	Du 30/04/12 au 23/04/13
En latitude	-5,66	-1,93	-3,73
En longitude	-1,78	-0,63	-1,15
En altitude	-3,06	-0,99	-2,07
Déplacement 3D	6,67	2,26	4,41

Tableau 1. Déplacements mesurés par la balise GPS en bordure Ouest du Couloir des Ruines. La convention de signe est telle qu'une variation positive en latitude indique un déplacement vers le Nord, une variation positive en longitude un déplacement vers l'Est.



Figure 7. Photographies de la balise GPS-RTK : à gauche après son déplacement en avril 2013 à proximité de la cible radar 1803, à droite en janvier 2014. On observe l'ouverture d'une fracture majeure.

Les mesures de déplacement par GPS-RTK présentent des phases d'accélération qui semblent coïncider avec des périodes de crises microsismiques (Figure 8). La composante Sud (latitude) du déplacement mesuré par cette balise est la plus importante : elle atteint -3,2 m entre janvier 2012 et janvier 2013, soit une vitesse moyenne de 8,8 mm/j.

Depuis la dernière crise le 30 octobre 2013, la vitesse de déplacement atteint 20 mm/j soit le niveau le plus élevé enregistré depuis la mise en service de la balise en mai 2011.

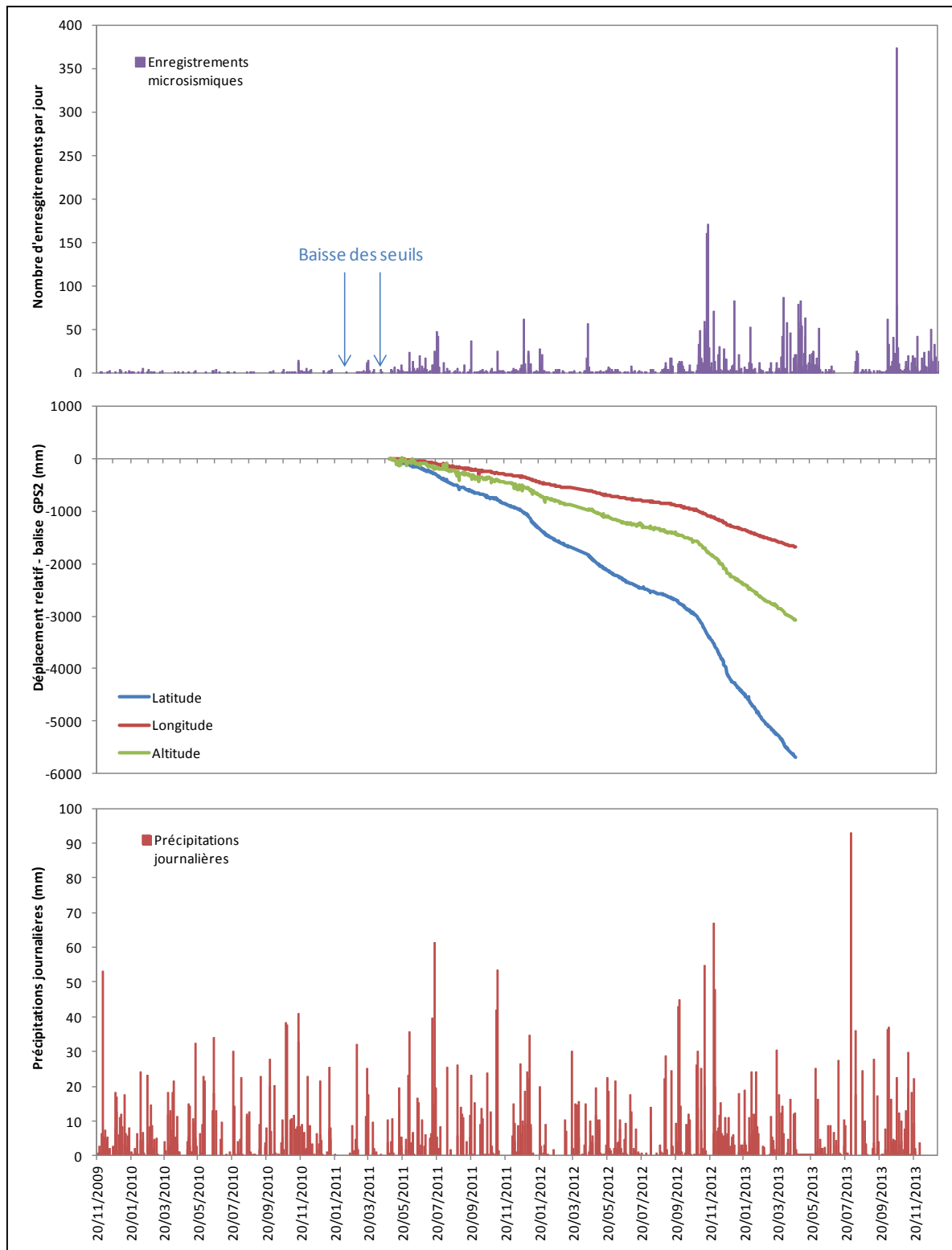


Figure 8. Activité microsismique journalière (haut), mesurée par le réseau de l'INERIS, déplacement cumulé à la balise GPS-RTK n°2 (milieu) et précipitations journalières enregistrées à Mont-Falcon (bas) du 20/11/2009 au 31/12/2013. La station GPS-RTK n°2 a été installée en avril 2011 et déplacée à un autre point de mesure en avril 2013. L'acquisition microsismique a été totalement interrompue du 08/07/2013 au 07/08/2013, et partiellement interrompue (1 des 2 stations de mesure HS) du 19/12/2013 au 31/12/2013. Les seuils de détection ont été baissés en 2011, ce qui explique en partie l'augmentation de l'activité après cette date.

4.2 Inclinométrie

Des mesures inclinométriques sont effectuées 2 à 4 fois par jour avec les inclinomètres bi-axiaux (précision $\pm 0,003^\circ$) intégrées aux sondes microsismiques trois composantes positionnées en entrée et fond de galerie ainsi qu'en forage vertical.

Les données inclinométriques (Figure 9) acquises dans le forage SD montre que l'orientation du mouvement en profondeur est proche de celle mesurée en surface. Le mouvement est orienté quasi plein Sud à 40 m de profondeur. L'amplitude du mouvement est plus importante à 40 m qu'à 80 m de profondeur, ce qui est conforme aux mesures dans les forages clinométriques à proximité.

A l'entrée de la galerie de reconnaissance, un mouvement saisonnier de basculement vers le Sud-ouest est observé, sous l'effet sans doute des sollicitations thermiques. La composante résiduelle du mouvement (après correction des effets des saisonniers) indique un très faible basculement orienté N270°. Un décrochage de la tendance est observé en août 2013 à la suite d'un violent orage – le retour à la tendance naturelle s'opère quelques semaines après.

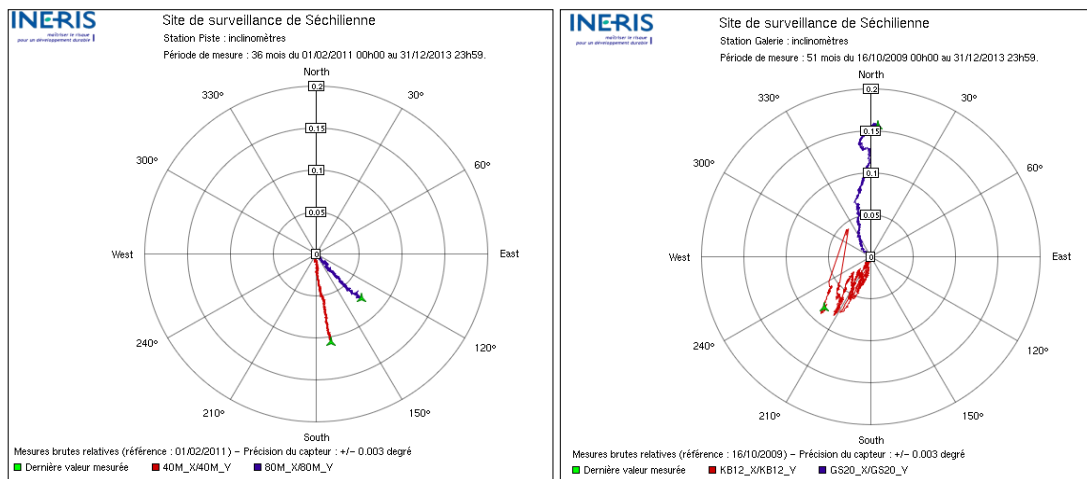


Figure 9. Mesures inclinométriques relatives en projection hémisphérique supérieure (le curseur vert indique la dernière mesure sur la période). A gauche, mesures aux sondes 40M et 80M positionnées respectivement à 40 et 80 m de profondeur dans le forage SD - à droite mesures en entrée (sonde KB12) et fond de galerie de reconnaissance (sonde GS20).

En fond de galerie un basculement lent vers le Nord est observé (Figure 9). Comme il n'existe pas de données de comparaison pour cette mesure et que celle-ci est à l'encontre des hypothèses scientifiques faites jusqu'à présent, des vérifications métrologiques et fonctionnelles ont été effectuées sur site. Comme celles-ci ont confirmé la pertinence de la mesure, les partenaires SLAMS ont admis la nécessité de mener des investigations complémentaires pour analyser et comprendre cette mesure. Il s'agira notamment de déterminer si ce mouvement observé résulte d'un effet local ou au contraire s'il s'opère à grande échelle.

4.3 Piézométrie

Des mesures de la piézométrie naturelle de la nappe du versant ainsi que des mesures de conductivité-température ont été réalisées à l'aide de capteurs positionnés à ~147 m de profondeur dans un forage dédié. Le monitoring hydrologique n'a cependant fourni des données pertinentes que de fin novembre 2009 à début avril 2010. Ces données ont été exploitées dans le cadre de la

tâche 2, elles ont mis en évidence une alternance de cycles de charge / décharge au gré des épisodes pluvieux, typique d'un aquifère fracturé à double perméabilité.

4.4 Scan-laser et imagerie optique (Livrable 1.6)

Une acquisition Lidar de la zone des Ruines du Versant de Séchilienne a été effectuée en février 2012 dans le cadre de l'ANR SLAMS. Une première acquisition Lidar avait été réalisée début 2011 par le CEREMA de Lyon. L'analyse des deux MNT successifs permet d'étudier l'évolution du mouvement et d'en visualiser le mécanisme. Trois résultats ont notamment été obtenus et confrontés à l'analyse réalisée à l'aide des données issues de l'instrumentation de terrain (extensométrie, géodésie, inclinométrie) :

- l'analyse spatiale du mouvement et son mécanisme (animation créée par superposition des surfaces 3D des MNT (figure 10),
- la direction des déplacements et leur ordre de grandeur (animation créée par superposition des surfaces 3D des MNT, étude de profils (figure 11),
- l'évolution de la morphologie de la surface affectée par le mouvement (animation créée par superposition des cartes de direction de pentes (figure 12).

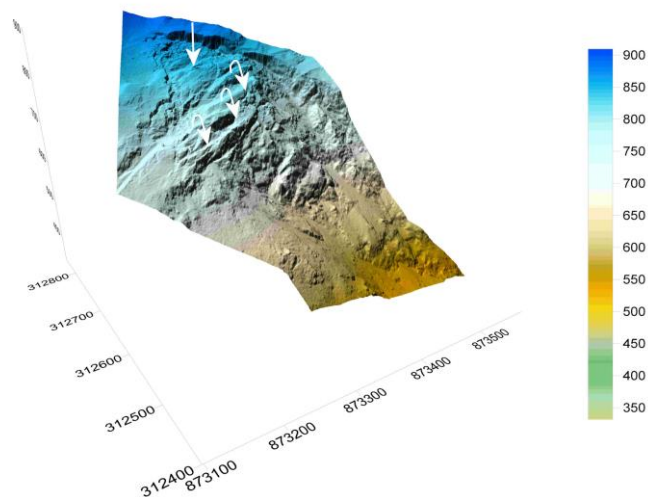


Figure 10 : identification des mécanismes : superposition des surfaces 3D

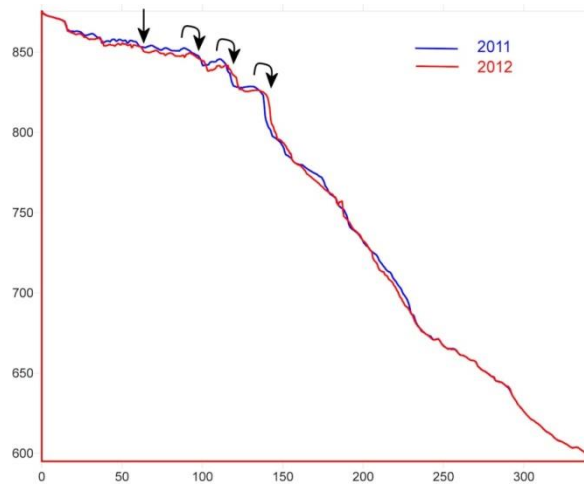


Figure 11 : identification des mécanismes et estimation des valeurs de déplacement le long d'un profil entre 2011 et 2012 à l'aide des données MNT-Lidar

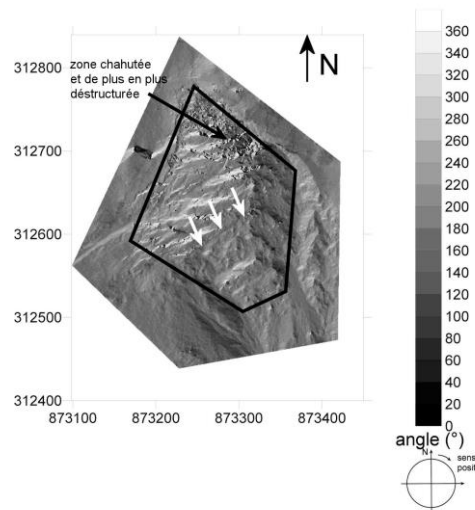


Figure 12 : évolution de l'état de déstructuration de la surface – carte des pentes

L'intérêt des données MNT fournies par les acquisitions Lidar réside dans l'ouverture à une analyse spatiale et une visualisation des mécanismes et des mouvements. Les ordres de grandeurs des directions et des valeurs de déplacements déterminés sont cohérents avec les valeurs fournies par l'instrumentation in-situ.

4.5 Photographies (Livrable 1.7)

Une technique d'imagerie de face a été mise en place pour détecter des déplacements précurseurs d'éboulements (Chanut 2011, Chanut 2012-b). Suite à l'éboulement de novembre 2006 d'un volume de l'ordre de 40 000 m³, il avait été constaté que des déplacements significatifs (3 à 4 m) de la zone s'étaient produits avant éboulement. Un appareil photo a été donc mis en place dans le local de Montfalcon qui fait face à la zone des Ruines : les photographies sont prises de façon automatique à intervalles de temps réguliers (figure 13). Une méthode automatique de traitement des photographies a été développée. Elle consiste à :

- choisir une photographie de référence,

- sélectionner les photographies prises sous de bonnes conditions météorologiques et à éliminer celles prises en conditions de brouillard, neige, nuage, pluie ...
- quantifier les déplacements entre une photographie et la photographie de référence par la méthode de corrélation de phase,
- post-traiter les cartes de déplacements pour disposer de l'information : se produit-il des déplacements supérieurs à 50 cm sur une zone ?

Le résultat obtenu pour un éboulement d'une centaine de m³ en juillet 2011 est présenté sur la figure 13. La méthode est en test actuellement sur le site de Montfalcon. En parallèle, une superposition manuelle des photos permet de visualiser les zones ébouées et la série des photos nous permet de dater le jour de l'éboulement (figure 14).



Figure 13 : dispositif de l'appareil photo



Figure 14 : localisation des principaux éboulements en une année

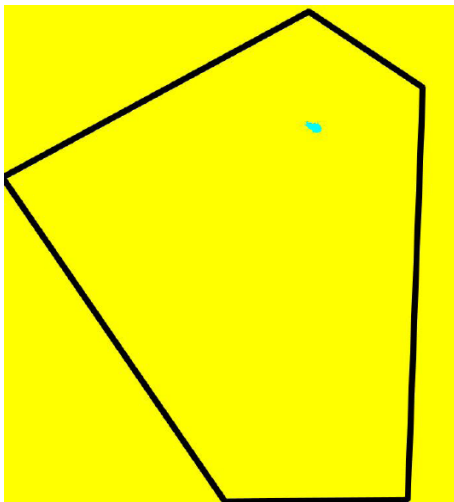


Figure 15 : identification de la zone affectée par un déplacement significatif avant éboulement en juillet 2011

5. Comparaison des différentes mesures

La comparaison des données de déplacement, écoute sismique et météo a montré :

- une accélération significative du mouvement induite par les précipitations. L'influence de la pluie a pu être modélisée, ce qui permet de mieux comprendre les causes du mouvement.
- le déclenchement d'éboulements et de microséismes par la pluie. L'influence de la pluie est toutefois plus sensible pour les plus petits événements, qui sont plus superficiels.

5.1 Relation entre déplacements et précipitations

En 2012, une nouvelle approche a été mise en place au CEREMA de Lyon pour la recherche de relations entre précipitations et déplacements de surface (Chanut ; 2012-a, Chanut ; 2013). Jusqu'à présent, quelque soit le modèle recherché, une dérive du modèle par rapport aux observations était constaté. Pour éviter cette dérive, il est proposé de travailler sur le signal "déplacements de surface journaliers" (y_t) et de le décomposer en tendance (T_t) et variations autour de la tendance (A_t) de façon multiplicative : $y_t = T_t(1 + A_t)$

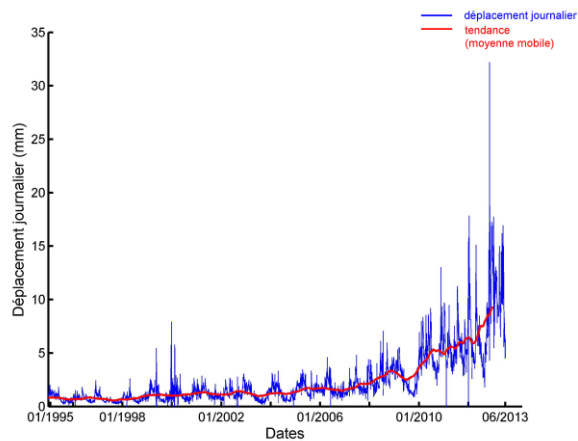


Figure 16 : déplacement journalier et visualisation de la tendance calculée par la moyenne mobile

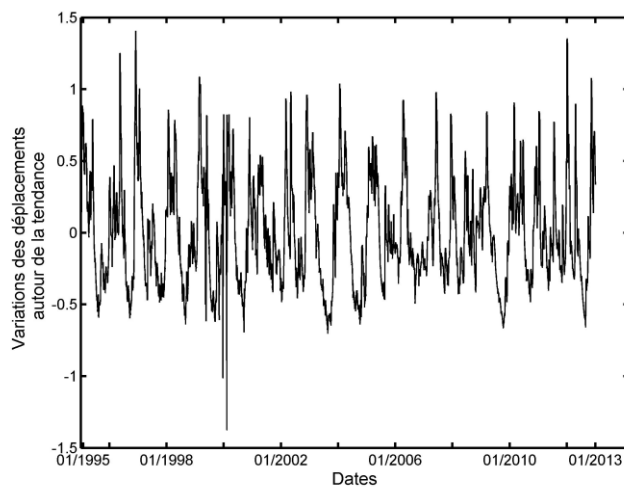


Figure 17 : variations des déplacements autour de la tendance

On raisonne donc sur les variations du déplacement autour de la tendance et on relie cette grandeur avec une grandeur représentative des apports d'eau : la pluie efficace est utilisée au lieu des apports d'eau bruts. La méthodologie de calcul a été établie par Aurélien Vallet de l'Université de Besançon (Vallet et al., 2013). Le modèle recherché relie directement la grandeur des déplacements aux apports d'eau de surface puisque nous ne disposons pas de données de pressions d'eau en profondeur. Un modèle simple de type vidange a donc été calé sur une période de deux années :

$$H_t = k H_{t-1} + a P_t$$

où H_t désigne la hauteur d'eau dans le réservoir à la date t , P_t la pluie efficace à la date t , k et a sont les paramètres de vidange et de remplissage. La grandeur déplacement A_t est déduite de façon linéaire de H_t .

Le modèle obtenu reste valable sur une dizaine d'années (figure 18).

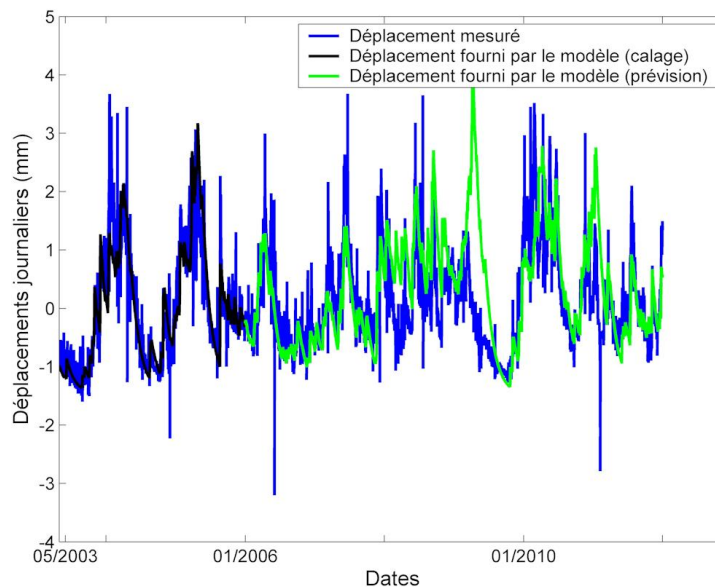


Figure 18 : extrapolation modèle vidange / réservoir pour la série des variations des déplacements autour de la tendance (période de calage 05/2003->12/2005, extrapolation jusqu'en 2012)

La mise en place de ce modèle valable sur une dizaine d'années rend compte de la commande hydraulique des déplacements qui intervient comme un facteur multiplicatif, et ceci de façon assez constante depuis une dizaine d'années. Pour la compréhension des causes du mouvement, l'analyse statistique montre :

- un mouvement assez continu (la tendance T_t), présentant une accélération progressive, tendance accélératrice due à la dégradation mécanique du massif et au mécanisme (auto-accélérateur) de basculement ;
- des fluctuations de vitesses (A_t) liées aux précipitations efficaces, qui peuvent être reliées aux pressions de l'eau dans les discontinuités du massif.

Nous en déduisons ainsi que l'eau agit donc de façon directe sur les fluctuations des vitesses et indirecte sur la tendance du mouvement via les circulations d'eau qui jouent un rôle défavorable dans le mécanisme de rupture.

L'INERIS a étudié la corrélation entre les déplacements de surface mesuré par la balise GPS et les précipitations sur la période du 16/10/2009 au 30/06/2013 en utilisant la méthode de Hipel et McLeod (1995). Cette méthode statistique a été retenue car elle est parfaitement adaptée à des données environnementales complexes et qu'elle ne nécessite pas de modèle physique.

Les résultats obtenus (Klein et al. 2013) mettent en évidence une corrélation faible mais significative, avec un retard de deux jours, entre les précipitations brutes et le déplacement journalier en latitude. Le coefficient de corrélation est cependant faible (0,20 pour un seuil de significativité à 5% de 0,07). Par ailleurs, la prise en compte de la pluie efficace plutôt que les précipitations brutes n'améliore pas le coefficient de corrélation.

Ce résultat est donc différent de celui exposé précédemment. Il s'explique par deux raisons. Dans le 1^{er} cas, la méthodologie est différente ; elle est de plus appliquée (donc calée) sur des périodes de temps beaucoup plus longues.

5.2 Influence des précipitations sur les éboulements et les micro-séismes.

L'analyse de la corrélation entre les précipitations et l'activité éboulements et micro-séismes entre 2010 et 2014 confirme les résultats obtenus par Helmstetter et Garambois (2010) pour la période 2007-2009. L'INERIS obtient aussi des résultats comparables en utilisant la méthode de Hipel et McLeod (1995). L'apport en eau a un effet rapide sur la microsismicité et les éboulements. Les coefficients de corrélations sont cependant faibles (au mieux 0,34 pour un seuil de significativité à 0,07). Ces résultats sont obtenus avec des méthodes statistiques différentes, sur les jeux de données présentés en section 1.

Les fonctions d'inter-corrélation entre précipitations, éboulements et microséismes sont représentées sur la Figure 19. La corrélation depuis 2010 est plus forte que pour les données avant 2010, mais les échelles de temps (délai et temps de relaxation) n'ont pas changé. Nous avons pu mettre en évidence un décalage de temps entre précipitations et éboulements plus important pour les plus gros événements. Alors que les plus petits éboulements sont déclenchés quasi-instantanément (décalage du pic de corrélation inférieur à 30 mn), les plus gros événements ont lieu en moyenne plusieurs jours après le pic de précipitation. Ce délai plus important pourrait s'expliquer par le temps d'infiltration de l'eau en profondeur. Alternativement, ce délai en temps de quelques jours peut être dû à l'accélération du mouvement de versant, dont le pic de vitesse a lieu en moyenne 3-4 jours après le maximum de précipitations. La corrélation avec les précipitations diminue rapidement avec la taille de l'éboulement. Les plus gros événements ne semblent pas ou très peu corrélés avec les précipitations (figure 20). Des résultats très similaires sont obtenus si on remplace les précipitations brutes journalières par la pluie efficace calculée par Aurélien Vallet (Vallet et al., 2013).

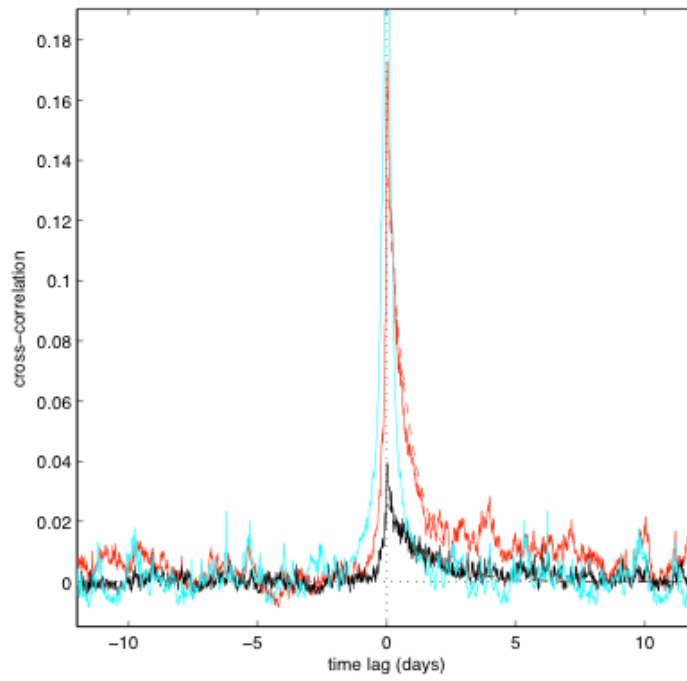


Figure 19: inter-correlation entre les précipitations horaires et le nombre d'éboulements (rouge) ou de microséismes (noir), et auto-correlation des précipitations (en bleu).

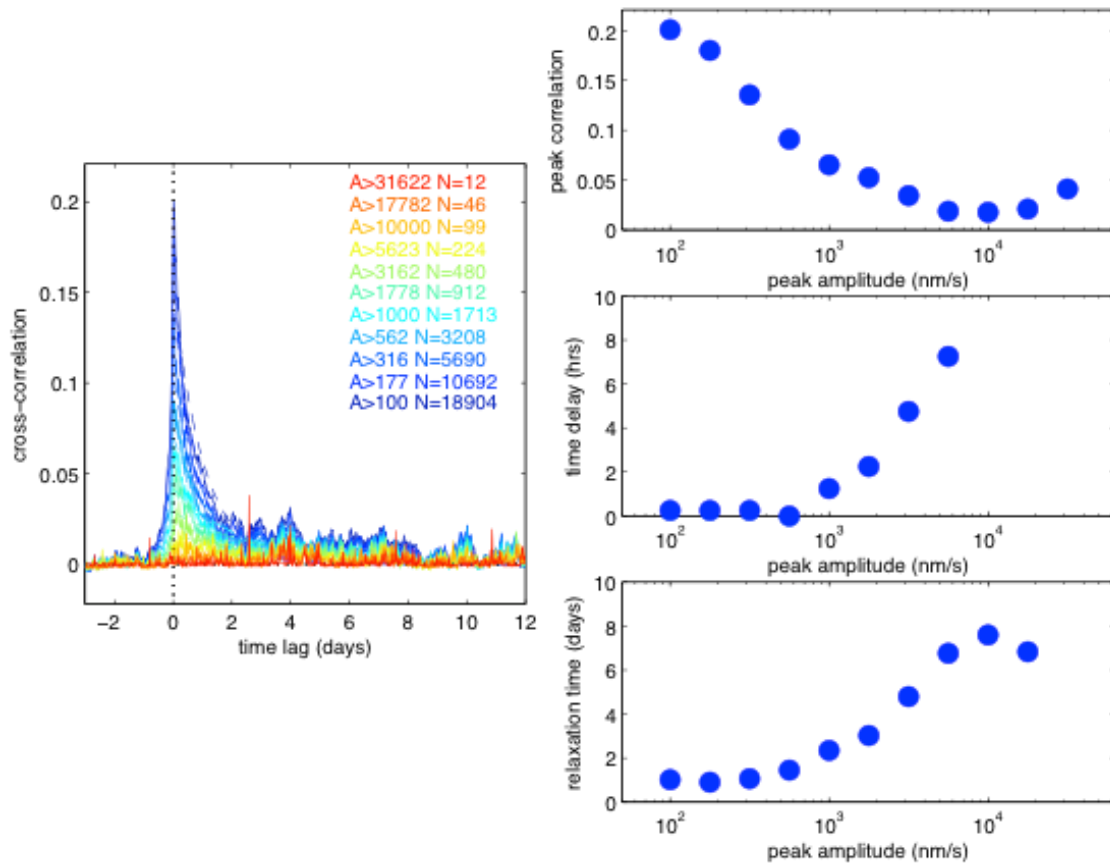


Figure 20: (a) inter-corrélation entre précipitations horaires et nombre d'éboulements, en fonction de l'amplitude minimum A du signal sismique (en nm/s) produit par l'éboulement ; et (b) variation du pic de corrélation, du temps du pic, et du temps de relaxation en fonction de A .

6. Conclusions et perspectives

Nous avons réalisé l'essentiel des travaux qui avaient été originellement prévus. Ce projet a permis l'acquisition de données multidisciplinaires sur un mouvement de terrain de grande ampleur proche de la rupture. Un tel jeu de données est unique au monde. Ces données ont été partagées, soit sur un site web public accessible à tous (données sismologiques d'ISTerre disponibles sur <http://omiv.osug.fr/SECHILIENNE/SISMO>), soit entre les chercheurs du projet (données du CEREMA et de l'INERIS).

Les données obtenues nous ont d'abord permis d'identifier la zone instable. La comparaison des différentes données (déplacement, sismologie, météo) ont permis de mettre en évidence l'influence des précipitations sur le mouvement. Les différentes mesures ont aussi montré une accélération très nette du mouvement depuis 2009. Cette évolution suggère que la rupture de tout ou partie de la zone frontale (3 millions de m³) est probable à l'échelle de quelques années.

Il serait intéressant de poursuivre l'instrumentation du site pour l'intérêt scientifique. On aura ainsi un jeu de données unique permettant d'identifier les précurseurs de la rupture d'un mouvement rocheux de grande ampleur. Ces observations permettraient d'identifier les paramètres pertinents pour la surveillance et la prévision d'autres versants rocheux instables.

Publications et communications à des congrès depuis le début du projet

Publications

- Helmstetter, A. and S. Garambois, Seismic monitoring of Séchilienne Rockslide (French Alps): analysis of seismic signals and their correlation with rainfalls, *J. Geophys. Res.*, 115, F03016, doi:10.1029/2009JF001532 (2010).
- Lacroix, P. and A. Helmstetter (2011), Localization of seismic signals associated with micro-earthquakes and rockfalls on the Séchilienne landslide, French Alps, *Bull. Seism. Soc. Am.* 101(1), 341-353, doi : 10.1785/0120100110.
- Vallet, A., C. Bertrand, and J. Mudry (2013), Effective rainfall: a significant parameter to improve understanding of deep-seated rainfall triggering landslide – a simple computation temperature based method applied to Séchilienne unstable slope (French Alps), *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 10, 8945-8991.

Communications.

- Bigarré P., Verdel T., Klein E., Gueniffey Y. Cloud monitoring: an innovative approach for the prevention of landslide risks, Proceedings of the Second World Landslide Forum – 3-7 October 2011, Rome.
- Chanut, M.-A., V. Barthelet & J. Kasperski (2011) Contribution de l'imagerie de face pour l'analyse des mouvements de terrain : application au versant de Séchilienne. Journées aléa gravitaire, Strasbourg.
- Chanut, M.-A., J. Kasperski, L. Dubois & J.-P. Duranthon (2012-a) Analyse cinématique actuelle des ruines de Séchilienne. JNGG2012 Bordeaux.
- Chanut M-A, Barthelet V., Dubois L., (2012-b) Corrélation d'images : méthode originale de tri automatique des photographies, JNGG 2012 Bordeaux.
- Chanut, M.-A. A.Vallet, L.Dubois, J.-P. Duranthon, Mouvement de versant de Séchilienne : relations entre déplacements de surface et précipitations – analyse statistique, Journées Aléas Gravitaires, 17-18 Septembre 2013, Grenoble.
- Dünner C., Klein E., Charmoille A., Bigarré P. Stratégie de surveillance multi- paramètres appliquée aux versants instables : exemple des Ruines de Séchilienne (Isère, 38), Rock Slope Stability Symposium, November 24-25, 2010, Paris.
- Dünner C., Klein E., Bigarré P. Surveillance multi-paramètres appliquée aux versants instables : exemple des Ruines de Séchilienne (Isère, 38). Journées "aléa gravitaire", jag 2011 – 7 & 8 Septembre 2011, Strasbourg, France.
- Grasso, J.-R. , S. Garambois, D; Jongmans, A. Helmstetter, T. Lebourg, J.-P. Malet, W. Berolo, R. Béthoux, L. Daras, and P. Ulrich, The OMIV Observatory on landslides, Observing with multi-parameters the instability of versants, EGU Vienna, 2-7 May 2010
- Helmstetter, A., S. Garambois, J. Kasperski, J-P Duranthon, and P. Pothérat, Seismic monitoring of the Séchilienne Rockslide (French Alps): analysis of seismic signals and their correlation with rainfalls, EGU Vienna, 2-7 May 2010.
- Helmstetter A. and S. Garambois, Seismic monitoring of Séchilienne rockslide, ESC, Sept 2010, Poster Presentation, Montpellier.
- Helmstetter, A., S. Garambois, and P. Lacroix, Seismic monitoring of Séchilienne Rockslide (French Alps): micro-seismicity, rockfalls, and triggering by rainfall, Congress on physico chemical processes in seismic faults, Padova, Italy, Nov 2010 (conf. Invitée)
- Helmstetter, A. Ecoute sismique du mouvement de terrain de Séchilienne. Séminaire INERIS Nancy, 16 Février 2011.
- Helmstetter, A. et S. Garambois, Ecoute sismique du mouvement de terrain de Séchilienne. Journées "aléa gravitaire", JAG 2011 – 7 & 8 Septembre 2011, Strasbourg, France.

- Helmstetter, A., Landslides deformation : scaling and triggering mechanisms, workshop "Materials Deformation : Fluctuations, Scaling, Predictability", Les Houches, 23-26 Janvier 2012 (conf invitée)
- Helmstetter, A., Ecoute sismique des mouvements gravitaires, Journées Aléas Gravitaires, 17-18 Septembre 2013, Grenoble.
- Klein E., Occhiena C., Pirulli M., Dünner C., Bigarré P., Scavia C., Analysis of potential rock mass movement through microseismic monitoring, Proceedings of the Second World Landslide Forum – 3-7 October 2011, Rome.
- Klein E., Durenne A., Gueniffey Y., L'analyse statistique de données appliquée à la surveillance multi-paramètres de versants instables. *Journées 'Aléa Gravitaire' 2013*, 17-18 septembre 2013, Grenoble.
- Klein E., Gueniffey Y., Coccia C., Bigarré P., Dynamique de mouvements de versant : mécanismes de déformation complexes et analyse de données multi-paramètres. *Rock Slope Stability Symposium*, 2014, soumis.
- Lacroix, P. and A. Helmstetter, Location of seismic signals associated with micro-earthquakes and rockfalls on the Séchilienne landslide, French Alps, ESC, Sept 2010, Poster Presentation, Montpellier
- Pothérat, P. & Lemaître, F. & Duranthon, J.P. & Benoit, A. La mesure à très longue distance : un besoin, un outil : le radar ULB. JNSS 2010, France, Paris

Tâche 2 - Compréhension des effets des mouvements de fluides et des couplages hydromécaniques associés sur les processus de déstabilisation du mouvement de Séchilienne.

Coordinateur : Frédéric Cappa (GEOAZUR)

1. Enjeux et problématiques, état de l'art

Les fluides sont connus pour être un facteur aggravant des instabilités gravitaires, mais les relations qui existent entre les mouvements de fluides et les déformations qui mènent à la rupture des versants sont encore mal comprises [Guglielmi *et al.*, 2002; Cappa *et al.*, 2004; Guglielmi *et al.*, 2005; Viesca *et Rice*, 2012]. Le modèle conceptuel classique propose que les infiltrations d'eau de pluie, la fonte des neiges et les variations saisonnières de la nappe souterraine augmentent la pression de fluide suffisamment pour diminuer les contraintes effectives et la résistance du versant, et favoriser ainsi la rupture et le glissement le long de fractures dans un état critique [Iverson, 2005]. Cependant, bien que les déplacements de surface des versants et la sismicité se corrèlent avec les variations saisonnières des infiltrations d'eau météorique, peu ou pas de surpressions de fluides ont été mesurées dans les glissements de terrain qui sont généralement installés dans la zone non-saturée des versants [Spillman *et al.*, 2007; Helmstetter *et Garambois*, 2010; Lacroix *et Helmstetter*, 2011; Vallet *et al.*, 2013; Cappa *et al.*, 2013]. Ces nouvelles observations remettent en question les modèles hydromécaniques habituels de ces instabilités gravitaires. La théorie classique ne peut donc pas expliquer les observations récentes des versants instables, ce qui ne permet pas d'estimer avec précision l'impact des fluides sur l'instabilité.

L'évaluation de l'aléa gravitaire s'appuie donc en partie sur notre capacité à mieux comprendre le fonctionnement hydraulique et mécanique des versants instables. L'une des clés pour améliorer cette compréhension est une meilleure connaissance des couplages hydromécaniques en jeu. Or, peu de données sont actuellement disponibles pour aborder ces couplages, ce qui rend les modèles de rupture des versants partiellement contraints. La connaissance du rôle des fluides sur la déstabilisation des versants ne peut donc être acquise que par une observation des fluides, basée sur un suivi hydrogéologique à long-terme sur un versant, et par des expériences analogues en conditions contrôlées à petite échelle afin de reproduire des glissements réels induits par les fluides sur des fractures à l'état critique proche de la rupture. Or, ce suivi hydrogéologique est généralement trop court (quelques mois à un an au mieux) pour avoir une vision précise des écoulements souterrains sur une longue fenêtre d'observations incluant un grand nombre de cycles saisonniers. Qui plus est, les expériences analogues contrôlées sont trop rares pour apporter des éléments de comparaison suffisants avec les observations à grande échelle.

Un enjeu important dans la compréhension du rôle des fluides dans les mécanismes menant à la rupture des versants est ainsi de développer un suivi long-terme des eaux souterraines, ainsi que des expériences et des modèles hydromécaniques reproduisant les processus suspectés à l'échelle du versant. Ceci a été l'objectif de la tâche 2 du projet SLAMS.

2. Approche scientifique et technique

Pour atteindre l'objectif fixé, nous avons suivi plusieurs axes :

- **Phase 1:** Développement d'un suivi hydrogéologique et hydrochimique du versant afin de quantifier précisément le réseau d'eaux souterraines. Observation d'anomalies chimiques marqueurs de la rupture.
- **Phase 2:** Développement d'une expérience d'injection d'eau dans une zone fracturée d'échelle métrique pour reproduire des glissements réels sur des fractures à l'état critique analogues aux fractures observées dans les versants de Séchilienne; Reproduction expérimentale de précurseurs sismiques de la rupture.
- **Phase 3:** Au terme des phases 1 et 2, développement d'un modèle conceptuel des écoulements des eaux souterraines et comparaison avec les données géodésiques et sismologiques acquises et traitées dans la tâche 1 du projet ;
- **Phase 4:** Au terme de la phase 3, développement de modèles hydromécaniques dédiés à simuler les effets des mouvements de la nappe souterraine sur la déstabilisation du volume instable, et fournir un cadre mécanique aux observations réalisées dans les phases 1 et 2 de cette tâche ainsi que celles acquises dans la tâche 1. La phase 4 est réalisée en lien avec la tâche 6 du projet.
- **Phase 5:** Amélioration des protocoles de monitoring hydrologiques et géophysiques des versants instables.

3. Résultats majeurs

(Certains résultats présentés ci-dessous ont été obtenus dans le cadre de la thèse de Benoit Derode (bourse ANR SLAMS, direction : F. Cappa et Y. Guglielmi, soutenu en 2013) et de la thèse de Aurélien Vallet (bourse ministère, direction : C. Bertrand et J. Mudry, soutenance prévue en 2014), avec le soutien technique de Sophie Viseur (développements numériques) et de Bruno Régent (suivi hydrogéologique et hydrochimique)).

- **Résultat 1:** *Une meilleure connaissance des écoulements d'eaux souterraines dans le versant de Séchilienne (Livrabale 2.1).*

Nous avons développé un protocole de suivi hydrogéologique et hydrochimique dédié à la détermination des circulations des eaux souterraines à l'échelle pluri-kilométriques autour du versant de Séchilienne et à l'échelle décamétrique dans le volume instable. L'analyse croisée des résultats de 15 campagnes d'échantillonnage d'eau des sources du Massif du Mont Sec, d'une campagne isotopique en O^{16}/O^{18} , ainsi qu'une campagne de multi-traçage artificiel a permis de définir un schéma conceptuel des écoulements à l'échelle du massif (Figure 1). Les résultats mettent en évidence la dualité perméabilité de matrice/perméabilité de fracture des micaschistes avec des écoulements préférentiels, réactifs et rapides dans les zones fracturées et des écoulements plus diffus, inertiels et lents dans la roche moins fracturée. Le versant instable est alimenté par un vaste bassin versant (déduit du traçage artificiel), même si la contribution des écoulements apparaît minoritaire par rapport à l'infiltration locale (O^{16}/O^{18}). La campagne de multi-traçage a montré une zone d'interconnexion entre le versant instable et les sources de Fonafrey, Thiébaud, Clos Bénit et la Bathie. Enfin la zone d'alimentation des sources des Aillouds et Mouniers semble être influencée par des eaux superficielles du Rif Bruyant (O^{16}/O^{18} , Conductivité). Finalement, la galerie EDF, située à la base du versant instable, semble jouer le rôle de drain majeur vers le Château de Vizille.

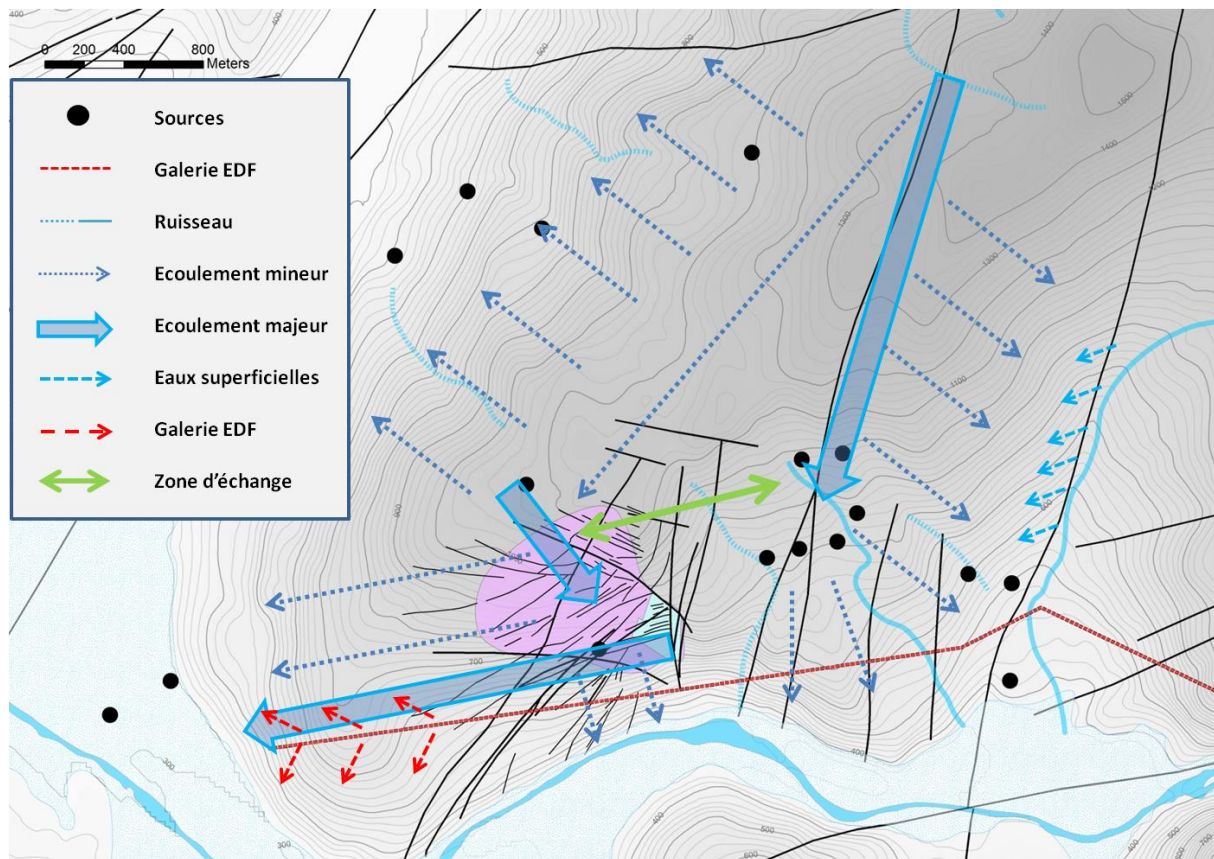


Figure 1. Schéma conceptuel des écoulements d’eaux souterrains dans le massif du Mont Sec. Le glissement de terrain de Séchilienne est représenté en rose. Les points noirs correspondent aux points d’échantillonnage des eaux.

- Résultat 2: *Variation de chimie des eaux des sources liée à l’endommagement mécanique des fractures du versant (Livrable 2.1).*

La chimie des eaux est un signal très fin qui permet la localisation dans le temps et dans l’espace de l’arrivée des eaux d’infiltration à l’origine des impulsions mécaniques des instabilités de versant [Guglielmi et al., 2002; Binet et al., 2007]. Il s’agit de comprendre comment s’organise la relation entre altération chimique, modifications hydromécaniques et endommagement du versant rocheux instable. Pour cela, un suivi hydrogéochimique des eaux souterraines a été mis en place depuis 2010 sur le site de Séchilienne. Ce suivi est composé de mesures en continu de différents paramètres physiques (conductivité électrique, température, etc.) sur deux points de sortie des eaux souterraines: un dans la zone déstructurée (galerie 710) et un dans la zone saine (Fonafrey). Le signal de déplacement est bien corrélé aux signaux de conductivité; à chaque augmentation du déplacement correspond une augmentation de la conductivité, qui succède à une diminution synchrone de ces deux paramètres (Figure 2). La conductivité mesurée est essentiellement expliquée par la concentration en sulfates. Les variations de ces concentrations en sulfates sont liées à l’altération de la pyrite et les pics sont expliqués par la réactivation de nouvelles surfaces minérales lors du déplacement du versant. La diminution de ces concentrations est liée au mécanisme même de l’altération de ce minéral; une couche d’oxyde de fer se forme à la surface lors de l’altération, isolant l’eau et les surfaces de la pyrite. Nous avons déduit de ces mesures que la conductivité électrique est représentative du signal chimique engendré par la dégradation du massif.

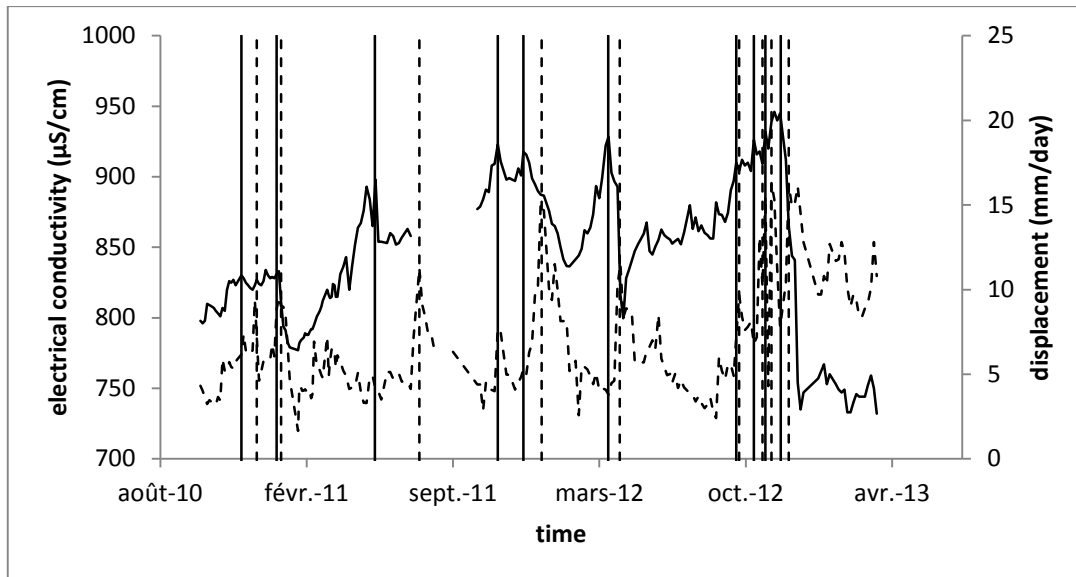


Figure 2 : Variations temporelles de la conductivité électrique (trait plein) mesurée dans la galerie de reconnaissance et du déplacement mesuré par l'extensomètre A13 (pointillés). Les traits verticaux correspondent au maximum des pics de conductivité (trait plein) et de déplacement (pointillés)

- **Résultat 3:** *Identification des mécanismes d'affaiblissement d'une zone de fractures mise sous pression (Livrable 2.2)*

Nous avons développé une expérimentation in situ à l'échelle métrique dédiée à quantifier les effets des fluides sur des glissements réels dans des conditions contrôlées et à en déduire les fondements physiques. Cette expérience a été réalisée conjointement à deux projets d'ANR, l'ANR SLAMS et l'ANR HPPP-CO₂. Nous avons injecté des fluides dans une zone de fractures pour simuler les effets potentiels d'une pluie sur un versant. Le jeu de données uniques acquis a montré qu'une surpression de fluides localisée peut générer des déformations sismiques dans les zones sèches éloignées du volume pressurisé. Nous avons aussi montré que les différentes signatures sismiques enregistrées sur le massif durant et après un événement pluvieux présentent des similarités avec les processus déduits des expériences à petite échelle (Figure 3). Nos analyses confirment que des déformations asismiques peuvent se produire en profondeur dans les zones saturées du versant pour contribuer aux déformations sismiques dans les zones sèches instables près de la surface. Nous avons donc ainsi reproduit des observations analogues à celles de Séchilienne, mais dans des conditions contrôlées où nous pouvons faire le lien entre différents processus ce qui n'aurait pas été possible sans cette expérimentation. Ces nouvelles observations remettent en question les modèles hydromécaniques classiques des instabilités gravitaires dans lesquels les relations entre écoulements de fluides et rupture ne sont pas intimement couplées. Les modèles simples produits jusqu'à présent sont donc partiellement inexacts, et ne permettent pas de répondre clairement à des questions importantes comme: (1) quel rôle les fluides ont-ils sur l'initiation et l'évolution des déformations en surface des versants?, (2) quels liens éventuels existent-t-il entre les déformations asismiques observées dans les zones saturées et les déformations sismiques localisées dans les zones sèches près de la surface? A partir de ces observations à petite échelle, nous avons ainsi pu définir des mécanismes que nous avons ensuite testés dans le versant de Séchilienne par modélisations hydromécaniques afin de contribuer à répondre à ces questions. C'est le résultat 4 de cette tâche.

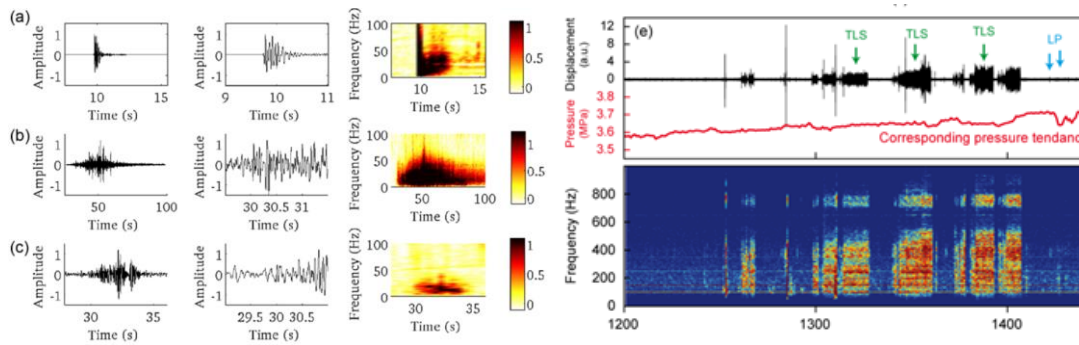


Figure 3. (gauche) : Différents événements sismiques enregistrés à la station THE, avec zoom sur une fenêtre de 2 secondes autour des événements (au centre), ainsi que leur diagramme temps-fréquence correspondant. (a) Trace d'un tir explosif, (b) signature d'une chute de bloc arrivée le 28 octobre 2008, et (c) microséisme local enregistré le 29 octobre 2008. (droite) Signaux sismiques observés dans l'expérience analogue : événements impulsifs, tremors et événements longues périodes avec le diagramme temps-fréquence.

- Résultat 4: *Une meilleure compréhension de l'influence des fluides profonds sur le mouvement de Séchilienne (Livrable 2.2).*

Nous avons développé une série de modélisations hydromécaniques pour étudier les effets des mouvements d'eau dans l'aquifère profond sur la rupture superficielle des versants. Ces modélisations sont à l'interface entre les tâches 1, 2 et 6 du projet. Les modèles intègrent les mécanismes d'affaiblissement observés dans l'expérience d'injection analogue. La comparaison entre modèles et observations nous a permis de montrer une corrélation étroite entre les mouvements piézométriques de l'aquifère profond et les variations de vitesses en surface du glissement. Les modèles reproduisent correctement les déformations mesurées en surface du versant, et la géométrie de la zone rompue cartographiée par la géologie et imagée par la géophysique (Figure 4). Ces mouvements produisent un endommagement mécanique du volume instable par transfert de contraintes poro-élastiques et un affaiblissement de la friction. Cette modélisation permet donc de mettre en évidence une altération non prévue du champ de contrainte près de la surface du versant et un affaiblissement qui mène à la rupture au-dessus de la nappe. Des variations de contraintes faibles de l'ordre de 0.01 à 0.11 MPa et des chutes de friction de 0.1 à 0.2 ont été identifiées comme suffisante pour initier la rupture (Figure 4). Ce scénario permet d'expliquer avec robustesse les observations géodésiques et sismologiques. Notre analyse démontre ainsi pour la première fois que des transferts de contrainte des zones humides aismiques profondes vers les zones sèches sismogéniques près de la surface jouent probablement un rôle majeur dans les processus d'instabilité des versants.

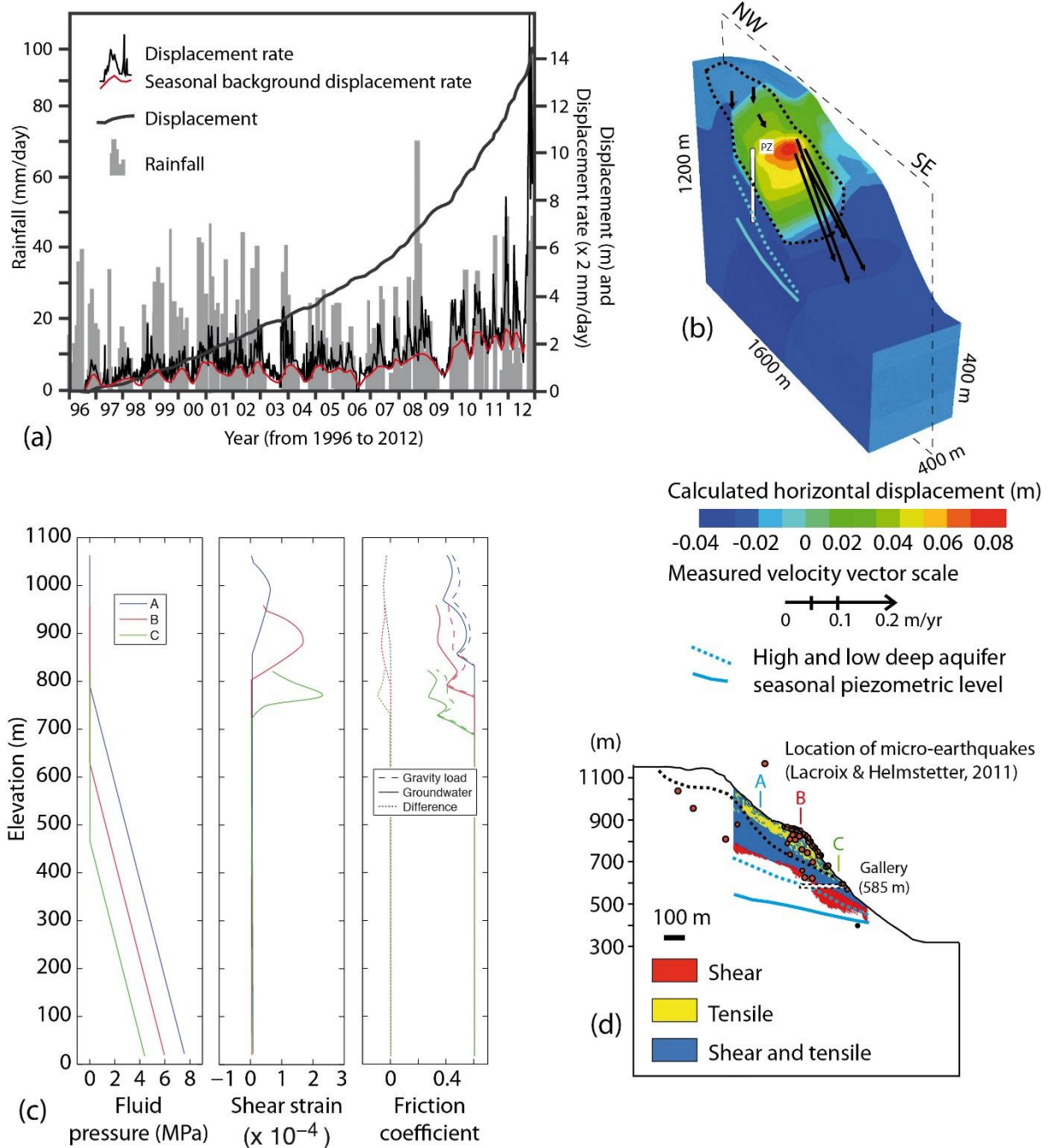


Figure 4. (a) Variations pluri-annuelles du déplacement du versant et des précipitations ; (b) Comparaison des déplacements calculés par modélisation hydromécanique avec les déplacements mesurés sur le versant ; (c) Profils verticales des variations de pression de fluides, de déformation cisailante et de friction calculées en A, B et C en (d); (d) Comparaison des déformations plastiques calculées internes au versant avec la sismicité observées dans la tâche 1.

- Résultat 5: Amélioration des protocoles de monitoring hydrologiques et géophysiques (Livrables 2.1 et 2.2)

Les résultats précédents nous permettent de proposer une amélioration des protocoles de monitoring hydrologiques et géophysiques existants des instabilités de versant :

- (a) Estimation de la pluie efficace à partir d'un nombre réduit de paramètres

La pression interstitielle, accumulée par la recharge des hydrosystèmes, est l'un des principaux facteurs de déclenchement des glissements de terrain. Les précipitations efficaces, qui sont la part des précipitations qui rechargent l'aquifère, sont un paramètre important à prendre en compte pour une évaluation précise des effets hydrauliques. Le calcul du bilan hydrique du sol est une méthode bien adaptée pour estimer les précipitations efficaces. Néanmoins, cette approche nécessite l'estimation de l'évapotranspiration, de la réserve facilement utilisable du sol (RFU) et la caractérisation du coefficient de ruissellement. La RFU et le coefficient de ruissellement sont généralement déduits à partir d'observations sur le terrain et de données spatiales (photographies aériennes et MNT). Le calcul de l'évapotranspiration est une méthode qui nécessite de nombreux paramètres météorologiques. Cependant, la plupart des glissements de terrain sont instrumentés avec des stations météo mesurant uniquement la température et les précipitations. Nous avons développé dans cette tâche une nouvelle méthode ne nécessitant que ces deux types de données comme entrées pour calculer les précipitations efficaces. Deux équations de rayonnement solaire et cinq équations d'évapotranspiration couramment utilisées ont été testées à Séchilienne. La méthode a été développée pour être universelle afin de pouvoir être appliquée à d'autres glissements de terrain. Cette étude a démontré que, pour le versant instable de Séchilienne, la performance de corrélation avec données de déplacement (coefficient de détermination) est considérablement améliorée avec les précipitations efficaces (0,6) par rapport aux résultats obtenus avec des précipitations brutes (0,3). La méthode proposée pour l'estimation des précipitations efficaces a été conçue pour être suffisamment simple pour être utilisée par n'importe quel spécialiste dont l'hydrogéologie n'est pas la spécialité et qui souhaite étudier les relations entre les précipitations et les déplacements de glissements de terrain.

(b) Définition automatique des seuils d'alerte hydrologiques

Le seuil hydrogéologique est une méthode largement utilisée pour caractériser les relations entre les précipitations et la déstabilisation de mouvements de terrain. Cette méthode est généralement appliquée à grande échelle et sur de multiples mouvements de terrain de faible profondeur. La définition de seuils implique le calcul d'indices pluviométriques basé soit sur la durée et l'intensité de la pluie, soit sur une période de pluie cumulée simultanée et antécédente, pour des événements stables et instables. Un seuil est alors établi entre ces deux catégories, et constitue une approximation statistique empirique des conditions pluviométriques minimales qui conduisent à la déstabilisation. Afin de prendre en compte l'inertie des processus hydrogéologiques, l'indice pluviométrique « pluie cumulée simultanée et antécédente » a été sélectionné. Une revue de la littérature montre que la plupart des études sont subjectives et que les seuils sont habituellement établis de façon non optimale, soit visuellement, soit sur des bases mathématiques/statistiques peu robustes. Pourtant, l'objectivité est essentielle si l'on souhaite appliquer la méthode du seuil comme outil d'anticipation du risque gravitaire. Pour cette approche, les machines à vecteurs de support (SVM), ont été utilisées pour déterminer le seuil hydrogéologique optimal en maximisant la marge de seuil entre les deux catégories. Cette étude montre que la pluie efficace est un paramètre pertinent à prendre en compte dans les mouvements de terrain, car il améliore de manière significative la discrimination des événements stables et instables (Figure 5). En outre, les SVM sont un outil approprié pour définir un seuil hydrogéologique objectif.

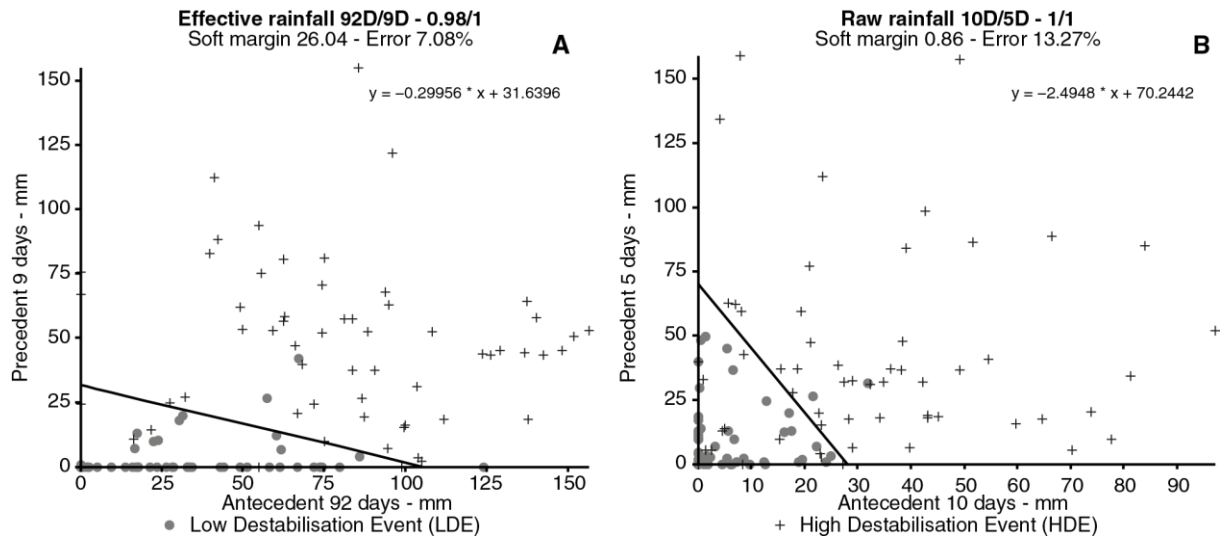


Figure 5: Résultat de la meilleure performance de classification pour la pluie brute (gauche) et pour la pluie efficace (droite).

(c) Estimation de l'état d'endommagement du milieu par pulses hydro-sismiques:

L'expérience d'injection contrôlée réalisée à petite échelle en conditions contrôlées nous a permis d'identifier l'évolution des propriétés du milieu par pulses hydrauliques de courte durée répétés avant et après endommagement du milieu. Nous avons notamment estimé une augmentation de la perméabilité d'un facteur 3 et une diminution de 50 % de la friction induite par l'endommagement du milieu lors de la phase d'injection longue durée analogue à une pluie sur un versant. Nous pensons que ces injections par pulse en forage serait un outil intéressant pour le suivi de l'évolution de l'état de dégradation des massifs instables. Un tel protocole permettrait de compléter les réseaux d'observations permanents actuels comme ceux développés dans le cadre de l'observatoire OMIV.

4. Discussion et limites actuelles

Nous avons réalisé la totalité du travail que nous avons initialement proposé, et obtenu des résultats nouveaux pour la communauté qui renforcent nos connaissances des effets des fluides sur la déstabilisation des versants montagneux et notre capacité à anticiper les aléas gravitaires déclenchés par un forçage hydraulique. La seule difficulté rencontrée a été le problème de la qualité des forages qui n'ont pas permis un accès direct aux conditions hydrauliques de la nappe souterraine et un suivi régulier de l'évolution des propriétés du milieu sur une longue fenêtre de temps intégrant plusieurs cycles saisonniers.

Les données obtenues nous ont permis d'identifier et de quantifier le comportement hydraulique et hydrochimique, et de proposer une modèle hydromécanique du versant de Séchilienne, ainsi que de déterminer certains paramètres clés pour la déstabilisation du versant (variations du niveau piézométrique, modification du contenu chimique des eaux, amplitude des transferts de contraintes depuis la nappe piézométrique, chute de friction). Ces paramètres nous ont permis d'examiner en détail les interactions entre les mouvements de fluides, leur évolution géochimique et leurs effets sur la rupture du versant.

De manière générale, nos résultats suggèrent que les fluides profonds peuvent faciliter la rupture du volume instable perché dans la zone non-saturée du versant par transfert contrainte et affaiblissement de la friction. Ce résultat sans précédent dans la communauté fournit des clés qui aideront à la quantification plus fiable de l'aléa gravitaire.

5. Conclusions - perspectives

Nous avons mené ce travail en véritable collaboration, et ce, grâce à un nombre raisonnable de partenaires dans cette tâche, et à leur réelle complémentarité scientifique. Nous avons aussi interagi avec les partenaires des tâches 1 et 6 du projet. Les financements accordés pour cette tâche nous ont permis d'aborder plus en profondeur une question fondamentale: le rôle des fluides dans la rupture des versants. Les résultats révèlent une richesse d'informations quantitatives et qualitatives sans précédent sur les couplages entre les écoulements de fluides et les déformations menant à la rupture dans le versant de Séchilienne. Cinq publications d'impact international émaneront de cette tâche, ainsi qu'une participation à une dizaine de conférences nationales et internationales. Enfin, ce projet a permis de former deux doctorants et une étudiante de M2R qui ont tous produit un travail de qualité.

Suite à ce travail, nous pensons qu'il est maintenant important d'explorer plus en détail les liens entre déformations hydromécaniques et sismicité, et plus particulièrement, la localisation de nouveaux types de signatures sismiques dans les versants, comme les trémors, les événements basses et très basses fréquences, par rapport aux sources de fluides. Nous pensons aussi qu'un suivi hydro-sismique en profondeur permettrait d'améliorer considérablement notre compréhension du partitionnement de la déformation sismique et asismique dans les versants, et donc améliorer notre connaissance de l'aléa gravitaire.

Références

- Binet, S., Y. Guglielmi, J. Mudry, C. Bertrand (2007), Multiscale analysis of unstable rock slopes hydrogeology, *Bulletin de la Société Géologique de France*, 178, 159-168.
- Cappa, F., Y. Guglielmi, V. Merrien-Soukatchoff, J. Mudry, C. Bertrand, and A. Charvoille (2004), Hydromechanical modeling of a large moving rock slope inferred from slope levelling coupled to spring long-term hydrochemical monitoring: example of the La Clapière landslide (Southern-Alps, France), *J. Hydrol.*, 291(1-2):67-90.
- Cappa, F., Y. Guglielmi, S. Viseur, and S. Garambois (2013), Deep fluids can facilitate rupture of slow-moving giant landslides as a result of stress transfer and frictional weakening, *Geophys. Res. Lett.*, (soumis en Nov., 2013; en revision mineure en Déc., 2013)
- Derode, B., F. Cappa, Y. Guglielmi, and J. Rutqvist (2013), Coupled seismo-hydromechanical monitoring of inelastic effects on injection-induced fracture permeability, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 61, 266-274, doi:10.1016/j.ijrmms.2013.03.008
- Guglielmi, Y., J.M. Vengeon, C. Bertrand, J. Mudry, J.P. Follacci, and A. Giraud (2002), Hydrogeochemistry: an investigation tool to evaluate infiltration into large moving rock masses (case study of La Clapière and Séchilienne alpine landslides), *Bull. Eng. Geol. Env.*, 61:311-324, doi:10.1007/s10064-001-0144z
- Guglielmi, Y., F. Cappa, and S. Binet (2005), Coupling between hydrogeology and deformation of mountainous rock slopes: Insights of La Clapière area (Southern-Alps, France), *C. R. Geosciences*, 337:1154-1163.

- Helmstetter, A., and S. Garambois (2010), Seismic monitoring of S echilienne landslide (French Alps): Analysis of seismic signals and their correlation with rainfalls, *J. Geophys. Res.*, 115, F03016, doi:10.1029/2009JF001532.
- Iverson, R. M. (2005), Regulation of landslide motion by dilatancy and pore pressure feedback, *J. Geophys. Res.*, 110, F02015, doi:10.1029/2004JF000268.
- Lacroix, P. and A. Helmstetter (2011), Localization of seismic signals associated with micro-earthquakes and rockfalls on the S echilienne landslide, French Alps, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 101(1), 341-353, doi : 10.1785/0120100110
- Spillmann, T., H. Maurer, A. G. Green, B. Heincke, H. Willenberg, and S. Husen (2007), Microseismic investigation of an unstable mountain slope in the Swiss Alps, *J. Geophys. Res.*, 112, B07301, doi:10.1029/2006JB004723.
- Vallet, A., C. Bertrand, and J. Mudry (2013), Effective rainfall: a significant parameter to improve understanding of deep-seated rainfall triggering landslide – a simple computation temperature based method applied to S echilienne unstable slope (French Alps), *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 10, 8945-8991.
- Viesca R.C., and J.R. Rice (2012), Nucleation of slip-weakening rupture instability in landslides by localized increase of pore pressure, *J. Geophys. Res.*, 117, B03104, doi:10.1029/2011JB008866.

Tâches 3 - Configuration multidimensionnelle de la scène actuelle du risque : pour une meilleure intégration

Coordinateur: Geneviève Decrop (Decrop R & D)

Au-delà du phénomène géologique, le mouvement de terrain des Ruines de Séchilienne engendre un risque qui pèse sur les collectivités locales du bassin de la Romanche et du Sud de l'agglomération grenobloise depuis près de 30 ans. Il a fait l'objet depuis cette date de différentes modalités de gestion, tant dans la dimension préventive que dans celle d'une éventuelle gestion de crise. La durée de cette gestion, sans que le risque majeur affiché ne se réalise, et les particularités de l'aléa (notamment l'ampleur des incertitudes) ont justifié que la part sociale du risque (à la fois la dimension de la gestion opérationnelle et ses conséquences sociales et économiques) bénéficie d'une attention particulière dans le projet et qu'elle fasse l'objet d'un travail commun, interdisciplinaire.

A cet effet, la tâche 3 du projet, dédiée à ces dimensions prévoyait trois actions distinctes. L'une était consacrée à l'analyse de la gestion opérationnelle du risque, la deuxième consistait à affiner un outil d'aide à la gestion de crise, et la troisième s'attachait à donner consistance et contenu à l'échange interdisciplinaire des partenaires de SLAMS sur la dimension sociétale du risque, au travers d'un atelier transversal accompagnant le projet de recherche sur toute sa durée.

L'analyse de la gestion opérationnelle a été rattachée à la tâche 8, plus précisément au travail portant sur la réalisation d'un outil d'aide à la décision, sous forme d'un arbre des incertitudes.

La plateforme Web-monitoring proposé par l'INERIS avait pour objectif de mettre à la disposition des acteurs opérationnels un outil de gestion efficace de l'information pertinente, transparente, homogène, validée techniquement et accessible rapidement à tout ou partie des acteurs, notamment en situation de pré-alerte et de gestion de crise.

A cet effet, une page Web a été ouverte par l'INERIS, centralisant l'information technique et scientifique collectée dans le cadre de SLAMS, elle est à la disposition des chercheurs depuis octobre 2010 <<http://cenaris.ineris.fr/>>. Une note technique à ce sujet et la plateforme WEB constituent le livrable 3.2.

En outre, une simulation de crise a été organisée, utilisant entre autres le support de la page web. Celle-ci avait initialement pour objectif de mettre en scène l'ensemble des acteurs de la scène du risque dans des rôles éloignés de leurs compétences professionnelles habituelles (le but de la simulation n'étant pas de vérifier leur aptitude professionnelle) pour identifier d'éventuels points d'amélioration organisationnels et fonctionnels et dresser des recommandations quant à l'évolution des outils opérationnels de gestion du risque.

Dans la pratique, les professionnels ont accepté de contribuer à la simulation mais pas au jeu de rôle ! La décision a donc été prise de réaliser la simulation avec des étudiants de 3^{ème} année de l'ENTPE ; elle a été menée avec l'appui du CERTU, du LAEGO. Elle a été menée le 25 novembre 2011 en présence de nombreux professionnels, représentants de la société civile et partenaires du

projet SLAMS qui ont contribué à animer et/ou observer le déroulement de la simulation. Ils ont également alimenté le débriefing et le débat qui ont clôturé la journée.

La simulation en tant que telle a été construite pour refléter l'incertitude vécue dans une situation réelle, en « panachant » la préparation raisonnée d'une structure de fil rouge et un « flou » dans les développements possibles. Elle est ainsi restée interactive jusqu'au débriefing final.

S'agissant du fil rouge de la simulation et à la demande de la préfecture de l'Isère celui-ci a été choisi volontairement éloigné du contexte.

Le retour d'expérience a mis en évidence la demande des acteurs de la scène de risque de travailler sur un fil rouge réaliste ce qui a été le cas (un camion sous un éboulement). Ils rejettent toute mise en situation extrême irréaliste à leurs yeux. Ils ont été par ailleurs très réticents à se mettre eux-mêmes en scène, y compris dans des rôles très éloignés de leurs prérogatives professionnelles.

Compte tenu du fil rouge il a été difficile d'identifier des points d'amélioration spécifiques à la scène du risque de Séchilienne. En revanche, la simulation a mis en évidence l'importance de partager avec tous les acteurs la même et unique base d'informations et de données validées. Dans ce sens, le web-monitoring apparaît comme un outil indispensable en matière de gestion des crises et de communication de crise puisqu'il favorise l'expertise ainsi que le rassemblement de capacités d'expertise. Les voies d'amélioration identifiées visent maintenant à favoriser le rapprochement entre experts et décideurs. La visualisation de scénarii d'aide à la décision est l'une des pistes à l'étude.

Il faut noter que ce type de simulation ne peut en aucun cas remplacer un exercice de simulation de crise piloté par l'autorité préfectorale avec un scénario réaliste et tous les services publics et privés concernés comme il s'est produit en novembre 2012.

L'atelier transversal, coordonné par Geneviève Decrop avec la participation active du PARN, a été, dans les faits, le travail central de la tâche 3. Dans la proposition initiale, il se présentait sous la forme de six journées de séminaire interne à l'équipe de recherche, soit deux par an, dont les thématiques seraient déterminées au fur et à mesure de l'avancée du projet et en fonction de l'émergence de questions offrant un enjeu interdisciplinaire. Le premier acte consistait alors en la définition, sur la base d'une consultation large, des thèmes, des enjeux et des modalités de tenue des ateliers. Cette consultation a été faite entre le 15 avril et le 15 juin 2010, sous la forme d'une invitation par la coordinatrice de l'atelier, Geneviève Decrop, adressée aux chercheurs à relire de façon distanciée et critique le projet commun de recherche, en pointant les points forts, mais aussi les points obscurs, et en formulant les questions adressées aux autres tâches du projet et aux autres disciplines engagées. 60 % des chercheurs se sont pliés à l'exercice. Le résultat a été présenté lors d'une réunion du consortium le 22 juin et la synthèse est disponible sur demande.

Des obstacles à l'interdisciplinarité

La proposition de relecture s'est heurtée d'emblée à la difficulté majeure de la démarche interdisciplinaire en tant que telle, à laquelle SLAMS n'a pas échappé. En effet, bien que l'interdisciplinarité soit invoquée comme un enjeu d'importance dans nombre de programmes scientifiques et d'appels d'offre, le manque de moyens financiers et humains affectés à cette dimension et la faible valorisation de cette dimension dans la carrière des chercheurs ne manquent pas de se révéler dans les activités concrètes des programmes. Il est apparu en effet que si des moyens en temps de travail était affecté au maître d'œuvre de l'atelier, en revanche les autres partenaires ne disposaient pas sur leur budget de temps affecté, ni même de frais de déplacement.

Certains ont pointé la difficulté dès ce premier exercice et se sont abstenus de toute participation active. Il en ressort que la bonne conduite du travail interdisciplinaire et ses résultats ont reposé sur le volontariat et l'implication d'un petit noyau de chercheurs convaincus de l'intérêt de la démarche. Ce que le projet perdait en extension, il le gagnait en intensité.

La mise en commun des interrogations, à ce stade, a fait apparaître la deuxième difficulté : l'incompréhension entre les sciences de la terre et les sciences humaines et sociales : *« les notions, la démarche et le langage des SHS sont largement ignorées des sciences de la terre. Elles sont inconnues ou obscures, déroutantes, voire irritantes. Il faudrait s'interroger sur ce point (mode d'usage du langage ? trivialité des objets ? ébranlement des évidences ? incertitude sur les buts...).* Dans l'autre sens, si l'outillage des ST est en partie opaque aux SHS, la méthodologie et les procédures des sciences physiques sont comprises dans leur structure et la légitimité des finalités est acquise», écrivions-nous dans la synthèse. Cependant, cette incompréhension de fond ne doit pas masquer les difficultés internes aux deux grands champs scientifiques : tant à l'intérieur du champ des Sciences de la terre, que du champ des SHS, les zones d'ombre, les incompréhensions et les doutes ne manquent pas.

Cependant, le thème de la première séance de l'atelier transversal s'imposait d'emblée : il s'agissait pour les chercheurs SHS du projet d'éclaircir leurs méthodes et leurs concepts et d'exposer leurs enjeux propres pour leurs collègues des ST.

Un premier programme de l'atelier, (trop) ambitieux ...

L'analyse fine des réponses des scientifiques lors de la consultation d'avril-juin 2010 faisait ressortir quelques autres grandes problématiques sur lesquelles il a été proposé un programme et un calendrier pour les 5 autres sessions de l'atelier. On peut rappeler pour mémoire 1) l'articulation des procédures de la connaissance scientifique et des procédures d'expertise, au travers des deux objets que sont l'Observatoire Multidisciplinaire des Instabilités de Versant (Université) et le Système de Surveillance (CETE) ; 2) l'articulation de l'observation géologique et de la modélisation numérique ; 3) le traitement de l'incertitude dans les outils d'aide à la décision (plateforme Web monitoring et arbre de décision ...

Cependant il est rapidement apparu qu'un tel programme était surdimensionné par rapport aux moyens effectifs alloués au projet sur cet objet. Après la première séance, tenue le 3 décembre 2010, il a été décidé de réduire le calendrier de l'atelier et d'en resserrer la problématique (annexe 2). Les échanges, lors de cet atelier, avaient fait en effet ressortir beaucoup plus nettement encore que lors de la première étape trois questions transversales du projet : d'une part l'incertitude, en tant que dimension structurante de l'aléa et de la gestion de ce risque ; d'autre part l'accès aux données de la surveillance pour la communauté scientifique (décalé d'une période de 6 mois par décision préfectorale pour protéger la gestion opérationnelle de toute interférence) ; et enfin l'articulation problématique de l'expertise du risque et de la recherche scientifique sur cet objet, notamment à propos des récents scénarios de risque livrés par le collège d'experts, revisitant nettement le risque à la baisse (les hypothèses de travail sous-tendant cette révision n'étant pas communiquées aux chercheurs).

... resserré et recentré autour d'un noyau de chercheurs impliqués

Ces trois objets ont donné la matière d'un programme de l'atelier resserré en deux groupes de travail, le premier sur l'accès aux données et le second sur l'articulation de l'expertise et de la recherche. A cet effet, deux groupes de travail ont été constitués pour préparer et conduire la réflexion sur chacune des thématiques.

L'atelier sur les données, après un travail préparatoire d'enquête par questionnaires, s'est réuni le 6 juin 2011. La discussion a fait apparaître que derrière la question récurrente du décalage de 6 mois dans la transmission des données par l'expert institutionnel (le CETE à la demande du préfet)

se cachait des difficultés plus complexes, car liées au paysage institutionnel. Il faut en effet distinguer les données à usage de gestion opérationnelle diligenté par le Préfet et celles qui sont indispensables pour la recherche.

Sur le plan de la recherche, les questions qui se posent sont celles de la qualité et celles de l'échange entre laboratoires et institutions soit des questions de politiques scientifiques et de moyens, notamment en ces temps de réorganisation des institutions publiques (RGPP), de libéralisation et d'autonomisation du marché de l'expertise. D'une manière générale, le GT pointe une culture de la rétention de données et de défense des périmètres institutionnels propre à la culture française, voire européenne, préjudiciable à l'activité scientifique et revient sur l'articulation de l'expertise avec la recherche, objet du 2^{ème} groupe de travail (Livrable 3.4). A noter qu'un site internet (<http://www.versant-sechilienne.developpement-durable.gouv.fr/>) a été ouvert en 2011 sur lequel les données sont mises à disposition avec le décalage de 6 mois.

L'atelier sur la constitution de l'expertise et ses rapports avec la recherche scientifique a été préparé par deux types de travaux.

D'une part, une enquête par interview menée par G. Decrop et J.-M. Vengeon auprès des principaux acteurs historiques et actuels de l'expertise du risque de Séchilienne.

D'autre part, le travail sur l'histoire sociale et scientifique de ce risque mené par G. Decrop dans la tâche 4.

Et l'enquête et ce travail historique ont pointé un certain nombre de problèmes et de points faibles relatifs à l'expertise telle qu'elle s'est constituée et déroulée depuis le milieu des années 1980, en particulier une certaine fermeture à l'objection et à la controverse scientifique, un manque de traçabilité et de transparence du processus d'expertise, une absence d'interaction avec la recherche. L'explication la plus plausible pour expliquer cette situation est que sur le risque émergent de Séchilienne, il a été appliqué des procédures classiques, routinières, adaptées à un type de risques récurrents et avérés. Ces procédures se sont révélées inadaptées à faire face à un phénomène inédit, incertain, non probabilisable. S'ajoutent à cela des logiques institutionnelles recoupant des logiques individuelles de carrière, de préservation de corps, de mobilisation des ressources publiques etc... Au total, si on peut relever que la gestion actuelle du risque rencontre un bon niveau de satisfaction (voir T8, V. Boudières et L. Creton-Cazenave, Analyse de l'offre de gestion du risque des Ruines de Séchilienne, 2013), on peut faire observer que la scène actuelle de l'expertise s'est construite dans le temps en une sorte de monopole, sur le découragement des acteurs dissidents et la sortie de scène des populations les plus exposées et les plus virulentes. Ce même rapport pointait cependant l'insatisfaction des acteurs scientifiques, ce qui concorde avec les résultats obtenus dans l'étude historique.

... Aboutissant à un livrable collectif et interdisciplinaire : un guide de bonnes pratiques de l'expertise publique du risque géologique

Le groupe de travail, après s'être approprié ces différents matériaux et avoir réfléchi sur d'autres cas d'expertise vécus par ses membres, a souhaité orienter sa réflexion positivement en direction de propositions pour aider à constituer une expertise adaptée à la problématique des risques incertains et fortement dépendants des savoirs scientifiques. Une investigation des différents documents relatifs à la conduite de l'expertise (chartes, témoignages, guides) a été menée pour soutenir le travail collectif qui a abouti à la rédaction d'un guide de bonnes pratiques en matière d'expertise du risque mouvements de terrain. Le texte a été soumis à la relecture critique des collègues partenaires ou non du projet et il a été finalement adopté par le groupe de travail comme sa production propre dans le cadre de SLAMS (livrable)

Le guide des bonnes pratiques est dorénavant un document public, diffusé et discuté dans un certain nombre d'arènes : il a été présenté et discuté lors de journées scientifiques de l'observatoire des sciences de l'univers de Grenoble (OSUG) - (et à cette occasion avec le CETE de Lyon-, lors de réunion de travail en SHS du laboratoire PACTE de l'IEP Grenoble. Le CETE de Lyon a fait part de son point de vue différent sur certains points et a rédigé une note dans ce sens (cf note en annexe au livrable 3.4). Il est actuellement porté comme pièce au débat dans un groupe de travail dédié à

l'expertise de l'Association Française pour la Prévention des Risques Naturels (AFPCN) par l'intermédiaire de François Gillet, par ailleurs membre du conseil scientifique de SLAMS. Il est projeté d'organiser un séminaire de restitution/discussion de ce guide réunissant les acteurs de l'expertise (ministère, laboratoires, établissements publics d'ingénierie, chercheurs, élus) au printemps 2014, si des moyens financiers sont trouvés.

L'interdisciplinarité et le dialogue entre sciences de la terre et sciences humaines et sociales ont été affichés au départ comme une dimension importante du projet SLAMS, dont l'objet central ne peut en effet être considéré exclusivement comme un phénomène géologique, mais d'abord et avant tout comme un risque collectif. Le risque est une notion interdisciplinaire par construction, une construction hybride entre les sciences de la nature et les sciences de l'homme. La culture administrative française où la technique prime, a fortement tendance à oublier cette double nature et à réduire le risque à sa seule dimension de l'aléa physique. Là est sans doute la limite majeure à laquelle se heurte aujourd'hui l'action publique de prévention et de gestion des risques. Il est difficile d'aller contre cette tendance et de surmonter les difficultés de l'échange interdisciplinaire, parmi lesquelles on peut citer pêle-mêle les préventions et les suspicions entre sciences dites « dures » et sciences dites « molles », la très faible valorisation dans les carrières de chercheurs attachée aux travaux interdisciplinaires, la rationalisation croissante des programmes de recherche, qui laissent peu de place à l'intuition, aux bifurcations imprévues, à l'échange gratuit. Or, la rencontre interdisciplinaire ne peut pas porter ses fruits sans qu'elle soit précédée d'un processus long, patient et souvent frustrant de travail collectif et individuel, au cours duquel les participants acceptent de s'exposer et de mettre en jeu certaines des convictions et des représentations qui sous-tendent leurs identités professionnelles – et cela sans certitude quant à une éventuelle plus-value au bout du chemin.

Pour toutes ces raisons, il s'en est fallu de peu que la méta-interdisciplinarité - que nous qualifions ainsi pour la distinguer de l'interdisciplinarité entre les spécialités d'un même champ disciplinaire - ne soit au final qu'une coquille vide. Il n'a déjà pas été facile, ni toujours couronné de succès de faire vivre l'interdisciplinarité « ordinaire » tout au long de ce projet, tant la logique de la spécialisation est puissante dans la science comme ailleurs. Au bout du compte, quelque chose a pu naître de ce processus volontariste, porté par la conviction d'un petit groupe de chercheurs qu'il y avait là quelque chose d'important. Le résultat témoigne à sa manière du chemin parcouru et de ce que le dialogue interdisciplinaire est malgré tout possible et même sans doute nécessaire. Ce résultat fera son chemin au-delà de la fin du projet SLAMS, si les institutions y sont attentives. Nous ne pouvons que l'espérer.

Tâche 4 - Approche diachronique : 20 ans de gestion du risque à Séchilienne

Coordinateur: Geneviève Decrop (Decrop R & D)

Il s'agissait, dans cette tâche de mettre en perspective la gestion du risque des Ruines dans sa durée. Les travaux réalisés dans le passé avaient concerné son histoire sociale, c'est à dire la manière dont ce risque a été perçu et appréhendé par les collectivités et les personnes concernées ; les réactions et les prises de position face aux différents éléments de sa gestion ; les effets sur le territoire et le devenir des populations. Dans la problématique de ce risque, l'expertise occupe une place centrale. Or, l'expertise en tant que telle n'avait jusqu'ici été qu'effleurée et questionnée à la marge. Le projet SLAMS a été l'occasion d'ouvrir cette boîte noire, en la restituant dans la perspective plus large de l'histoire scientifique du Mouvement de Séchilienne (depuis sa réactivation au milieu des années 1980), et en s'interrogeant sur les interactions, les articulations entre l'expertise à des fins de gestion opérationnelle du risque et la recherche scientifique sur le phénomène géologique.

Plusieurs sources ont été utilisées pour mener à bien ce travail : d'une part, la documentation réunie par Geneviève Decrop lors de ces travaux antérieurs et complétée pour la période des années 2000; d'autre part, la base documentaire scientifique constituée par Benjamin Einhorn du PARN sur Séchilienne (dont, entre autres, l'analyse longitudinale a fait apparaître de manière significative la courbe d'intérêt de cet objet parmi les acteurs scientifiques) ; enfin, les entretiens menés avec Jean-Marc Vengeon, mentionnés à propos de l'atelier interdisciplinaire. Ce travail a fourni les matériaux de la réflexion interdisciplinaire de l'atelier, comme il a été exposé plus haut. Dans la perspective de la gestion des risques naturels, il y a des enseignements à en tirer : il offre en effet l'exemple d'une nouvelle génération de risque sur lesquels les outils classiques de gestion n'ont que faiblement prise, voire s'avèrent contre-productifs. Dans ces cas de figure (où domine l'incertitude) le risque, l'expertise et la gestion opérationnelle sont intrinsèquement liés.

Le risque d'éboulement des Ruines de Séchilienne est en effet un *risque d'expert*, au sens où seule l'expertise scientifique et technique est en mesure de le déceler et de l'évaluer. Il place donc les populations exposées et les gestionnaires dans une dépendance totale vis-à-vis des experts. Il s'agit d'un risque non probabilisable, qui présente des incertitudes majeures, notamment quant au scénario de réalisation (une seule rupture et un effondrement en masse ? plusieurs phases successives de volumes divers ? en effritement continu ? ...) et à son échelle temporelle. Son point de départ est une réactivation d'un mouvement ancien. La toponymie – les Ruines de Séchilienne – indique en effet l'inscription dans la mémoire longue locale d'éboulements récurrents menaçant les passagers de l'axe stratégique Grenoble/Oisans, à la hauteur du goulet d'étranglement de la Romanche.

Ce risque est suivi par une expertise initiée en 1984/85 et toujours en vigueur aujourd'hui, sous la forme d'abord (de 1984 à 1999) d'un comité d'experts locaux, puis d'un collège dit international à partir de 2000. Le CETE de Lyon, assure la surveillance du site à la demande de la DGPR et pour le compte du Préfet de l'Isère dans un objectif de sécurité civile.

Aujourd'hui, les scénarios de risque élaborés par le collège d'experts nommé en 2000 se démarquent fortement de ceux élaborés par leurs prédécesseurs : l'hypothèse d'un effondrement en masse d'un volume important créant un barrage sur la Romanche est minimisée au profit de l'hypothèse d'un éboulement « polyphasé » de volumes limités, sans création de barrages ou avec une création de barrage dépourvue des conséquences dramatiques évoquées il y a 15 ans. La question est cependant que cette nouvelle expertise ne diffère pas dans son mode de constitution et de fonctionnement de la première. Les nouvelles hypothèses ne reposent pas non plus sur une avancée de la recherche qui aurait permis d'éclairer le mécanisme moteur du mouvement.

L'expertise des Ruines de Séchilienne a présenté les points critiques suivants, au cours de son histoire :

- les travaux des experts se sont déroulés dans un certain huis-clos, adressés à la DGPR et au Préfet de l'Isère. Seuls les rapports annuels étaient accessibles au public et aux autres scientifiques.
- l'expertise en titre s'est révélée fermée aux objections et questions venant d'autres experts ou de scientifiques, malgré le poids des incertitudes de fond pesant sur la gestion sociale du risque.
- il n'y a eu aucune évaluation de l'expertise digne de ce nom (une procédure de validation a été lancée en 1992 par les ministères de tutelle. Mais composée de collègues parisiens des experts, et tenue sur 3 jours seulement, elle n'a interrogé que les acteurs impliqués).
- il y a eu absence de procédure claire de nomination des experts : dans la première phase, il s'agit de la saisine routinière interne au CETE, jamais remise en cause dans les 15 années suivantes, et dans la deuxième phase, d'une nomination discrétionnaire par un haut fonctionnaire officialisée par une simple lettre de commande. Dans les deux cas, les experts ont disposé d'une grande latitude. Dans la première phase, ils cumulaient l'expertise, la surveillance du site et le formatage du système de surveillance, le conseil opérationnel aux gestionnaires en matière de protection des populations et de parades.
- enfin, l'expertise s'est déroulée indépendamment de l'effort de recherche qui a commencé à se déployer au début des années 2000, notamment dans l'université voisine Joseph Fourier de Grenoble.

Ces travaux ont donné lieu à un livrable et à un article à paraître dans la revue Nature Sciences Sociétés. Un ouvrage, aux Presses Universitaires de Grenoble est en perspective.

Tâches 5 - Dimension spatio-temporelle du risque de Séchilienne (point de vue géologique)

Coordinateur : Denis Jongmans (ISTERRE)

A INTRODUCTION

Durant le Quaternaire, la vallée de La Romanche au niveau de Séchilienne a été le siège d'une activité érosive intense engendrée par la présence de glaciers et de nombreux cycles de glaciation et déglaciation. Lors des phases de déglaciation, les versants ont subi des phénomènes de décompression correspondant au relâchement des contraintes résultant de la fonte de la glace. Les datations récentes de l'escarpement sommital de Séchilienne (Le Roux et al., 2009) montrent cependant qu'il existe un retard de plusieurs milliers d'années entre la fin de la dernière glaciation et l'initiation de ce mouvement de terrain. La géométrie et les caractéristiques des zones endommagées évoluant vers des mouvements de terrain sont fortement contrôlées par les facteurs internes (lithologie, héritage tectonique) mais aussi par les facteurs de forçage externe (séismes, cinétique de fonte du glacier, persistance du pergélisol, effets climatiques) dont certains sont susceptibles d'expliquer le décalage temporel observé.

Les objectifs au sein de la tâche 5 étaient les suivants :

- (O1) caractériser en surface et en volume l'état de déstructuration actuel des micaschistes résultant des structures héritées (foliation, fractures et failles d'origine tectonique) et de la déformation gravitaire, y compris les propriétés mécaniques de la matrice rocheuse et des plans de discontinuités,
- (O2) établir la chronologie et l'évolution spatiale de la déstabilisation du versant de Séchilienne depuis son initiation (il y a environ 8000 ans) jusqu'à la situation actuelle,
- (O3) comprendre l'évolution du mouvement de terrain en fonction du temps par modélisation numérique,
- (O4) étudier la réponse dynamique du mouvement durant les changements climatiques de l'Holocène. Ce dernier objectif n'a pas pu être réalisé dans le cadre du projet.

B METHODES

Pour répondre à ces objectifs, les mesures et modélisations numériques suivantes ont été réalisées.

Objectif 1

Avant le projet SLAMS, l'état de l'endommagement du versant de Séchilienne n'était connu que de façon ponctuelle, principalement à partir des données de surface et de celles obtenues grâce à la galerie de reconnaissance à la côte NGF 710 et à des profils de géophysique de longueur limitée (Vengeon, 1998 ; Duranthon et al., 2003 ; Meric et al., 2005). En août 2008, 4 grands profils sismiques (470 m de long) et 3 profils électriques (960 m) ont été réalisés, permettant d'avoir des informations jusqu'à une profondeur pouvant atteindre 150 m environ. Dans le cadre du projet, ces données ont été retraitées et réinterprétées en vue d'obtenir une vue 3D de la zone endommagée. La Figure 1 reprend la localisation des ces 7 grands profils géophysiques.

Les méthodes géophysiques ne fournissent pas directement les paramètres mécaniques nécessaires à la compréhension du phénomène géologique et à la modélisation numérique. Plusieurs lois de

mélange, théoriques ou empiriques, ont été proposées pour faire le lien entre la vitesse des ondes P (V_P) et la porosité ϕ principalement pour des roches sédimentaires saturées (Mavko et al., 1998). Une des lois les plus simples est l'équation empirique proposée par Wyllie et al. (1956), qui s'écrit :

$$1/V_P = \phi/V_{Pf} + (1-\phi)/V_{P0} \quad (1)$$

où ϕ est la porosité du milieu et V_P , V_{Pf} et V_{P0} sont respectivement les vitesses dans le milieu poreux, dans le fluide imprégnant la roche et dans la matrice. Dans le cas d'une roche sèche fracturée (cas de Séchilienne), V_{Pf} est la vitesse de l'air et ϕ est la porosité de fissures. La vitesse dans la matrice a été obtenue à partir des résultats d'essais de laboratoire mesurant la vitesse V_P et la porosité (Leroux et al., 2011).

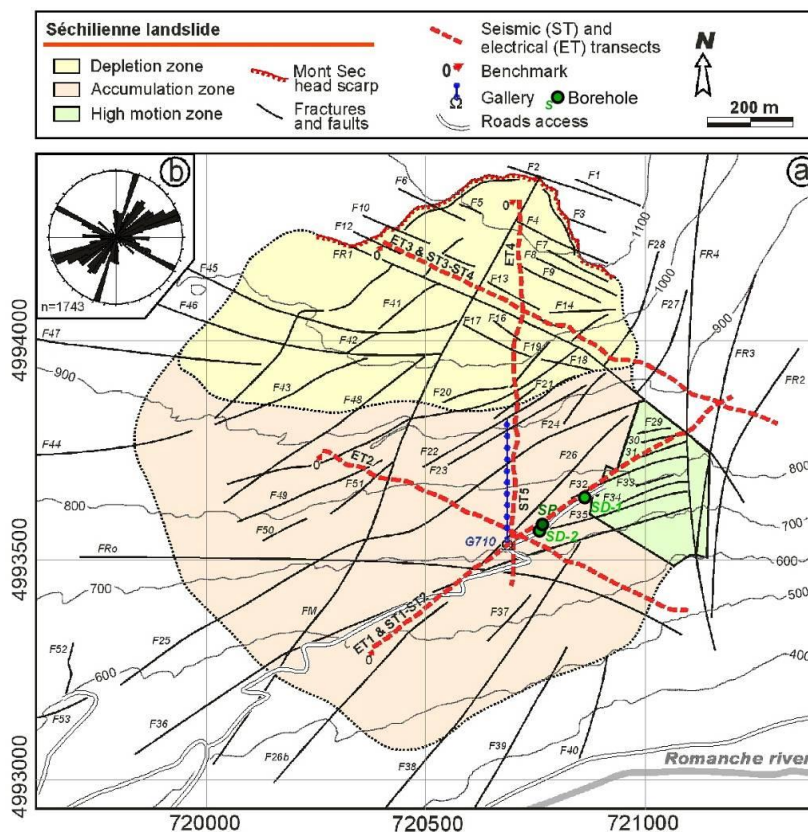


Figure 1. (a) Carte structurale simplifiée du versant de Séchilienne (modifiée à partir de Potherat and Alfonsi, 2001). Les zones d'affaissement, de bombement et très active sont respectivement colorées en jaune, rose et vert. Sur cette figure sont localisés la galerie de reconnaissance (G710), les 3 forages profonds (cercles gris) et les profils de tomographie électrique (ET1 à ET4) et sismique (ST1 à ST5). (b) Diagramme en rose des discontinuités structurales montrant les trois principales orientations de fractures affectant le versant (N20°E, N60-70°E et N120°E).

Enfin, des essais de laboratoire (uniaxiaux, triaxiaux et brésiliens) ont été réalisés sur des échantillons prélevés dans les forages profonds en vue de déterminer les principales caractéristiques géomécaniques dans les micaschistes et les grès (module de Young, résistances à la compression et à la traction, angle de frottement) et le long des plans de discontinuité (cohésion, angle de frottement).

Objectif 2

La méthode utilisée pour la datation des escarpements rocheux constitués de micaschistes gréseux est la mesure de la concentration du nucléide cosmogénique ^{10}Be produit in situ s'accumulant aux seins des minéraux de quartz. Ce nucléide cosmogénique est produit lors de réactions nucléaires entre les particules primaires et secondaires de haute énergie issues du rayonnement cosmique et les atomes constituant les roches exposées à la surface de la Terre (Gosse and Philips, 2001). Pour chaque site d'échantillonnage, 2 à 3 kg de roche contenant des veines de quartz ont été prélevés sur l'affleurement. Le quartz de chaque échantillon a été isolé et purifié par des attaques physico-chimiques successives. Après ajout d'une quantité connue de ^9Be entraîneur, le béryllium est extrait de ce quartz puis, après conditionnement sous forme d'oxyde de béryllium, analysé par spectrométrie de masse par accélérateur (AMS) sur l'instrument national ASTER localisé au CEREGE afin de déterminer la concentration de ^{10}Be (Brown et al., 1998). Cette concentration peut être finalement interprétée en termes d'âge d'exposition en utilisant par exemple le code de calcul fourni par « Cronus calculator » (Balco, 2008). Ce code prend en compte les variations temporelles du taux de production actuel en fonction de la latitude, de l'altitude et de la topographie (S_t) du site d'échantillonnage suivant la procédure de Stone (2000). Dans le cadre de cette étude nous avons également intégré une correction liée à la présence d'une couverture neigeuse (S_s) de 2m sur une durée de 4 mois pour les échantillons prélevés sur des surfaces sub-horizontales. Le taux de production (P) associé à l'échantillonnage est $P = P_0 S_t S_s$ avec (P_0) qui représente le taux de production en surface. Ces mesures permettent de déterminer une durée minimale d'exposition au rayonnement cosmique en surface et donc de dater la mise à la surface de la roche. Durant le projet SLAMS, deux campagnes d'échantillonnages ont été réalisées en 2010 (23 échantillons) et 2011 (39 échantillons) sur des escarpements internes du mouvement, en complément des 23 datations effectuées en 2009 (hors projet SLAMS, Le Roux et al., 2009).

Objectif 3

L'évolution thermique du versant de Séchilienne (hypothèse de géométrie 2D) durant les derniers 21000 ans a été simulée numériquement en implémentant un modèle de formation de permafrost dans le code aux éléments finis « Comsol » (software (<http://www.comsol.com>)). La géométrie du versant a été simplifiée et étendue pour réduire les effets de bord. Le versant a été maillé avec 1758 éléments triangulaires dont la taille est comprise entre 65 et 175 m. L'évolution de la température dans le versant a été calculée avec un pas de 4 ans, en considérant un flux de chaleur horizontal nul et un flux vertical de 65mW/m^2 à la base du modèle (Goy et al., 1996). Comme les conditions climatiques existant durant ces 21000 dernières années restent peu connues, un modèle simple de combinaison des processus se produisant à la surface du sol (TTOP model ; Smith and Riseborough, 1996) a été choisi et couplé avec la modélisation thermique dans le versant (Williams and Smith, 1989). La courbe de température dans l'air depuis le dernier maximum glaciaire a été obtenue en compilant des courbes trouvées dans la littérature et en les corrigeant pour le site de Séchilienne (Lebrouc et al., 2012).

C PROSPECTION GEOPHYSIQUE

L'analyse des grands profils électriques et sismiques a permis de déterminer la géométrie des zones déstructurées par l'instabilité gravitaire (Le Roux et al., 2011). Sous la couche altérée, la zone stable (colorée en blanc sur la Figure 1) est caractérisée par des vitesses sismiques élevées ($V_p > 3500$ m/s) et des résistivités électriques de l'ordre de $600 \Omega.m$ caractérisant les micaschistes. Dans la zone subsidente, on observe une forte diminution de V_p (< 2000 m/s) associée à une augmentation très forte de la résistivité électrique (2000 à $6000 \Omega.m$), sur une épaisseur de l'ordre de 100 à 150 m. Ces variations de paramètres géophysiques traduisent la présence de fractures ouvertes remplies d'air sur une grande profondeur, qui contribuent à augmenter la résistivité et à diminuer la vitesse

sismique. Dans la zone très active, une épaisseur similaire (150 m) de terrains déstructurés a été mise en évidence, au contraire de la zone de bombement où cette couche intensément fracturée est plus fine (20-50 m) et surmonte une couche de caractéristiques intermédiaires avant d'atteindre le substratum compact entre 100 et 200 m de profondeur. Les valeurs de vitesses sismiques V_p ont été transformées en porosité de fissures à l'échelle de 20-40 m en utilisant la loi de Willye (Equation 1 ; Figure 2.a). Les images en porosité obtenues le long des trois principaux profils sismiques sont montrées à la Figure 2b à d.

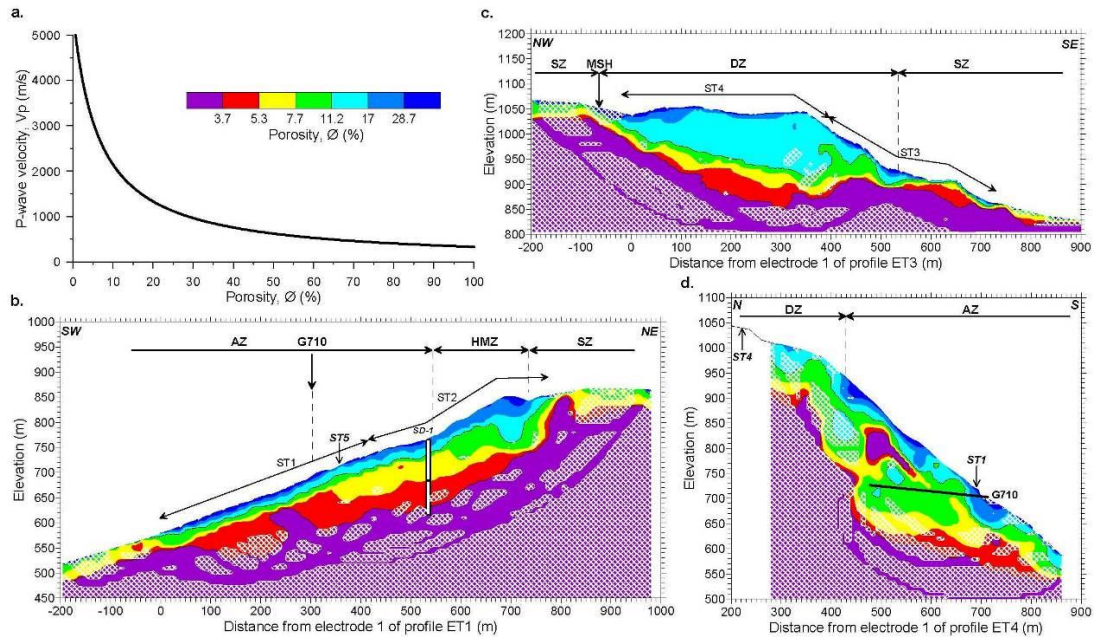


Figure 2. (a) Loi de Willye déterminée pour les micaschistes de Séchillienne. (b) à (d) cartes de porosité calculées à partir des 3 profils sismiques (Leroux et al., 2011).

La vitesse dans les micaschistes sains (3500 m/s) correspond à une porosité de 3,7 %. Dans les parties très déstructurées du versant, la porosité peut atteindre 30%, résultant de la déformation gravitaire au sein du mouvement.

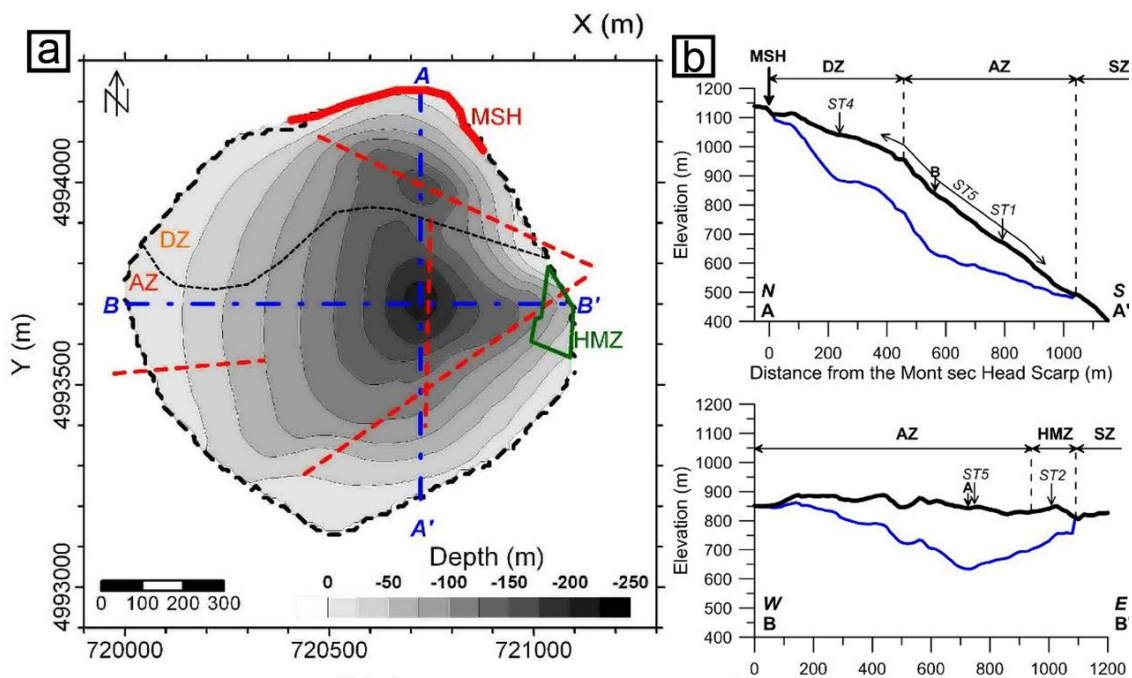


Figure 3. (a) Carte 2D montrant la géométrie du mouvement de terrain (iso-profondeurs) avec les limites des zones, la localisation des profils sismiques (tirets rouges) et des deux coupes AA' et BB' (tirets bleus). (b) Deux coupes avec la limite de la masse affectée par l'instabilité (ligne bleue) en considérant une valeur limite de 3,7 % en porosité ($V_p=3500$ m/s). MSH : Escarpement sommital du Mont Sec. DZ : zone d'affaissement. AZ : zone de bombement. SZ : zone stable.

A partir de ces images, d'un profil V_p réalisé précédemment (Méric et al., 2005) et des limites latérales du mouvement, le volume affecté par la déformation gravitaire en considérant une valeur limite de porosité de 3,7 % a été calculé. Le volume reconstitué est montré à la Figure 3b. En tenant compte des différentes sources d'incertitude, un volume de 60 ± 10 millions de m^3 a pu être estimé pour le mouvement de Séchilienne. Deux coupes NS et EW (Figure 3c) montrent la profondeur de la zone déstructurée qui atteint localement 200 m. Les mesures inclinométriques réalisées dans les forages profonds (voir implantation à la Figure 1) ont montré une zone d'inflexion à environ 110 m de profondeur (Figure 4), en accord avec une limite de vitesse entre 3000 et 3500 m/s.

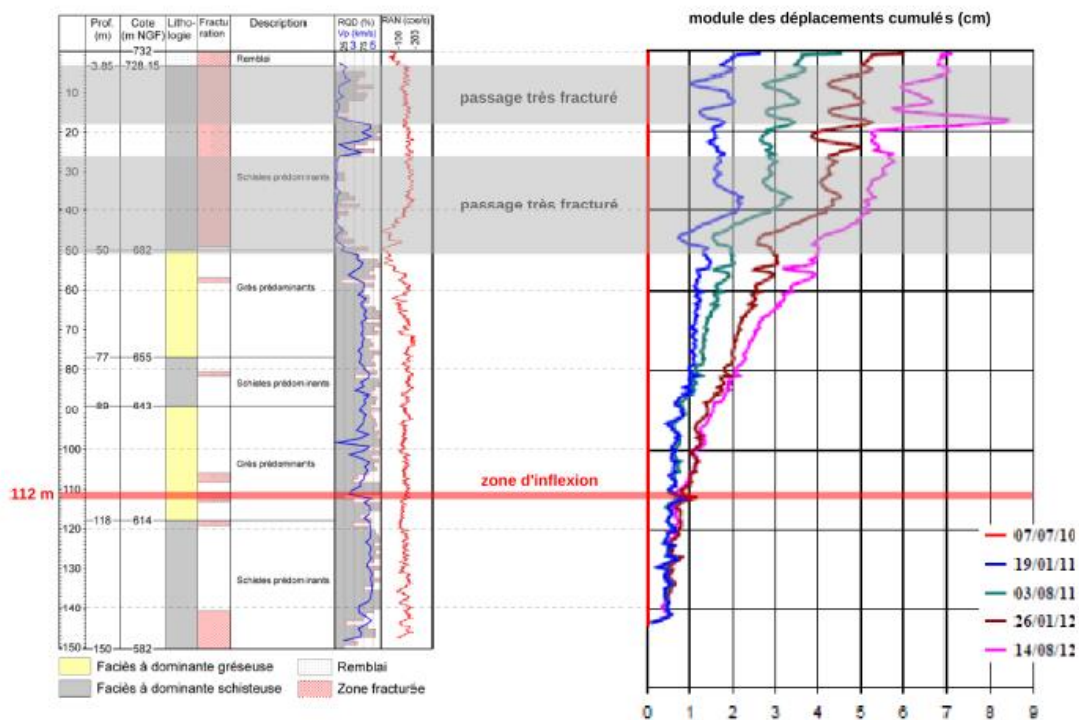


Figure 4. Description lithologique du sondage SC2 et relevés inclinométriques réalisés entre le 07/07/2010 et le 14/08/2012. Ces derniers montrent une zone d'inflexion à 112 m de profondeur et un mouvement général de basculement vers la vallée de flexural toppling.

Le tableau des caractéristiques géomécaniques de la matrice rocheuse et des discontinuités est repris en annexe (Livrable 5.3). Comme le montre la Figure 4, la lithologie rencontrée varie entre des micaschistes et des grès massifs. Aucun essai de laboratoire n'a pu être réalisé dans les micaschistes. Les résultats dans les grès sont très variables (résistance à la compression comprise entre 34 et 163 MPa), en raison de la présence de fines passées schisteuses dans certains échantillons et de l'influence défavorable de la foliation. Au niveau des discontinuités, un angle de frottement résiduel moyen de l'ordre de 33° , typique de ce type de massif rocheux, a été mesuré.

Les couches les plus profondes du grès (E3 et E1) ont fait l'objet d'essais triaxiaux afin d'identifier un critère de Hoek Brown. En dépit du nombre d'essais limité (identifications sur 5 points), on constate que la résistance à la compression uniaxiale identifiée dans le critère de Hoek Brown est voisine pour les deux faciès 102 et 105 MPa. Le paramètre m_i diffère (8,6 pour les grès ferrugineux, et 13,1 pour le grès massif (E1)).

Le résultat le plus marquant pour ces faciès très faiblement poreux (porosité connectée inférieure à 1%) est la forte dépendance du module de Young au confinement. Nous joignons les graphes montrant la valeur identifiée lors des essais, en fonction de la pression de confinement, et la variation relative (vis à vis de la valeur identifiée avant essai par mesures de vitesse du son).

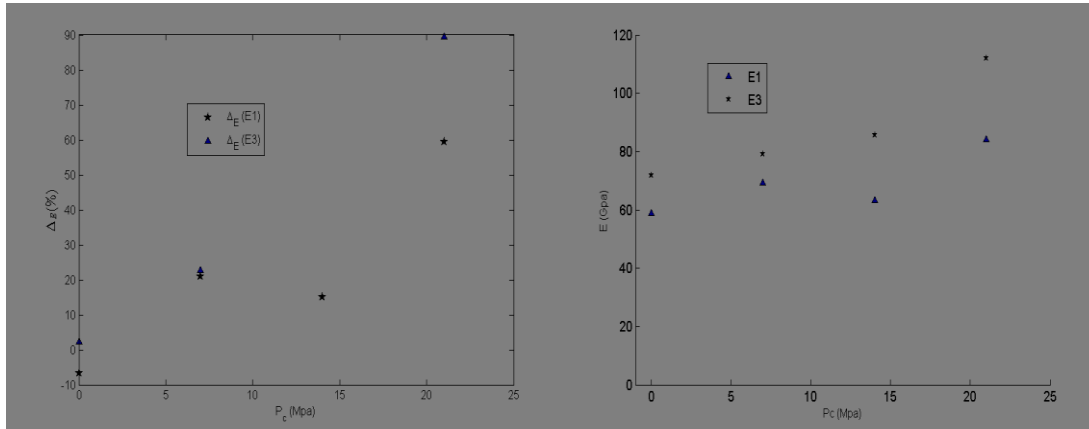


Figure 5. Valeur relative (a) et absolue du module d'Young en fonction du confinement.

D MODELISATION THERMIQUE

La courbe de température estimée pour l'altitude de Séchilienne depuis le dernier maximum glaciaire est présentée à la Figure 6. Elle permet de distinguer 4 périodes thermiques principales : deux périodes froides (bandes bleues A et C) et deux périodes de réchauffement (bandes blanches B et D).

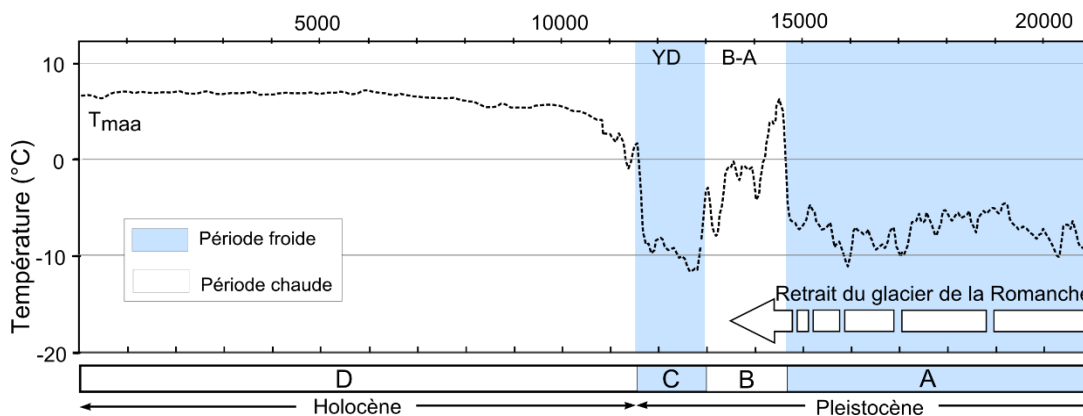


Figure 6. Courbe de température moyenne sur les derniers 21000 ans, montrant l'alternance de périodes froides et chaudes (Lebrouc et al., 2013).

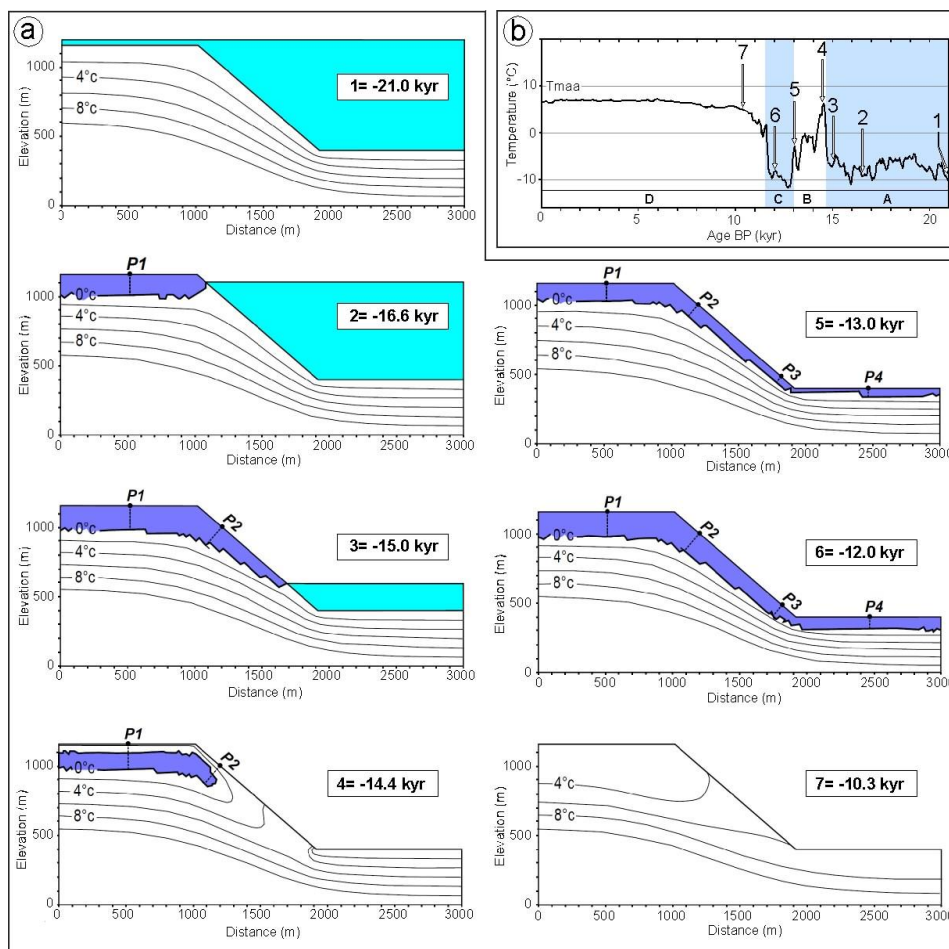


Figure 7. Résultats de la modélisation thermique 2D. (a) Distribution des températures pour un modèle 1T à 7 instants présentés en (b). P1 et P4 indiquent les localisations où sont extraites les valeurs d'épaisseur du pergélisol. (Lebrouc et al., 2013).

L'évolution thermique dans le versant a été simulée pour quatre modèles thermiques (glacier froid ou tempéré (C ou T), paramètres thermiques du modèle TTOP constants ou variables selon les périodes chaudes et froides (1 ou 2)). Les courbes de température calculées par modélisation thermique avec un intervalle de 2°C et la géométrie du pergélisol sont montrées pour le modèle 1T (paramètres thermiques constants, glacier tempéré) sur la Figure 7a, pour les temps numérotés de 1 à 7 sur la Figure 7b. A 21 ka (temps 1), il n'y a pas de pergélisol puisque la température à la base du glacier tempéré est 0°. Durant la première période froide A (temps 2 et 3), le pergélisol se développe progressivement dans la partie supérieure du versant libérée du glacier, pour atteindre une épaisseur maximale de 190 m. Durant la période de réchauffement B (temps 4), le pergélisol diminue d'épaisseur et ne se maintient que dans la partie supérieure du versant. Lors de l'épisode froid suivant C (temps 5 et 6), le pergélisol se re-développe et affecte tout le versant. Au début de l'Holocène (période chaude D, temps 7), la température augmente rapidement, provoquant la disparition rapide du pergélisol à 10 ka. Les modélisations réalisées pour les autres modèles 1C, 2C et 2T ont fourni un âge de disparition du pergélisol relativement constant (11 à 10 ka).

Les profondeurs maximales obtenues pour les 4 modèles sont reportées à la Figure 8 et sont comparées à la zone déstructurée mise en évidence par les grands profils sismiques (Leroux et al., 2011). Trois des 4 modèles conduisent à des profondeurs de pergélisol relativement semblables, tandis qu'une profondeur plus importante est obtenue pour le modèle 1C (glacier froid et facteurs thermiques constants). Bien que des conditions de glacier froid ne puissent pas être localement exclues, la forte érosion glaciaire observée dans les Alpes occidentales est en faveur d'un régime tempéré à Séchilienne et le modèle 1C est donc sans doute le moins réaliste. La profondeur maximale atteinte par le pergélisol pour les 3 modèles est comparable à l'épaisseur de la zone

déstructurée définie par la prospection sismique, en considérant les deux valeurs limites de 3000 et 3500 m/s, proposées par Le Roux et al. (2011). Cette bonne correspondance suggère que les fluctuations du front du pergélisol depuis le dernier maximum glaciaire peuvent avoir joué un rôle en dégradant les propriétés mécaniques du versant par ségrégation de glace (Wegmann et al., 1998). Cette hypothèse est appuyée par l'observation de fractures métriques parallèles au versant, visibles à la surface et dans les premiers 100 m du forage SC3 (Figure 1).

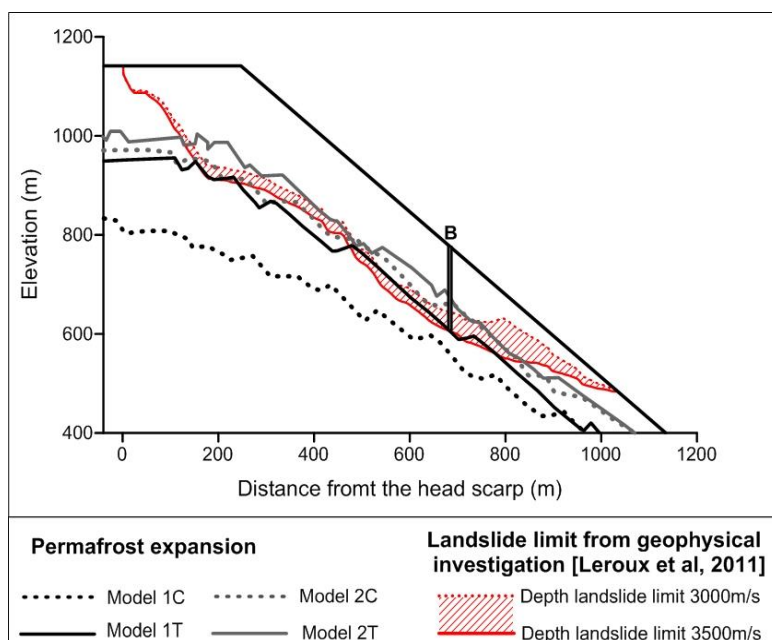


Figure 8. Profondeurs maximales de permafrost atteintes pour les 4 modèles 1C, 2C, 1T et 2T. Comparaison avec la zone déstructurée mise en évidence par sismique réfraction (Le Roux et al., 2011). (B = Forage SC1 projeté sur la coupe AA' de la figure 3).

La modélisation thermique du versant de Séchilienne durant les derniers 21000 ans a montré que le pergélisol a disparu il y a 10000 à 11000 ans et qu'il a donc persisté au moins 3000 à 4000 ans après le désenglacement de la vallée de La Romanche. Le renforcement du versant par la présence de la glace ne permet donc pas d'expliquer l'initiation de l'instabilité au niveau de l'escarpement sommital, déclenchée durant la période chaude et humide de l'Optimum Climatique il y a 5000 à 8000 ans. Cette étude a aussi montré que la profondeur maximale atteinte par le pergélisol dans le versant de Séchilienne correspondait à l'épaisseur des terrains déstructurés par l'instabilité gravitaire. Ces résultats indiquent que l'expansion du pergélisol peut avoir contrôlé l'épaisseur du terrain superficiel fracturé après la décharge glaciaire.

5. Datations

5-1. Géomorphologie et stratégie d'échantillonnage

La morphologie actuelle du versant de Séchilienne (Figure 9) résulte en grande partie de l'activité érosive du glacier de la Romanche lors de la dernière phase glaciaire quaternaire du Würm (115 à 21 ka). Elle est constituée par un large plateau glaciaire au dessus de 1000 m qui se prolonge vers le sud par une paléo-pente présentant une forte déclivité comprise entre 35 et 40° jusqu'en fond de vallée (340 m). La rupture de pente est constituée par une succession de falaises pluri-décamétriques orientées N60°E à N70°E recoupant l'ensemble de la zone (Figure 8) et correspondant à un épaulement glaciaire. La surface du versant présente de nombreuses zones polies horizontales à verticales agencées suivant des sillons de plusieurs centaines de mètres d'extension qui traversent le mouvement (Figure 9) en empruntant les structures tectoniques

héritées orientées N70°E. Ces sillons ont été repris par la déformation gravitaire du versant s'accompagnant d'éboulements locaux (chutes de blocs et d'écaïlles).

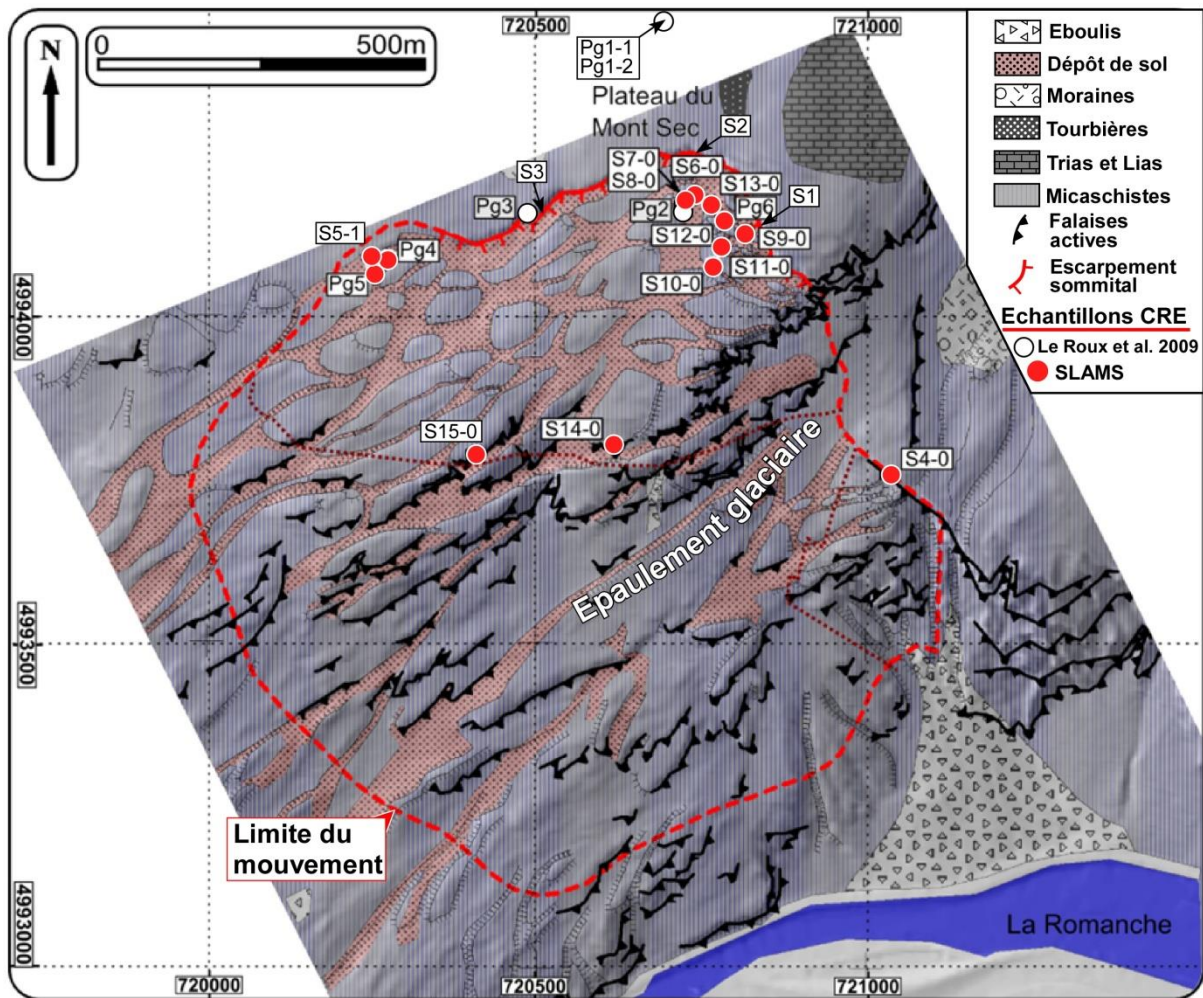




Figure 10. Photographie des structures gravitaires et glaciaires observées dans le versant de Séchilienne. a-Surface sub-verticale délimitant un sillon glaciaire affectée localement par des éboulements récents. b-Surfaces glaciaires résiduelles et dépôts morainiques préservés au sommet de blocs découpés par des escarpements gravitaires. c-Escarpement gravitaire affecté par des écroulements dans la partie aval. d-Contre-escarpements dans la partie amont. e-Escarpement sommital dans la partie amont du versant.

Il subsiste également une couverture morainique éparse et discontinue, préservée le plus souvent dans le fond des sillons glaciaires (Figure 10b). La paléo-surface glaciaire est affectée dans sa partie aval, entre 340 m et 1000 m, par de nombreux éboulements (Figure 10c) concentrés le long de l'épaulement glaciaire. Au-dessus de 1000 m d'altitude, le plateau glaciaire est affecté par une importante déformation en masse donnant lieu à une zone fortement déstructurée, découpée par une succession d'escarpements (Figure 10e) et de contre-escarpements (Figure 10d) de plusieurs mètres

de hauteur. La limite supérieure de cette zone correspond à l'escarpement sommital du Mont Sec de 40 m de hauteur. Au pied de chaque escarpement sont observées des crevasses remplies par des blocs provenant du démantèlement par érosion gravitaire de ces escarpements verticaux et par des dépôts de sols. La partie sommitale de ces blocs présente le plus souvent des formes arrondies et polies interprétées comme des surfaces glaciaires résiduelles (Figure 10b).

Compte tenu de la morphologie du versant, 64 échantillons de quartz ont été prélevés dans le cadre de l'ANR SLAMS à des altitudes comprises entre 850 et 1120 m. L'échantillonnage se répartit suivant 6 profils verticaux d'escarpements gravitaires (S4, S5, S3, S9, S10, S11 et S12), 4 profils verticaux de contre-escarpements (S6, S7, S8, S13) et 2 profils verticaux de paléo-surfaces glaciaires (S14 et S15). Le plus souvent, la partie sommitale horizontale des profils a été échantillonnée. De plus, 3 surfaces glaciaires subhorizontales ont été également échantillonnées (Pg4, Pg5 et Pg6) dans la partie haute du versant (figure 9).

5-2. Résultats et interprétations

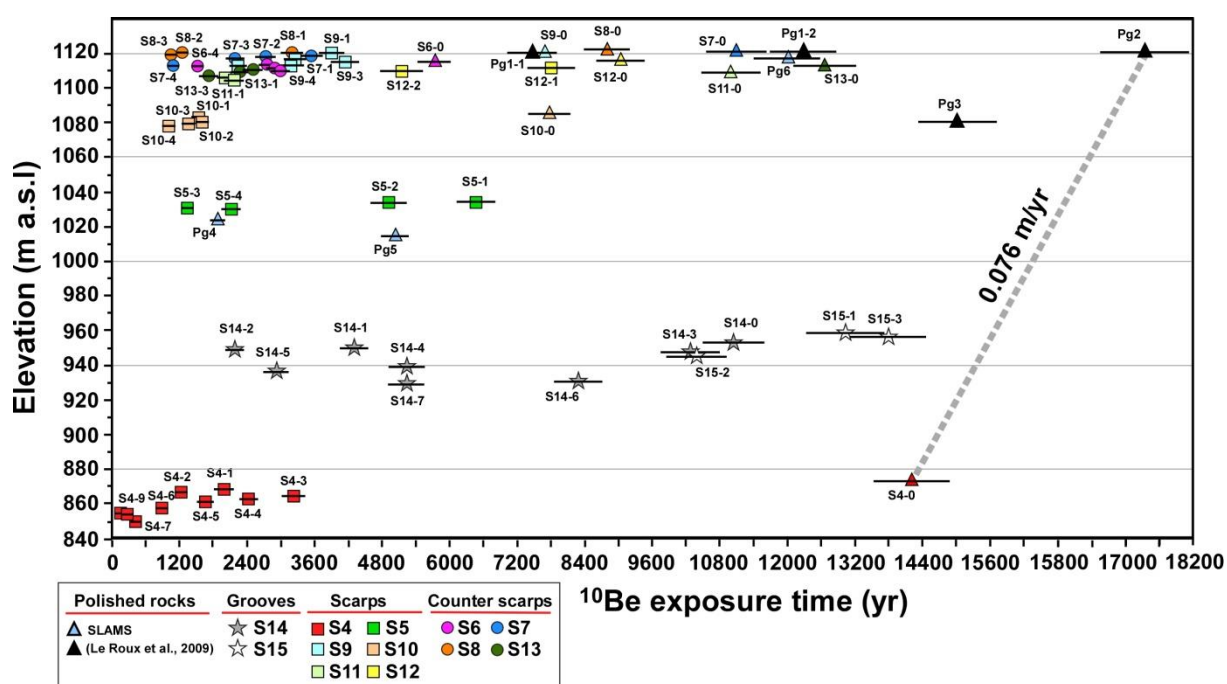


Figure 11. Diagramme représentant l'âge d'exposition ^{10}Be en fonction de l'altitude pour l'ensemble des échantillons prélevés dans le cadre du projet SLAMS. Les symboles font référence aux différents objets géomorphologiques. Les données issues de Le Roux et al. (2009) sur les surfaces glaciaires polies sont indiquées (Pg1-1, Pg1-2, Pg2 et Pg3). La vitesse moyenne d'ablation verticale du glacier déduite entre Pg2 et S4-0 est indiquée par le trait gris.

L'analyse des âges d'exposition ^{10}Be (Figure 11) montre une répartition temporelle large qui va depuis 17472 ± 1600 ans pour Pg2 jusqu'à 178 ± 126 ans pour S4-8. Les âges obtenus le long des escarpements gravitaires suivent une logique altitudinale avec une diminution des âges avec les altitudes décroissantes (Figure 11). L'escarpement qui présente les âges d'exposition les plus vieux correspond au profil S12 (≈ 1115 m) et les âges d'exposition les plus jeunes sont observés pour le profil S4 (≈ 950 m). Les âges provenant des contre-escarpements sont bien regroupés et relativement récents entre 3534 ± 380 (S7-1) et 1055 ± 186 ans (S8-3). Au sein d'un même profil, on observe le plus souvent une décroissance des âges depuis le haut vers le bas de l'escarpement. Lorsque ce n'est pas le cas, ces âges sont interprétés comme la signature d'une chute de blocs détachés de l'escarpement postérieurement à sa formation, un phénomène qui diminue localement l'âge d'exposition. De plus, l'analyse de la Figure 11 montre que les âges les plus vieux sont obtenus

pour des surfaces horizontales prélevées sur des polis glaciaire (Pg) ou au sommet des escarpements gravitaires (Sx-0). Ces affleurements sont interprétés comme des surfaces glaciaires héritées. Il existe cependant une très forte variabilité des âges pour ces différentes surfaces, résultant de l'action de différents processus. A partir de la Figure 11, la vitesse d'ablation moyenne verticale du glacier peut être estimée et correspond à la différence d'âge entre deux surfaces à deux altitudes différentes. Ainsi pour les surfaces Pg2 et S4-0, qui sont les âges les plus anciens dans le versant de Séchilienne, la vitesse d'ablation moyenne est déduite de la pente 0,076 m/an (Figure 11).

En théorie, tous les âges d'exposition mesurés sur ces surfaces glaciaires devraient s'aligner sur cette droite (Figure 11). Cependant, il existe un délai entre les âges mesurés à la surface et la droite d'ablation moyenne, qui correspond à un déficit de concentration en ^{10}Be . Ce dernier est probablement lié à la présence d'un masque d'origine sédimentaire de type moraine ou sol, dont le dépôt est associé à la dynamique de retrait du glacier et qui a efficacement atténué le flux de rayons cosmiques atteignant la paléo-surface glaciaire horizontale. Dans une telle configuration, nous avons calculé la hauteur de masque de moraine nécessaire pour expliquer le déficit de concentration en ^{10}Be observé (Figure 12), en appliquant une équation d'atténuation dépendante de la densité du matériau (2 g/cm^3 pour les moraines). Les hauteurs de masque calculées varient de 7,34 m pour l'échantillon Pg4 à 0,19 m pour l'échantillon Pg3. Les échantillons de référence Pg2 et S4-0 sont considérés comme des âges de retrait et n'ont donc pas été recouvert par un masque sédimentaire. Les variations importantes d'épaisseur de masque d'un site d'échantillonnage à l'autre montrent que la paléotopographie glaciaire à un rôle important dans la mise en place et la préservation des masques. Ainsi les épaisseurs les plus importantes sont localisées dans des zones de sillon, lieu préférentiel où les matériaux superficiels peuvent s'accumuler sur de grandes épaisseurs ou être déplacés par érosion hydrique lors du retrait comme dans le cas des échantillons Pg4 et Pg5. Ce processus d'érosion emporte les matériaux superficiels (moraines et sol) lors d'évènements climatiques extrêmes (fortes précipitations) et les redépose plus loin dans des endroits où ils peuvent être stockés sur de grandes épaisseurs. L'épaisseur moyenne est de 1,4 m pour des dépôts morainiques tandis que dans le cas de matériaux pédologiques (densité de 1 g/cm^3), l'épaisseur du masque est doublée. Si l'on prend comme hypothèse une disparition constante de l'épaisseur du masque depuis le retrait glaciaire jusqu'à l'actuel, on obtient une vitesse d'érosion pour chaque échantillon (Figure 12). Les valeurs sont comprises entre 0 et 0,5 mm/an, avec une vitesse moyenne de 0,08 mm/an.

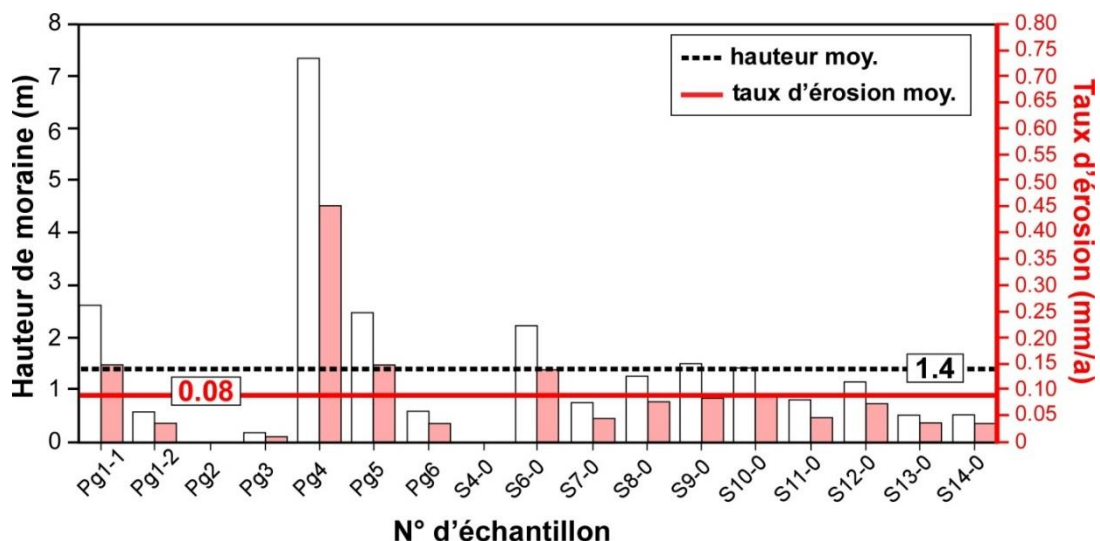


Figure 11. Histogramme des hauteurs de masque et des taux d'érosion associés pour les différents échantillons de surface. La hauteur moyenne et le taux d'érosion moyen sont également indiqués.

Par comparaison, l'étude réalisée par Vivian et Ricq de Bouard (1969) sur les moraines de versant recouvrant le plateau de Saint-Nizier (30 km au nord-ouest de Séchilienne) et localisées au point

de confluence des glaciers quaternaires de la Romanche et de l'Isère a mis en évidence des dépôts morainiques discontinus avec des épaisseurs variant de 0,5 à 10 m. Les épaisseurs de masques morainiques calculées pour le versant de Séchilienne sont donc réalistes et cohérentes avec les données régionales existantes. Par ailleurs, des études récentes basées d'une part sur des observations de terrain et d'autre part sur des modèles d'érosion et d'exhumation à partir de données cosmogéniques ont permis de contraindre le taux d'érosion dans les moraines (Hallet et Putkonen, 1994 ; Putkonen et Swanson, 2003 ; Schaller et al., 2009). Ces taux d'érosion sont compris entre 0 et 0,70 mm/an. Les taux d'érosion des moraines calculés pour le versant de Séchilienne sont donc également réalistes et cohérents avec les données de la littérature.

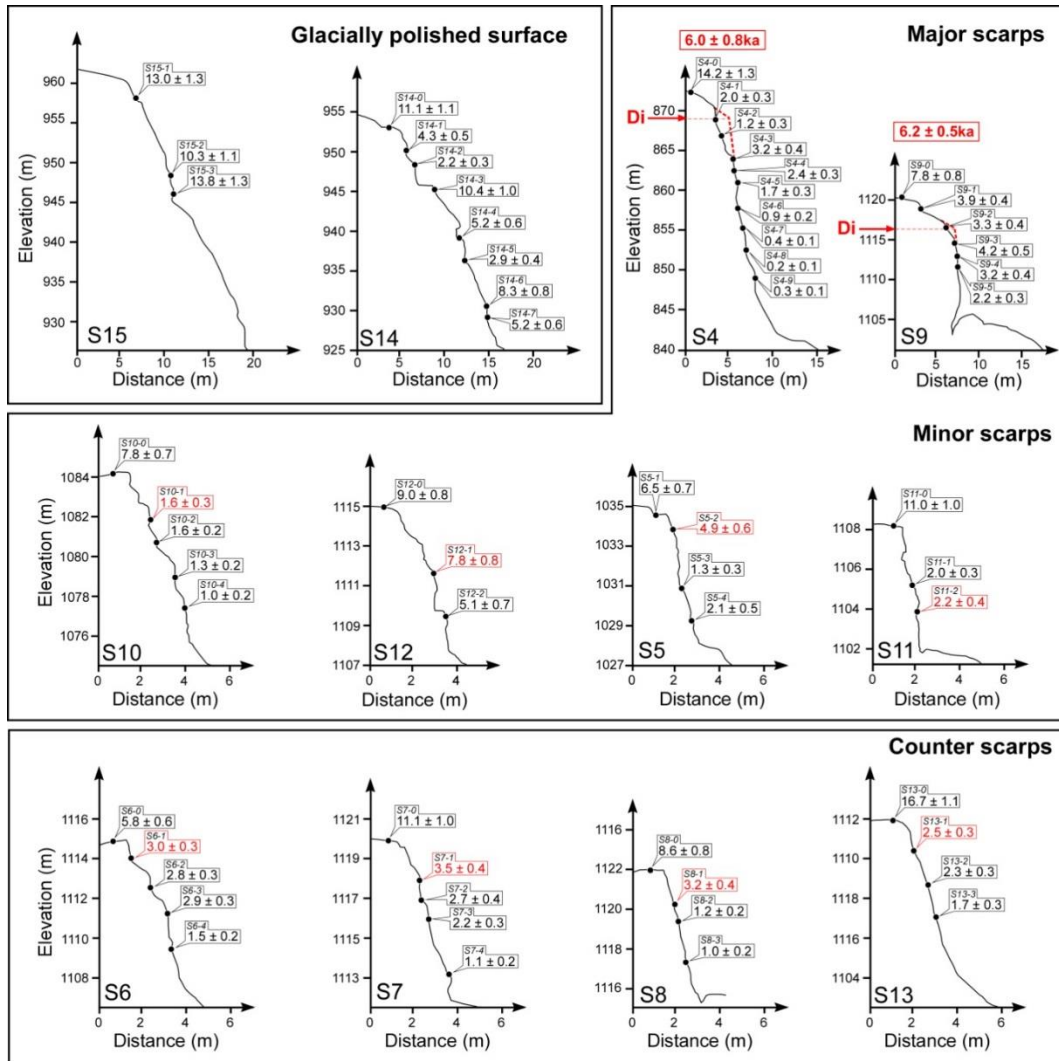


Figure 12. Profils topographiques à l'échelle 1/1 des escarpements et surfaces glaciaires étudiés. La localisation des échantillons le long des surfaces et les âges d'exposition ^{10}Be (en ka) sont indiqués. Les âges d'exposition ^{10}Be en rouge correspondent à l'âge d'initiation des escarpements. Pour les escarpements majeurs (S4 et S9) l'âge d'initiation dépend de Di (altitude d'initiation de l'escarpement).

L'interprétation des âges d'exposition obtenus doit considérer le type et la morphologie des escarpements. On doit ainsi distinguer les escarpements majeurs de plusieurs dizaines de mètres de hauteur (S9 et S4), les escarpements mineurs de quelques mètres de hauteur, et les contre-escarpements. Les âges obtenus sont présentés sur la Figure 13. Pour les escarpements mineurs et les contre-escarpements, la répartition des âges montre une décroissance depuis le haut vers le bas de l'escarpement, avec une concentration temporelle entre 2 et 4 ka. Seuls les escarpements S5 et S12 indiquent une activité plus ancienne. Pour ces escarpements de hauteur faible, l'âge d'initiation

minimum est interprété comme l'âge d'exposition ^{10}Be le plus vieux obtenu le long de l'escarpement, en ne prenant pas en compte l'âge Sx-0 de la surface glaciaire (Figure 12) qui date un autre phénomène. La déformation gravitaire a pu commencer avant cet âge minimum (indiqué en rouge sur la Figure 13) mais avec une intensité très faible, au moins pour les escarpements S10, S5, S6, S7, S8 et S13. Pour les escarpements majeurs, l'âge d'initiation de l'escarpement est obtenu en définissant l'altitude d'initiation de l'escarpement (Di sur la Figure 13) qui correspond à l'intersection entre la surface glaciaire et la surface de l'escarpement. En extrapolant la cinématique de l'escarpement à partir des âges mesurés, l'âge d'initiation pour l'escarpement S4, localisé sur la bordure latérale du mouvement est estimé entre 5,2 et 6,8 ka, tandis que l'escarpement S9, localisé plus en amont dans le versant et associé à l'escarpement sommital, donne un âge d'initiation entre 5,7 et 6,7 ka. L'initiation de ces deux escarpements majeurs se fait donc dans une même gamme temporelle (5 et 8 ka) qui est compatible avec l'âge d'initiation de l'escarpement sommital du Mont Sec obtenu par Le Roux et al. (2009).

La compilation de l'ensemble des âges d'exposition ^{10}Be permet de proposer un schéma d'évolution de l'ensemble du versant de Séchilienne (Figure 13) depuis la dernière phase glaciaire. Le désenglacement du versant s'est initié partir de 17 ka (Pg2) et s'est terminé en fond de vallée vers 14,3 ka (Lebrouc et al., 2013). Dans les zones de falaise associées à l'épaulement glaciaire, les écroulements ont certainement été actifs depuis le retrait du glacier jusqu'à l'actuel. Ce phénomène est très probablement associé à un phénomène de décompression. Entre 5 et 8 ka, le mouvement de versant de Séchilienne est caractérisé par la création de l'escarpement sommital et de l'escarpement latéral le long de structures tectoniques majeures, montrant l'influence de l'héritage tectonique du versant. Entre 4 et 5 ka, la déformation semble se propager latéralement vers l'ouest avec l'activation de l'escarpement mineur S5. Une fois ce système mis en place, des contre-escarpements et escarpements mineurs se développent en aval des structures majeures entre 2 et 4 ka. Actuellement l'ensemble de ces escarpements et falaises glaciaires sont affectés par la déformation du versant. Cette étude chronologique montre que la déformation en masse du versant a été initiée plusieurs milliers d'années après la disparition du glacier et durant la période climatique de l'Optimum Climatique Holocène. Le régime des précipitations durant cette période semble donc être un des facteurs déclenchants de l'initiation du mouvement de Séchilienne, même si la présence d'eau n'est pas indispensable pour initier un phénomène de fauchage.

5. Conclusions

Les études réalisées lors du projet SLAMS ont permis de caractériser l'état de déstructuration actuel du versant de Séchilienne, constitué de micaschistes, et de mesurer les paramètres géomécaniques caractéristiques de ce matériau. Les grands profils géophysiques et les forages profonds réalisés ont montré que la zone déstructurée pouvait atteindre un volume total de 60 ± 10 millions de m^3 , associé à une épaisseur maximale de 100 à 200 m selon les endroits. La géométrie 3D du mouvement a été déterminée à partir d'une limite de porosité de fissures à la Figure 3 (Livrable 5.2) tandis que le tableau des caractéristiques géomécaniques caractérisant la matrice rocheuse et les discontinuités est repris en annexe (Livrable 5.3).

Les datations par la mesure de la concentration en nucléide cosmogénique ^{10}Be produit in situ accumulé dans les roches superficielles ont montré que le désenglacement du versant de Séchilienne a commencé à partir de 17 ka pour se terminer en fond de vallée aux environs de 14 ka. Le retrait du glacier s'est effectué dans la partie sommitale à une vitesse de l'ordre de 0,076 m/an. Les données des durées d'exposition suggèrent que le glacier a laissé des dépôts morainiques pouvant atteindre plusieurs mètres d'épaisseur sur le versant, qui ont joué le rôle de masque avant d'être érodés. A sa fonte, le glacier a laissé une falaise principale d'épaulement glaciaire à l'altitude d'environ 900 m. Les datations réalisées suggèrent que cette falaise a été continuellement affectée par des éboulements depuis le retrait du glacier jusqu'à l'époque actuelle. Les escarpements sommital et latéral Est se sont créés entre 5 et 8 ka, durant la période climatique de l'Optimum Climatique Holocène après la disparition du pergélisol, et la déformation s'est ensuite propagée vers l'Ouest (4-5 ka), puis à l'intérieur du mouvement (initiation d'escarpements mineurs entre 2-4 ka). La Figure 13 reprend l'interprétation chronologique de la propagation de l'activité gravitaire

(livrable 5.1). Aucune information sur l'éventuelle déformation du versant avant le Würm et durant la phase interglaciaire n'est disponible par la méthode 10Be. En effet les conditions climatiques, les processus d'érosion et la couverture glaciaire ne permettent pas aux rayonnements cosmiques d'interagir avec les roches du versant de Séchilienne et le chronomètre ne fonctionne donc pas.

Enfin, les modélisations numériques thermiques ont montré que le pergélisol a pu persister jusqu'à 11 ka et a donc pu jouer un rôle dans le délai de plusieurs milliers d'années observé entre la disparition du glacier (14-17 ka) dans la vallée et l'initiation de l'instabilité gravitaire (5-8 ka). Un point important est que la profondeur maximale atteinte par le pergélisol correspond à l'épaisseur de la zone déstructurée mise en évidence par les reconnaissances profondes. Ce résultat suggère que le pergélisol a pu jouer un rôle de fissuration du massif (par ségrégation de lentilles de glace) contribuant à affaiblir le versant.

Ce projet a permis d'apporter des contraintes temporelles, spatiales et géomécaniques sur le mouvement de Séchilienne, qui devraient permettre dans le futur d'envisager une modélisation mécanique 3D du versant de Séchilienne afin de comprendre la dynamique du mouvement.

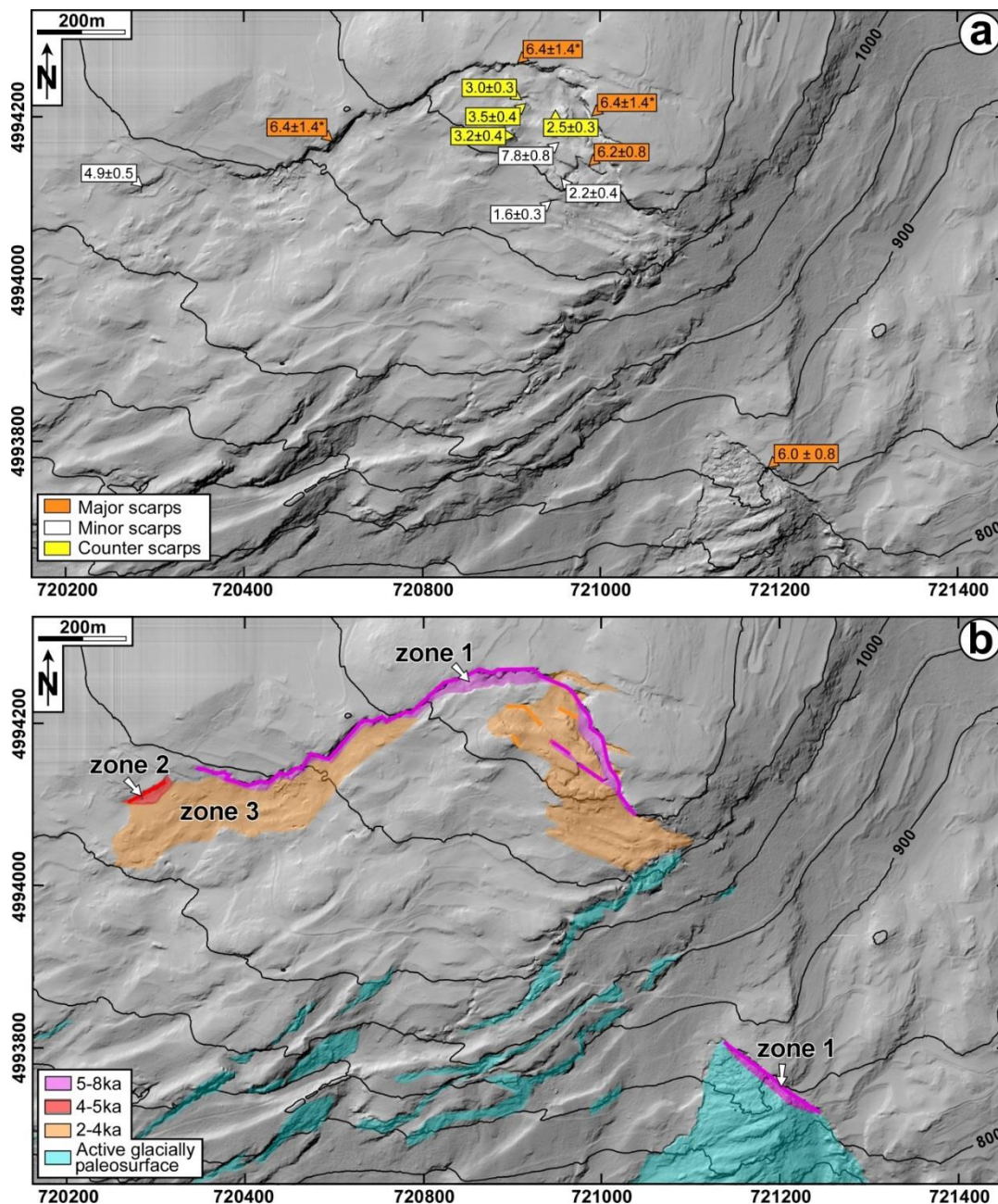


Figure 13. Synthèse des datations par durée d'exposition au rayonnement cosmique sur le versant de Séchilienne. a) Ages d'exposition ^{10}Be en fonction du type d'escarpement.

L'astérisque correspond à la gamme d'âges obtenue par Le Roux et al. (2009) le long de l'escarpement sommital. b) Interprétation en terme de zone d'activation. Les escarpements majeurs sont activés les premiers entre 5 et 8 ka. Ensuite, la déformation se prolonge à l'ouest avec formation des escarpements mineurs et des contre-escarpements en aval de l'escarpement sommital entre 2 et 4 ka.

E REFERENCES

- Antoine, P., Giraud, A., Evrard, H., Rochet, L., 1994. A huge slope movement at Séchilienne, Isère, France. *Landslide News* 8, 15–18.
- Balco, G., Stone, J.O., Lifton, N., Dunai, T., 2008. A complete and easily accessible means of calculating surface exposure ages or erosion rates from ^{10}Be and ^{26}Al measurements. *Quaternary Geochronology*, doi:10.1016/j.quageo.2007.12.001
- Brown, E.T., Bourlès, D., Burchfield, B., Deng, Q., Li, J., Molnar, P., Raisbeck, G.M., Yiou, F., 1998. Estimation of slip rates in the southern Then Shan using cosmic ray exposure dates of abandoned alluvial fans. *Geological Society of American Bulletin*, 110, 377–386.
- Delacourt, C., Allemant, P., Bertier, E., Raucoules, D., Casson, B., Grandjean, P., Pambrun, C., Varel, E., 2007. Remote-sensing techniques for analysing landslide kinematics: a review. *Bull. Soc. Geol. Fr.* 178 (2), 89–100
- Duranthon, J.P., Effendiantz, L., Memier, M., Previtali, I., 2003. Apport des méthodes topographiques et topométriques au suivi du versant rocheux instable des ruines de Séchilienne. *Rev. XYZ* 94, 31–38.
- Gosse, J. C., and F. M. Phillips (2001), Terrestrial in situ cosmogenic nuclides: theory and application, *Quaternary Science Reviews*, 20(14), 1475–1560. Goy, L., Fabre, D., Ménard, G., 1996. Modelling of rock temperatures for deep alpine tunnel projects. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 29, 1–18.
- Hallet, B., and J. Putkonen (1994), Surface dating of dynamic landforms: young boulders on aging moraines, *Science*, 265(5174), 937–940.
- Kasperski, J., Pothérat, P., Duranthon, J.P., 2010. Le mouvement de versant de Séchilienne: point sur l'activité du phénomène. *Proceedings of the Rock Slope Stability symposium, Paris. 24–25 November 2010*, 13 p.
- Lebrouc V., S. Schwartz, L. Baillet, D. Jongmans, J.F. Gamond, 2013, Modeling permafrost extension in a rock slope since the Last Glacial Maximum: Application to the large Séchilienne landslide (French Alps), *Geomorphology*, 198, 189–2000.
- Le Roux, O., Schwartz, S., Gamond, J.F., Jongmans, D., Bourlès, D., Braucher, R., Mahaney, W., Carcaillet, J., Leanni, L., 2009. CRE dating on the head scarp of a major landslide (Séchilienne, French Alps), age constraints on Holocene kinematics. *Earth Planet. Sci. Lett.* 280, 236–245. doi:10.1016/j.epsl.2009.01.034.
- Le Roux, O., Schwartz, S., Gamond, J.F., Jongmans, D., Tricart, P., Sebrier, M., 2010. Interaction between tectonic and erosion processes on the morphogenesis of an alpine valley: geological and geophysical investigations in the lower Romanche valley (Belledonne massif, western Alps). *Int. J. Earth Sci.* 99, 427–441. doi:10.1007/s00531-008-0393-1.
- Le Roux O., Jongmans D., Kasperski J., Schwartz S., Potherat P, Lebrouc V., Lagabrielle R and Meric O., 2011, Deep geophysical investigation of the large Séchilienne landslide (Western Alps, France) and calibration with geological data, *Engineering Geology*, 120, 18-31.
- Mavko, G., Mukerji, T., Dvorkin, J., 1998. *The Rock Physics Handbook*. Cambridge, University Press. 340 pp.
- Meric, O., Garambois, S., Jongmans, D., Wathelet, M., Chatelain, J.L., Vengeon, J.M., 2005. Application of geophysical methods for the investigation of the large gravitational mass movement of Séchilienne (France). *Can. Geotech. J.* 42, 1105–1115. doi:10.1139/t05-034.
- Putkonen, J., and T. Swanson (2003), Accuracy of cosmogenic ages for moraines, *Quaternary Research*, 59(2), 255–261.
- Rochet, L., Giraud, A., Antoine, P., Evrard, H., 1994. La déformation du versant Sud du Mont sec dans le secteur des ruines de Séchilienne (Isère, France). *Bull. 'Association Int. Géol.' Ingénieur* 50, 75–87.
- Schaller, M., J. D. Blum, and T. A. Ehlers (2009a), Combining cosmogenic nuclides and major elements from moraine soil profiles to improve weathering rate estimates, *Geomorphology*, 106(3), 198–205.
- Smith, M.W., Riseborough, D.W., 1996. Permafrost monitoring and detection of climate change. *Permafrost and Periglacial Processes* 7, 301–309.
- Stone, J. O. (2000), Air pressure and cosmogenic isotope production, *Journal of Geophysical Research*, 105(B10), 23753–23,759.
- Vengeon, J.M., 1998. Déformation et rupture des versants en terrain métamorphique anisotrope. Apport de l'étude des ruines de Séchilienne. PhD thesis, Université Grenoble I, France, 186 pp.

- Vengeon, J.M., Giraud, A., Antoine, P., Rochet, L., 1999. Analysis of the deformation and toppling of rock slopes in crystallophyllian terrain. *Can. Geotech. J.* 36, 1123–1136.
- Williams, P.J., Smith, M.W., 1989. *The Frozen Earth: Fundamentals of Geocryology*. Cambridge University Press, Cambridge
- Wyllie, M.R.J., Gregory, A.R., Gardner, L.W., 1956. Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media. *Geophysics* 21 (1), 41–70.

Tâches 6 & 7 - Synthèse modélisations Numériques

L. Baillet, E. Chaljub, P. Bottelin

INITIATION ET DESTABILISATION DU MOUVEMENT DE SECHILIENNE

La partie modélisation concernant l'initiation et la déstabilisation du mouvement de Séchilienne a été effectuée sur des modèles en 2D. Les modèles géométriques sont construits à partir du logiciel Resoblok, puis importés dans un code calcul aux éléments discrets LMGC90.

Travaux effectués - Résultats

L'objectif des simulations a été de reproduire l'initiation de la déstabilisation et d'obtenir un état comparable à l'actuel (géométrie et déstructuration du versant).

Le dialogue entre les deux logiciels (Resoblok et LMGC90) a été mené sur des premières simulations avec deux réseaux de fractures. Puis, pour définir plus précisément les réseaux de fractures, la caractérisation structurale effectuée par Vengeon, (1999) et Antoine (1998) et une synthèse structurale à partir des levés de fracturation réalisés dans les galeries présentes sur le site de Séchilienne (anciennes galeries de mines) ont permis de mettre en évidence quatre grandes familles de fractures:

- une famille de fractures verticales avec un pendage de 90° ,
- une famille de fractures subverticales avec un pendage de 75° ,
- et deux familles de fractures subparallèles à la pente avec des pendages respectifs de 45° et 30° .

Les simulations de l'initiation du mouvement de Séchilienne ont été effectuées avec ces quatre familles de fractures. L'espacement des fractures, déterminé à partir des levés structuraux en galerie est d'environ 8m. Pour que les temps de calcul restent raisonnables, trois espacements de fractures de 60 m (1400 blocs modèle A), 50 m (2000 blocs modèle B) et 40 m (3000 blocs modèle C) ont permis de tester le rôle de la distribution inter-fracture et donc du nombre et de la taille des blocs sur la déstabilisation. La surface (calcul en 2D) de la masse déstabilisée calculée numériquement est comparée à celle du mouvement obtenue par prospection géophysique (Figure 1)

Les résultats présentés correspondent à des simulations réalisées avec un coefficient de frottement constant de type Coulomb égal à 0.3 appliqué à l'ensemble des fractures et pour un état permettant de visualiser la masse mise en mouvement.

L'analyse des résultats de ces simulations (Figure 1) indique tout d'abord une surface déstabilisée et des isovaleurs de champ de déplacement quasiment identiques entre les modèles avec des réseaux de fractures de 50 (modèle B) et 40m (modèle C). Pour une distribution du réseau de fractures de 60 m (modèle A) les déplacements restent plus superficiels.

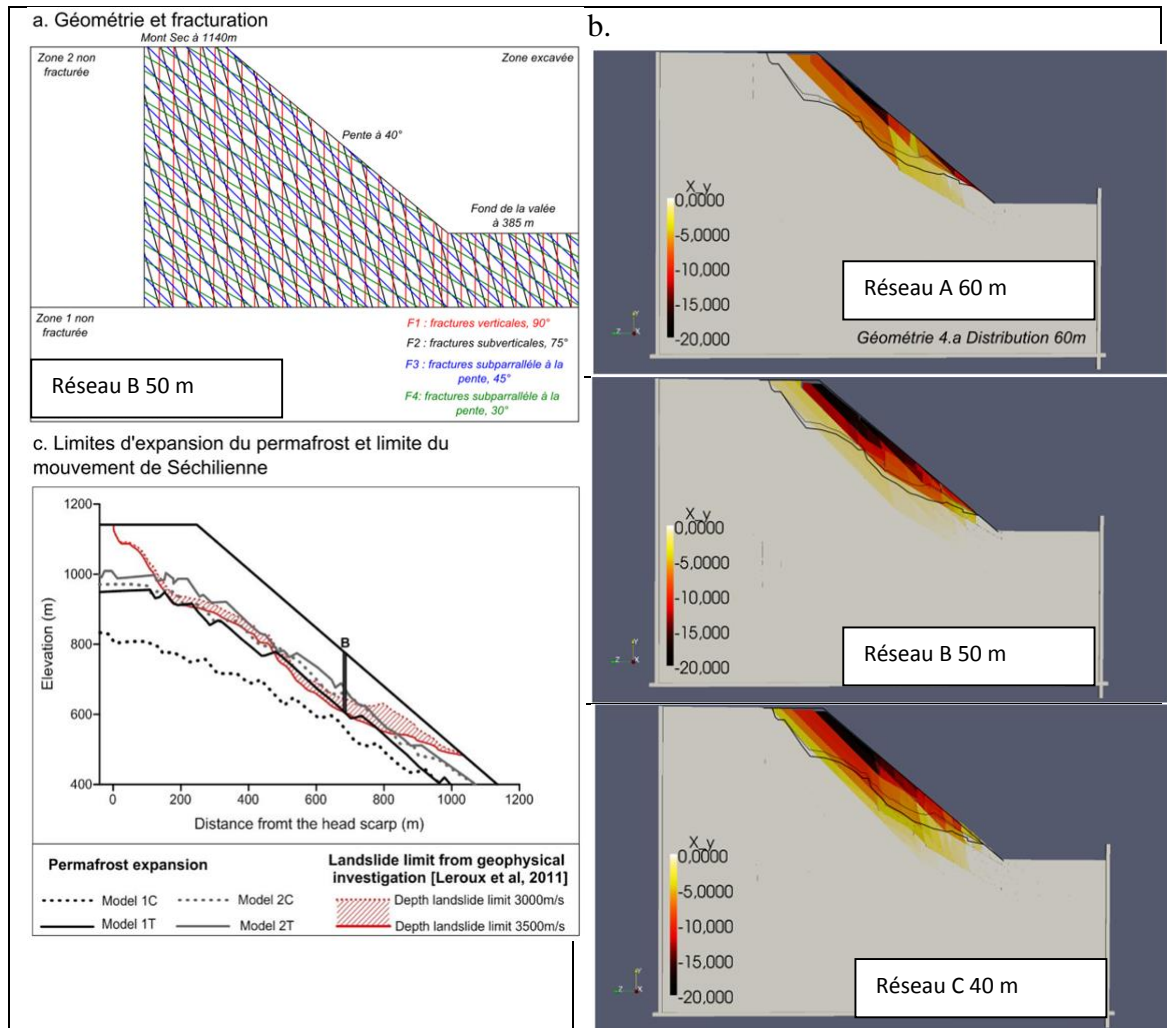


Figure 1 : a) Modèle géométrique B avec ses 4 réseaux de fractures. b) Déplacement vertical en mètres pour les trois modèles A, B et C. Les limites en profondeur du mouvement de Séchilienne obtenues à partir de la prospection géophysique sont représentées par des traits noirs (en trait plein la limite à 3500 m/s et en traits pointillés la limite à 3000 m/s déduites de la vitesse des ondes sismiques dans les micaschistes). c) Figure présentant les limites d'expansion du permafrost et du mouvement de Séchilienne.

Les résultats de ces premières simulations numériques sont encourageants car ils permettent à partir du réseau de fractures et du coefficient de frottement entre les blocs de retrouver la profondeur de la masse déstabilisée.

Les difficultés rencontrées dans la simulation de l'initiation et la déstabilisation du mouvement de Séchilienne sont de trois ordres. D'une part, la prise en compte de la fracturation nécessite une gestion précise du comportement fortement non-linéaire (contact avec frottement) au cours du temps. D'autre part la taille des éléments discrets influence directement les temps de calcul. Même si dans le modèle du versant de Séchilienne en 2D on peut envisager utiliser des tailles d'éléments correspondants aux largeurs minimales du réseau de fracture (c'est-à-dire 8m), il est actuellement inenvisageable de passer en 3D pour suivre l'évolution du mouvement sans travailler sur l'optimisation des codes. Enfin, la simulation d'un problème multi-échelle en temps où il faut être

suffisamment précis pour gérer les glissements locaux aux interfaces (temps courts) et simuler des temps réels importants (à l'échelle de la déstabilisation) reste un véritable challenge.

SIMULATION NUMERIQUE DU MOUVEMENT SISMIQUE A SECHILIENNE

Objectifs initiaux et état de l'art

(Synthèse de la Tâche 6 « Approche prospective, scénarisation de la menace, la gestion du risque dans le futur au niveau de l'aléa » telle que décrite dans le projet SLAMS).

Le glissement de Séchilienne se situe dans une zone sismique modérément active, à proximité de la faille de Belledonne qui est susceptible de produire un séisme de magnitude 6 pour des périodes de retour importantes (supérieures à la sismicité historique, [Thouvenot et al. 2003](#)).

Le développement d'un modèle numérique 3D aux éléments spectraux (SPECFEM3D, <http://www.geodynamics.org/cig/software/packages/seismo/specfem3d/>) a été proposé pour tester l'impact de différentes combinaisons magnitude sismique-distance-azimut sur le mouvement de versant de Séchilienne. Ces simulations requièrent un modèle de la structure sismique (V_P , V_S , Q_P , Q_S , ρ) à l'intérieur et hors de la zone en mouvement, qui sera basé sur l'interprétation des grands profils géophysiques déjà réalisés (cf. [Tâche 5 ANR SLAMS](#)).

L'objectif des simulations est de quantifier les effets de site (tâche 1) et les caractéristiques des vibrations (amplitude, durée, fréquence) potentielles sur le mouvement de Séchilienne. La validation du modèle pourra se faire par comparaison avec les séismes enregistrés sur le site par les stations du Réseau Accélérométrique Permanent. Les résultats attendus consistent à estimer les conséquences du forçage sismique sur la stabilité du mouvement de versant de Séchilienne, en allant vers une scénarisation du risque.

Introduction

Au sein du mouvement de versant de Séchilienne, le mouvement sismique est amplifié d'un facteur 5 à 8 dans la gamme de fréquence 1,5 à 50 Hz par rapport à la station de référence ([Garambois et al. 2013](#)). Bien qu'en partie sensibles au séisme considéré (effet de directivité), les caractéristiques générales de l'amplification sont stables et pourraient être liées à un effet de site du type contraste d'impédance sismique.

Dans un premier temps, on comparera ces observations avec l'amplification théorique générée par une couche de faible impédance sismique (avec gradient) sur un substratum, pour une onde SH à incidence verticale.

Dans un second temps, on construira un modèle numérique 3D du mouvement sismique à Séchilienne qui permettrait d'étudier des causes de cette amplification, en particulier la combinaison des effets de site topographiques et des effets de site dus à un contraste d'impédance sismique.

On s'attachera par la suite à caractériser le mouvement du sol à l'échelle du mouvement de versant de Séchilienne, *i.e.* pour des longueurs d'onde déca- à hecto-métriques, soit des fréquences de l'ordre de quelques Hz à dizaine de Hz.

Détermination des paramètres sismiques

La construction d'un modèle numérique du mouvement sismique requiert la définition de paramètres sismiques élastiques et anélastiques réalistes. Une synthèse des paramètres mentionnés dans la bibliographie a été entreprise et présentée au [Tableau 1](#). Des valeurs de référence ont été

utilisées en l'absence de données spécifiques au site de Séchilienne. Les valeurs de V_s ont été obtenues à partir de V_p , en prenant un coefficient de Poisson (ν) égal à 0,3.

Paramètre / Réf.	Sénéchal et al. (2013)	Leroux et al. (2011)	Lebrouc et al. (2013)	Vengeon et al. (nr)	Cette étude
V_{P1} (m.s ⁻¹)	1200 à 3000-4000 (gradient)	800 à 2500 puis 3500 (gradient)	-	≥ 800	1200 à 3500 (gradient)
V_{S1} (m.s ⁻¹)	-	-	-	-	650 à 1900
Z_1 (m)	96 à 150	30 à 150	150 à 200	-	150
V_{P2} (m.s ⁻¹)	4000	3500	3000 à 3500	≤ 5000	3500
V_{S2} (m.s ⁻¹)	-	-	-	-	1900
ρ_1 (kg.m ⁻³)	-	-	-	-	2300 à 2500
ρ_2 (kg.m ⁻³)	-	-	-	-	2500

Tableau 1 : Synthèse bibliographique des paramètres sismiques mesurés sur le site de Séchilienne.

Comparaison amplifications sismiques expérimentales/théoriques

La fonction de transfert théorique pour une onde SH à incidence verticale se propageant dans un milieu 1D a été calculée en utilisant le logiciel EERA (Equivalent-linear Earthquake site Response Analyses, Bardet et al. 2000). En première approche, un milieu simplifié a été considéré avec une première couche de 150 m d'épaisseur (H_1) de propriétés $V_{S1} = 1000$ m.s⁻¹ et $\rho_1 = 2300$ kg.m⁻³ qui correspond au corps du mouvement de versant de Séchilienne. En profondeur, le massif sain a été modélisé par une deuxième couche de propriétés $V_{S2} = 1900$ m.s⁻¹ et $\rho_2 = 2500$ kg.m⁻³. La fonction de transfert correspondante est présentée à la Figure 3.

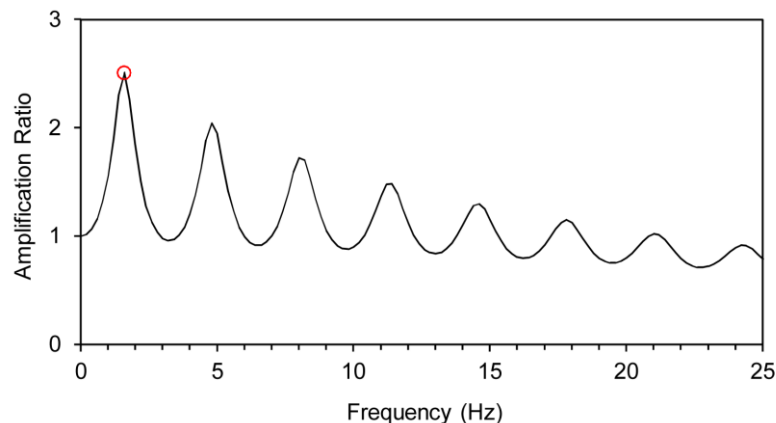


Fig 3 : Fonction de transfert théorique pour une onde SH à incidence verticale dans le milieu bi-couche considéré.

La fonction de transfert théorique montre une amplification maximale d'un facteur 2,5 à la première fréquence de résonance (f_1) de 1,6 Hz. Dans ce modèle bi-couche, on a $f_1 = V_{S1} / 4 H_1$. D'autres pics de moindre amplitude sont présents et décroissent avec la fréquence.

Ce calcul théorique sous-estime d'un facteur 2 à 3 les amplifications calculées à partir des données expérimentales sous séismes (Garambois et al. 2013). De plus, la fréquence du premier pic (1,6 Hz) est située la fourchette basse de la gamme de fréquence amplifiée expérimentalement (~1-50 Hz).

Ces différences peuvent provenir du fait que la fonction de transfert théorique est calculée pour une onde SH à incidence verticale, alors que les rapports spectraux sous séismes considèrent l'ensemble du train d'onde enregistré par les capteurs (ondes de volume P et S, ondes de surface). De plus, le modèle 1D considéré n'est probablement pas représentatif du milieu. L'amplification observée sur une large gamme de fréquence pourrait ainsi provenir d'effets 2D ou 3D et/ou de l'effet des hétérogénéités du milieu, soulignant le besoin d'un modèle plus détaillé.

Construction du modèle numérique

Les modèles numériques de terrain (MNT) successifs réalisés au cours des vingt dernières années sur le site de Séchilienne ont été archivés et commentés en vue d'une éventuelle réutilisation.

La topographie du modèle numérique a été construite à partir du MNT BD ALTI® de l'Isère fourni par l'Institut Géographique National (IGN) avec une taille de pixel de 25 x 25 m. Ce MNT a été découpé autour de la zone d'intérêt et référencé en coordonnées Lambert 93 (ID : IGF:LAMB93). La topographie de la base du mouvement de versant proposée par Leroux et al. (2011) et issue de reconnaissances géophysiques a été intégrée au modèle numérique.

Le modèle numérique a été maillé avec des éléments spectraux, qui correspondent à des éléments finis à haut degré d'interpolation polynomiale. Le modèle comprend environ 1 Million d'éléments spectraux, soit de l'ordre de 100 Millions de points de grille et 300 Millions de degrés de liberté.

Pour assurer une résolution satisfaisante de la propagation des ondes, la taille caractéristique des éléments spectraux (ℓ) doit être inférieure à la plus petite longueur d'onde propagée (λ).

Hors de la zone de Séchilienne, des éléments spectraux de taille caractéristique importante ($\ell = 300$ m) ont été utilisés sur l'ensemble de la surface (Fig. 2a), avec un dé-raffinement ($\ell = 900$ m) en profondeur. Afin de simuler le mouvement du sol jusqu'à des fréquences de l'ordre de quelques Hz à dizaines de Hz, le maillage a été raffiné ($\ell = 25$ m) dans un rayon de 2 km autour de la zone de Séchilienne (Fig. 2b).

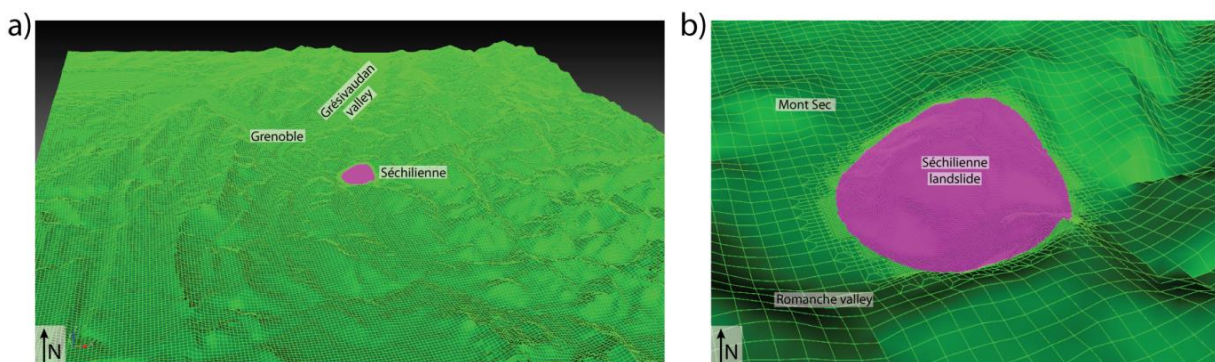


Figure 2 : a) Maillage aux éléments spectraux construit à partir du modèle numérique de terrain BD ALTI® de l'Isère. Les éléments ont une taille caractéristique de $\ell = 300$ m en surface, et $\ell =$

900 m en profondeur. b) Zoom sur le mouvement de versant de Séchilienne. Violet : zone au maillage raffiné ($\ell = 25$ m) dans un rayon de 2 km autour du mouvement de versant.

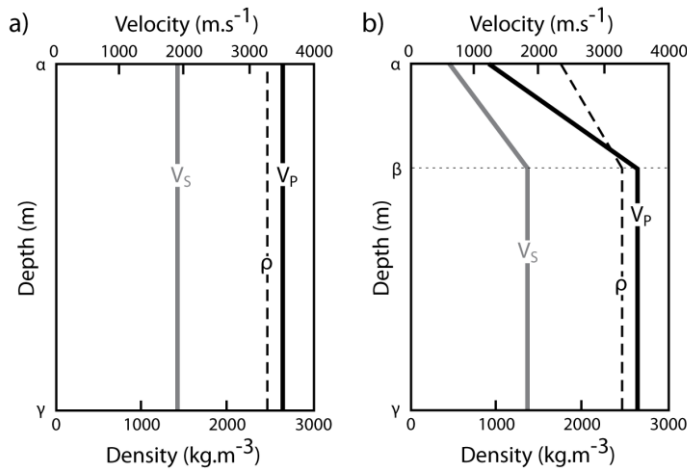


Figure 3 : Modèle de vitesse à l'extérieur (a) ou à l'intérieur (b) du mouvement de versant. Les cotes (échelle arbitraire) des points α , β et γ sont calées sur la surface topographique, la limite basale du mouvement (Leroux et al. 2011) et la base du modèle numérique, respectivement.

Le modèle de vitesse implémenté diffère selon si l'on se trouve à l'extérieur (Fig. 3a) ou à l'intérieur (Fig. 3b) de l'emprise du mouvement de versant. Les valeurs des paramètres sismiques sont issues de la synthèse bibliographique présentée plus haut.

Conclusions – Perspectives

Les amplifications sous séismes observées expérimentalement (d'un facteur 5 à 8 dans la gamme de fréquence 1-50 Hz) à l'intérieur du glissement de versant de Séchilienne n'ont pas pu être expliquées de manière satisfaisante par le calcul de la fonction de transfert pour un modèle 1D avec un contraste d'impédance vertical. La construction d'un modèle numérique 3D a alors été entreprise. La topographie de surface a été intégrée au modèle et un maillage aux éléments spectraux de taille variable a été réalisé. Le modèle de vitesse s'appuie sur une synthèse bibliographique des paramètres sismiques mesurés sur le site et sur la géométrie du mouvement de versant reconnue par géophysique (interface basale de Leroux et al. 2011).

Les perspectives de ce travail préparatoire sont la simulation numérique effective de la propagation d'ondes au sein du mouvement de versant de Séchilienne, autorisant une meilleure compréhension des mécanismes d'amplification du mouvement du sol (effet de site topographique vs contraste d'impédance sismique). L'étape suivante du processus de pré-traitement consiste en

l'implémentation du modèle de vitesse dans la simulation numérique, puis la réalisation des calculs en utilisant des moyens locaux comme le mésocentre CIMENT.

Références

- Bardet, J. P., Ichii, K., and Lin, C. H. (2000) EERA: A Computer program for Equivalent-linear Earthquake site Response Analysis of Layered soil deposits, Department of Civil Engineering, University of Southern California.
- Garambois, S., Langlais, M., & Guéguen P. (2013) Rapport d'activités Effets de site sismologiques à Séchilienne, Livrable 1.3, ANR SLAMS.
- Lacroix, P. & Helmstetter, A. (2011) Location of seismic signals associated with microearthquakes and rockfalls on the Séchilienne landslide, French Alps Bulletin of the Seismological Society of America, Seismological Society of America, 101, 341-353
- Lebrouc, V.; Schwartz, S.; Baillet, L.; Jongmans, D. & Gamond, J. (2013) Modeling permafrost extension in a rock slope since the Last Glacial Maximum: Application to the large Séchilienne landslide (French Alps) *Geomorphology*, 198, 189 - 200
- Le Roux, O.; Jongmans, D.; Kasperski, J.; Schwartz, S.; Potherat, P.; Lebrouc, V.; Lagabrielle, R. & Meric, O. (2011) Deep geophysical investigation of the large Séchilienne landslide (Western Alps, France) and calibration with geological data *Engineering Geology*, Elsevier, 120, 18-31
- Sénéchal, P., Garambois, S. & Virieux, J. (2013) Rapport d'activités Exploitation des données sismiques et sismologiques acquises sur le glissement de terrain de Séchilienne, Livrable L5.5, ANR SLAMS.
- Vengeon, J-M., Jongmans D., Jeannin M., Wathelet M., Giraud A. & Meric O. (nr) Geophysical investigation of the large Séchilienne gravitational movement, The Alps (France).

Tâche 8 - SCENARISATION DE LA MENACE OU COMMENT GERER L'INCERTAIN.

Coordinateur : Vincent Boudières (PARN) & J.-R. Grasso (ISTERRE)

INTRODUCTION

La stratégie mise en œuvre dans le projet SLAMS vise à construire de nouveaux outils (prototypes expérimentaux, outils numériques, modèles au sens large) qui permettent de fournir une plateforme d'aide à la décision pour des estimations quantitatives de l'aléa mouvement gravitaire sur le site de Séchilienne. Pour atteindre cet objectif, la tâche 8 tend vers une synthèse des différentes étapes du projet SLAMS, qui vise à analyser et identifier chaque pas du processus de cascade dans la chaîne d'évènements d'où peut émerger la propagation catastrophique d'une pente instable. A chaque pas de la chaîne d'évènements qui constituent une cascade, on s'attache à quantifier les erreurs relatives tant aux types de données (aléatoires) qu'aux manques de connaissance sur les processus impliqués (épistémiques). Elargis aux aspects vulnérabilités, nos objectifs peuvent s'énoncer comme l'ensemble des questions découlant du phénomène instabilité, de l'incertitude et de l'action de gestion dans le contexte contemporain du principe de précaution et de l'acceptabilité du risque. La première question est celle de la connaissance, du traitement et du partage des incertitudes (1). Une incertitude qui se loge au niveau de la connaissance de l'aléa (incertitude sur la caractérisation des phénomènes, leur fréquence et leur amplitude,...), mais qui se décline et se déploie aussi aux niveaux des modalités de gestion, de la vulnérabilité et des attentes vis-à-vis de l'offre générale (faiblesses de l'offre de gestion, arbitrages sur les scénarios, les seuils, traduction de l'incertitude dans les zonages, le dimensionnement des ouvrages, les parades techniques, l'information préventive, la réduction de la vulnérabilité...) (2). Corrélativement, un second questionnement complémentaire à celui de la responsabilité, peut être proposé sur le plan juridique, mais également politique, éthique et scientifique, notamment lorsqu'il est décliné en matière de responsabilités et d'acceptabilité d'un risque latent, potentiel, mais non réalisé¹.

Ce rapport rend compte d'une tâche où l'activité se partage entre Sciences de la Terre et Sciences humaines et sociales. Cette « pluri-disciplinarité » entre SHS et Sciences de la terre, l'est aussi au sein de ces deux corpus scientifiques : si les approches SHS mixent des corpus issus de la sociologie, de la géographie et des sciences de gestion, en sciences de la terre, sismologie, géomorphologie, hydrologie, mécanique des roches et géologie sont les approches croisées indispensables à la compréhension du déclenchement des instabilités gravitaires.

Cette tâche est un travail innovant dans la mesure où les analyses qui ont été conduites s'inscrivent dans une démarche expérimentale avec un enjeu d'innovation, notamment au regard des approches méthodologiques mobilisées. En effet, au regard du temps et des moyens impartis les auteurs ont

¹ L'activité initialement prévue autour d'un séminaire sur les thèmes de la responsabilité et de l'acceptabilité (G. Decrop) n'a pas été réalisée en tâche 8. Ces développements ont été intégrés au sein de la tâche 3 sur la thématique de l'expertise (G. Decrop).

eu à cœur de produire une étude originale et expérimentale en associant différents corpus et paradigmes sur les risques.

D'un point de vue global, cette tâche interroge, sous différentes formes, la manière dont est structurée l'offre de gestion et le processus de décision associé. Sur cette tâche 8 et autour de la question de la décision en univers incertain, l'approche fut à la fois analytique, interprétative et normative selon les activités et les corpus mobilisés.

Au côté d'une description de l'offre de gestion (acteurs/outils) et d'une proposition méthodologique d'évaluation organisationnelle, le processus de décision est lui appréhendé sous l'angle d'une identification et d'une quantification des incertitudes associées.

Le travail entrepris au sein de cette tâche 8 s'est donc articulé autour de 2 activités scientifiques distinctes que nous avons souhaitées les plus complémentaires possibles, citons ainsi :

(1) Analyses et synthèses des incertitudes (arbre de décision)

- approche probabiliste sur des phases clés de la cascade d'évènement qui mènent à une catastrophe dite naturelle (prototype d'arbre de décision)
- mesure (probabiliste) de la susceptibilité aux séismes des pentes de Séchilienne dans le contexte alpin
- probabilité de rupture du lac-barrage post effondrement

(2) l'Analyse de l'offre de gestion du risque des ruines de Séchilienne, essai d'approche pragmatique et évaluative² :

- l'approche « par les distances », qui s'inscrit dans le cadre d'une sociologie pragmatique,
- une approche évaluative « satisfaction-importance », de type normative et inspirée des méthodes d'évaluation des services,
- enfin, une approche interprétative sur la vulnérabilité active, qui s'inscrit dans une approche organisationnelle des risques.

Cette étape 2 s'articule autour d'une question centrale : comment mieux cerner les configurations et les structures de l'offre de gestion actuelle du risque de Séchilienne ?

² Dans un souci de cohérence des activités, l'analyse de l'offre de gestion (satisfaction/importance) initialement prévue en tâche 3 a migré en tâche 8 en parfaite complémentarité avec l'évaluation de la vulnérabilité active. L'ensemble de ces activités SHS font l'objet d'un rapport (livrable commun précité)

Cette étape 2 se veut innovante et expérimentale, et s'articule autour d'une question centrale : *comment mieux cerner les configurations et les structures de l'offre de gestion actuelle du risque de Séchilienne ?*

Activité 1 Arbre de décision

1- Enjeux et problématiques, état de l'art:

Les glissements de terrain sont la cause principale des dommages (en structures et personnes) induits par les séismes en zone de montagne. L'impact des glissements de terrains déclenchés par un séisme dans les Alpes françaises, dans un contexte de pentes fortes et sismicité modérée, n'est actuellement pas analysé ni connu. Dans le contexte spécifique de l'impact de sollicitation sismique sur des glissements actifs lents (cm au m par an), cas de Séchilienne, la susceptibilité d'une pente alpine en mouvement lent à une sollicitation sismique ainsi que la cascade associée (séisme-mouvement de terrain-lac/barrage-rupture/barrage) n'est pas quantifiée. Parmi les éléments qui contribuent à cette lacune

- l'absence d'évènement catastrophique contemporain (localement rupture d'un barrage-lac après éboulement en 1149, 20 km en amont de Séchilienne (Rochetaillée)

- le retard/compétence de la communauté française sur les études d'interactions séismes mouvements de terrain et dans la moindre mesure, communauté européenne (exception partielle pour l'Italie et l'Espagne)

- le rejet de la susceptibilité au séisme pour Séchilienne, couplé au rejet de la rupture du barrage-lac, par la commission d'expert (rapport Panet 2003-2009) sans argumentation pour les réponses aux séismes et sur la base d'expérience de laboratoire pour la rupture du barrage.

Dans le contexte international, les mécanismes de déclenchement pour différent cas mondiaux restent peu compris malgré l'acquisition récente de données denses et robustes. Les contributions scientifiques se focalisent sur

- cartes de susceptibilité aux séismes, analyses rétrospectives, non validées en prospectif.
- lois empirique de déclenchement en distance maximale en fonction de la magnitude du séisme déclencheur
- rôle du terrain privilégié (pente, roche) y compris via le rôle de l'accélération du mouvement sismique, amplitude maximale privilégiée par des effets locaux (topographie, matériau)
- rôle de la source sismique négligé

2- Approche scientifique et technique

Si l'objectif initial s'appuyait sur la synthèse des résultats des différentes taches, les retards dans certaines taches en amont de notre contribution n'ont pas permis la réalisation d'un arbre de décision quantitatif depuis un déplacement initial de quelques cibles « au-delà de la normale », jusqu'à la propagation d'un volume dont la taille est issue d'une loi de distribution et qui se propage à une distance dont la variabilité correspondant à différentes simulations (données probabilistes), cet éboulement créant un possible barrage, ce dernier rompant avec une probabilité temporelle. Nos travaux se sont donc concentrés sur

- l'évaluation de susceptibilité de la pente de Séchilienne à un séisme
- la probabilité de rupture d'un éventuel barrage;

Comme discuté en introduction, le recentrage sur ces 2 axes de recherche se justifiait par l'absence de travaux de recherche dans ce domaine dans le contexte alpin.

Pour traiter ce problème des interactions séisme - glissement de terrain, on identifie le comportement moyen de 8 séquences mondiales de glissements de terrains déclenchés par des séismes, dans la gamme de magnitude $M_w = 5.6-8.0$. Ces comportements moyens permettent d'analyser les distributions des distances des glissements de terrains à la faille sismique (figure 1). L'utilisation de distance normalisée (distance glissement séisme / longueur de faille sismique) permet de lisser les effets géomorphologiques locaux en donnant accès au rôle possible de la source sismique. Cette innovation méthodologique a fait l'objet d'une publication Tatar et Grasso, 2013) au Journal of Geophysical Research, (solid earth).

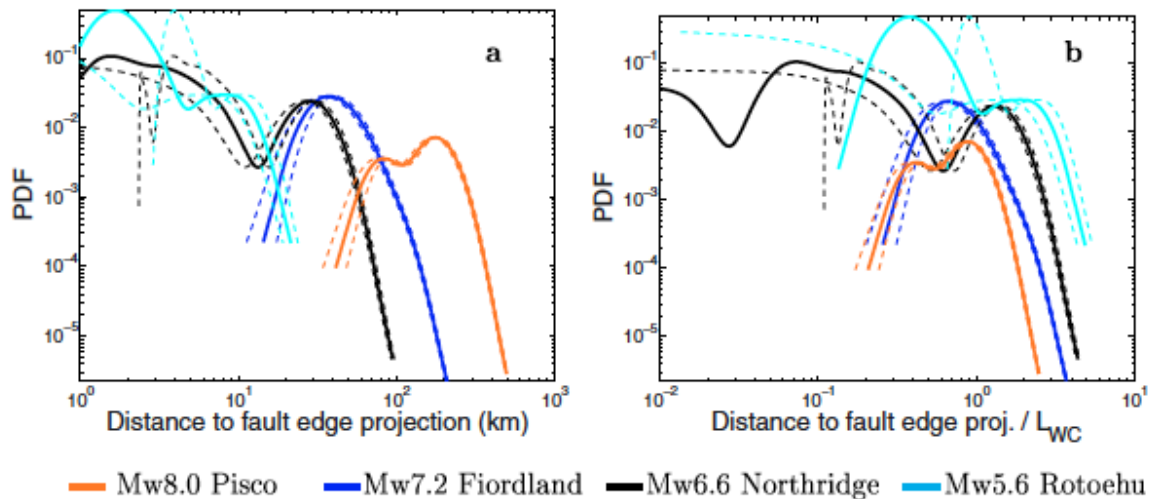


Figure 1 : distribution des distances à la faille pour les glissements de terrains déclenchés (hanging wall) par les 4 séismes en faille inverse, sans rupture de surface. (b) En utilisant les distances normalisées les distances maximales collapse à une distance indépendante de la magnitude du séisme, démontrant ainsi le rôle de la déformation sismique dans le contrôle des distances où les mouvements de terrains sont induits (Tatar et Grasso 2013)

Cette même méthode est appliquée sur les inventaires des séismes modérés alpins pour 5 événements entre $M=4.9-6.0$

En ce qui concerne la stabilité du barrage consécutif au possible effondrement, nous avons collaboré avec le groupe de Chengdu (Sichuan, Chine) leader actuel dans cette problématique. La base de données consécutive au séisme de Wenchuan (2008) permet une analyse statistique des stabilités des 450 lac-barrages contemporain à ce séisme. Cette base de données est comparée aux bases de données mondiales.

Le calage sur les données locales est en cours via la recherche d'exemple historique dans le contexte alpin.

3-résultats majeurs

Dans le domaine des interactions séismes/mouvement de terrains (contexte des Alpes françaises) nos contributions s'énoncent comme suit :

- la validation, en domaine alpin, des relations empiriques distances max de déclenchement en fonction de la magnitude du séisme (études des séismes contemporains significatifs des Alpes françaises (5 cas 1906, 1959, 1962, 1963 2005). Ces résultats fournissent des zones d'influence des séismes pour le déclenchement de Séchilienne, en fonction de la taille du séisme. Un second résultat suggère une plus forte susceptibilité dans les Alpes du nord (région de Chamonix), cette susceptibilité anormale semble être corrélée à la modification des limites des parois en zone de permafrost, due au réchauffement climatique.

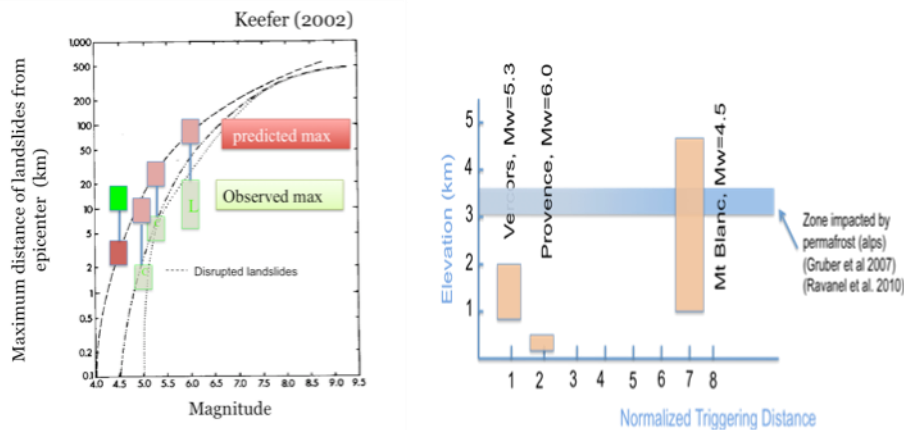


Figure 2 : distribution des distances à la faille pour les glissements de terrains déclenchés par 4 séismes français, M=6, 1906, Provence, M=5.3, 1962, Vercors ; M=4.9, 1963 Trièves, ; M=4.5, 2005, Mont blanc). On observe que les distances maximales (verts) sont en deçà de celles observées (en rouge) au niveau mondiale (Kefer 2002) exceptée pour le cas du séisme de Vallorcine (Mt Blanc 2005). Cette forte susceptibilité pour cet événement est probablement dû à un effet de remontée en altitude du permafrost lié au changement climatique en cours (Grasso et al. 2013).

- rôle de la cinématique de la source sismique dans le contrôle des distances de déclenchement à partir d'inventaires mondiaux bien contraints. Ces résultats permettent d'affiner les résultats précédents en fonction du style de déformation sismique (faille inverse, normale ou coulissage)

- à partir des deux contributions précédentes une gamme de distance séisme - pente où un pourcentage donné de glissement de terrain est localisé ; les applications à Séchilienne sont dérivées pour différents types et magnitudes de séismes.

Table 3. d_{95}^* and d_{75}^* Normalized Distances for All Earthquakes^a

Earthquake Focal Mechanism	Catalog	d_{95}^*	d_{75}^*	$d_{95-\%DS}^*$	$d_{75-\%DS}^*$
Surface-faulting earthquakes	Wenchuan	0.7	0.1	0.4	0.1
	Chi-Chi	0.8	0.2	0.8	0.2
	Kashmir	0.5	0.1	0.4	0.1
	Mean	0.7	0.1	0.5	0.1
Buried, oblique-slip earthquake	Loma Prieta	1.0	0.3	2.3	0.6
Buried, dip-slip earthquakes	Fiordland	3.2	1.9	3.2	1.9
	Northridge	2.9	0.7	2.9	0.7
	Rotoehu	4.1	1.9	4.1	1.9
	Pisco	2.2	1.3	2.2	1.3
	Mean	3.1	1.5	3.1	1.5

^a d_{95}^* and d_{75}^* are the distances normalized by LWC at which 95 and 75% of the landslides occurred, respectively. $d_{95-\%DS}^*$ and $d_{75-\%DS}^*$ are the distances normalized by LWC and weighted by the strike-slip component of the coseismic slip at which 95 and 75% of the landslides occurred, respectively.

Table 1 : distances pour lesquelles 95% et 75% des glissements de terrains ont lieu. La moyenne par type de mécanisme au foyer montre que les séismes en failles inverses déclenchent plus loin que des séismes avec une composante de coulissage.

Dans le contexte des lacs barrages et de leur rupture (cas Séchilienne - contexte des alpes françaises) les résultats concernent:

- le rejet d'une stabilité déterministe du barrage crée par l'effondrement de Séchilienne. L'utilisation en domaine alpin, des relations empiriques (rupture=f(temps)) à partir de cas mondiaux (moyenne régionale (chine, japon, nlle-zélande) et moyenne mondiale) démontrent l'instabilité stochastique de la durée de vie des barrages créés par les mouvement de terrains pour la plupart des cas (hors volumes extrêmes ($V > 109 \text{ m}^3$)). L'ensemble des études suggèrent des durées de vie en loi de puissance pour ces types de lac barrage.

4-Limites actuelles

En ce concerne les analyses concernant les cas français, le calibrage des lois de déclenchements à partir des cas historique se fait à partir de faible volume ($V < 10^3 \text{ m}^3$). Cette limite apparente doit être nuancée par les observations récurrentes de distributions en lois de puissances pour les tailles des glissements induits par les sollicitations sismiques. Dans un tel contexte la probabilité de déclenchement d'un gros volume est plus faible, ce qui est conforme au premier ordre à nos observations.

Une seconde limite potentielle est le calage en magnitude dans un contexte où les effets de site sur le glissement modifient les amplitudes des ondes sismiques (voir résultats sur Séchilienne dans ce rapport (Garambois et al. 2014, Livrable 1.3). Un rapport d'amplitude de 10 par exemple revient à une augmentation d'une unité de magnitude. Cette effet potentiel intervenant pour l'ensemble des pentes mondiales analysées, les diagrammes magnitude-distance que nous utilisons restent les mêmes en France ou mondialement ; on doit alors introduire la notion de magnitude efficace pour inclure un effet de site potentiel. Dans ce sens les lois actuelles de seuil de déclenchement minimisent l'amplitude réelle

qui déclenche un séisme. Par exemple ce ne sera pas un $M=6$ à 30 km de distance, mais une amplitude efficace $A_{\text{eff}} = A_{(M6)+dA}$ dA , étant la correction correspondant à l'amplitude modifiée par effet de site (donc la nouvelle magnitude « efficace » $M_{\text{eff}} = M6-dM$

Enfin le calage des lois de rupture de barrage sur les exemples historiques en contexte alpin n'a pu être finalisé dans le temps de ce projet (en cours)

5- Synthèse :

Les 2 classes de résultats décrits précédemment éclairent différemment les conclusions des rapports d'experts sur le site de Séchilienne. La synthèse en cours tente de réconcilier ces approches en situant, dans un prototype d'arbre de décision, les scénarii proposés « à dire d'expert » comparativement à un ensemble de scénarii probabilistes. Les résultats préliminaires nous permettent de fournir les éléments de synthèse suivant:

- les scénarii envisagés par les entités en charge des alertes et donc du risque (telles qu'accessibles via les rapports ouverts) minimisent tant l'impact d'un séisme sur la cinématique du mouvement de Séchilienne que la possibilité de rupture du lac barrage consécutif à l'effondrement d'une partie du versant de Séchilienne. Cette minimisation est mesurée relativement aux études que nous avons effectuées à l'aide des bases de données mondiales auxquelles nous avons pu nous référer lors du projet SLAMS.

Activité 2 Analyse de l'offre de gestion du risque des ruines de Séchilienne, essai d'approche pragmatique et évaluative

1. Approche problématique et scientifique

La problématique ici proposée est la suivante : Appréhender la manière dont est pensée, perçue, envisagée la réponse de gestion au "risque des Ruines de Séchilienne". Il s'agit ici d'analyser le niveau de satisfaction générale et particulière de l'offre de gestion perçue par les acteurs qu'ils soient producteurs ou destinataires de l'action de gestion. En s'inspirant et en adaptant des méthodologies d'évaluation des services, issue des sciences de gestion (modèles Kano et Tétracasse) nous tenterons de porter un regard nouveau sur l'offre actuelle de gestion sur Séchilienne.

Après un travail préalable d'identification des éléments (dimensions, outils, paramètres, dispositifs, procédures,...) qui caractérisent et structurent cette offre, nous mesurerons le niveau de satisfaction et d'importance des éléments qui composent l'offre de gestion, perçue par les acteurs (politiques, techniques, scientifiques,...). Parallèlement à cette optique évaluative, une démarche dite pragmatique par « les distances » (Creton- Cazanave, 2010) sera développée afin de d'identifier et spécifier la nature des relations entre acteurs et dispositifs qui structurent cette même offre de gestion. Cette démarche qualitative basée des entretiens semi-directifs et sur l'administration de questionnaires auprès des acteurs de la scène de risque doit permettre de rendre compte de manière graphique de la perception collective de l'offre de gestion actuelle. Ce temps d'analyse constitue un préalable pour la suite du projet dans la mesure où il permet d'établir une cartographie (au sens sociotechnique) actualisée de l'offre de gestion du risque des Ruines de Séchilienne. Le risque est donc ici appréhendé comme un problème collectif (Gilbert, 1990, 1998, 2003). En ce sens, il ne constitue pas un "donné", mais relève d'un processus de construction et de structuration pluri-acteurs.

Enfin dans une posture évaluative, il s'agira ensuite d'analyser la vulnérabilité active (associée aux analyses développées ci-dessus). Nous prévoyons ici un travail de diagnostic plus orienté sur la vulnérabilité active associée à l'offre de gestion. Dans la mouvance des travaux actuels en géographie des risques (Thouret et D'Ercole 1996) nous initierons un travail d'identification de cette vulnérabilité dite active par un diagnostic des faiblesses ou dysfonctionnements directement liée à l'offre globale de gestion (pratiques, acteurs, dispositifs, procédures,...) (Boudières, 2008 ; Boudières et al, 2009. Dans le cadre d'une démarche prospective, il s'agit de fournir des éléments et pistes de réflexions pour questionner l'offre de gestion.

2. Principaux résultats

Sans revenir spécifiquement sur les résultats obtenus par les différentes approches (évaluative : satisfaction/importance, descriptive : distographe, interprétative : vulnérabilité active), relevons ici en guise de conclusion générale quelques points saillants de l'analyse :

- Une offre de gestion des risques relativement unique dans sa configuration, disposant d'une forte intégration allant de la caractérisation du scénario d'aléa jusqu'à la réduction de la vulnérabilité des enjeux et la préparation à la crise.
- L'ensemble de la chaîne du risque est articulée et bénéficie d'une forte cohérence de type « top down ».
- Une structuration hiérarchique toutefois fortement dépendante de la capacité du comité d'expert à caractériser et définir un scénario de menace appréhendable par l'ensemble de la chaîne de gestion (surveillance, alerte, préparation sauvegarde, zonage, travaux, ...).
- L'importante robustesse de l'offre de gestion du risque de Séchilienne constatée, caractérisée par un fort degré d'intégration et de cohérence, ne doit pas masquer le fait que les fondements de cette offre de gestion reposent essentiellement à la fiabilité du scénario retenu.

Ainsi, l'importante robustesse de l'offre de gestion du risque de Séchilienne constatée, caractérisée par un fort degré d'intégration, de coordination et de cohérence, ne doit pas masquer le fait que les fondements et l'intégrité de cette offre de gestion reposent essentiellement à la fiabilité du scénario retenu.

Sur un plan méthodologique nous pouvons également évoquer les remarques suivantes :

- une forte complémentarité dans les approches proposées :
Pragmatique : définition du sens de l'action (acteur-outils)
Normative : analyse synchronique froide des perceptions (enjeux-outils)
Evaluative- interprétative : diagnostic des forces et faiblesses de l'offre
- Un test de protocole méthodologique réussi en termes d'efficacité : rationalisation questionnaire, démarche terrain, traitement, spectre de résultats associé.
- Une Innovation pluridisciplinaire « bloquante » : trans-SHS (géographie sociale, sociologie, gestion), avec des épistémologies croisées difficiles à valoriser

3. Conclusions

Vis à vis des 2 activités scientifiques proposées existe un enjeu d'évaluation de données qualitatives et quantitatives pour mesurer :

- dans un cas la prise de décision (à travers une analyse du processus de décision et de l'incertitude sur les connaissances associées aux phénomènes géophysiques)
- dans l'autre, l'évolution de la susceptibilité de l'offre de gestion vis-à-vis du risque (son évolution au sens gestionnaire et organisationnel)

Dans les limites de temps et de moyens imparties, il ne nous a pas été permis de mixer les deux activités dans une perspective qui aurait pu être d'alimenter l'arbre de décision en données qualitatives associées à l'organisation de l'offre de gestion et inversement, tester et éprouver l'arbre de décision au niveau des acteurs de l'échantillon de l'offre de gestion.

Citons dans cette perspective d'analyse et de manière non exhaustive, certains travaux qui font directement écho à un type de développements qui n'a pas pu être réalisé dans le cadre du projet :

- Intégration de données médiatiques: Torre, A., Melot, M., Bossuet, L., Cadoret, A., Caron, A., Darly, S., Jeanneaux, Ph., Kirat, Th. et Pham, H. V. 2010. « Comment évaluer et mesurer la conflictualité liée aux usages de l'espace ? Eléments de méthode et de repérage », VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement, vol. 10-1, avril.
- Intégration de données juridiques: Barré, M.-D., Aubusson de Cavarlay, B. et Zimolag, M. 2006. Dynamique du contentieux administratif. Analyse statistique de la demande enregistrée par les tribunaux administratifs, Rapport pour la Mission de recherche Droit et justice, Paris : Ministère de la Justice.

A ce titre, il existe un enjeu réel de compréhension sur le processus d'évolution de l'offre de gestion (et de la décision). Un questionnement possible pourrait être de mieux appréhender et intégrer les forçages sociétaux externes (organisationnels, conflits, médiat, juridique,...) sur l'évolution de l'offre de gestion (et de la décision) et ce indépendamment de l'évolution des scénarii d'aléas.

4. Bibliographie et Références

- Adam V., 2008. Disaster management performance audit a comprehensive model to assess the effectiveness, efficiency and appropriateness of disaster management in the case of floods for Austrian local authorities, *Interpraevent conference proceedings*, vol 2, 263-74 pp.
- Boudières V., 2008, De la gestion des risques aux risques de leur gestion dans les territoires touristiques de montagne : Modalités de gestion du risque d'avalanches dans les Alpes françaises et facteurs de vulnérabilité associés, Thèse de doctorat de Géographie, Cemagref/PACTE, 384 pp
- Becerra S., 2012, « Vulnérabilité, risques et environnement : l'itinéraire chaotique d'un paradigme sociologique contemporain », *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement* [En ligne], Volume 12 Numéro 1
- Chateauraynaud, F. et Torny, D., 1999, *Les sombres précurseurs : une sociologie pragmatique de l'alerte et du risque*, EHESS, Paris.
- Durville et al, 2010, rapport CGEDD : Ruines de Séchillienne : mesures à prendre face aux risques, 40 pp.
- Créton-Cazanave, L., 2009, « Warning ! The use of meteorological information during a flash-flood warning process », *Advances in Science and Research*, vol. 3, p. 99–103.
- Créton-Cazanave, L., 2010, *Penser l'alerte par les distances. Entre planification et émancipation, l'exemple du processus d'alerte aux crues rapides sur le bassin versant du Vidourle*, Thèse de doctorat, Institut de Géographie Alpine, Université de Grenoble. Disponible en ligne : <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00507023>
- Créton-Cazanave, L., avr. 2005, « Rapport final-2005-AMPHORE- Analyse d'une vulnérabilité : le système d'alerte. Cas des crues rapides du Gard, septembre 2002. », Rapport intermédiaire, Programme Interreg III AMPHORE.
- Créton-Cazanave, L., Lutoff, C., et Soubeyran, O., 2009, *Alerte aux crues rapides : de l'utilité d'une nouvelle approche*, Dans *Risques et environnement : recherches interdisciplinaires sur la vulnérabilité des sociétés*, Peltier, A. et Becerra, S. (coordinateurs), chap. Vulnérabilité, p. 483–494, L'Harmattan, ISBN 978-2-296-08132-1.
- De Singly F., 1992, *La conception du questionnaire*. In *L'enquête et ses méthodes : le questionnaire*, ed. F De Singly, pp. 27-41. Paris: Nathan
- Decrop G, Dourlens C, Vidal Naquet P. 1997. *Les scènes locales de risque*, CERP/Futur Antérieur Lyon

- Gilbert C. 2005. Erreurs, défaillances et vulnérabilités : vers de nouvelles conceptions de la sécurité ?
In Risques, crises et incertitudes : pour une analyse critique. Cahier n°3 du GIS Risques Collectifs et Situations de Crise, ed. O Borraz, C Gilbert, P Joly, pp. 69-115. Grenoble : MSH-Alpes
- Granjou C. 2004. L'externalisation de l'expertise dans le système des Agences en France : l'objectivité scientifique au service de la Précaution. In Expertise et action publique, Collection Sociologie politique, ed. S Jacob, J Genard, pp. 43-51 : Editions de l'Université Libre de Bruxelles
- Gumuchian H, Marois C. 2000. Initiation à la recherche en géographie. Paris. 425 pp.
- Jullien, F., 1996, Traité de l'efficacité, Grasset.
- Lascoumes P, Le Galès P. 2004. Gouverner par les instruments. Pari. Sciences po. 369 p.
- Latour, B., 1991, Nous n'avons jamais été modernes, essai d'anthropologie symétrique, Paris:La Découverte, 207 p.
- Llasat, M., Lutoff, C., Teramasso, A., Ruin, I., et Créton-Cazanave, L., 2005, « Comparaison des systèmes d'alerte opérationnels. Espagne, France, Italie. », Rapport technique, University of Barcelona.
- Llosa S. 1997. L'analyse de la contribution des éléments de service à la satisfaction : un modèle Tetracasse, Décisions Marketing, 10, Janvier-Février, pp. 81-88
- Lussault, M., 2007, L'homme spatial. La construction sociale de l'espace humain, Seuil, Coll. La couleur des idées, Paris.
- Nachi, M., 2006, Introduction à la sociologie pragmatique : vers un nouveau "style" sociologique ?, Armand Colin.
- Panet, M., 2009, "Scénarios d'évolution du versant des ruines de Séchilienne", Rapport du Collège d'experts, Janvier 2009, 17 p.
- Ray D., 2001, Mesurer et développer la satisfaction de la clientèle, Paris, Éditions d'Organisations, p. 9-10
- Retaillé, D., 1997, Le monde du géographe, Presses de Sciences Po.
- Roux, J. (Ed), 2006, Être vigilant : l'opérativité discrète de la société du risque, Publications de l'Université de Saint-Etienne, 268 p.
- Sorensen, J. H., 2000, « Hazard Warning Systems: Review of 20 years of progress », Natural Hazards Review, p. pp. 119–125.
- Soulet MH., 2005, La vulnérabilité comme catégorie de l'action publique. Pensée plurielle pp. 49-59
- Theys J. 1987. La société vulnérable. In La société vulnérable, évaluer et maîtriser les risques, ed. J Fabiani, J Theys, pp. 3-36. Paris : Presse de l'École Normale Supérieure
- Tremblay P, 2006, Mesurer la satisfaction et les attentes des clients : des modèles classiques aux modèles asymétriques, Centre d'expertise des grands organismes, 79 pp
- Weber, M., 1904 (Réed. 1965), Essais sur la théorie de la science, Plon, 478 p.