Journées Aléas Gravitaires

MONTPELLIER 2022

10-11 Mai 2022

https://jag2022.sciencesconf.org/

RESUMES

Journées
Aléas
Gravitaires

JAG

MONTPELLIER 2022

10-11 Mai 2022

https://jag2022.sciencesconf.org/

ATELIER TECHNIQUE
9/05/2022

Christophe Brunet
Institut de Physique du Globe de Paris
Observatoire Volcanologique du Piton de la Fournaise
Co-responsable technique, IR CNRS

La détection et l'analyse de la propagation du magma vers la surface sont essentielles dans la prévention des éruptions et la compréhension des mécanismes géophysiques mis en jeu. Un réseau instrumental dense associant différentes techniques de mesures complémentaires et couplé à une transmission en temps réel des données permet d'atteindre en partie ces objectifs.

Trois projets de développement instrumental seront abordés :

1- L'inclinométrie constitue l'une de ces techniques pour la surveillance et l'étude des déformations associées aux processus magmatiques. Au Piton de la Fournaise, les inclinomètres actuellement utilisés permettent d'atteindre des résolutions de l'ordre de 10^{-9}rad à 10^{-8}rad suivant les capteurs et le type d'installation mis en œuvre. Hormis les inclinomètres de forages coûteux à mettre en place actuellement au nombre de 3, les signaux restent assez bruités du fait de leur installation en surface, avec notamment l'influence des variations de température environnementale. Il apparait donc nécessaire de développer une solution intermédiaire, un capteur de sub-surface installé dans un mini-forage pour réduire ces artéfacts. L'OVPF développe actuellement ce capteur (fig1) qui sera déployé suivant une configuration en antenne afin d'améliorer globalement le rapport signal sur bruit avec des contraintes fortes de mise en œuvre, d'encombrement et de coût. Une solution combinant des éléments du commerce, une électronique et une mécanique en cours de développement sera bientôt mise en œuvre pour des tests de qualification (banc de calibration).

2- Un autre aspect du développement low-cost développé à l'OVPF est une solution RTK qui sera utilisée pour de l'ortho-photo des coulées de lave post-éruptive sur la base d'un Canon 5D (fig2) et du réseau de surveillance GNSS du Piton de la Fournaise. Cette solution sera en partie utilisée également sur le projet inclinomètre présenté précédemment.

3- Enfin, en marge de la thématique des déformations, l'OVPF développe une station multigaz GETS (fig3, *Geochemical Easily Transported System*) de type low-cost permettant la communication entre différents capteurs (I2C, SPI et RS232) et différents modes de communication (Wifi et Lora). Ce type de station sera déployée au sol au plus près des évents éruptifs et pourra donc potentiellement être endommagée voire détruite. La contrainte de coût est donc prépondérante. De même, le poids et le volume de GETS sont maitrisés afin de permettre un déploiement au sol via un drone ou des mesures sur drone directement dans le panache volcanique. Indépendamment du type de capteur géochimique, l'aspect électronique de gestion des communications et de la transmission seront abordés brièvement.

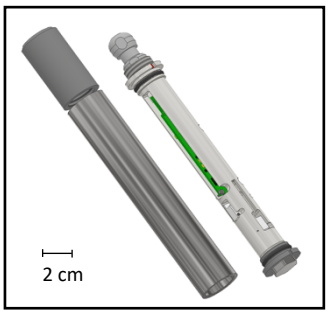


Fig1 Mini-inclinomètre

Fig2 RTK sur Canon-5D

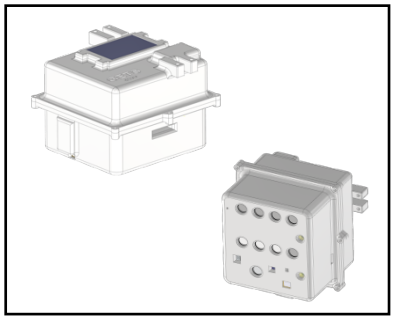


Fig3 GETS

Journées
Aléas
Gravitaires

JAG

MONTPELLIER 2022

10-11 Mai 2022

https://jag2022.sciencesconf.org/

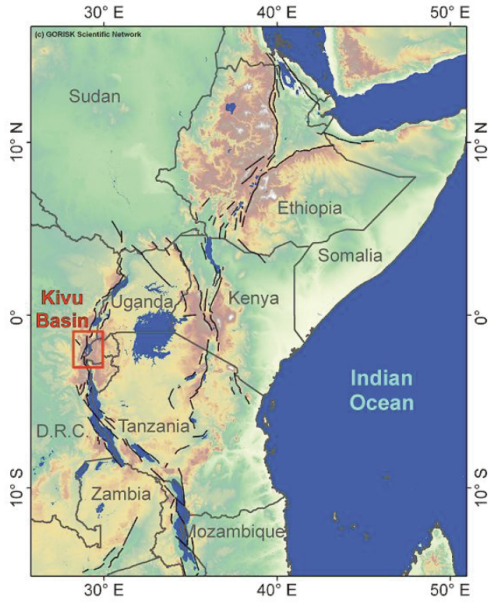
Les observatoires multi-méthodes des "mouvements de terrain"

GRavIty: Glissements gravitaires au Rwanda: vers une évaluation des facteurs de risque et de leurs Impacts sociétaux.

JOLIVET Marc(1), ARVOR Damien(2), DAUTEUIL Olivier(1), CORGNE Samuel(2), BAVAY Dominique(1) et BYIRINGIRO Fils-Vainqueur(3)

(1) Laboratoire Géosciences Rennes, UMR6118 CNRS – Université de Rennes 1, Rennes, France
(2) Laboratoire Littoral-Environnement-Télédétection-Géomatique (LETG), UMR6554, CNRS – Université Rennes 2, Rennes, France.
(3) Laboratoire de Géosciences, Université du Rwanda, Kigali, Rwanda.

La compréhension des facteurs d'activation et de contrôle du déclenchement et de la cinétique des glissements gravitaires (secousse sismique, pente, précipitations, déforestation, dégradation des sols) est un enjeu majeur pour la gestion du risque qui impose une approche interdisciplinaire innovante couplant l'analyse conjointe des écosystèmes (climat, végétation, sols et pratiques agricoles), de la géologie (failles, substratum, géomorphologie) et des sociétés (densité, habitat, vulnérabilité).



Au Rwanda, pays le plus densément peuplé d'Afrique (500 ha/km2), le climat humide, les fortes pentes, la sismicité associée au rift est-africain et l'intense déforestation liée à l'activité agricole génèrent un aléa gravitaire majeur. Si des cartes d'aléa existent, le suivi des glissements actifs et la caractérisation du risque sont inexistants. Pourtant ils ont un impact majeur sur les infrastructures, l'agriculture et donc l'économie et les populations. Il est indispensable, dans le contexte actuel de déforestation, de dégradation avancée des sols et d'une population dense, de documenter le comportement long-terme des glissements actifs et d'évaluer les risques associés afin de proposer des solutions de remédiation ou de minimisation des impacts anthropiques.

L'approche interdisciplinaire proposée dans le projet GRavIty mobilisera télédétection, géomorphologie, sismologie, climatologie, tectonique et enquêtes auprès de populations pour suivre la dynamique des glissements sur deux sites d'étude aux caractéristiques physiques et anthropiques différentes. Sur chaque site, une cartographie détaillée des glissements sera réalisée via les méthodes de détections par imagerie satellitaire des changements d'usage du sol développées au LETG et une cartographie géomorphologique de terrain. L'activité des glissements principaux et l'évolution de leur environnement seront suivies par une cartographie récurrente par drones et des campagnes de mesure GPS permettant d'évaluer les vitesses caractéristiques de fluage. Enfin une enquête auprès des populations permettra d'établir une chronologie des déclenchements et une première évaluation de leur impact sur les systèmes anthropisés. Le volet « science participative » permettra aux habitants de signaler en permanence tout mouvement important. Ces données chronologiques seront mises en parallèle des données climatiques et de sismicité obtenues dans les catalogues existants (NOAA, Copernicus ERA5-Land, CHIRPS, USGS et KivuSNet).

Ces données permettront de caractériser les glissements, de quantifier les risques associés et d'évaluer les moyens de protection ou les pratiques environnementales à développer, ouvrant sur des projets associant les Sciences de la Terre, les Sciences de l'Environnement et les Sciences Humaines.

Le projet GRavIty est soutenu par un contrat doctoral 80Prime (CNRS-MITI) ainsi que par un financement "Défis scientifiques" de l'Université Rennes 1.

Suivi de mouvements gravitaires par série d'images optiques terrestres

Ombeline Brenguier*[1]

[1]ADRGT – SAGE – 2 rue de la Condamine 38610 Gières, France

Résumé

La prévision des catastrophes naturelles telles que les mouvements gravitaires passe par l'amélioration de la compréhension de leur dynamique et de leur comportement. Ainsi une panoplie de techniques existe pour caractériser et quantifier leur déplacement et leur évolution : extensomètres, relevés topographique manuel ou automatique, inclinomètres ...
Ces mesures apportent des informations précises et précieuses pour la compréhension de la dynamique du mouvement et son évolution au cours du temps. En outre elles sont très efficaces pour les systèmes d'alerte.

Ces mesures restent toutefois ponctuelles et parfois ne permettent pas d'avoir une bonne caractérisation de la géométrie de la zone en mouvement, notamment les limites latérales. Elles présentent aussi l'inconvénient de nécessiter la mise en place d'instrumentation in situ qui peut être compliquée car les accès sont dangereux ou impossibles. De plus l'installation de ces systèmes de surveillance nécessite d'avoir une connaissance à priori des zones actives.

La SAGE-ADRGT, en collaboration avec l'EOST de Strasbourg, a développé une approche innovante qui consiste à analyser des séries chronologiques d'images terrestres provenant d'une caméra fixe.

Cette approche est basée sur l'acquisition de vues régulières (journalières) de photos prises d'un point de vue fixe. A partir de deux photos prises à deux instants différents d'un objet en mouvement, il est possible de restituer le champ de vitesse de surface (figure 1). On cherche par corrélation à déterminer le déplacement d'un motif entre deux images. Le bruit généré par l'environnement (variation de température, d'humidité, etc ...) permet de détecter des mouvements de l'ordre de 1/5ieme de pixel (note : la taille du pixel dépend de l'éloignement entre l'appareil photo et l'objet à suivre).

Cette approche permet d'identifier les secteurs les plus actifs, de dater le départ de bloc rocheux au jour près mais aussi de quantifier les déplacements. Elle permet de détecter des signes précurseurs au départ de blocs de plusieurs m3 (cf. compartiment rocheux A sur la figure 1, éboulé en 2021). Enfin elle donne accès à la géométrie globale des masses en mouvement.

Depuis 2020, plusieurs sites sensibles de Savoie ont été équipés avec ce nouveau système de suivi.

*Intervenant

SITE 1 : Sur une falaise située en Maurienne, cette technique a mis en évidence des déplacements importants au niveau d'une masse de plusieurs milliers de m3 dont l'activité n'était pas soupçonnée (compartiment rocheux noté B sur la figure 1). Cette masse menace une route départementale et une infrastructure d'EDF.

Suite à cette détection, le suivi a été renforcé par un deuxième appareil fixe et des méthodes plus classiques (suivi par théodolite) pour gagner en précision et gérer l'alerte. Une solution pour sécuriser la zone est déjà à l'étude.

SITE 2 : Un glissement rocheux situé dans le val d'Arly était suivi par un théodolite automatisé. Suite à des mouvements de plusieurs mètres la plupart des cibles du théodolite automatique ont été perdues. Le suivi par images terrestres a permis de compléter la série de mesure de déplacement et en outre de bien délimiter les limites du mouvement.
En conclusion, cette nouvelle approche peu onéreuse permet de compléter les outils déjà existants pour le suivi de sites instables. Elle apporte notamment des informations sur la dynamique et la géométrie des sites actifs à l'échelle globale. Elle permet ainsi de détecter des précurseurs à des évènements de taille variable.

Mots-Clés: Suivi optique série temporelle précurseurs quantification caractérisation

Caractérisation et suivi temporel de glissements de terrains lents par réseau sismique dense : l'expérience RESOLVE Harmalière

Antonin Chale-Briand[1], Camila Andrea Sanchez Trujillo[1], Stéphane Garambois[2], and Grégory Bièvre*[3]

[1]Institut des Sciences de la Terre – Institut National des Sciences de l'Univers, Institut de recherche pour le développement [IRD] : UR219, Université Savoie Mont Blanc, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR5275, Université Gustave Eiffel, Université Grenoble Alpes – ISTerre, OSUG-C (Maison des Géosciences), 1381, rue de la Piscine, 38610 GIERESISTerre, Université Savoie Mont Blanc, Campus Scientifique, 73376 Le Bourget-du-Lac Cedex, France

[2]Institut des Sciences de la Terre (ISTerre) – Université Grenoble Alpes, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR5275, Université Savoie Mont Blanc, PRES Université de Grenoble, Institut de recherche pour le développement [IRD] : UR219, Institut national des sciences de lÚnivers, Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux, Université Joseph Fourier - Grenoble 1, Institut national des sciences de lÚnivers, Institut national des sciences de lÚnivers, Institut national des sciences de lÚnivers, Institut national des sciences de lÚnivers, Institut national des sciences de lÚnivers, Institut national des sciences de lÚnivers, Institut national des sciences de lÚnivers, Institut national des sciences de lÚnivers, Institut national des sciences de lÚnivers, Institut national des sciences de lÚnivers – BP 53 - 38041 Grenoble cedex 9, France

[3]Institut des Sciences de la Terre – Université Grenoble Alpes, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR5275, Institut national des sciences de lÚnivers, Institut national des sciences de lÚnivers, Institut national des sciences de lÚnivers, Institut national des sciences de lÚnivers, Institut national des sciences de lÚnivers, Institut national des sciences de lÚnivers, Institut national des sciences de lÚnivers, Institut national des sciences de lÚnivers, Institut national des sciences de lÚnivers, Institut national des sciences de lÚnivers, Institut national des sciences de lÚnivers, Institut national des sciences de lÚnivers, Institut national des sciences de lÚnivers, Institut national des sciences de lÚnivers, Institut national des sciences de lÚnivers – BP 53 - 38041 Grenoble cedex 9, France

Résumé

Le glissement de terrain d'Harmaliere (Isère, France) présente des mécanismes de déformation multiples : fragile au niveau de l'escarpement principal, ductile le long de plusieurs surfaces de cisaillement identiées dans sa partie supérieure et sous forme d'écoulement au pied du glissement. La transition entre les comportements solide (glissement) et uide (écoulement) est distribuée le long d'une zone de transition de plusieurs centaines de mètres de long, dont l'extension et le(s) mécanisme(s) qui la contrôle restent diciles à déterminer.

*Intervenant

Le projet RESOLVE (Développement d'une plate-forme multi-instruments pour une approche d'imagerie multi-physique) vise à développer des acquisitions 4D en utilisant un réseau très dense de capteurs autonomes et sans l. Cette communication a pour objectif de présenter l'expérience RESOLVE et les premiers résultats obtenus sur le glissement de terrain d'Harmalière où 100 vélocimètres 3 composantes ont été installés au niveau de la zone de transition pendant 1 mois à la n du printemps 2021. Cette base de données permettra diérentes approches de caractérisation et de suivi temporel. Tout d'abord par l'imagerie haute-résolution de cette zone cruciale, grâce à l'obtention d'images 3D de la vitesse des ondes P (tomographie active) et des ondes S (tomographie passive par intercorrélation de bruit). Egalement par un suivi temporel à haute-résolution, par interférométrie sismique du bruit qui permettra d'obtenir des tomographies dynamiques des variations horaires de vitesses sismiques, qui seront comparées aux données environnementales existantes. Cette approche permettra d'évaluer la synchronicité des changements au sein de la masse instable. Ces données 3C permettront également d'étudier la pertinence et la sensibilité de la méthode H/V pour le suivi des glissements de terrain. Enfin, elle permettront l'analyse ne de l'activité micro-sismique interne ou proche du glissement : estelle localisée le long de plans préférentiels (surfaces de cisaillement) qui correspondraient à un glissement ou est-elle distribuée aléatoirement dans la zone de transition, ce qui correspondrait plutôt à un mécanisme de coulée ? Évolue-t-elle dans le temps ?
Ces données denses permettront également de tester des approches de détection et de regrouppements d'évènements grâce à des techniques d'apprentissage, qui sont en développement sur ce type de réseau.

Mots-Clés: Glissement, coulée, réseau sismique dense

Glissement du Chambon : évolution post-rupture depuis 2016

Marie-Aurélie Chanut*[1], Laurent Dubois , Yohan Peru , and Samuel Dauphin

[1]Centre d'Études et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement - Equipe GéoCoD – Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement – 25 avenue François Mitterrand - CS 92803 - 69647 BRON Cedex, France

Résumé

Introduction

Au printemps 2015 s'est déclenché un glissement de terrain d'un volume estimé de l'ordre de 600 000 m3 au niveau de la rive droite de la retenue du barrage du Chambon dans la vallée de la Romanche en Isère. Ce glissement a entraîné des dommages structurels conséquents au grand tunnel du Chambon et la fermeture totale de la route RD1091 reliant Grenoble à Briançon pendant de nombreuses semaines. L'interprétation *a posteriori* de l'évolution de l'instabilité au cours du temps a permis de formuler l'hypothèse d'un mécanisme de rupture progressive se développant dans le massif schisteux constituant le versant (Dubois et *al.*, 2016). L'objet de la présente communication est de présenter un état des lieux du comportement post-rupture du glissement mené depuis juillet 2015.

Méthode de suivi

Depuis l'arrêt du suivi géodésique par le CD 38 fin octobre 2016, l'évolution du glissement de terrain est quantifiée par la comparaison annuelle de nuages de points 3D de la surface en mouvement. Les modèles 3D sont générés par photogrammétrie ou scanner laser terrestre. Les modèles sont ensuite recalés dans la même géométrie à l'aide des zones réputées stables situées sur le pourtour du glissement de terrain. Enfin, les déplacements 3D sont calculés selon le principe développé sur la Figure 1 (Chanut et *al.*, 2021). Des cartes de pentes (2D) sont générées par la projection des nuages de points 3D dans le plan horizontal. Les champs de déplacements (gauche-droite et haut-bas dans l'image) sont calculés par corrélation d'images à partir des deux cartes de pentes. Le champ de déplacements 2D obtenus est ensuite reprojeté dans la géométrie 3D des nuages de points pour en déduire le champ de déplacements 3D.

La méthode a été validée sur le glissement du Chambon lors de périodes de forts déplacements en avril-mai 2016, mai-juin 2016 et juin-juillet 2016 en confrontant les déplacements calculés par cette méthode à ceux mesurés par géodésie.

Mots-Clés: Glissement du Chambon, Suivi, Nuages de points, Sensibilité aux apports d'eau

*Intervenant

2D Phase-based RFID landslide surface displacement monitoring

Arthur Charléty*†[1], Mathieu Le Breton , Laurent Baillet , and Eric Larose

[1]ISTerre Failles – Institut des Sciences de la Terre – ISTerre, OSUG-C (Maison des Géosciences), 1381, rue de la Piscine, 38610 GIERES, France

Résumé

Passive Radio-Frequency Identification (RFID), used recently to monitor landslide displacement at a high spatio-temporal resolution (1), was previously used to measure only 1D displacement.
We demonstrate the ability to track 2D horizontal displacements, using an array of four antennas connected to an RFID interrogator. Ten tags were deployed on a landslide for 11 months and 2D relative localization was performed using a Phase-of-Arrival approach (2). The localization method is inspired of the Time-Difference Phase- Difference (TD-PD) technique. The radial displacement estimation from each antenna was measured, and a geometrical model based on sensitivity kernel calculations allowed for 2D displacement estimation. Results show a clear south-east displacement of about 1 m in the horizontal plane, over the monitored area.
The centimeter-scale accuracy of this technique was confirmed experimentally. This study confirms that long-term 2D landslide displacement tracking with RFID is feasible at relatively low instrumental and maintenance cost. This widens the applicability of RFID to Earth Science monitoring
(1).

References

(1) M. Le Breton, L. Baillet, E. Larose, E. Rey, P. Benech, D. Jongmans, F. Guyoton, and M. Jaboyedoff, "Passive radio frequency identification ranging, a dense and weather-robust technique for landslide displacement monitoring," Engineering geology, vol. 250, pp. 1–10, 1 2019.

(2) A. Charl'ety, E. Larose, M. Le Breton, L. Baillet, and A. Helmstetter, "2d phase-based rfid localization for on-site landslide monitoring," 2022.

(3) P. V. Nikitin, R. Martinez, S. Ramamurthy, H. Leland, G. Spiess, and K. Rao, "Phase based spatial identification of uhf rfid tags," in 2010 IEEE International Conference on RFID (IEEE RFID 2010), pp. 102–109, IEEE, 2010.

(4) M. L. Breton, F. Li'ebault, L. Baillet, A. Charl'ety, 'Eric Larose, and S. Tedjini, "Dense and longdterm monitoring of earth surface processes with passive rfid – a review," 2021.

*Intervenant
†Auteur correspondant: arthur.charlety@univ-grenoble-alpes.fr

Mots-Clés: Phase localization, landslides, RFID, remote sensing, wireless sensor network, early warning

Comparaison instrumentale de la mesure des précipitations : essais et retours d'expérience

Poster

Auteur : R. CHOCHON (1)*, T. LEBOURG (1), N. MARTIN (2), M. HERNANDEZ (3), M. VIDAL (1)
(1) Université Côte d'Azur, OCA, CNRS, IRD, GEOAZUR, France
(2) Université Côte d'Azur, CNRS, UAPV, AMU, ESPACE, France
(3) Azur Géo Logic, Bureau d'étude, Vence, France
* raphael.chochon@geoazur.unice.fr

De nombreux domaines scientifiques utilisent des mesures de précipitations pour leurs études, en particulier dans les sciences de l'environnement, l'hydrologie, l'hydrogéologie, la géologie, ou encore l'agriculture. Au laboratoire Géoazur, et plus généralement dans les travaux des laboratoires de l'OMIV, les précipitations servent comme variables en tant qu'intrants hydrogéologiques dans les modèles géologiques pour expliquer une partie de l'activité des mouvements de terrain.
Ces mesures peuvent également être utiles en temps réel dans le domaine opérationnel, en complément des lames d'eau radar afin d'aider à la prise de décisions lors d'évènements intenses (Chochon et al. 2021), ou bien a posteriori pour procéder à des retours d'expérience sur des épisodes marquants.

La mesure directe de la pluie peut se faire en quantifiant son volume liquide dans un seau, par des systèmes de comptage de basculement d'auget, de pesée, ou encore de flotteurs. La pluie peut aussi se mesurer indirectement par des systèmes optoélectroniques ou radiofréquences. Ces systèmes permettant notamment de mesurer la taille, la forme et la vitesse des gouttes, à différentes échelles spatiales et ainsi en déduire un volume.
Selon l'objectif final de la mesure, mais aussi selon les contraintes du milieu d'installation (emplacement, énergie, etc.) et du plan de maintenance voulu, une de ces technologies sera préférée à une autre. Au travers de la présente étude, nous montrons que ce choix peut avoir un impact sur la rigueur ou la reproductibilité de la mesure et donc sur les quantifications de pluies.

Au travers d'une comparaison menée depuis mi-2018 sur la toiture du laboratoire Géoazur, nous avons cherché à quantifier les différences qui peuvent être observées entre plusieurs modèles de pluviomètres moyen et haut de gamme.
Six pluviomètres ont été installés sur la période 2018-2021 ; trois pluviomètres à augets de la marque *Davis Instruments*, dont deux modèles à doubles-augets (VP2 A et B) et un modèle mono-auget (VP2 C) ; un pluviomètre « radar » de la marque *Lufft* ; un pluviomètre à impact (acoustique) de la marque *Vaisala* ; et enfin un pluviomètre manuel à lecture directe de la marque *SPIEA* (homologué Météo-France), et qui a servi de référence pendant cette expérimentation.
Le pluviomètre à doubles-augets VP2 A n'a subi aucune maintenance (ni nettoyage ni calibration), afin de simuler le cas d'une station météo installée et non entretenue. Le pluviomètre VP2 B est identique au niveau matériel, mais a été nettoyé et calibré tous les 6 mois environ. Le pluviomètre VP2 C est composé d'un système mono-auget, et a seulement été nettoyé en même temps que le pluviomètre VP2 B. Les autres pluviomètres n'ont subi aucune maintenance, car ils n'en nécessitent pas, et c'est là leur avantage d'après les fabricants.

Tous les pluviomètres sont comparés au pluviomètre de référence pour une trentaine d'évènements de plus de 30 mm, et un de ces pluviomètres, le VP2 C, ressort nettement en tête du comparatif (Figure 1). Ce dernier sert ensuite de référence pour comparer entre eux les autres pluviomètres, sur différents

pas de temps d'agrégation de 5 minutes à 24h, mais cette fois sur toute la période commune de disponibilité des données des pluviomètres.

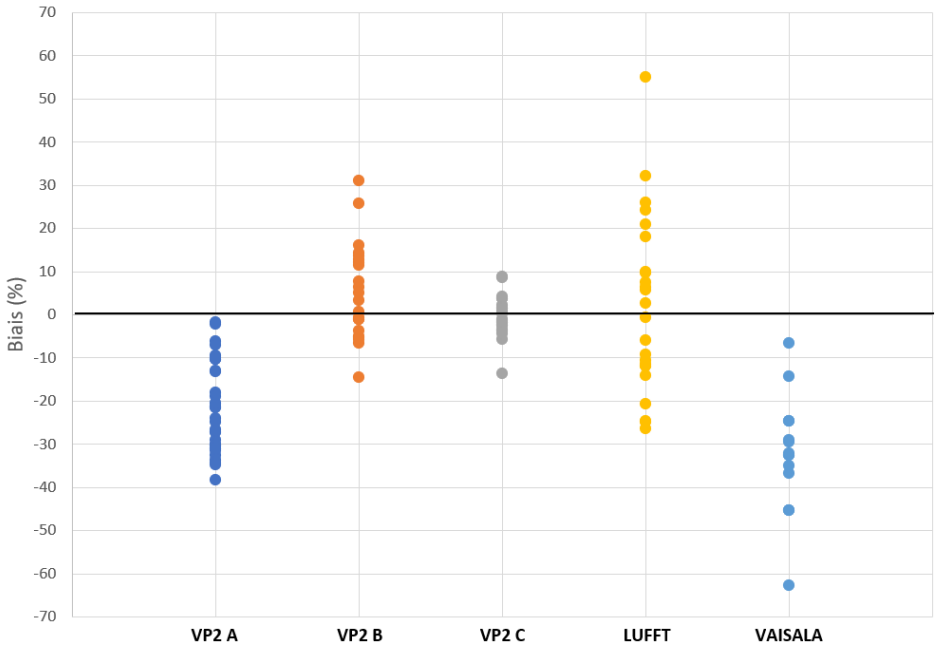


Figure 1 : Biais de chaque pluviomètre par rapport au pluviomètre de référence SPIEA sur les épisodes de plus de 30 mm de la période 2018-2021

Les fortes intensités de précipitations peuvent aussi affecter la précision de mesures des pluviomètres. Ce phénomène est connu, notamment pour les pluviomètres à augets du fait d'une perte d'eau pendant le mouvement de bascule des augets (Lanza et al. 2006), et peut atteindre jusqu'à 12% selon Météo-France sur des pluviomètres avec une surface de captation de 400 cm² (Leroy 2000; 2002).
Pour évaluer l'effet des intensités sur la justesse de chaque pluviomètre, nous avons classé les enregistrements de chaque pluviomètre en fonction de l'intensité recueillie par le pluviomètre de référence. Nous montrons ici les lacunes plus ou moins grandes de chaque instrument selon différentes classes d'intensités de précipitations.
Des méthodes de calibration dynamiques existent pour calibrer des pluviomètres à augets à différentes intensités (Humphrey et al. 1997; Sypka 2019; Liao et al. 2021), mais demandent du matériel et manipulations spécifiques qui vont à l'encontre de la simplicité d'utilisation des pluviomètres testés dans cette étude.

L'étude présentée ici montre quelques résultats intéressants sur la limite des pluviomètres à augets qui nécessitent impérativement une maintenance minimale au risque de voir diminuer drastiquement leur justesse. Le pluviomètre mono-auget de la marque *Davis Instruments* montre de très bons résultats et est jugé meilleur que son prédécesseur à doubles-augets, qui a aussi l'avantage d'être intégré dans une station météorologique complète et abordable.
Les pluviomètres « haut de gamme », qui intègrent d'autres technologies de mesure indirecte des précipitations montrent leurs limites avec parfois près de 40% de sous-estimation. Leur avantage de ne disposer d'aucun élément mécanique et ainsi de minimiser le besoin de maintenance, semble perdre de l'intérêt pour les applications nécessitant une très bonne estimation des intrants hydrologiques d'un versant par exemple.
Cette communication se fera dans le cadre d'un doctorat financé par le partenaire socio-économique Azur Géo Logic, et la région PACA

CHOCHON, Raphaël, MARTIN, Nicolas, LEBOURG, Thomas et VIDAL, Maurin, 2021. Analysis of extreme precipitation during the mediterranean event associated with the Alex storm in the Alpes-Maritimes: atmospheric mechanisms and resulting rainfall. In : *SimHydro 2021 : Models for complex and global water issues* [en ligne]. Valbonne, France. 16 juin 2021. [Consulté le 19 décembre 2021]. Disponible à l'adresse : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03374712

HUMPHREY, M.D., ISTOK, J.D., LEE, J.Y., HEVESI, J.A. et FLINT, A.L., 1997. A New Method for Automated Dynamic Calibration of Tipping-Bucket Rain Gauges. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. décembre 1997. Vol. 14, n° 6, pp. 1513-1519. DOI https://doi.org/10.1175/1520-0426%281997%29014%3C1513:ANMFAD%3E2.0.CO%3B2.

LANZA, L., M. LEROY, ALEXANDROPOULOS, C., STAGI, L. et WAUBEN, W., 2006. 84 : *The WMO Laboratory Intercomparison of Rainfall Intensity Gauges: final report*. Geneva : WMO. Instruments and Observing Methods.

LEROY, Michel, 2000. N°42 : *Estimation de l'incertitude de mesure des précipitations* [en ligne]. Rapport technique DSO. Trappes : Météo-France. Disponible à l'adresse : http://ccrom.meteo.fr/ccrom/IMG/pdf/note42-3.pdf

LEROY, Michel, 2002. La mesure au sol de la température et des précipitations. [en ligne]. 2002. [Consulté le 13 janvier 2018]. Disponible à l'adresse : http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/36247/?sequence=1

LIAO, Minhan, LIAO, Aimin, LIU, Jiufu, CAI, Zhao, LIU, Hongwei et MA, Tao, 2021. A novel method and system for the fast calibration of tipping bucket rain gauges. *Journal of Hydrology*. 1 juin 2021. Vol. 597, pp. 125782. DOI 10.1016/j.jhydrol.2020.125782.

SYPKA, Przemysław, 2019. Dynamic real-time volumetric correction for tipping-bucket rain gauges. *Agricultural and Forest Meteorology*. 15 juin 2019. Vol. 271, pp. 158-167. DOI 10.1016/j.agrformet.2019.02.044.

New indicators of precursory motion before landslides based on InSAR

In the last few decades, InSAR has been used to identify ground deformation related to slope instability and to retrieve time series of landslide displacements. In some cases, retrospective retrieval of time series revealed acceleration patterns precursory to failure. This suggests that, the higher temporal sampling of new generation satellites, may indeed offer the opportunity to detect motion precursory to failure with viable lead time.

However, the possibility to retrieve continuous time series over landslides is often impaired by factors such as unfavourable orientation or landcover and fast movements, which make phase unwrapping difficult if not, in certain cases, impossible.

One way to retrieve precursory signs of destabilisation for landslides that present characteristics unfavourable to unwrapping is to analyse in detail changes in successive interferograms in the phase domain, in combination with interferometric coherence.

We generated and analysed 124 Sentinel-1 12 days interferograms, covering the period between April 2015 and February 2022, over the Achoma landslide in the Colca valley, Peru. This large, deep-seated landslide, covering an area of about 40 hectares, previously unidentified, failed on 18th June 2020, damming the Rio Colca and giving origin to a lake.

We developed a method to analyse the changes through time of the unwrapped phase difference between a stable point and points within the landslide. In combination with this, we investigated patterns of coherence loss both within the landslide and in the surrounding area.

We observe seasonal coherence loss is seen both within the landslide and in the surrounding area, in correspondence with wet periods. However, we observed also significant, local coherence losses along the scarp and the southeastern flank of the landslide, intermittently in the years before failure, in periods in which coherence was in general higher. Moreover, we observe a sharp decrease in the ratio between the coherence within the landslide and in the surrounding area, roughly six months before the failure.

This type of approach is promising with respect to the extraction of relevant information from interferometric data when the generation of accurate and continuous time series of displacements is hindered by the nature of landcover or of the landslide studied. The combination of key, relevant parameters and their changes through time obtained with this methodology may prove necessary for the identification of precursory signals over a wider range of landslides than with time series generation alone.

Vers une nouvelle approche de la sensibilité des méthodes d'imagerie géophysique de proche surface pour la caractérisation des aléas

Maxime Gautier*[1], Gautier Stéphanie[1], and Cattin Rodolphe[2]

[1]Géosciences Montpellier – UMR5243 : Université de Montpellier – Place Eugène BATAILLON - 34095 Montpellier cedex 5, France

[2]Géosciences Montpellier – UMR5243 : Université de Montpellier – Place Eugène BATAILLON - 34095 Montpellier cedex 5, France

Résumé

L'imagerie géophysique est fréquemment utilisée pour la caractérisation de la subsurface. En effet, les méthodes électriques, sismiques et gravimétriques sont particulièrement adaptées à l'imagerie des zones déformées (failles actives, glissements de terrain) grâce à la complémentarité des profondeurs d'investigations et des paramètres physiques qu'elles explorent.
Ces méthodes, simples à mettre en œuvre, peu coûteuses et non invasives, sont particulièrement adaptées à la caractérisation des glissements de terrain. Elles apportent des images indirectes de la structure interne du glissement et de sa variabilité spatiale. Elles permettent par exemple de délimiter le plan de rupture, latéralement et en profondeur. Cette caractérisation se doit d'être précise et bien contrainte car elle est utile à la modélisation des processus de pentes et, de fait, à l'évaluation des aléas gravitaires. Cependant, ces images sont souvent difficiles à interpréter, notamment en raison de la " non unicité des solutions " aux problèmes inverses de la géophysique. Il est donc important de disposer de méthodes pour savoir quels sont le ou les meilleurs modèles à retenir et d'estimer la fiabilité des résultats d'une inversion. C'est dans ce cadre qu'intervient cette étude qui porte sur la sensibilité des méthodes géophysiques. En effet, la sensibilité permet de savoir quelles zones du modèle sont bien contraintes ou non, c'est-à-dire si la valeur proposée pour un paramètre (résistivité, vitesse, densité) est pertinente pour expliquer les données. Classiquement, la sensibilité est proposée de façon quantitative pour les différentes méthodes géophysiques. Nous proposons ici une nouvelle approche quantitative de la notion de sensibilité que nous avons appliqué aux méthodes électriques dans un premier temps.

En utilisant la librairie " PyGimLi " de Python, nous proposons d'inverser les données de résistivité électrique sur un maillage de notre choix puis, de calculer pour chacune des mailles quelle serait la valeur de la variation minimale de résistivité qu'il faudrait avoir pour que le dispositif de mesure puisse détecter cette variation. Ces calculs nécessitent autant de simulations qu'il y a de mailles sur notre grille d'inversion. Il est possible de mettre en œuvre cette méthode quelle que soit la configuration du quadripôle utilisé (Wenner, Wenner-Schlumberger, Dipôle-dipôle).

*Intervenant

Cette nouvelle approche quantitative de la sensibilité permet de connaitre l'incertitude sur les paramètres pour chaque maille du modèle, ce qui peut servir de " grille de lecture " des résultats de l'inversion à posteriori. Cette approche permet également de prendre en compte la position et la géométrie des mailles du modèle.
Nous proposerons, dans la suite des travaux, une approche similaire pour les autres méthodes géophysiques (sismique et gravimétrique) afin de mener à bien une inversion conjointe de différents jeux de données.

Mots-Clés: Géophysique, Proche, Surface, Inversion, Aléa

Détection automatisée des instabilités gravitaires en combinant sismologie, données satellitaires et apprentissage machine - exemple des Alpes européennes.

Charlotte Groult*†[1], Clément Hibert[1], and Jean-Philippe Malet[1]

[1]Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre – université de Strasbourg, Centre National de la Recherche Scientifique : UAR830 / UMS830 – 5 Rue René Descartes 67084 STRASBOURG CEDEX, France

Résumé

Les glissements de terrain de grande ampleur qui se sont produits récemment dans de nombreuses régions du monde (Nuugaatsiaq, Groenland ; Taan-Tyndall, États-Unis ; Culluchaca, Pérou) ainsi que l'augmentation de la fréquence des instabilités gravitaires dans les Alpes européennes (par exemple, l'effondrement des Drus, massif du Mont-Blanc, France) ont révélé la menace de tels événements pour l'activité humaine. La sismologie fournit des enregistrements continus de l'activité des glissements de terrain sur de longues distances. Les séries temporelles à haute fréquence de l'imagerie satellitaire (Mission Copernicus Sentinel) fournissent des informations complémentaires pertinentes pour localiser, identifier le type d'instabilité gravitaire et recueillir des informations sur le volume de l'événement. L'objectif de ce travail est de présenter une nouvelle méthode pour construire automatiquement des catalogues instrumentaux de glissements de terrain en combinant les observations sismologiques et satellitaires en utilisant des approches d'apprentissage automatique. Ce nouveau type de catalogue de glissements de terrain fournira une résolution spatio-temporelle sans précédent sur une longue période de temps permettant d'explorer les corrélations possibles entre l'activité des glissements de terrain et les facteurs de forçage (météorologiques, climatiques, tectoniques).
La méthode de détection appliquée aux observations sismologiques consiste à calculer l'énergie du signal entre 2 et 10 Hz sur laquelle une méthode STA/LTA est appliquée. Les détections sont affinées en appliquant une méthode de pointer à l'aide du kurtosis. Les détections trop proches ($<$ 2 min) sont combinées. Pour le traitement des données sismiques continues, les détections sont considérées comme un événement si au moins 3 stations les ont enregistrées en même temps. Ensuite, un classificateur supervisé Random Forest est utilisé pour identifier la source de l'événement (séismes ou glissements de terrain). La base de données des glissements de terrain, utilisée pour entraîner le classificateur Random Forest, est constituée de 68 événements survenus au cours des 20 dernières années dans l'ensemble des Alpes européennes. Une base de données de 7914 tremblements de terre (de MLv $>$ 0.1) qui se sont produits en 2020 a également été compilée afin d'entraîner le classificateur à distinguer les glissements de terrain des tremblements de terre. Ainsi, un jeu de données de 2502 traces

*Intervenant
†Auteur correspondant: charlotte.groult@unistra.fr

sismologiques de glissements de terrain et de 39540 traces de séismes est utilisé pour entraîner et tester les méthodes de détection et d'identification sismologiques. Les premiers tests de notre chaîne de traitement nous ont donné un taux de bonne identification de l'ordre de 80% pour les glissements de terrain et de 99% pour les séismes.
Le modèle est ensuite appliqué aux archives d'observations sismologiques (par exemple 1800 stations en 2021) acquises sur les Alpes européennes depuis 2000. Pour éviter d'avoir trop de détections de bruit, nous avons choisi de garder un événement dans le nouveau catalogue de glissement de terrain seulement s'il est détecté et classifié comme un glissement de terrain par au moins trois stations dans une fenêtre de temps de 4 minutes. Le catalogue instrumental dérivé sera présenté, et la sensibilité de la méthode sera discutée.

Mots-Clés: Sismologie, machine learning

Influence du forçage thermique sur les écailles rocheuses : observations de fréquences de résonance et modélisation thermo-acousto-élastique

Antoine Guillemot*[1], Pierre Bottelin[†] , Laurent Baillet[‡] , and Eric Larose[§]

[1]ISTerre - CNRS – ISTerre lab., University Savoie Mont-Blanc - CNRS, Le Bourget-Du-Lac, France – 38000 Grenoble, France

Résumé

Parmi les instabilités gravitaires, les écailles rocheuses déstabilisées sont connues pour présenter des modes de vibration bien déterminés. Les fréquences de résonance correspondantes à ces modes peuvent être suivies par une instrumentation sismologique pour surveiller les propriétés mécaniques et structurelles de l'écaille, ainsi que pour prévenir toute rupture irréversible. Dans de précédentes études, les effets thermoélastiques superficiels sont supposés être à l'origine des fluctuations quotidiennes des fréquences de résonance, mais ces effets n'ont pas été mis en évidence qualitativement ni quantitativement(1). Notre travail reprend cette hypothèse, et quantifie les processus physiques impliqués. Nous interprétons les variations quotidiennes des fréquences de résonance sur le site d'étude des Arches (Vercors, Préalpes françaises) (2) à travers un modèle thermo-acousto-élastique basé sur la méthode des éléments finis(3). Les variations relatives des fréquences de résonance modélisées (*df/f*) au cours de la journée correspondent étroitement à celles observées, reproduisant ainsi l'augmentation de ces fréquences en milieu de journée d'environ 2%. La corrélation positive entre les flux thermiques et le *df/f*, observée aux échelles journalière et annuelle sur de nombreux sites surveillés, est ainsi fidèlement modélisée. De plus, notre modèle permet d'expliquer les différents comportements observés sur les sites étudiés : la réponse du *df/f* dépend principalement de l'ensoleillement reçu par la surface de l'écaille, et son déphasage est relié à la phase des flux de chaleur radiatifs et convectifs.
L'influence du forçage radiatif solaire sur la déformation des joints de blocs rocheux a récemment été mise en évidence par une modélisation basée sur des mesures expérimentales(4). L'évolution du champ de contrainte à proximité de la surface de la roche est donc un paramètre-clé pour comprendre les processus mécaniques d'endommagement. Pour une instrumentation future, nous recommandons ainsi le déploiement de pyranomètres et de sismomètres sur les sites rocheux étudiés, afin d'inverser avec précision les paramètres acousto-élastiques au cours du temps. Un tel dispositif permettrait de surveiller l'état d'endommagement et la fracturation des roches, grâce au suivi de ces paramètres acousto-élastiques.

(1) Colombero, C., Jongmans, D., Fiolleau, S., Valentin, J., Baillet, L. & Bièvre, G. (2021) Seismic Noise Parameters as Indicators of Reversible Modifications in Slope Stability: A

*Intervenant
[†]Auteur correspondant: p.bottelin@adrgt.org
[‡]Auteur correspondant: laurent.baillet@univ-grenoble-alpes.fr
[§]Auteur correspondant: eric.larose@univ-grenoble-alpes.fr

Review. *Surv Geophys*. doi:10.1007/s10712-021-09632-w

(2) Bottelin, P., Lévy, C., Baillet, L., Jongmans, D. & Guéguen, P. (2013) Modal and thermal analysis of Les Arches unstable rock column (Vercors massif, French Alps). *Geophys J Int*, **194**, 849–858. doi:10.1093/gji/ggt046

(3) Guillemot A., Bottelin P., Baillet L., Larose E., (2022) Changes in resonance frequency of rock columns due to thermoelastic effects on a daily scale: observations, modelling and insights to improve monitoring systems, *Geophysical Journal International*, under review

(4) Marmoni, G. M., Fiorucci, M., Grechi, G., & Martino, S. (2020). Modelling of thermo-mechanical effects in a rock quarry wall induced by near-surface temperature fluctuations. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, *134*, 104440

Mots-Clés: Ecailles rocheuses, thermique, acoustique, sismologie, résonance, analyse modale

Conceptualisation des processus d'instabilités gravitaires impliqués dans l'érosion de la côte rocheuse basque française

Lucie Guillen[1-2*], Yannick Thiery[1], Thomas Dewez[1], Clara Levy[1], Pierre Bourbon[3], Séverine Caritg[1], Lisa Martins[3], Philippe Razin[4], Christophe Garnier[3], Alessia Cucurrullo[2], Domenico Gallipoli[2-5]

[1] Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) – Orléans, France
[2] Laboratoire des Sciences pour l'Ingénieur Appliquées à la Mécanique et au génie Électrique (SIAME), Université de Pau et des Pays de l'Adour – Pau, France
[3] Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) – Pessac, France
[4] École Nationale Supérieure en Environnement, Géoressources et Ingénierie du Développement Durable (ENSEGID) – Bordeaux, France
[5] Università degli Studi di Genova – Genoa, Italy

En France métropolitaine, quarante-quatre pourcent du linéaire côtier est représenté par des côtes rocheuses et à falaises ("Réseau national des observatoires du trait de côte," 2020). Ces falaises s'érodent selon des vitesses, des répartitions géographiques et des processus gravitaires variables (de 0.001 à 3.374 $m.an^{-1}$ (Prémaillon, 2018)).

Cette hétérogénéité est notamment observée dans les Pyrénées Atlantiques (64), dont la côte rocheuse de 40 km de long est remarquable pour sa diversité géologique et géomorphologique. Les falaises basques s'érodent par divers types d'instabilités gravitaires : des chutes de blocs, des glissements rocheux banc sur banc, des glissements de matériaux fins et grossiers, des glissement-coulées et des glissements composites. Si des évaluations qualitatives de ces processus et un suivi temporel ont été engagés depuis la mise en place de l'Observatoire de la Côte Nouvelle-Aquitaine (OCNA) en 1996, il demeure une méconnaissance sur les facteurs qui les régissent. Ainsi, afin de mieux anticiper le déclenchement des phénomènes instables et d'adapter une stratégie de gestion de ce trait de côte urbanisé à 70%, il est nécessaire d'observer et mesurer ces glissements de terrain pour les modéliser.

L'une des particularités de cette côte est d'être constituée de dépôts sédimentaires hétérogènes, dont une partie s'est accumulée dans le bassin profond nord-pyrénéen entre le Crétacé supérieur et le Tertiaire, rassemblée sous le terme de « flysch ». Dans le monde, diverses études ont localement caractérisé l'influence des structures et de l'altération des flyschs affleurants en contexte littoral, sur leur résistance mécanique et sur leurs taux d'érosion. Toutefois, ces études n'intègrent pas la variabilité intrinsèque des faciès sédimentologiques des flyschs (Mutti and Lucchi, 1972) sur les taux d'érosion et le type d'instabilité gravitaire.

Le caractère novateur de cette étude réside dans la perspective de synthétiser ces variabilités de faciès et de déformation structurale dans le but de déterminer leur influence sur les types d'instabilités et sur leurs taux d'érosion associés, à l'échelle du bassin sédimentaire. La côte basque apparait comme un site exceptionnel pour atteindre ces objectifs. Dans cette perspective et compte tenu du linéaire étendu de ces falaises, deux sites regroupant une large

variété de flyschs érodés par différents types d'instabilités ont été sélectionnés : Bidart et Socoa (Ciboure).

(i) Le site de Bidart présente des falaises formées par des alternances marno-calcaires hémipélagiques d'âge Crétacé supérieur, surmontées en discordance par une couverture alluviale Mio-Plio-Quaternaire. Cette côte atteignant jusqu'à plus de 70 m de hauteur est déstabilisée par des glissement-coulées, des glissements de matériaux fins, grossiers et rocheux, ainsi que par des instabilités composites.

(ii) Le site de Socoa est constitué d'un empilement régulier de calciturbidites (Razin, 1989), dont la stratification est conforme à la pente de la falaise. Cette falaise, de 30 m de hauteur environ, s'érode par des chutes de blocs, des glissements rocheux et de rares glissements de terrain dans les altérites.

Cette contribution se focalise sur : (i) l'identification et la localisation des différents types d'instabilités et la quantification de leur récurrence entre 1938 et 2021, (ii) des schémas conceptuels de déstabilisation.

Les méthodes mises en œuvre pour identifier et cartographier les instabilités sont fondées sur des observations géomorphologiques, géologiques et sur des analyses de photographies aériennes. La quantification de l'érosion et l'évaluation de la récurrence des instabilités sont réalisées par analyse de photographies et orthophotographies aériennes. La résistance des matériaux est évaluée par des mesures in situ au moyen du critère de résistance de Hoek and Brown (1997).

Ces résultats synthétisés sous forme de schémas conceptuels, permettront d'engager une réflexion sur le rôle des facteurs contributifs (de prédisposition et de déclenchement) et notamment sur la géologie, incluant la lithologie, son altération et les structures. A terme, nous envisageons de projeter cette conceptualisation à d'autres sites côtiers de ce bassin sédimentaire nord-pyrénéen, selon les types d'instabilités et les types de flyschs observés.

Mots-clés : instabilité gravitaire, mouvement de terrain, typologie, érosion, littoral, falaise, flysch, côte basque, projet Ezponda

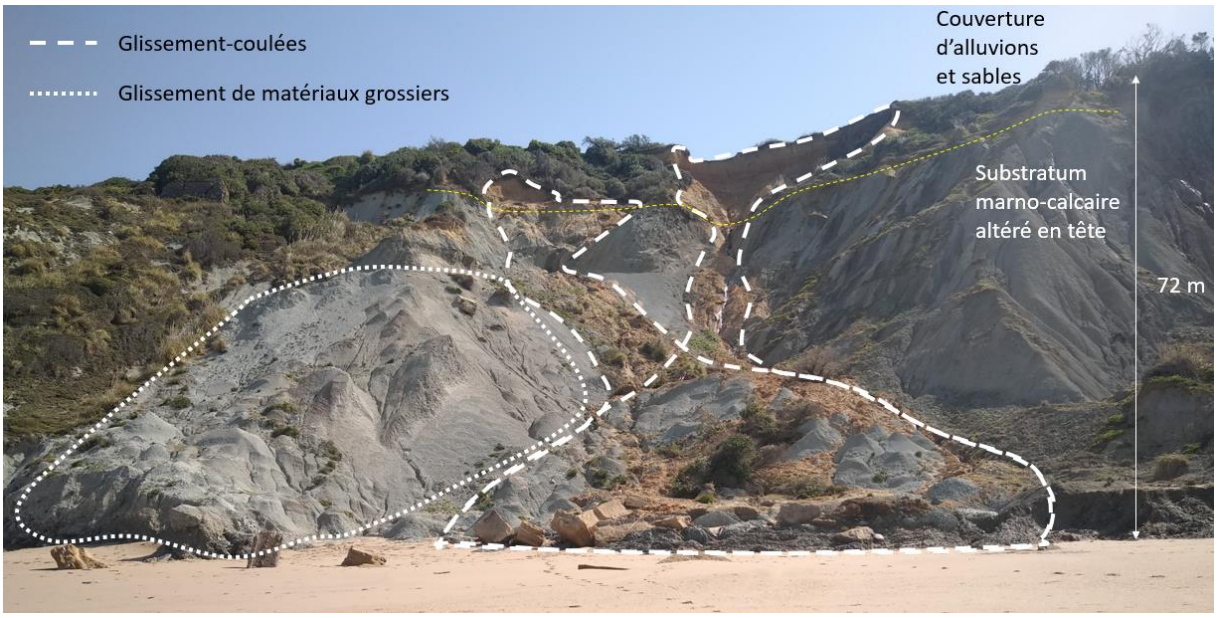


Figure : Glissement-coulées et glissements de matériaux grossiers à la Corniche de Bidart – avril 2021

Bibliographie

Hoek, E., Brown, E.T., 1997. Practical Estimates of Rock Mass Strength. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 34, 1165–1186. https://doi.org/S1365-1609(97)80069-X

Mutti, E., Lucchi, F., 1972. Turbidites of the northern Apennines: introduction to facies analysis. International Geology Review 20, 125–166. https://doi.org/10.1080/00206817809471524

Prémaillon, M., 2018. Hierarchisation des facteurs d'erosion des falaises côtieres du site au globe. Université Toulouse III Paul Sabatier.

Razin, P., 1989. Evolution tecto-sédimentaire alpine des Pyrénées basques à l'Ouest de la transformante de Pamplona. Université de Bordeaux III.

Réseau national des observatoires du trait de côte [WWW Document], 2020. . Réseau national des observatoires du trait de côte. URL http://observatoires-littoral.developpement-durable.gouv.fr/chiffres-cles-r9.html (accessed 3.22.22).

Perspectives dérivées de l'analyse géologique, géométrique et statistique de l'inventaire des mouvements gravitaires au Tessin (Suisse) au cours 20 dernières années

Amalia Gutierrez*[1], Marc-Henri Derron[1], Michel Jaboyedoff[1], and Andrea Pedrazzini[2]

[1]Institut des sciences de la terre [Lausanne] – Faculté des géosciences et de lénvironnement, Université de Lausanne, Géopolis - CH-1015 Lausanne, Suisse

[2]Département géologique [Tessin] – Service cantonal du Tessin, CH- 6501 Bellinzona, Suisse

Résumé

Introduction

Le canton du Tessin, situé au sud de la Suisse, se caractérise par un relief Alpin et un climat tempéré et humide, où se produisent régulièrement des mouvements gravitaires de tailles variées, tels que des chutes de blocs, coulées de débris, glissements de terrain ou des avalanches. L'inventaire StorMe, réalisé par la section forestière de la République et Canton du Tessin et répondant à une directive de la confédération, recense tous les évènements gravitaires importants survenus depuis les années '80 sur son territoire, ainsi que certains évènements dits historiques pour lesquels les données sont parfois incomplètes.

A partir de la richesse des informations de cet inventaire, et afin d'améliorer la gestion des risques naturels dans le Canton (qui représente une facture annuelle non négligeable), une analyse géologique, géométrique et statistique des mouvements gravitaires survenus et répertoriés au Tessin au cours des 20 dernières années a été réalisée. Cette analyse permettra également de mieux estimer les conditions particulières qui régissent les instabilités dans le Tessin.

Matériels et méthodes

L'inventaire continent la localisation des évènements (sous forme de points et polygones) avec certaines informations de base (date, coordonnées, etc.) et est accompagnée d'une base de données externe, avec des informations plus précises (classe de mouvement, nombre de blocs, etc.) selon le type de mouvement.

Une fois les données d'entrée rassemblées, triées et organisées, les paramètres de contrôle relatifs aux mouvements ont été sélectionnés, de manière générale dans un premier temps, puis raffinées par la suite ; les catégories principales sont la géométrie, la topographie, l'hydrographie, l'utilisation des sols et la géologie. A partir des couches de données (format raster ou vecteur), les paramètres géométriques considérés ont été calculés, à savoir :

*Intervenant

coordonnées, élévation, point d'élévation maximale et minimale, superficie, périmètre, et la ligne d'énergie, puis des paramètres de contrôle supplémentaires sont calculés, suivant la catégorie de la couche :

Topographie, morphométrie : pente, aspect, courbure générale, courbure de profil, courbure tangentielle, indice de rugosité du terrain (TRI) et mesure de la rugosité du vecteur (VRM),

Hydrologie et hydrogéologie : indice de puissance du cours d'eau (SPI), indice d'humidité topographique (TWI), distance au cours d'eau, type d'aquifère, conditions hydrogéologiques et productivité de l'aquifère,

Utilisation et couverture des sols : utilisation des sols, couverture des sols, distance à la route la plus proche, et distance au bâtiment le plus proche,

Géologie : épaisseur des dépôts non consolidées, genèse de la roche, type de roche, unité tectonique, nappe ou zone tectonique, âge (période), distance à la faille la plus proche et distance à la discontinuité tectonique majeure la plus proche.

Dans le but de connaitre la distribution spatiale et temporelle des évènements, une première analyse statistique simple univariée et bivariée a été effectuée. ArcGis a été utilisé pour extraire les points d'élévations maximales et minimales, ainsi que pour examiner la distribution spatiale des évènements. Matlab nous a permis de visualiser la distribution univariée de chacun des paramètres initiaux, y compris le temps, et de choisir ceux qui présentaient un réel intérêt. Puis, une fois les paramètres de contrôle sélectionnés, nous avons utilisé un script Python pour une analyse plus approfondie de tous les paramètres (incluant ceux spécifiques à chaque type de mouvement) impliquant des graphiques en paires (avec seaborn) et la détermination des coefficients de corrélation de Spearman et Pearson (avec les outils Pandas profiling tool et la librairie scipy.stats). Des diagrammes ont été élaborés et extraits simultanément. Pour certaines variables d'intérêt (p. ex. volume, distance de chute du glissement, ligne d'énergie, ...) des analyses plus détaillées impliquant des régressions linéaires et des lois de puissance ont ensuite été effectuées, à l'aide de scipiy.optimize, qui ont été postérieurement comparées aux résultats d'autres auteurs (Corominas, 1996 ; Dussauge et al., 2003; Guzzetti et al., 2009; Jaboyedoff et al., 2020, Meier et al., 2020).

Résultats et conclusions

À partir de l'analyse statistique initiale, nous avons déterminé les principaux paramètres qui semblent contrôler de manière plus prononcée les mouvements gravitaires dans le canton du Tessin, à savoir : la pente, l'aspect, l'indice de rugosité du terrain, l'indice d'humidité topographique, et la lithologie. Les aspects géométriques qui présentent une forte corrélation, seuls ou entre eux, selon les différents types de mouvement, sont : la surface, la longueur, la différence de hauteur entre la zone source et le pied du dépôt, le volume, et la ligne d'énergie.

Les communes les plus touchées sont celles de Blenio, où les coulées de débris et les avalanches prédominent, Mendrisio (coulées de débris), Locarno (éboulements), et Bellinzona (chutes de pierres). Les aspects géométriques montrent que les chutes de pierres et les glissements de terrain ont tendance à avoir des surfaces totales (zone source et zone de dépôt) plus petites que les avalanches et les coulées de débris. D'autre part, la longueur des dépôts, les différences de hauteur, et les volumes, montrent des comportements similaires pour tous types de mouvement.

La ligne d'énergie calculée montre des valeurs moyennes, médianes, et modales similaires d'environ $26^{o}/30^{o}$, 33^{o}, $34^{o}/35^{o}$ et 41^{o}, respectivement pour les coulées de débris, les avalanches, les glissements de terrain et les chutes de pierres. Des corrélations significatives de type loi de puissance ont été trouvées entre la longueur du dépôt et la différence de hauteur (cf. Corominas, 1996) ; le volume de dépôt et l'aire de mouvement (cf. Guzzeti et al., 2009) ; et la distribution des volumes de chutes de pierres et leur fréquence (cf. Dussauge et al., 2003).

Bibliographie

Corominas, J. (1996). The angle of reach as a mobility index for small and large landslides. Canadian Geotechnical Journal, 33(2), 260-271.

Dussauge, C., Grasso, J. R., & Helmstetter, A. (2003). Statistical analysis of rockfall volume distributions: Implications for rockfall dynamics. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 108(B6).

Guzzetti, F., Ardizzone, F., Cardinali, M., Rossi, M., & Valigi, D. (2009). Landslide volumes and landslide mobilization rates in Umbria, central Italy. Earth and Planetary Science Letters, 279(3-4), 222-229.

Jaboyedoff, M.; Carrea, D.; Derron, M. H.; Oppikofer T.; Penna, I. M.; and Rudaz B. (2020). A review of methods used to estimate initial landslide failure surface depths and volumes. Engineering Geology, 267, 105478.

Meier, C., Jaboyedoff, M., Derron, M. H., & Gerber, C. (2020). A method to assess the probability of thickness and volume estimates of small and shallow initial landslide ruptures based on surface area. Landslides, 1-8.

Mots-Clés: Glissements, inventaire, statistique

10 ans d'instrumentation permanente sur le glissement de terrain de Maca, Pérou

Pascal Lacroix*[1]

[1]ISTerre – Institut de recherche pour le développement [IRD] : UR219, CNRS : UMR5275 – 1381 Rue de la Piscine 38610 Gières, France

Résumé

10 ans d'instrumentation permanente sur le glissement de terrain de Maca, Pérou
P. Lacroix1, N. Bontemps1, E. Taipe2, S. Zerathe1, G. Araujo2, H. Perfettini1, E. Larose1, M. Wathelet1, B. Guillier1

1 ISTerre, Université Grenoble Alpes, IRD, CNRS, Grenoble, France

2 NGEMMET, Arequipa, Peru

Le glissement de terrain de Maca, situé au Sud Pérou, dans les Andes à 3500m d'altitude, est un site instrumenté depuis 10 ans conjointement par l'IRD et l'INGEMMET, dans le cadre d'une collaboration franco-péruvienne.

Ce glissement de terrain lent (_˜1 m/an) de type lateral spreading se développe dans des dépots lacustres sur une épaisseur de plus de 70m, surmonté d'un dépot d'avalanche de près de 10m par endroit, pour un volume total d'environ 60Mm3. Le glissement de terrain affecte un village de 1000 habitants et son agriculture vivrière, une route très passante des Andes, et des terrasses pré-inca. Il constitue le point noir du développement économique dans cette région très touristique des Andes.

Ce glissement de terrain est situé dans un environnement climatique et tectonique singulier, soumis à la fois à une alternance de saisons de pluies intenses (Décembre-Avril) et saisons très sèches (Mai-Novembre) avec une variabilité inter-annuelle marquée, et à une forte sismicité régionale en raison de sa proximité à des failles normales (séismes de Mw6 à moins de 20 km) et sa situation au pied du volcan actif Sabancaya. Toutes ces caractéristiques procurent à ce site un intérêt majeur pour l'étude des forçages sur la dynamique des mouvements de terrain. C'est dans cet objectif que ce site a été instrumenté depuis 2012 par l'installation de GPS continus et sismomètres large bande, enregistrant notamment la réponse du glissement de terrain à 5 séismes importants (Mw> 5 à moins de 20km). Ces données fournissent les premières mesures in situ de foçages sismiques sur un mouvement de terrain lent.

Cet exposé vise à retracer les principales avancées dans la compréhension de la dynamique gravitaire réalisées grâce à cette instrumentation (Lacroix et al., 2014, 2015; Zerathe et al., 2016; Bontemps et al., 2018; Bontemps et al., 2020).

*Intervenant

Références

Bontemps, N., P. Lacroix, Doin, M. P. (2018). Inversion of deformation fields time-series from optical images, and application to the long term kinematics of slow-moving landslides in Peru. *Remote Sensing of Environment,* 210, 144-158.

Bontemps N., P., Lacroix, E. Larose, E. Taipe & J. Jara. Rain and small earthquakes maintain a slow-moving landslide in a persistent critical state. *Nature Communications.* 11, 780 (2020)

Lacroix P., H. Perfettini, E. Taipe, B. Guillier (2014), Co- and postseismic motion of a landslide; observations, modeling and analogy with tectonic faults, *Geoph Res. Lett.,* doi: 10.1002/2014GL061170.

Lacroix P., E. Berthier, E. Taipe (2015), Earthquake driven acceleration of slow-moving landslides in the Colca valley, Peru, detected from Pléiades images, *Rem. Sens. Env,* 165 (148-158).

Zerathe, S., Lacroix, P., Jongmans, D., Marino, J., Taipe, E., Wathelet, M., et al. (2016), Morphology, structure and kinematics of a rainfall controlled slow-moving Andean landslide, Peru. *Earth Surface Processes and Landforms.*

Mots-Clés: glissement lent, suivi sismologique et cinématique, forçage sismique

Seismic monitoring of the Åknes rockslope, Western Norway

Nadège Langet*†[1] and Volker Oye[1]

[1]Norwegian Seismic Array – POB 53, NO-2027 Kjeller, Norvège

Résumé

The Åknes unstable rock slope, located in the fjord region in the Western part of Norway, is the most extensively and thoroughly instrumented rock slope in Norway. Extensometers, lasers, GPS and inclinometers, placed both at the surface and in boreholes, are permanently monitoring the slope displacement. In addition, seismic sensors are installed in different parts of the slope and complement the monitoring system.
A first small-scale surface geophone network located around the backscarp has recorded triggered seismic data since 2006 and detected close to 60,000 events. Among those, approximately 80% are related to seismic events occurring on the slope, the rest corresponding to either noise or local earthquakes. Seismic events related to an activity on the slope are categorized into five classes and follow the typology proposed in the published work by Provost et al. (2018): (1) high-frequency slopequakes; (2) low-frequency slopequakes; (3) successive slopequakes; (4) tremor-like slopequakes and (5) rockfalls. Given the large amount of data, the classification was automated by taking advantage of spectrogram images which are then fed into a Convolutional Neural Network. The statistical analysis of the automatic classification enables to highlight some interesting features. For example, although it is already known that the slope movement accelerates in spring when the snow melts, our results also show that mainly two types of seismic events (low-frequency and tremor-like slopequakes) are associated to this increased activity. This provides some insights on the processes generating these seismic signals.
Later on, a broadband seismometer and a borehole string of eight geophones were installed on the slope and continuously record the seismic activity. Although these data are not yet systematically used as part of the monitoring system, they contain a lot of information. We will show some examples of such data, discuss what they can tell us as well as how we envision to analyse and integrate them in the future.

Mots-Clés: Seismic monitoring, Rockslope, Norway

*Intervenant
†Auteur correspondant: nadege@norsar.no

SOILSTAB: A seismic noise-based solution for near real-time monitoring of soil rigidity in the context of slow moving landslides (and beyond).

Eric LAROSE [(1)], Alexandra ROYER[(2)], Antoine GUILLEMOT[(1,2)], Mathieu LE BRETON[(2)], Laurent BAILLET[(1)], Etienne REY[(1,2)].

(1) ISTerre, Univ. Grenoble Alpes, CNRS, 38000 Grenoble, France
(2) Géolithe & Géolithe Innov, 38920 Crolles, France

Abstract:

Monitoring landslides is essential to understand their dynamics and to reduce the risk of human losses by detecting precursors before failures. In general, surface observations need to be complemented by observation at depth, in the bulk of the material. A decade ago, the ambient seismic noise interferometry method was proposed to monitor changes in the seismic surface wave velocity. As seismic wave velocities are directly related to the rigidity of the material, significant reduction of seismic velocity can be associated to a loss of rigidity (a route toward soil liquefaction or to high fracturation). This technique could detect a velocity decrease several days before the failure of a clayey landslide [1], paving the way to a novel precursor signal that could serve for alert or early warning systems. Here we report on different landslides that have been monitored, over several years [2], and detail the standard experimental configuration, the basic signal processing procedure. Environmental effects on the relative seismic velocity change are also addressed. In order to make the technology operational for decision makers, we built an online application using a web portal. This application displays daily evolution of seismic velocity variations, including various parameters and depth interpretation. This portal also integrates other available observations like environmental parameters (weather, precipitations) or surface observations (photogrammetry, GPS, extensometers…).

Introduction

Monitoring landslides is essential to understand their dynamics and to reduce the risk of human losses by raising warnings before a failure. A decade ago, a decrease of apparent seismic velocity was detected several days before the failure of a clayey landslide (Fig. 1), that was monitored with the ambient noise correlation method [1]. This episode revealed the seismic noise potential to detect precursor signals before a landslide failure, which could improve early warning systems. The use of ambient noise correlation monitoring is increasing in landslide research, and progressively turns to operational applications: to date, at least nine slopes have been monitored [1-11]. In this paper, we will recall the experimental protocol and data processing, and will review some site studies. We will develop on the technique performance and interests, and will discuss the possible limitations.

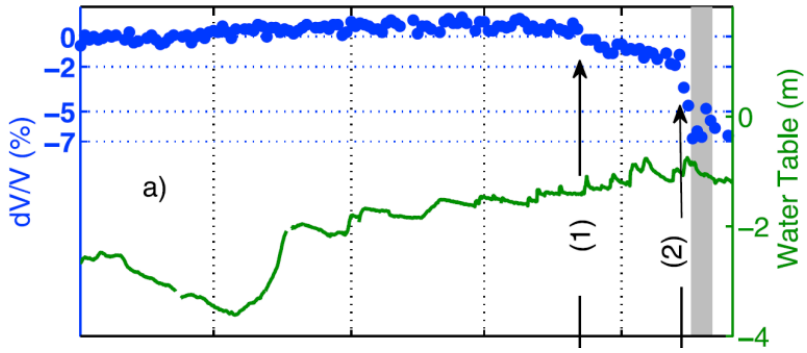


Fig. 1 : On the Pont-Bourquin landslide, the apparent surface wave velocity (blue, one point per day) was monitored before the major failure of 19 August 2010 (gray). Vertical line 1: the first velocity reduction starts after rainfall on 23 July and represents a 2% drop developing over 20 days. Vertical line 2: the major drop starts after rainfall on 14 August, with a total decrease of 7% over the 5 days preceding the landslide. The water table height (green) was not sufficient to predict a failure. Figure from Mainsant et al. (2012). Vertical dotted lines : month.

Field experiment, methodology and data collection

Seismic sensors are deployed in the field, on the active part to monitor, or very close to its borders in stable ground. Sensors are connected to GPS-synchronized digitizers with adapted powering (solar panels or wind turbine, and batteries on remote sites) and to data transmission in near real time. In general, seismic data are arranged in one-hour long files and transmitted once every hour or, at least, once a day. Of particular interest is the stability of the sensors: tilt should be absolutely avoided, and sensor relative displacement should remain negligible compared to observed seismic relative velocity changes.

Data processing

A general processing workflow is presented in Fig. 2, based on those proposed by [12, 4, 13]. Data at day *D* are collected and processed at day D+1; pre-processing steps are performed to reduce the effect of transient artifacts (amplitude normalization) and to compensate for frequency spectrum changes (spectral normalization). Data gaps management is also a crucial step performed based on the MSNOISE Python package [14]. We finally obtain the daily correlogram C_D, that we can compare to either a fixed reference C_{ref} (C_D averaged over all available dates *D*, or a fixed historical period of the experiment), or a dynamic reference based on moving averaging. We compare daily correlograms C_D to the reference one C_{ref} by stretching the time axis of the first and compare (by retrieving the cross-correlation coefficient called *CC*) to the second such that the actual relative velocity change (*dV/V*) is obtained when the best fit (the higher *CC*) is obtained.

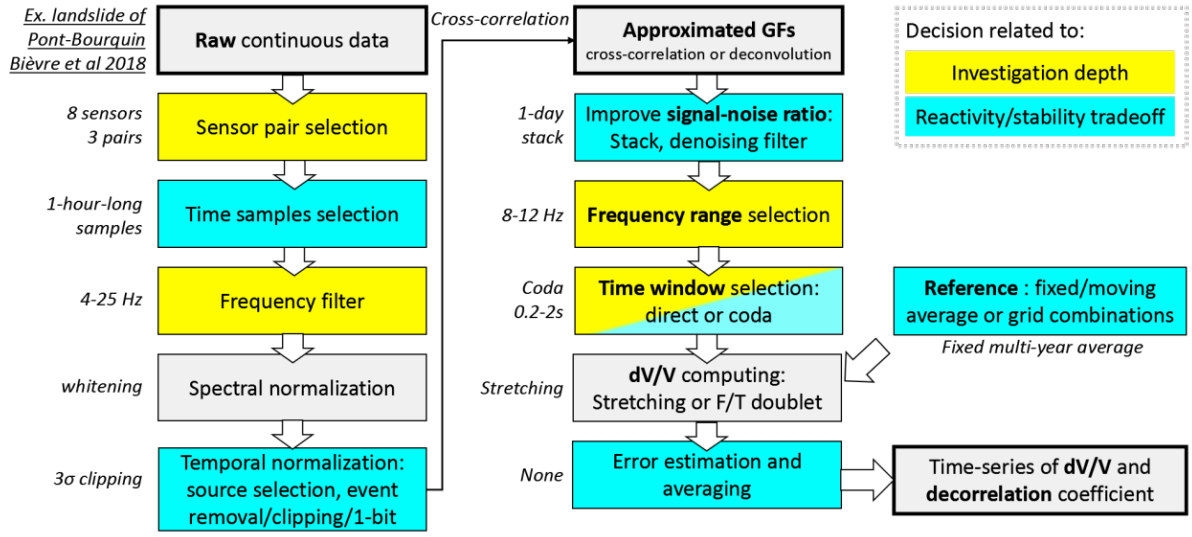


Figure 2 : General workflow to process ambient seismic noise correlation and extract daily relative velocity changes dv/v *and correlation coefficients* CC. *Fig. from Le Breton et al. (2021).*

Interpretation and discussion

The apparent relative velocity change between the current correlogram C_D and the reference C_{ref} indicates either a change of rigidity, or a change in density in the soil. In rocks and soils, the possible range of density changes is much smaller than the range of possible rigidity changes. Here is a review of the existing observations, to date.

On the Avignonet landslide, a possible precursor velocity drop was suggested in 2009, but collected data offered sparse temporal coverage [3]. On the Pont-Bourquin landslide, a velocity drop of -7% was observed 5-7 days before the landslide major failure [1]. Since then, the landslide is back to a meta-stable state (average velocity of the order of 1-2 m/year), and no significant velocity drop was observed. Velocity fluctuations of +/-2% are observed, with a yearly cycle superimposed with more rapid changes events (ice, rain, snow). On the Maca landslide (Peru), several co-seismic drops have been observed, for which the cumulative effect of the rain was proved to play a key role in the landslide activation, and healing [10]. We also observed that the cumulative effect of a rainy season

with a series of moderate magnitude local earthquake could trigger the landslide activation, contradicting the idea that only M>5 earthquake could trigger landslides. On the Montevecchio landslide, Italy, seismometers have been placed after the landslide activation, and could track the recovery (stiffening) of the soil [6]. On the Harmalière landslide, a possible rigidity drop was observed on a rotational sliding compartment [11]. On other sites, no acceleration phase was observed and dV/V fluctuations were observed to be limited to, in general, +/-2%.

As a matter of fact, velocity changes associated to environmental changes (including mainly the water content, but also snow/ice cover, freezing, solar illumination) remain in a limited range of % that decreases with frequency [2]. In most practical applications, above a few Hertz, the *dV/V* associated to environmental change is of the order of a few percent's (+/- 2%). Beyond these environmental (daily to yearly) variations, a velocity drop can hardly be associated to a change of density (water content) and should be interpreted as a drop of rigidity, possibly evolving to a drop of viscosity yielding to the landslide acceleration.

The depth sensitivity of the change can be estimated, and even inverted into a 1D vertical profile, by evaluating dV/V at various frequency bands and performing surface wave inversion. This can be performed provided an initial 1D velocity profile is available. As surface waves are mostly influenced by shear waves, 1D shear wave velocity is in general expected prior to monitoring the landslide, which is a relatively conventional step for imaging and characterization purposes and hazard assessment.

The ability to detect a precursory velocity change requires to adapt the processing work-flow to each landslide: the key factors are the filtering frequency, the correlation time window, and the choice of temporal resolution, that are all site geometry dependent. Basically: the deeper the landslide the lower the frequency; the larger the landslide, the longer the time-window; the shorter time resolution, the lower dV/V sensitivity. Sensitivity kernels can be estimated to fix precisely these parameters, although visual inspection of correlograms also allows to estimate them.

Industrial application and available solution

Following the data processing presented in this paper, we developed the SOILSTAB numerical code associated to the EVORISK web portal. This work was achieved within the joint laboratory *Geophysics, Geomechanics, Geotechnics Innovation Lab.*, a research structure joining the *Institut des Sciences de la Terre* (ISTerre) academic laboratory and the private company Geolithe. This joint laboratory aims at developing new techniques and instrumentation prototypes to monitor natural or artificial instabilities such as landslides, rockfalls, mines or civil engineered structures, but also hazards induced but global warming such as rocky glacier destabilization and other permafrost issues. As an example, we display on Fig. 3 a snapshot of the EVORISK web portal.

In practice, we perform monitoring operations either on a private basis (customers contracting with Geolithe) or on a research basis if fundamental questions are addressed (partners agreement with the Labcom).

Acknowledements

This work was partially funded by the ANR LABCOM GEO3iLAB (ANR 17-LCV2-0007-01), the LABEX OSUG Habitability, the Canton du Valais, and the FEDER/POIA SIMOTER-1 project. Most seismic data are available at the RESIF data center (7H or 1N networks). We thank M. Jaboyedoff, F. Guyoton, R. Mayoraz for enlightening discussions and support. P. Dumont and N. Stelzenmuller helped improving the code. We acknowledge experimental help from SIG-ISTerre.

References

[1] G. Mainsant, E. Larose, C. Brönnimann, D. Jongmans, C. Michoud, M. Jaboyedoff (2012): *Ambient seismic noise monitoring of a clay landslide : toward failure prediction*, J. Geophys. Res. **117**, F01030.

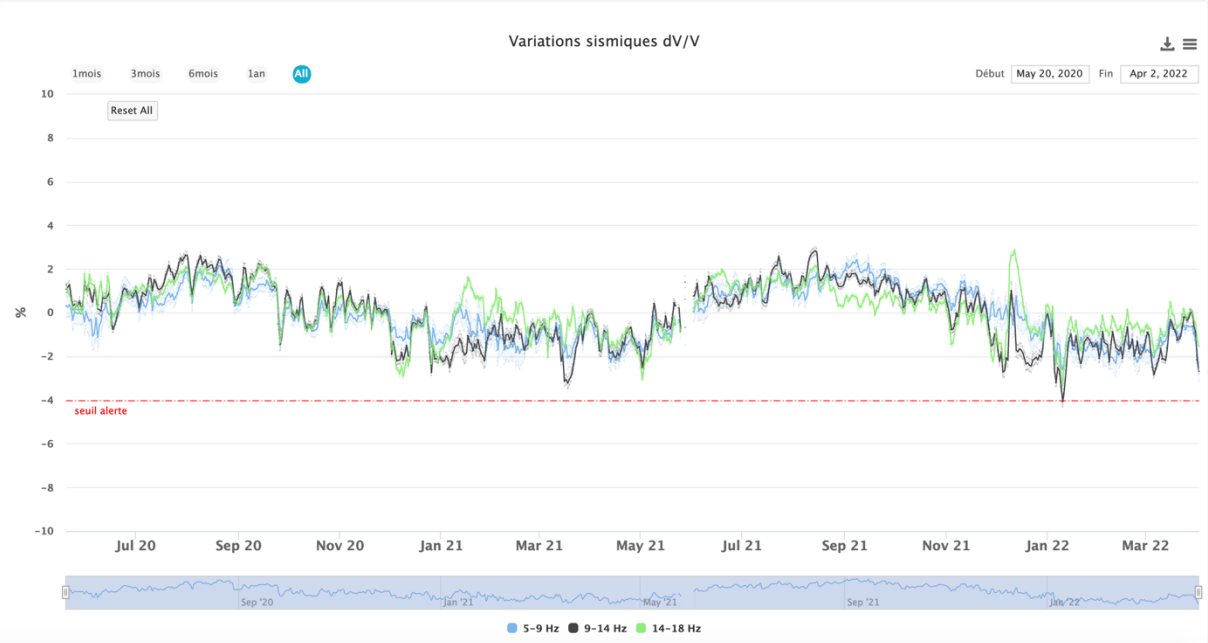


Figure 3: example of relative velocity changes obtained from seismic noise on an unstable morainic river bank. The different seismic frequencies ([5-9], [9-14], [14-18] Hz) correspond to different depth penetrations. Seasonal variations are clearly visible, but no destabilization is observed. Different visualization options are available and alert levels can be fixed site by site.

[2] M. Le Breton, N. Bontemps, A. Guillemot, L. Baillet, E. Larose (2021): Landslide Monitoring Using Seismic Ambient Noise Interferometry: Challenges and Applications, Earth Science Review Earth Science Review **216**, 103518

[3] Renalier, F., Jongmans, D., Campillo, M., Bard, P.-Y., (2010) *: Shear wave velocity imaging of the Avignonet landslide (France) using ambient noise cross correlation*. J. Geoph. Res.: Earth Surface **115**.

[4] Larose, E., Carrière, S., Voisin, C., Bottelin, P., Baillet, L., Guéguen, P., Walter, F., Jongmans, D., Guillier, B., Garambois, S., Gimbert, F., Massey, C. (2015): *Environmental seismology: What can we learn on earth surface processes with ambient noise?* J. Appl. Geoph. **116**, 62–74.

[5] Voisin, C., Garambois, S., Massey, C., Brossier, R. (2016.) : *Seismic noise monitoring of the water table in a deep-seated, slow-moving landslide*. SEG, SJ67–SJ76.

[6] Bertello, L., Berti, M., Castellaro, S., Squarzoni, G. (2018): *Dynamics of an Active Earthflow Inferred From Surface Wave Monitoring*. J. Geoph. Res.: Earth Surface **123**, 1811–1834.

[7] Valentin, J. (2018). Suivi de glissements rocheux et de coulées dans les roches argileuses à partir de méthodes sismiques et photogrammétriques (thesis). Grenoble Alpes.

[8] Colombero, C., Baillet, L., Comina, C., Jongmans, D., Larose, E., Valentin, J., Vinciguerra, S., (2018): *Integration of ambient seismic noise monitoring, displacement and meteorological measurements to infer the temperature-controlled long-term evolution of a complex prone-to-fall cliff.* Geophys J Int **213**, 1876–1897.

[9] Guillemot, A., Helmstetter, A., Larose, É., Baillet, L., Garambois, S., Mayoraz, R., Delaloye, R. (2020): *Seismic monitoring in the Gugla rock glacier (Switzerland): ambient noise correlation, microseismicity and modelling*. Geophys J Int **221**, 1719–1735.

[10] Bontemps, N., Lacroix, P., Larose, E., Jara, J., Taipe, E. (2020) : *Rain and small earthquakes maintain a slow-moving landslide in a persistent critical state*. Nat Commun **11**, 1–10.

[11] Fiolleau, S., Jongmans, D., Bièvre, G., Chambon, G., Baillet, L., Vial, B., (2020): *Seismic characterization of a clay-block rupture in Harmalière landslide, French Western Alps.* Geophysical J. Int. **221**, 1777–1788.

[12] Bensen, G.D., Ritzwoller, M.H., Barmin, M.P., Levshin, A.L., Lin, F., Moschetti, M.P., Shapiro, N.M., Yang, Y. (2007). *Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements*. Geophys J Int **169**, 1239–1260.

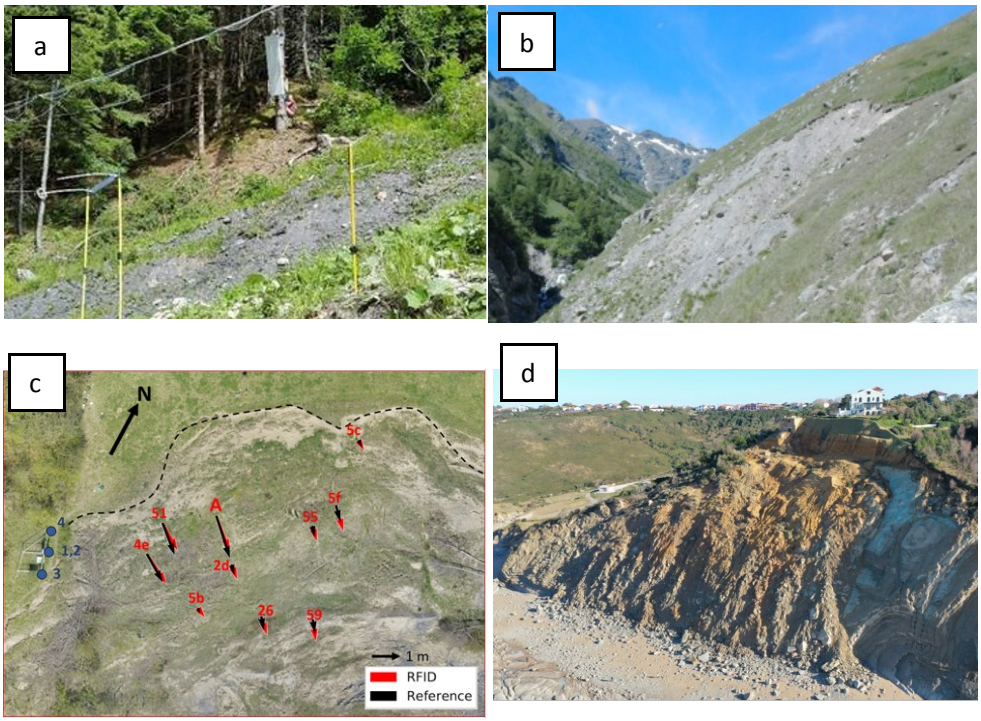
[13] Sens-Schönfelder, C., Brenguier, F. (2019). *Noise-Based Monitoring*, in: Seismic Ambient Noise. Cambridge University Press.

[14] Lecocq, T., Caudron, C., Brenguier, F. (2014): *MSNoise, a Python Package for Monitoring Seismic Velocity Changes Using Ambient Seismic Noise*, Seismological Research Letters **85** (3), 715-726.

Retour d’expérience sur 5 ans d'auscultation de glissements de terrain par technologie RFID

Mathieu Le Breton, Arthur Charléty, Laurent Baillet, Éric Larose, Étienne Rey, Franck Muller, Nicolas Grunbaum, Fabrice Guyoton.

Les technologies RFID apportent une nouvelle manière d'instrumenter des objets, et voient l'émergence de plusieurs applications en geosciences (Le Breton et al., 2021). Cette étude propose un retour d’expérience sur l'application d’auscultation de glissements de terrain, par localisation relative de tags RFID ultra-haute fréquence (868 MHz) (Le Breton et al., 2017, 2019). Cette technique permet de mesurer des déplacements avec une précision centimétrique, à un faible coût par point de mesure, et à travers des obstacles comme de la neige, du brouillard, ou de la végétation. Validée initialement sur le glissement de terrain de Pont-Bourquin (Les Diablerets — Suisse), cette technique a depuis été déployée par le laboratoire ISterre et la société Géolithe sur les glissements de terrain de l’Harmalière (Trièves, Isère), de Valloire (Savoie), et de la Villa Itxas Gaïana (Bidart, Pyrénées-Atlantiques). Ces installations ont eu lieu, respectivement, en 2017, 2019, 2020 et 2022, et restent en opération aujourd’hui. La présente étude prend du recul sur ces résultats, les compare avec d’autres mesures de référence, et fait ressortir les cas d’usage où la technique RFID semble très adaptée. L’étude fait aussi le point sur les améliorations apportées depuis l'installation pilote, comme la distance de lecture augmentée, la localisation en 2D (Charléty et al., 2022), l’industrialisation du système de mesure, et la visualisation des données traitées sur un portail web (Evorisk).


a
b
c
d
N
5c
5f
5f
5f

Foumbouni : suivi d'un glissement de terrain de grande ampleur dans un contexte simo-volcanique tropical

Benoit Le Moigne[1], Grégoire Dectot[2], Matthieu Arnaud[2], Sébastien Gourdier[3], Yannick Thiery*[3], Kahina Reboul[1], Claire Rault*†[1], and Melissa Beltramo[2]

[1]BRGM – 5 rue Sainte Anne 97400 Saint Denis, La Réunion
[2]BRGM – Lotissement "Les trois Vallées" n°1 Immeuble "Le Jacaranda" n°5 97600 Mamoudzou, Mayotte
[3]BRGM – BRGM – 3 Av. Claude Guillemin, 45100 Orléans, France

Résumé

Le glissement de terrain de Foumbouni (Mayotte) est un glissement lent de grande ampleur dont le volume est supérieur à 300 000 m3. Ce glissement occupe une superfie de 7ha sur lequel est installée une centaine d'habitations et un des axes de communication principal de l'île. L'activité de ce glissement s'est intensifiée suite aux fortes pluies engendrées par le cyclone Helen (mars 2014). Suite à cet évènement des déplacements de plus de 40 cm ont été mesurés et des dommages importants ont été constatés sur les habitations et les infrastructures.
La comprehension de la structure et du mécanisme de ce type de glissement de terrain est necessaire pour proposer des solutions durables permettant de minimiser les risques liés à son déplacement. C'est pourquoi, compte tenu des enjeux présents sur le glissement de Foumbouni, et de la faible connaissance de ce type de phénomène d'ampleur sur l'île, il a été décidé d'étudier ce site.

Depuis 2017, les déplacements et les vitesses du glissement de terrain sont suivis par mesures géodésiques Trois piézomètres ont été implantés sur le glissement permettant de suivre les variations du niveau des eaux souterraines. Les mesures piézométriques et les déplacements ont été analysées conjointement au regard des précipitations. Bien qu'aucun déplacement important n'ait été enregistré depuis la surveillance, ces données ont permis de relier la composante rapide de la recharge de l'aquifère aux faibles accélérations du glissement de terrain.

Afin de définir la géométrie du glissement de terrain et des matériaux impliqués, une série d'investigations géophysiques (MASW et ERT), combinée à l'observation des matériaux récupérés lors du forage des piézomètres à 25 m ont été entreprises. Ces données montrent que le glissement est composé de colluvions, de couches d'argiles sur une épaisseur de 4 à 6 m remplissant une paléo-vallée argilisée. Aucune surface de glissement n'a pu être clairement identifiées lors des forages, de plus aucun des trois piézomètres n'a été cisaillé, ce qui suggère que la surface principale du glissement pourrait être plus profonde que 25 m.
Les connaissances aquises ces dernières années concernant la dynamique, la morphologie et les

*Intervenant
†Auteur correspondant: c.rault@brgm.fr

matériaux de ce glissement suggèrent que le glissement de Foumbouni pourrait avoir un comportement de type fluage. Les futures observations associées à une analyse plus approfondie du comportement mécanique des matériaux devraient permettre de mieux évaluer sa dynamique. Bien que resident encore de nombreuses incertitudes quant à son fonctionnement et sa structure, les connaissances qui seront aquises sur Foumbouni pourraient apporter de nouveaux éléments permettant de mieux comprendre et apprehender les mouvements de grande ampleur et tout particulièrement ceux présents dans ce milieu spécifique, simotectonique et tropical, qu'est Mayotte. Le lien établi entre la composante rapide de recharge de l'aquifère et les déplacements permet de proposer des actions de mitigation focalisées sur la gestions des eaux de surface.

Mots-Clés: Mayotte, glissement de terrain lent, fluage, terrains volcaniques, climat tropical

Glissement de terrain et aléa torrentiel dans la Combe de Beaujournal à Valloire (73)

Etienne Rey [1, 2, *], D. Jongmans[3], E. Larose[3], A. Guillemeot[1, 2], A. Royer[2], M. Le Breton[2], L. Baillet[3]

1 : ISTERRE - Equipe Risques, University of Grenoble Alpes (UGA) 1381 rue de la Piscine - 38610 GIERES - France

2 : Géolithe 181 Rue des Bécasses, 38920 Crolles - France

Résumé

Il existe en zones montagneuses des interactions fréquentes entre glissements de terrain et laves torrentielles, l'impact des premiers pouvant alors être déporté plus en aval via les laves torrentielles en direction des enjeux humains. Lorsque ces instabilités de versant sont de grande ampleur et peu accessibles (absence de piste et d'infrastructures), la surveillance reste souvent la meilleure voire la seule option envisageable. Dans le cadre du projet POIA SIMOTER-1, nous avons instrumenté un glissement de terrain par un dispositif impliquant plusieurs méthodes complémentaires : suivi en continu de la rigidité du terrain en place, suivi des déformations/déplacements de surface et photographies time-lapse, données météorologiques. Nous décrivons ici l'instrumentation mise en place et les résultats des mesures obtenus depuis le début de la période de surveillance, en l'absence d'évènement significatif.

Contexte

Les territoires montagneux sont régulièrement soumis à des mouvements gravitaires (glissements de terrain, éboulements, laves torrentielles) qui peuvent constituer un risque majeur pour les infrastructures, la population et le développement anthropique. Lorsque les instabilités de versant (glissement ou éboulement) ne menacent pas directement les enjeux humains, elles peuvent toutefois constituer un risque indirect lors d'épisodes de fortes précipitations, via l'alimentation de cours d'eaux torrentiels susceptible de remobiliser les matériaux accumulés en bas de versant sous forme de lave torrentielles (Figure 1). L'ampleur et la complexité de ces phénomènes peuvent rendre difficile la mise en œuvre de parades efficaces et il faut alors envisager de mettre en œuvre des systèmes de surveillance pour alerter lorsque le risque augmente.

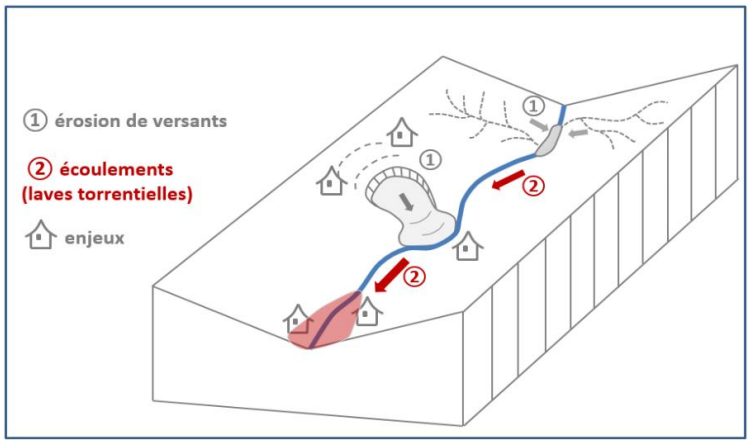


Fig. 1 : Interaction entre un glissement de terrain et un cours d'eau susceptible de provoquer des laves torrentielles.

Dans les 20 dernières années, le Rieu Benoit a généré au moins 3 laves torrentielles, menaçant le hameau des Verneys (2006, 2008),mais aussi la route nationale longeant la Valloirette et desservant le Col du Galibier depuis Valloire, arrachant la passerelle des Arolles en 2011. Suite à la lave torrentielle de 2006, trois griffes d'érosion significatives sont apparues en partie basse du versant au-dessus du lit du torrent, et en mars 2012, une cicatrice d'arrachement a été détectée dans l'alpage au-dessus de la zone d'érosion principale.

Du point de vue géologique, ce versant rive gauche du Rieu Benoît est constitué, au niveau de la zone de glissement (localisé au 1/3 aval du bassin versant), d'une couche de moraines de 15 à 20 mètres d'épaisseur, mise en évidence par des reconnaissances géophysiques (sismique réfraction, MASW et tomographie électrique) réalisées à l'été 2018. Ces matériaux morainiques reposent sur des flyschs très déformés gréseux et turbiditiques (plus argileux). Les reconnaissances réalisées ne mettent pas en évidence de nappe au sein des moraines (résistivité assez élevée, 300 à 600 Ohm.m et vitesse sismique inférieure à 1200 m/s), ce qui est cohérent avec la pente marquée du versant (25 à 35°) et la perméabilité probablement significative des matériaux morainiques instables.

Instrumentation sur site

Afin de surveiller le glissement de terrain mis en évidence par le service RTM en 2012, ISTerre a installé l'instrumentation suivante en tête de glissement (Fig. 2) :

- Suivi sismologique de la rigidité du terrain (dV/V) - SOILSTAB

- Suivi du déplacement en surface du glissement par un dispositif GEORFID,

- Suivi visuel par des appareils photographiques (depuis le versant d'en face et dans l'axe du Rieu pour visualiser l'interaction entre glissement et torrent)

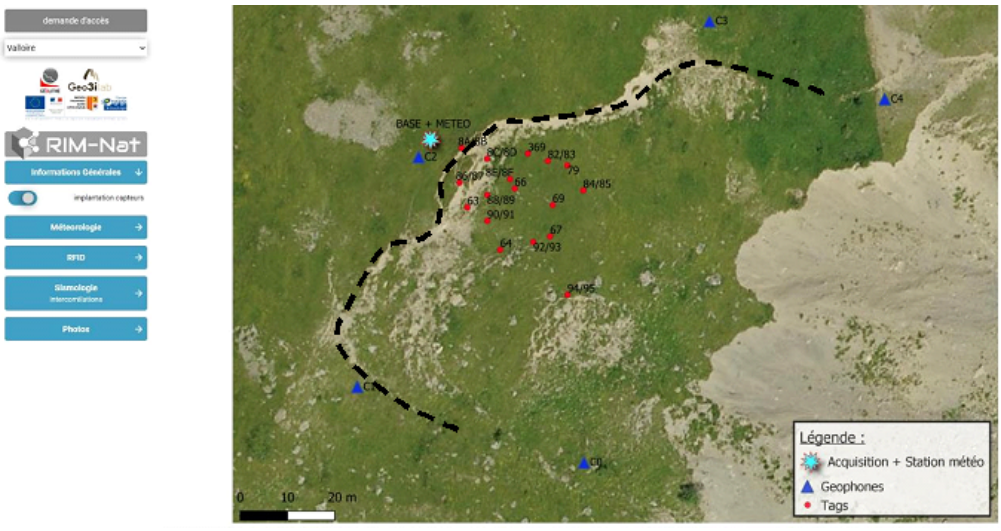


Fig. 2 : Instrumentation du glissement de terrain localisé en rive gauche du bassin versant aval du Rieu Benoit (source : portail dédié EVORISK). L'instrumentation comporte 5 capteurs sismiques (C0 à C4) et 19 tags RFID. La cicatrice découverte en 2012 est représentée en pointillés noirs.

La mesure en continu du bruit de fond sismique permet un suivi temporel de l'évolution la rigidité du terrain [2,3,4]. L'intercorrélation du bruit de fond sismique ambiant, mesuré en

continu entre les différentes paires de géophones à composante verticale localisés de part et d'autre du glissement permet en effet de calculer et de suivre la variation de la vitesse des ondes de surface *dV/V* au sein de la masse instable. La vitesse des ondes de surface dans le sol est principalement reliée à la vitesse des ondes de cisaillement VS donc à son module de rigidité élastique en cisaillement G. Une diminution significative de la vitesse des ondes de surface peut donc être reliée à une perte de rigidité en cisaillement du terrain et constituer un signal précurseur avant réactivation d'un glissement de terrain, telle qu'observée par exemple dans le cas du glissement argileux de Pont-Bourquin situé dans le Valais suisse [5]. Les variations du niveau d'une nappe phréatique peuvent impacter significativement les mesures de *dV/V* via l'évolution de la teneur en eau du milieu poro-élastique [5,6,7]. En l'absence de nappe, les variations de teneur en eau sont probablement plus limitées et liées essentiellement à l'infiltration de la pluie ou/et à la fonte de la neige. Les variations observées sur ce site de Valloire seront discutées plus loin.

Le dispositif RFID utilise les propriétés de propagation des ondes électromagnétiques émises par une antenne de base fixe localisée en tête de glissement dans une zone réputée fixe, pour réaliser un suivi des déplacements en surface, via les variations de distance relative entre cette antenne fixe et les tags distribués à la surface du glissement [8]. Ces tags, ici semi-passifs, sont mis en place sur des piquets métalliques rigides afin de s'affranchir d'éventuelles des effets potentiels liés à la reptation du manteau neigeux.

Un suivi visuel par des prises de photo time-lapse est réalisé *i.* pour le glissement et l'érosion du versant depuis le versant d'en face (rive droite), *ii.* pour la zone de contact entre le bas du glissement et le cours d'eau, depuis l'aval proche du glissement rive gauche. Un outil ergonomique a été développé sur le portail EVORISK pour la comparaison des séries temporelles de photo entre 2 dates différentes. Enfin les données météorologiques (précipitations liquides, température, vent) sont par ailleurs enregistrées et transmises en continu par pas de temps de 15 minutes. L'intégralité des données est télétransmise à distance sur un serveur FTP pour traitement et affichage des données sur le portail web dédié sécurisé EVORISK de Geolithe.

Résultats & discussion

Les données collectées depuis 2019 (*dV/V*) et depuis 2020 (RFID) n'ont pas mis en évidence de réactivation significative du versant instable, ce qui est confirmé par les observations visuelles de terrain mais aussi les levés GPS réalisés périodiquement. Le suivi sismologique, calculé pour 3 bandes de fréquence complémentaires (5-9 Hz, 9-14 Hz et 14-18 Hz) sensibles chacune à une plage de profondeur différente a toutefois permis de mettre en évidence des variations saisonnières moyennes de la rigidité du terrain en place d'amplitude +/- 2%. Ces variations réversibles, de période annuelle, pourraient résulter des variations environnementales comme la teneur en eau du terrain en place, ou encore la température. Elles sont du même ordre de grandeur que celles observées sur d'autres glissement argileux instrumentés par cette même méthode [4,5,9], et nous ont conduit à proposer un seuil d'alerte de 4%, du fait de la superposition possible de ces variations saisonnières avec d'autres de plus courtes longueurs d'onde, liées aussi à des paramètres environnementaux, mais caractérisés par des variations plus rapides. L'influence de l'environnement (notamment les paramètres météorologiques) sur l'évolution de la rigidité du glissement instrumenté est actuellement en cours d'étude à ISTerre.

Les mesures RFID n'ont pas mis en évidence de déplacement de surface significatif, en accord avec les observations visuelles et les levés DGPS périodiques réalisés sur site. Les mesures

montrent toutefois des variations d'amplitude limitées (inférieures ou égales à quelques cm), réversibles et régulières, liées à des variations environnementales réversibles quotidiennes (principalement attribuable à la température et à la rosée), ou encore pluri-horaires ou pluri-journalières dues à des épisodes de précipitation pluvieuse [10].

En conclusion, le dispositif de surveillance mis en place à Valloire constitue une instrumentation complète et innovante, capable de détecter le signe précurseur d'une déstabilisation du terrain en profondeur (baisse brutale de dV/V) [3] sur les déplacements de surface (RFID + photos) qui viennent confirmer dans un second temps une éventuelle réactivation du terrain instable. Des dispositifs similaires équipent déjà d'autres sites dans les Alpes du Nord [2] impliquant dV/V (SOILSTAB) et RFID (GEORFID), ou l'un des deux seulement.

Remerciements

Ce projet a été financé par des fonds FEDER (Fonds européen de développement régional) de la Communauté européenne, gérés par la Région Provence Alpes Côtes d'Azur, et par l'Etat français via le Fonds national d'aménagement et de développement du territoire dans le cadre de la CIMA (Convention Interrégionale du Massif des Alpes). Nous remercions l'INRAE pour le montage du projet global et les discussions liées à l'interaction avec les laves torrentielles. Nous sommes également reconnaissants à M. le maire de la commune de Valloire et le service RTM pour leur coopération. Nos remerciements s'adressent également à GEOLITHE INNOV et au service SIG d'ISTERRE pour leur appui technique indispensable, mais également au LABCOM GEO3iLAB qui a permis le développement d'outils de traitement automatisé des données utilisés notamment sur ce site (SOILSTAB, GEORFID,...).

Références

[1] S. Roudnitska - Rapport du RTM (2012) suite à la visite sur site du 12/06/2012

[2] E. Larose, A. Royer, A. Guillemot, M. Lebreton, L. Baillet, E. Rey (2022). *SOILSTAB: A seismic noise-based solution for near real-time monitoring of soil rigidity in the context of slow moving landslides (and beyond)*. JAG 2022, soumis.

[3] M. Le Breton, N. Bontemps, A. Guillemot, L. Baillet, E. Larose (2021): Landslide Monitoring Using Seismic Ambient Noise Interferometry: Challenges and Applications, Earth Science Review Earth Science Review **216**, 103518

[4] Renalier, F., Jongmans, D., Campillo, M., Bard, P.-Y., (2010) *: Shear wave velocity imaging of the Avignonet landslide (France) using ambient noise cross correlation*. J. Geoph. Res.: Earth Surface **115**.

[5] G. Mainsant, E. Larose, C. Brönnimann, D. Jongmans, C. Michoud, M. Jaboyedoff (2012): *Ambient seismic noise monitoring of a clay landslide : toward failure prediction*, J. Geophys. Res. **117**, F01030.

[6] L. Illien, C. 2021 *Seismic velocity recovery in the subsurface : transient damage and subsurface and groundwater drainage following the 2015 Gorkha earthquake, Nepal*. J. Geophys. Res. : Solid Earth, **126**, e2021JB023403.

[7] S. Pride, *Relationships between seismic and hydrological properties,* Hydrogeophysics chp 9, Water Science and Technology Library, Vol. 50

[8] M. Le Breton, L. Baillet, E. Larose, E. Rey, P. Benech, D. Jongmans, F. Guyoton, M. Jaboyedof (2019). *Passive radio-frequency identification ranging, a dense and weather-robust technique for landslide displacements monitoring*. Eng. Geology **250**, 1-10.

[9] Fiolleau, S., Jongmans, D., Bièvre, G., Chambon, G., Baillet, L., Vial, B., (2020): *Seismic characterization of a clay-block rupture in Harmalière landslide, French Western Alps.* Geophysical J. Int. **221**, 1777–1788.

[10] M. Lebreton, L. Baillet, E. Larose, E. Rey, P. Benech, D. Jongmans, F. Guyoton (2017). Outdoor UHF RFID : phase stabilization for real-world applications. IEEE J. of Radio-Frequency Identification, Vol.1 N°4, 279-290.

Modèle de vitesse 3D d'ondes S par tomographie par corrélation de bruit ambiant pour caractériser la structure d'un glissement de terrain profond.

Joachim Rimpot*†[1], Myriam Lajaunie[1], Dimitri Zigone[1], Céleste Broucke[1,2], Jean-Philippe Malet[1], and Clément Hibert[1]

[1]Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre – université de Strasbourg, Centre National de la Recherche Scientifique : UAR830 / UMS830 – 5 Rue René Descartes 67084 STRASBOURG CEDEX, France

[2]Institut de Physique du Globe de Paris – Centre National de la Recherche Scientifique : UMR7154, Université Paris Cité : UMR7154 – IPGP, 1 rue Jussieu, 75238 Paris cedex 05 ; Université Paris Diderot, Bât. Lamarck A case postale 7011, 75205 Paris CEDEX 13, France

Résumé

La zone étudiée est un glissement de terrain profond (> 80m) situé dans les Hautes-Pyrénées (France). Cette structure, qui couvre une surface de 650.000m^2, a été réactivée au printemps 2018 suite à un important éboulement (> 100.000 m3) modifiant les conditions de contraintes au sein de la masse instable. A la même période, la partie inférieure a été affectée par une crue de période de retour centennale du torrent de Bastan.
L'objectif principal de ce travail est de modéliser en trois dimensions les structures internes du glissement afin de comprendre les mécanismes contrôlant l'instabilité. Pour cela, nous avons réalisé un modèle de vitesse 3D des ondes S dans les 100 premiers mètres, mettant en évidence des variations latérales de la lithologie, des successions stratigraphiques et des failles présentes sous le glissement. De plus, le modèle vise à mieux évaluer les propriétés mécaniques des roches et les éventuels écoulements préférentiels de l'eau.
Dans les zones où seuls quelques séismes de fortes amplitudes sont enregistrés et avec une faible distribution azimutale, réaliser un modèle de vitesse 3D des ondes S (Vs) peut être difficile. La méthode de tomographie par corrélation de bruit ambiant présente l'avantage d'utiliser le bruit environnant pour modéliser les vitesses des ondes de surface en approximant les fonctions de Green entre chaque paire de stations. Pour ce faire, l'hypothèse principale consiste en une distribution homogène des sources de bruit, ce qui n'est jamais vraiment le cas dans un environnement naturel, et encore moins dans le cas d'un glissement de terrain. Par conséquent, les étapes de prétraitement et la sommation des enregistrements sur la période considérée sont essentiels pour réduire l'effet d'une distribution non uniforme du bruit et aboutir, par inversion, à un modèle de Vs final cohérent. Cette tomographie du bruit ambiant a été réalisée à partir de 25 enregistrements de 24h (entre le 24 juin 2020 et le 18 juillet 2020) à une fréquence d'échantillonnage de 500 Hz pour 70 capteurs sismiques miniaturisés. Chacun des géophones IGUI16HR-3C 5Hz SmartSolo du service DENSAR (EOST) a été enterré à environ 30 cm et espacé de 70 m en moyenne, selon la topographie du versant.

*Intervenant
†Auteur correspondant: jrimpot@unistra.fr

Dans ce travail, nous présentons succinctement la théorie et la méthodologie de la tomographie par corrélation de bruit ambiant et discutons du modèle 3D de Vs. Puis nous confrontons ce modèle 3D à un modèle de vitesse 3D des ondes P, obtenu via une étude de sismique active utilisant le même déploiement de sismomètres sur la même période. Pour cette étude, 370 sources sismiques contrôlées ont été déclenchées. Enfin, pour contraindre l'interprétation de ces deux modèles, on dispose d'informations de forages (analyse lithologique et hydrogéologique des carottes, analyse de la nappe phréatique, identification de zones de rupture dans des inclinomètres). Au regard de ces données, les caractéristiques géométriques et les paramètres physiques des principales structures géologiques du glissement de terrain sont discutés.

Mots-Clés: Glissement de terrain, Tomographie, Corrélation de bruit, Sismologie, Modèle 3D Vs

Cartographie des strates et cortèges de végétation des falaises instables des Vaches Noires (Normandie)

Bastien Sandberg, Olivier Maquaire, Candide Lissak, Mohand Medjkane, Thomas Rouland

NORMANDIE UNIV, UNICAEN, CNRS, IDEES, 14000 CAEN, France

Introduction

Depuis les années 1950, les scientifiques et géomorphologues constatent que l'action de la végétation dans les mécanismes influençant le maintien des sols instables n'est pas aussi anecdotique qu'il n'y paraît, mais plutôt que ces mécanismes sont interdépendants (Marston, 2010). L'étude de cette interrelation se concentre principalement sur l'éco-ingénierie et l'efficacité de certaines espèces face à un processus donné, plutôt qu'à l'analyse des actions dans leur globalité (Burylo, 2010). Cette tendance pourrait être attribuée à la diversité des espèces végétales, dont le comportement dépend à la fois des caractéristiques abiotiques et biotiques de leurs milieux, mais également de la variabilité et de la plasticité de la végétation qui peuvent être conjointement observées sur un même site.

C'est dans ce contexte qu'une recherche a été initiée sur les falaises des Vaches Noires, situées au nord-ouest du Pays d'Auge (Normandie), s'étendant sur un linéaire de 4,5 kilomètres et formant un site remarquable, sur le plan géomorphologique et botanique, car présentant différents niveaux de couverture de végétation allant de la strate herbacée à la strate arborée. En effet, ces falaises présentent un relief de badlands actif, évoluant sous l'influence de processus subaériens emboîtés, comprenant des glissements de terrain, des coulées boueuses et des chutes de blocs (Auger & Mary, 1968, Roulland *et al*., 2019 ; Roulland *et al*., 2021). L'absence d'action humaine a permis un développement naturel croissant des cortèges de végétation spécifiques aux milieux marneux instables, durant ces dernières décennies (Goret et Prey, 2021 ; Thierry *et al*. 2007).

Malgré le développement de la végétation dans des zones où cette dernière s'est pourtant très bien adaptée (ex : Forêt de pente), de nombreux secteurs sont encore instables (actifs). Dans d'autres secteurs, la végétation tente de s'implanter de manière plus ou moins ponctuelle (annuelle/bisannuelle), mais ne semble pas réussir à dépasser le stade herbacé.

Ces travaux de recherche visent à mettre en avant les interrelations entre les différents types d'instabilité observés et le niveau de colonisation végétale, grâce à la cartographie multi-dates des strates de végétation (Fig. 1A), des types de cortèges (Fig. 1B) et des communautés végétales. Cette cartographie est primordiale pour mettre en avant les variations d'occupation du sol en lien avec les processus de surfaces observées.

Matériels et méthodes

Afin de réaliser cette cartographie de la végétation, plusieurs méthodes ont été appliquées de manière conjointe (analyse d'images, inventaire *in situ*). En parallèle, cette cartographie est associée à celle des zones d'instabilités et des types de mouvement (Roulland *et al.* 2021 ; Roulland, thèse en cours) qui ne seront pas présentées dans cette communication.

La méthode Braun-Blanquet a été retenue **pour identifier les différents cortèges** : elle consiste à faire des relevés *in situ* de la végétation par transect simplifié (Fiers, 2004), permettant d'identifier les différents cortèges en fonction de leurs compositions floristiques en s'appuyant sur les écrits existants (Goret et Prey, 2021 ; Bardat *et al*., 2004), ainsi que leurs emplacements et les enchaînements visibles sur le terrain.

Pour **spatialiser ces différents cortèges**, des séries multi-temporelles d'orthophotos (RGB) par drone ont été réalisées sur l'intégralité du versant des falaises, à trois périodes différentes à l'aide de deux levers à 115 mètres d'élévation produisant entre 3 000 et 4 000 photos par période.

Pour compléter ces levers, afin d'identifier les cortèges incertains lors de l'analyse des images, et pour observer les secteurs inaccessibles, différents levers drone à basse altitude ont été réalisés.

Différents algorithmes de classification et analyses radiométriques (calculs d'indices) ont été testés, en s'appuyant sur les bandes RGB des images drone, dans le but d'extraire l'information végétation de ces séries d'images. Certains indices classiques permettant la détection de la végétation ont été sélectionnés (GBR, NDBRBI et GRVI dans Lissak *et al., 2020*), mais n'ont pas permis d'obtenir de résultats cohérents et fiables, concernant l'identification des cortèges (Problème de confusion des sols avec les cortèges arbustifs et herbacés), ni de mettre en avant les sols nus, secs ou humides.

Pour compléter ces résultats, la photo-interprétation visuelle pourra permettre d'identifier les différents secteurs « homogènes » de strates (herbacée, arbustive, arborée et sol nu) et les cortèges de végétation sur lesquels s'appuiera l'étude, pour analyser les relations entre les cortèges de végétation et les sols instables.

Résultats et discussions

Depuis mars 2021, seuls trois orthophotos ont pu être réalisés (7-8 octobre 2021 et 11-12 novembre et 22-23 janvier 2022) sur l'intégralité des Vaches Noires, due à la variété de critères à combiner, pour la réalisation d'un vol optimal.

Sur les **21 cortèges de végétation** reconnus dans la littérature et sur le terrain, allant de la végétation pionnière au stade végétal climacique de la forêt, **huit cortèges** ont été retenus compte tenu de leurs représentativités (leurs taux de recouvrement, leurs caractéristiques autoécologiques et leurs indépendances à toute présence humaine) et leurs positionnements sur les falaises (sur le versant et à proximité des différents escarpements et échines des ravines) :

1. Végétation pionnière des éboulements de marne
2. Pelouse marnicole à *Blackstonia perfoliata* et *Tetragonolobus maritimus*
3. Mégaphorbiaie à Epilobium hirsutum Equisetium telmateia dans les zones de suintement
4. Roselière de Phragmition communis
5. Fourré à Hippaphae rhamnoides et Ligustrum vulgarus
6. Saulaie à Equisetum telmateia
7. Forêt alluviale à *Equisetum telmateia* et *Fraxinus excelsior*
8. Forêt de pente à *Dryopteris affinis* et *Fraxinus excelsior*

Comme le montre la figure 1, extrait d'une première cartographie des strates et cortèges réalisée pour le lever du 11-12 octobre 2021.

Il est possible de visualiser à l'œil nu la différence de l'occupation des strates de végétation par ravine, il reste cependant nécessaire de préciser les cortèges car les informations qui en découlent sont très importantes. En effet, avec la lecture de la cartographie des strates de

végétation, il est possible d'observer une différence de proportion des strates entre les différentes unités biogéomorphologiques. Par exemple, entre l'unité 1 et l'unité 4, dont les processus hydrogravitaires sont principalement respectivement des coulées boueuses et des glissements de terrain, on observe que :

L'unité 1 (à l'extrême Est de la zone d'étude), est avant tout recouverte d'herbacée (51 %), essentiellement composée de végétation pionnière (qui présente aussi, de ce fait une certaine surface de sol nu), suivie du sol nu (21 %), principalement dû aux coulées boueuses ayant arraché et recouvert la végétation, puis de la strate arborée (14 %) et arbustive (13 %), composée de saulaies et de fourrés d'argousier. Les cortèges associés sont principalement la végétation pionnière, les fourrés d'Argousier, les roselières, les mégaphorbiaies, les saulaie…

L'unité 4 (à l'extrême ouest de la zone d'étude), est recouverte par les différentes strates de manière assez uniforme avec une dominance de la strate arborée (35 %), composée de forêts de pente, suivie de la strate arbustive (27 %), avec des fourrés d'argousiers, du sol nu (24 %) et enfin de la strate herbacée (14 %), essentiellement composée de pelouse marnicole. Les cortèges associés sont notamment des forêts de pente, fourré d'Argousier, pelouse marnicole, saulaie, …

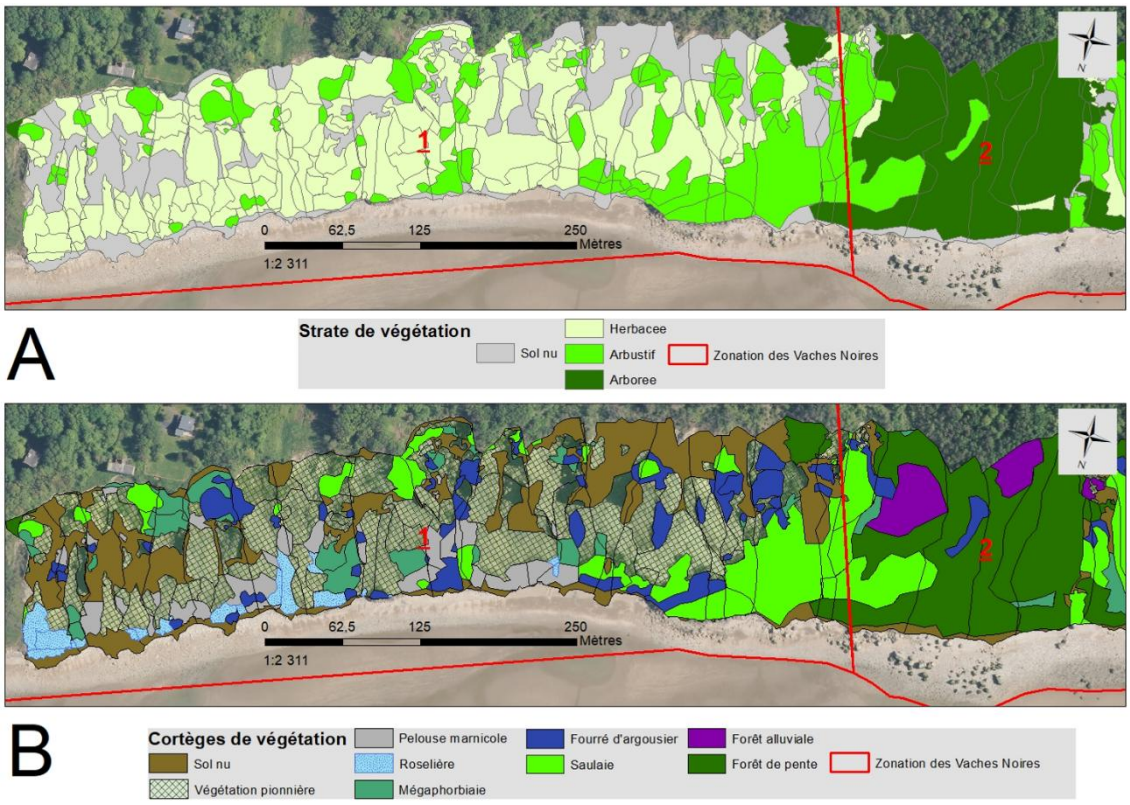


Figure 1 : Partie orientale des falaises des Vaches Noires avec extrait de la cartographie des strates (A) et des cortèges (B) de végétation (Levés du 11-12 octobre 2022) sur les unités 1 et 2.

L'analyse de l'autoécologie de ces cortèges fournit ainsi plus d'informations sur les caractéristiques abiotiques du milieu (la présence d'eau, la charge en élément grossier, etc.). De ce fait, les espaces plutôt secs et calcaires vont principalement contenir des pelouses marnicoles alors que les espaces plus humides ou récemment perturbés vont présenter de la végétation pionnière ou des roselières. Les sols présentant surtout des éléments fins (sable, argile, limon), sont surtout occupés par les saulaies alors que ceux chargés en éléments grossiers sont occupés par les fourrés d'argousier.

Conclusion et perspectives

Le croisement des données floristiques relevées *in-situ* et l'analyse d'images haute résolution démontrent ici l'intérêt majeur qu'apporte la cartographie des strates et des cortèges, de ce site très accidenté, peu accessible et dont la cinématique est forte. Grâce à la combinaison des approches, la recolonisation végétale en lien avec les vitesses et rythmes d'évolution des falaises des Vaches Noires, la résistance et la résilience des cortèges à la suite d'un processus hydro gravitaire, peuvent être suivies à haute résolution spatiale et temporelle, et cela, pour chaque unité morphologique qui en compose le versant. En réalisant des vols à chaque saison, il sera possible par la suite de spatialiser l'évolution des cortèges, de suivre les processus en place, mais également d'effectuer une typologie des mouvements de versant rencontrés et des cortèges de végétation associée. Ces différentes méthodes de suivi ainsi que l'analyse croisée menée, permettent de se questionner sur les clés de transposition pouvant être apportées pour l'étude d'autres sites côtiers ou continentaux à faible accessibilité.

Références

Auger, P., & Mary, G. (1968). Glissements et coulées boueuses en Basse-Normandie. *Revue de Géo. Phy. et Géol. Dyn.(2)*, *10*, 213-224.

Bardat, J., Bioret, F., Botineau, M., Boullet, V., Delpech, R., Géhu, J. M., ... & Touffet, J. (2004). *Prodrome des végétations de France (Vol. 61, p. 171).* Muséum national d'histoire naturelle.

Burylo, M. (2010). Relations entre les traits fonctionnels des espèces végétales et leurs fonctions de protection contre l'érosion dans les milieux marneux restaurés de montagne [*Thèse de doctorat, Université de Grenoble*]. https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00602804

Fiers, V. (2004). Guide pratique : Principales méthodes d'inventaire et de suivi de la biodiversité.

Goret, M., & Prey, T. (2021). Typologie de la végétation des falaises des Vaches noires et des Roches noires. 91.

Lissak, C., Bartsch, A., de Michele, M., Gomez, C., Maquaire, O., Raucoules, D., & Roulland, T. (2020). Remote Sensing for Assessing Landslides and Associated Hazards. *Surveys in Geophysics, 41, 1‑45*. https://doi.org/10.1007/s10712-020-09609-1

Marston, R. (2010). Geomorphology and vegetation on hillslopes: Interactions, dependencies, and feedback loops. *Geomorphology, 116(3), p.206-217*. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.09.028

Roulland, T., Maquaire, O., Costa, S., Compain, V., Davidson, R., & Medjkane, M. (2019). Dynamique des falaises des Vaches Noires : Analyse diachronique historique et récente à l'aide de documents multi-sources (Normandie, France). *Géomorphologie : relief, processus, environnement, 25(1), 37‑55*. https://doi.org/10.4000/geomorphologie.12989

Roulland, T., Olivier, M., Costa, S., Medjkane, M., Davidson, R., Fauchard, C., & Antoine, R. (2021). Seasonal activity quantification of coast badlands by TLS monitoring over five years at the "Vaches Noires" cliffs (Normandy, France). *Geomorphology, 400, 16.* https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.108083

Thierry, T., Delassus, L., & Avoine, J. (2007). Typologie appliquée aux falaises sédimentaire du Calvados. 11.

INSTABILITES ROCHEUSES DANS LA REGION DES GRANDS CAUSSES (SUD DE FRANCE)

A. Taboada[1], R. Cattin[1], M. Ferry[1], S. Gautier[1], M. Renouf[2], Yacine Bourahla[1], et Aziz Ferroum[1]

1 Laboratoire Géosciences Montpellier, Université de Montpellier

2 Laboratoire de Mécanique et Génie Civil, Université de Montpellier

Les glissements de terrain se produisant dans les escarpements rocheux font partie des risques naturels les plus imprévisibles en raison de la complexité de leur structure (réseaux de fractures, degré d'altération...), ainsi que des conditions aux limites qui sont généralement mal connues (niveau de la nappe d'eau, géométrie...). Dans le but de mieux comprendre ces phénomènes, nous avons identifié plusieurs zones potentiellement instables situées dans les escarpements rocheux bordant les plateaux carbonatés de la région des Grands Causses, dont la morphologie suggère qu'ils sont dans un état proche de la rupture. En particulier, on observe des colonnes rocheuses d'échelle variable situées dans des niveaux calcaires et dolomitiques massifs du jurassique inférieur (Bathonien, Bajocien). La déstabilisation des colonnes est favorisée par leur géométrie (élancement, hauteur), qui est contrôlée par l'espacement des joints verticaux qui prédécoupent les escarpements.

Les colonnes potentiellement instables présentent des structures géologiques relativement simples et sont soumises à un forçage climatique intense au cours de l'année. Les cas qui ont été identifiés comprennent des basculements, des éboulements et des glissements irréguliers, qui sont représentatifs des instabilités rocheuses les plus importantes de la région. D'après les données historiques, les événements pluvieux extrêmes associés aux « événements cévenols » du début de l'automne, constituent le principal facteur de déclenchement des processus de glissement de terrain dans les escarpements rocheux. Les études météorologiques montrent qu'au cours des 60 dernières années, les événements climatiques les plus extrêmes (>200 mm/jour) se sont intensifiés d'environ 20% et sont devenus plus fréquents, en particulier dans la région des Cévennes (qui couvre le plateau du Larzac) (Ribes et al., 2019). La quantité de précipitations peut localement dépasser 200-500 mm/jour, atteignant en une journée la quantité annuelle moyenne des régions situées plus au Nord. De plus, les fortes précipitations de l'automne dans le sud de la France ont tendance à s'accentuer avec le changement climatique (Luu et al., 2018) : les simulations et observations climatiques régionales montrent que la probabilité de dépasser les précipitations centennales a plus que doublé, en raison de l'augmentation de la température. Il est important d'observer que l'augmentation du nombre et de l'intensité des évènements climatiques extrêmes est corrélée avec la fréquence et la taille des instabilités rocheuses, qui devraient aussi augmenter dans les années à venir.

Nous avons analysé plus particulièrement le mécanisme de basculement de colonnes rocheuses associé à l'adoucissement et/ou sapement des couches basales. Ce mécanisme est favorisé par plusieurs processus d'altération et d'érosion qui sont souvent observés au pied de nombreux escarpements rocheux dans la zone étudiée : a) l'altération chimique par dissolution avec élargissement et affaiblissement des fractures dans la roche ; b) l'altération mécanique liée aux cycles de mouillage-séchage des matériaux argileux ou de gel-dégel, et l'érosion des matériaux superficiels fracturés et adoucis ; c) la croissance de la végétation (y compris des arbres) qui s'enracine dans la couche superficielle du sol et en profondeur dans les fractures, contribuant à la désagrégation chimique et mécanique de la roche ; d) le sapement des matériaux désagrégés et/ou le détachement et l'effondrement de dalles rocheuses à la base des escarpements avec création d'abris-sous-roche.

La phase de prérupture associée au mécanisme de basculement est illustrée à partir d'un exemple de colonne rocheuse située dans la reculée karstique du Laurounet à proximité de la grotte de Labeil. Elle est partiellement instrumentée depuis juillet 2021 (Fig. 1a). Les processus d'altération sont contrôlés par la percolation de l'eau liée à une nappe phréatique perchée au-dessus des couches marneuses sous-jacentes, dont le niveau peut augmenter considérablement lors d'épisodes cévenols.

La réalisation d'un modèle 3D à partir d'images photos et de données de théodolite Laser a permis de calculer le centre de gravité de la colonne et de déterminer sa distance par rapport à l'abris sous roche, qui a réduit la zone d'appui d'environ un tiers de la base. La déformation et l'érosion dans l'abris sous roche se manifeste par le détachement de blocs d'échelle submétrique et l'ouverture des fissures subverticales. Les données instrumentales montrent la corrélation entre les variations de température et l'ouverture/fermeture de la fissure qui sépare la colonne de l'escarpement rocheux. Le taux de déformation plastique sera déterminé à partir de l'analyse d'un cycle annuel de mesures.
Cette approche permet d'estimer l'aléa gravitaire associé à la déstabilisation d'escarpements rocheux à partir d'une approche multi-physique qui combine des observations, des mesures et des modèles.

Figure 1 : Colonnes rocheuses instrumentée située dans la vallée du Laurounet (hauteur 20m) avec abri-sous-roche.

Journées
Aléas
Gravitaires

JAG

MONTPELLIER 2022

10-11 Mai 2022

https://jag2022.sciencesconf.org/

Instabilités gravitaires en domaine volcanique

The Cirque de Salazie (Reunion Island) an ideal laboratory to study landslide hazard and erosion-related interactions

Claire Rault*[1], Yannick Thiery*[2], Marie Chaput[1], Pierre-Alexandre Reninger[2], Laurent Michon[3,4], J.b. Thomas Dewez[2], Kévin Samyn[1], and Bertrand Aunay*[1]

[1]BRGM – 5 rue Sainte Anne 97400 Saint Denis, La Réunion
[2]BRGM – BRGM – F-45000, Orléans, France, France
[3]Universite de Paris, Institut de Physique du Globe de Paris, – CNRS : UMR7154 – F-75005 Paris, France, France
[4]Université de La Réunion, Laboratoire GéoSciences Réunion, F-97744 Saint-Denis, France – La Réunion

Résumé

Composed of a thick accumulation of loose volcaniclastic materials derived from successive volcanic flank collapses and exposed to high precipitation rates, the Cirque de Salazie (Reunion Island) is highly exposed to landsliding. Of the 121 km^2 making up this large depression, at least 19% of slopes are affected by various types of landslides. Among the different remarkable processes observed, there are large slow-moving landslides with volume larger than 200 Mm3, *déboulés* a rapid process that induce the formation of large gully (up to 700 m long) in few days, large catastrophic retrogressive landslides with volume exceeding 1 Mm3, etc. Whether they are fast- or slow-moving, they cause an important hazard and risk for Salazie inhabitants.
Scientific research in the Cirque de Salazie has been conducted for more than 20 years to provide a better understanding of landslides processes, improve landslide hazard assessment and find sustainable solutions for risk mitigation.

The purpose of our approach is to present the great advances that have been made since 2003 concerning the knowledge of landslides processes in this volcano-tropical environnement through the combination of multidisciplinary methods. Geological and geomorphological analysis, hydrogeological modeling, geodetic measurements and geophysical acquisition (AEM, seismic and electrical) have been used to (i) relate the morphology of the *cirque* to landslide activity, (ii) propose a landslide inventory and associate them to a specific typology; (iii) understand the internal structure of large slow-moving landslides and (iv) quantify the relation between rainfall, groundwater and landslide activity.

These advances allow to relate the dismantling processes at the island-scale and the climate conditions to the activity and mechanisms of landslides in the *cirque*.

Through their activity, density and diversity, the landslides of this open-air laboratory provide key information for landslide hazard assessment in volcanic and non-volcanic regions.

*Intervenant

They offer insights to refine hazard maps by integrating for example the different mechanisms and structure of landslide. These results could also provide a better assessment of hazards, whether on a short time scale by defining for example landslide trigger thresholds or on a longer time scale by integrating the effects of climate change on the activation or reactivation of instabilities.
The high erosion rate and important landslide activity of the Cirque de Salazie make this small area an ideal laboratory to study a wide range of geomorphological processes from large slope movements to sediment transport in rivers.

Mots-Clés: Landslide classification, volcaniclastic, tropical environment, rainfall, airborne electromagnetics, Reunion Island.

Surveillance et étude de l’aléa gravitaire sur les volcans actifs français

Jean-Marie Saurel, Fabrice R. Fontaine, Roberto Moretti, Aline Peltier, François Beauducel, Patrice Boissier, Christophe Brunet, Jordane Corbeau, Sébastien Deroussi, Robin Dumeige, Virginie Durand, Raphael Grandin, Mike Heap, Philippe Kowalski, Frédéric Lauret, Anne Mangeney, Marc Perruzzetto, Marina Rosas-Carbajal, Doris Vaton, Jean-Christophe Komorowski, Arnaud Lemarchand

Les édifices volcaniques sont par nature instables et subissent tout au long de leur vie des phases de construction et de destruction. Les trois volcans actifs en domaine aérien en France présentent tous des aléas gravitaires différents. L’IPGP, en charge de la surveillance de ces volcans (Piton de la Fournaise, Soufrière de Guadeloupe, Montagne Pelée), développe depuis plusieurs années des méthodes et moyens pour surveiller et étudier les aléas gravitaires sur ces édifices.
Entre la surveillance et l’étude des instabilités à l’intérieur du cratère Dolomieu sur le Piton de la Fournaise suite à son effondrement en 2007, les dispositifs d’alerte et de suivi des instabilités de flanc du dôme de la Soufrière de Guadeloupe et le système de détection automatique de lahars de la rivière du Prêcheur en Martinique, l’IPGP utilise de nombreuses techniques (suivi photogrammétrique, satellite, GNSS temps-réel, dispositifs dédiés sur mesure). Couplées à l’analyse des dépôts, des propriétés des matériaux et à la modélisation numérique, ces observations instrumentales permettent de mieux comprendre la dynamique des instabilités et leurs effets.
Ces différentes méthodes, adaptées et développées pour chaque type d’aléa gravitaire, peuvent néanmoins être étendues à d’autres cibles non volcaniques (suivi de grands glissements lents ou de laves torrentielles par exemple).

Journées
Aléas
Gravitaires

JAG

MONTPELLIER 2022

10-11 Mai 2022

https://jag2022.sciencesconf.org/

La modélisation des mécaniques de rupture et de propagation des mouvements de terrain

Modélisation hydro-mécanique de glissements de terrains lents

Florent Prunier*†[1,2,3,4,5]

[1]Prunier – Univ Lyon, INSA-Lyon, GEOMAS, F-69621, France, – Campus LyonTech La-Doua, 20 avenue A. Einstein, 69621 Villeurbanne cedex, France
[2]Al-Dah – Univ Lyon, INSA-Lyon, GEOMAS, F-69621, France – Campus Lyon Tech La-Doua, France
[3]Bertrand – Université de Besançon, UMR 6249 Chronoenvironnement – 16 route de Gray 25030 Besançon cedex, France
[4]Ducasse – Université de Besançon – 16 route de Gray 25030 Besançon cedex, France
[5]Mallet – Université de Strasbourg, ÉOST, IPGS – CNRS UMR7516 – 5 rue René Descartes 67084 Strasbourg Cedex, France, France

Résumé

Nos sociétés urbanisées et aménagées sont régulièrement confrontées à devoir gérer des problématiques de stabilité de pentes avec à la clef des impacts humains et économiques potentiellement importants. Chaque site ayant ses spécificités propres en termes de contexte géologique, environnemental et d'usage, la réponse à apporter à ce type de problèmes nécessite dans les cas complexes ou à fort impact, la mobilisation d'un nombre importants d'acteurs avec une expertise pointu dans des domaines comme la géologie, la géophysique, l'hydrogéologie, la mécanique des sols et la géotechnique.
A travers le cas d'étude du glissement de terrain du village de Viella dans les Pyrénées orientales, nous présentons dans cette communication ce que peut apporter un modèle géomécanique en termes de compréhension physique des mécanismes instables d'un site.

En février 2018, un éboulement de falaise à l'amont du village de Viella à réactiver un glissement autour du village dans une zone en terrains meubles à pentes plus faibles (15-20∘au maximum).

Après des investigations géologiques et géophysiques du site, nous avons monté un modèle géomécanique en éléments finis 2D prenant en compte les couplages hydro mécaniques du site. Bien que construit avec une approche mécanicienne purement déterministe, ce modèle n'a pas vocation à être utilisé dans un but prédictif pur. Il a plus vocation à être utilisé dans une approche observationnelle, afin de décrire certains mécanismes de pertes de stabilité.

Afin d'être capable de décrire des phénomènes comme la liquéfaction (Nova 1989, Lade 1992), ou une perte de stabilité lié à une décharge à déviateur constant (Daouadji et al. 2011), il est nécessaire d'utiliser à minima un modèle élasto-plastique non associé avec écrouissage pour les différentes couches de sol (Schantz et al. 1999, Barnichon 1998). D'un point de vue pratique cela implique un modèle avec au moins 6 paramètres mécaniques à calibrer (sur

*Intervenant
†Auteur correspondant: florent.prunier@insa-lyon.fr

des essais triaxiaux de laboratoire pour une calibration rigoureuse) : 2 paramètres élastiques comme E et , 3 paramètres de rupture comme c, ϕ, ψ et au moins un paramètre décrivant la forme de l'écrouissage, comme un module sécant E50. Pour la partie hydraulique, la perméabilité de chacune des couches est nécessaire, mais afin de simuler un niveau de nappe à partir de conditions limites, les propriétés de rétention d'eau dans la zone non saturée ainsi qu'une loi donnant l'évolution de la perméabilité avec le degré de saturation sont aussi nécessaires. Si un modèle simplifié à 2 paramètres de Van-Genuchten (Van-Genuchten 1980) est utilisé à la fois pour la courbe de rétention d'eau et pour l'évolution de la perméabilité, 4 paramètres supplémentaires sont à calibrer. Dans la pratique tous les essais d'identifications ne sont en général pas faits. Ainsi dans le cas de glissements lents, une approche observationnelle s'avère nécessaire afin d'obtenir un ou des jeux de paramètres pertinents par analyse inverse. En l'état actuel des connaissances et technologies, il semble plus pertinent que cette " analyse inverse " soit menée de manière empirique par un expert géomécanicien, car ces modèles décrivent une physique complexe fortement non linéaire dans un espace 3D avec couplages multi-physiques (dans le cas présent hydro-mécanique). Ainsi un certain nombre de méthodes numériques d'inversions risquent de prévoir des jeux de paramètres optimums non acceptables physiquement.

Dans le cadre de l'étude du site de Viella, la partie mécanique du modèle a été évaluée par analyse inverse grâce aux mesures des déplacements de surface. Pour la partie d'hydraulique souterraine, la reconnaissance hydro-géologique ainsi que des mesures de géophysiques de résistivité ont permis d'émettre des premières hypothèses sur les perméabilités des sols. Néanmoins les mesures de résistivités ont mis en exergue une zone importante de sol à forte résistivité là où on s'attendait à voir des couches de sols saturés. Des premiers calculs, ont permis de montrer que cette zone sèche n'était probablement pas liée à une formation peu perméable. En effet les calculs ont montré que même avec une forte perméabilité (plus en concordance avec le modèle géologique), cette lentille de sol restait sèche du fait de la géométrie du site et des conditions aux limites d'entrée de l'eau dans le versant.

Dans une seconde étape, quelques scénarios de conditions de chargements hydrauliques ont été simulés avec le modèle qui a pu reproduire des zones de mouvements et de glissements réalistes.

Dans une dernière partie de l'exposé une réflexion sur les notions de coefficients de sécurités partiels ou globaux largement utilisées en ingénierie géotechnique est proposée. En complément de ces approches classiques, le critère de bifurcation du travail du second ordre (Prunier et Branque 2019, Prunier et al. 2016, Lignon et al. 2009) est présenté et son utilisation dans des approches observationnelles discutée.

Références :

Lade PV. Static instability, liquefaction of loose fine sandy slopes. Journal of Geotechnical Engineering (ASCE) 1992; 118:51–71

Nova R. Liquefaction, stability, bifurcations of soil via strain-hardening plasticit. In Numerical Methods for the Localisation and Bifurcation of granular bodies; Proceedings of the International Workshops, Gdansk, Dembicki E, Gudehus G, Sikora Z (eds). 1989; 117–132.

Daouadji, A., Darve, F., Al Gali, H., Hicher, P.Y., Laouafa, F., Lignon, S., Nicot, F., Nova, R., Pinheiro, M., Prunier, F., Sibille, L. and Wan, R. (2011), Diffuse failure in geomaterials: Experiments, theory and modelling. Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech., 35: 1731-1773. https://doi.org/10.1002/nag.975

Schantz T., Vermeer P.A., Bonnier P.G., The hardening soil model: Formulation and verification, in Beyond 2000 in Computational Geotechnics – 10 years of Plaxis©,Balkema.

Barnichon JD. Finite element modelling in structural and petroleum geology. Ph.D. Thesis, Univerité de Liège, Belgique, 1998. – modèle Plasol.

Van Genuchten MT. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil, Science Society of America Journal 1980; 44:892–898.

F. Prunier et D. Branque : Definition of a safety factor using the fi- nite element method in geomechanics, from a static to dynamic re- gime. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2019. https ://doi.org/10.1080/19648189.2019.1650119.

F. Prunier, B. Chomette, M. Brun et F. Darve : Designing geotechnical structures with a proper stability criterion as a safety factor. Computers and Geotechnics, 71 :98–114, 2016.

Hydro-mechanical modelling of landslides with a material instability criterion
S. LIGNON, F. LAOUAFA, F. PRUNIER, H.D.V. KHOA, and F. DARVE, Géotechnique 2009 59:6, 513-524

Mots-Clés: modélisation géomécanique, éléments finis, stabilité

How can the morphometric characteristics and failure conditions of a historic gully caused by intense rainfall be reconstructed?

Bertrand Aunay*†[1], Claire Rault[1], Yannick Thiery[2], Bastien Colas[3], and Kahina Reboul[1]

[1]BRGM – BRGM – 5 Rue Sainte Anne, Saint-Denis, La Réunion, 97400, France
[2]BRGM – BRGM – 3 avenue Claude Guillemen 45000 Orléans, France
[3]BRGM – Ministère de l'écologie de l'Energie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire, Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique, Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie – 3 Avenue Claude Guillemin - BP 36009 - 45060 Orléans Cedex 2, France

Résumé

In January 1980, during exceptional cyclonic rainfall, an atypical landslide, called "déboulé", rapidly generated the permanent 700 m-long gully of the Ravine de l'Eglise on an inhabited plateau in Reunion Island (Indian Ocean). Retrieving the initial conditions that led to this historical process is both challenging and necessary for understanding the mechanism of gully incision and providing pointers for improving risk mitigation in relation to this phenomenon. In our study, we reconstruct the pre- and post-failure topographies using SFM (structure from motion) applied on archive aerial photographs. Based on the comparison of these digital elevation models, we estimate the volume of material eroded to be ca. 0.63 Mm3.

Groundwater level increase, part of the triggering mechanism, is hindcast in the catchment of the gully using a lumped hydrological model. This model shows that in only a fortnight the groundwater level probably rose by 36 m, which could have caused a progressive increase in pore pressure and triggered formation of the gully by retrogressive landslides. We test this hypothesis by considering the pre-failure topography and the hindcast groundwater level in a deterministic model based on limit equilibrium equations to explore ground stability. The evolution of ground stability with a rise in the water table shows that the gully may have extended in a headward direction by retrogressive landslides.
This is the first quantitative reconstruction of an exceptional historical event affecting the territory of Reunion Island. The methods used to investigate the Ravine de L'Eglise incision thus offer new complementary insights and challenges for understanding the mechanism and the temporality of gully formation.

Mots-Clés: gully, cyclonic rainfall, archive aerial photographs, structure from motion, hindcast historic groundwater level, lumped hydrological model, slope stability model, headward retreat, Reunion Island

*Intervenant
†Auteur correspondant: b.aunay@brgm.fr

Rainfall thresholds assessment for shallow rainfall-induced landslides: a case study in the Alpes Maritimes region, France

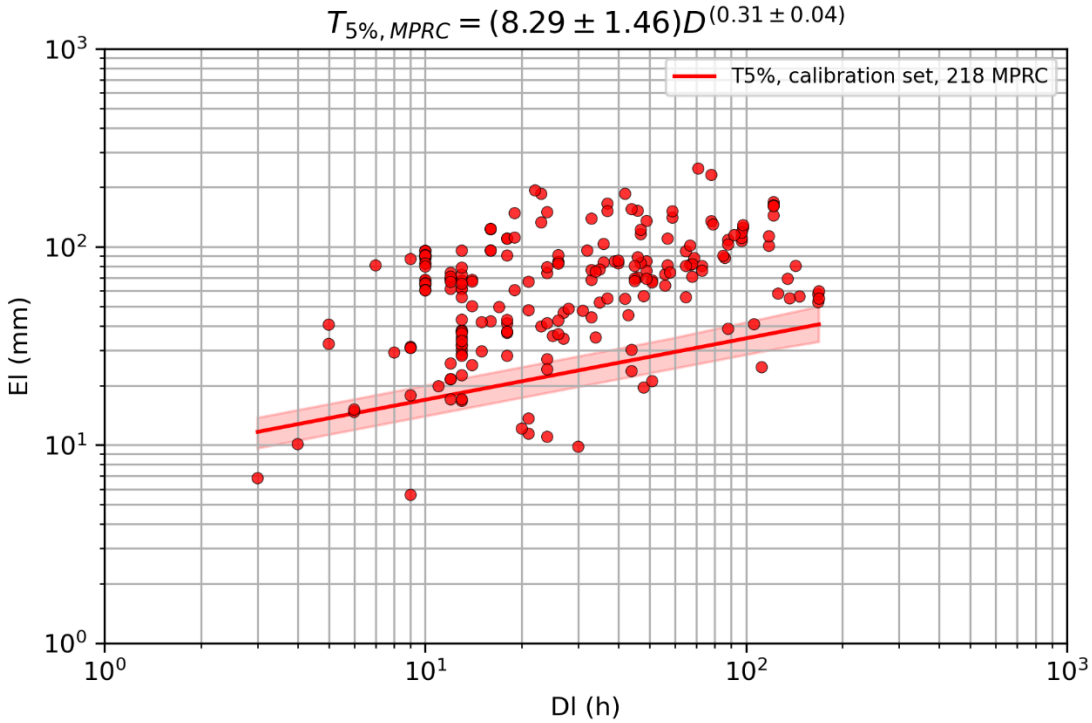
Rainfall triggering of shallow landslides is addressed in this work with a case study for the Alpes-Maritimes region (France), employing the probabilistic tool of rainfall thresholds (Caine 1980).

Our methodology for estimating landslide rainfall thresholds, tailored to the Alpes-Maritimes context, makes use of an automatic algorithm. This represents a first step towards an operational Landslide Early Warning System (LEWS).

The CTRL-T algorithm (Melillo and al. 2018) is used to output rainfall thresholds for different exceedance probabilities from a regional landslide dataset and two national climate datasets. The first climate dataset stores high resolution gridded rainfall data (1km resolution, hourly), and consequently provides the rainfall records directly used for the threshold construction. A second dataset contains lower resolution gridded rainfall, snow, temperature and evapotranspiration data (8km resolution, daily), permitting to assess the region's climate via parameters imported in CTRL-T.

Several improvements are made to the method. First, potential evapotranspiration values approximated from temperatures and latitudes in one of the process' steps are replaced by local values, the result accounting best for the regional climate. Then, climate-specific duration values used to split the raw rainfall record in events and sub-events are computed separately for each mesh point. This second modification enabled considering the heterogeneity of the Alpes-Maritimes climate.

Rainfall thresholds are obtained for different exceedance probabilities, first from a set of probable conditions (MRC), then from a set of highly probable conditions (MPRC).



Scatterplot in the rainfall duration/cumulated rainfall space of Most Probable Rainfall Conditions (MPRC) and MPRC T5% threshold

The thresholds are then validated using a method designed by Gariano and al. (2015). The validation process strengthens the analysis as well as enables to identify best performing thresholds. This work

(Barthelemy et al., 2022), represents a scientific progress towards landslide reliable warning systems by (a) making a case study of probabilistic E, D rainfall thresholds for Alpes-Maritimes, (b) using high-resolution rainfall data and (c) adapting the method to climatically heterogeneous zones.

Caine N (1980) - The Rainfall Intensity - Duration Control of Shallow Landslides and Debris Flows. Geografiska Annaler Series A, Physical Geography 62:23–27. https://doi.org/10.2307/520449

Gariano, S. L., Brunetti, M. T., Iovine, G., Melillo, M., Peruccacci, S., Terranova, O., Vennari, C., and Guzzetti, F.: Calibration and validation of rainfall thresholds for shallow landslide forecasting in Sicily, southern Italy, Geomorphology, 228, 653–665, https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.10.019, 2015.

Melillo M, Brunetti MT, Peruccacci S, et al (2018) - A tool for the automatic calculation of rainfall thresholds for landslide occurrence. Environmental Modelling & Software 105:230–243. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.03.024

S. Barthelemy, S. Bernardie, G. Grandjean (2022) - Assessing rainfall triggering of shallow landslides with an automatic tool generating rainfall thresholds: a case study in the Alpes Maritimes region, France, *submitted to Landslides*

Les glissements de terrain de la bordure méridionale du plateau du Larzac.

Kévin Elkharrat[1], Catherine Homberg[1], Sara Lafuerza[1]
Institut des Sciences de la Terre de Paris, ISTeP, Paris, France[1]

Introduction

Le plateau carbonaté du Larzac, qui s'étend de Millau (Aveyron) à Lodève (Hérault), est sujet sur ses bordures à de nombreuses instabilités de pente allant du basculement de roche à d'importants glissements rotationnels rocheux. Du fait de leur taux de glissement extrêmement lents, ces grandes instabilités rotationnelles restent mal comprises notamment en termes de géométrie et de dynamique. Notre étude se concentre sur plusieurs glissements de ce type, situés dans deux vallées : la Lergue et le Laurounet. Un de ces mouvements de terrain près du village de Pégairolles-de-l'Escalette et de l'autoroute A75 montre une activité avec un faible taux de glissement de 3mm/an (Denchik et al., 2019) et fait l'objet d'une surveillance géophysique *in situ* (puits d'observations de l'Observatoire Multidisciplinaire des Instabilités de Versant, OMIV). L'objective de ce travail est d'étudier les mécanismes de déclenchement impliqué dans la phase initiale et de déterminer les conditions mécaniques en tenant compte du faible taux de glissement actuel. La méthodologie appliquée inclut les simulations numériques 2D de la rupture basée sur les modèles géologiques et les données de terrain (Rock Mass Rating et résistance compressive uniaxial à partir du marteau de Rockschmidt et l'orientation des joints).

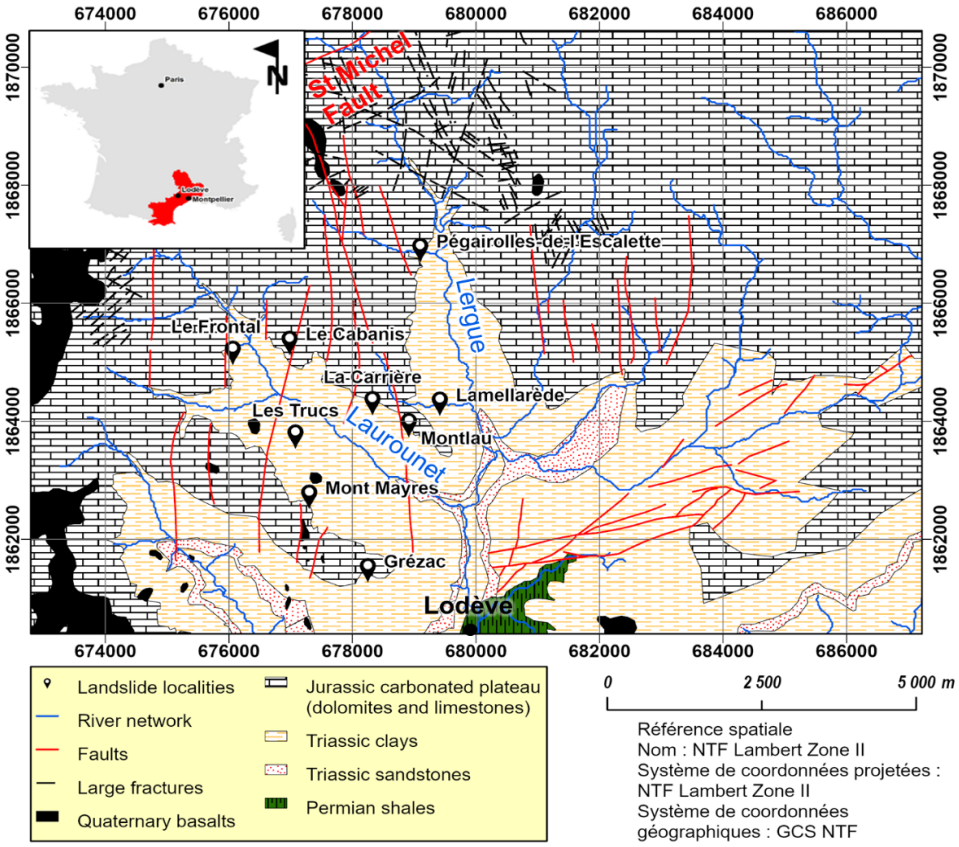


Figure 1 – Carte géologique simplifié de la zone d'étude avec une carte de la France indiquant la plus grande ville étant Lodève situé dans le Languedoc indiqué en rouge. Cette carte montre globalement un plateau carbonaté du Jurassique surplombant des argiles du Trias et des grès également du Trias. La localité des glissements est indiquée par des puces grises et les failles majeures en rouges.

Contexte géologique

Les glissements rotationnels de cette étude affectent des roches sédimentaires allant du plateau carbonaté Jurassique (Hettangien) au grès médian du Trias (Ladinien) en passant par des argiles à évaporites du Trias (Norien) (Fig. 1). La présence de plusieurs glissements à priori similaires dans la zone (Lauroux, Mont Mayres, Montlau…) suggère des facteurs (de cause) communs. Les unités carbonatées sont marquées par une fracturation importante spécialement au-dessus du village de Pégairolles-de-l'Escalette (cf. large fractures, Fig. 1).

Données de terrain et Résultats

Les relevés de l'orientation des joints ont montré que l'unité carbonaté de l'Hettangien est coupée par un réseau dense de fractures. Au total 321 mesures de fractures sur 10 localités différentes, incluant des unités glissées ou non, ont été réalisées sur cette même unité. Ces mesures ont attesté aucune variation significative de direction entre toutes les localités. Trois familles sont présentes : les plans de stratification, des joints subverticaux de direction NNW-SSE reliée à l'orogenèse pyrénéenne et WSW-ENE corrélée à l'extension liasique. La classification du Rock Mass Rating (RMR) fut appliquée afin de contraindre les paramètres mécaniques caractérisant ce massif pour les scénarios de modélisation. Grâce à cela, deux critères de ruptures ont été utilisés : Hoek-Brown et Mohr-Coulomb (Hoek, 1990). Les paramètres obtenus pour les carbonates sont de 3,2 MPa pour la cohésion, 37° pour l'angle de friction et 25 GPa pour le module d'Young. A cause du manque d'affleurement sur les argiles du Norien, des données de la littérature et du puits de l'OMIV à Pégairolles-de-l'Escalette furent utilisées. D'autre part, la cohésion et le module d'Young obtenus pour les carbonates à l'aide de la classification RMR sont bien plus faibles que ceux issus de la littérature, de l'ordre de 90% pour la cohésion et 40% pour le module d'Young. Quant à l'angle de friction, peu de différence s'observe lors de la comparaison. Ces différences de valeurs démontrent un effet d'échelle liées à la présence des discontinuités dans le massif.

La cartographie et la photogrammétrie réalisées sur des glissements étudiés démontrent plusieurs surfaces de rupture (jusqu'à 3), se traduisant par plusieurs blocs basculés à contre pente. Ces surfaces de ruptures s'enracinent dans les argiles à évaporites du Trias s'étendant jusqu'à la rivière la plus proche et reprennent les fractures dans leur partie sommitale. En prenant en compte le mouvement constant lent de 3mm/an du glissement de Pégairolles-de-l'Escalette, et avec le rejet identifié de 100m il faudrait pour ce glissement environ 33000 an pour arriver de l'état initial à l'actuel. Cette hypothèse reste à valider par des datations des surfaces de rupture exposées par la méthode des isotopes cosmogéniques (^{36}Cl). Cet ensemble de données a permis de préciser le modèle géologique qui couplé aux données mécaniques définissent un modèle géotechnique nécessaire pour la modélisation de la rupture. D'autre part, une topographie pré-glissement a été construite pour simuler la rupture pré-glissement pour le cas d'étude de Pégairolles-de-l'Escalette.

Grâce aux modèle géotechnique plusieurs scénarios de rupture prenant en compte le modèle de comportement mécanique (Hoek Brown et Mohr-Coulomb), les contrastes lithologiques et une surface de rupture, ont été effectués pour la topographie pré-glissement et actuelle. L'effet de l'eau a été testé en considérant le massif complètement saturé. La simulation de la rupture fut effectuée par le logiciel OPTUMG2 en éléments finis, par l'analyse limite dite de Strength Reduction Factor analogue à un facteur de sécurité. Pour l'ensemble des scénarios simulés (topographie actuelle et pré-glissement), les résultats montrent l'importance de la considération

de surface de rupture préexistantes, du niveau piézométrique, du comportement mécanique et de la lithologie. En effet ces différents facteurs vont abaisser le facteur de sécurité sans atteindre cependant un état d'instabilité. Les plus fortes baisses de ce facteur de sécurité se font lorsqu'on considère les contrastes lithologiques et la combinaison de l'ensemble des facteurs cités plus haut. Cette baisse s'accentue notamment lorsqu'on considère la topographie pré-glissement marquée par une pente plus critique que celle observée de nos jours.

Conclusions préliminaires

La cartographie et la photogrammétrie des glissements ont permis de construire une surface pré-glissement et de préciser leur structure. Les simulations numériques sur l'ancienne et l'actuelle topographie démontrent l'importance de considérer plusieurs facteurs prédisposants (joints, lithologies) et facteurs déclenchants (gravité, eau). « L'estimation de terrain » des paramètres du massif rocheux s'est montrée plus appropriée pour ces glissements évoluant dans les unités géologiques fracturés. Par conséquent, ce travail a permis de quantifier à minima un possible effet d'échelle sur la caractérisation des paramètres mécaniques, notamment sur la cohésion et le module d'Young par la considération des discontinuités.

Références :

Bieniawski, Z. T. (1993) Classification of Rock Masses for Engineering: The RMR System and Future Trends, in Rock Testing and Site Characterization. Elsevier, pp. 553–573. doi: 10.1016/B978-0-08-042066-0.50028-8.

Denchik, N. et al. (2019) In-situ geophysical and hydro-geochemical monitoring to infer landslide dynamics (Pégairolles-de-l'Escalette landslide, France), Engineering Geology, 254, pp. 102–112.doi: 10.1016/j.enggeo.2019.04.009.

Hoek, E. (1990) Estimating Mohr-Coulomb Friction and Cohesion Values from the Hoek-Brown Failure Criterion, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 27(3), pp. 227–229

Characterization of volume - runout relationships for large-scale rock avalanches at La Reunion Island (France)

Margaux Flipo-Houzé*[2,1], Clara Levy*[3], Marie Chaput*[4], and Marc Peruzzetto*[1]

[2]Université de Montpellier – Université de Montpellier et MBS – Montpellier, France
[1]Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) – BRGM - Direction des Risques et de la Prévention – Orléans, France
[3]Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) – BRGM Direction Risques et Prévention – Orléans, France
[4]Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) – Saint-Denis, La Réunion

Résumé

We study the runout hazard for large-scale rock avalanches (volume $\geq$ 10ˆ5 m3) on La Reunion Island. The topography of this volcanic island of 2512 km^2 is structured by the three cirques of Cilaos, Salazie and Mafate. These cirques are delimited by remparts that can reach a height of 1000 m, for a total length of about a hundred kilometres. These vertical to sub-vertical cliffs regularly experience large-scale collapses: about thirty destabilizations of volumes between 10,000 m3 and 50,000,000 m3 have been identified between 1875 and 2020. The rock avalanches affecting these remparts threaten infrastructures and populations located at the cliff foots. The most deadly historical event was the collapse at Grand Sable in 1875, with a volume of about 18,000,000 m3 and a runout length of about 2 km, which buried a hamlet of 62 people. Considering the strong demographic and land pressure at La Reunion Island, it is important to be able to estimate as accurately as possible the runout distances of this type of event.
Empirical laws relating runout distances and volumes were derived for rock avalanches (Corominas 1996; Mitchell et al. 2020). However, these databases contain only few events that occurred in a volcanic context. The aim of this study is to appraise if these laws are suitable to estimate runout distances in a volcanic context, in particular by comparing them with empirical laws deduced from a database of rock avalanches exclusively in a volcanic context.

For this study, we used several databases :

- A general database compiling 386 events from the literature (Corominas (1996), Mitchell et al (2020), Lucas et al.(2014)), These events are of various types (debris avalanches, rockfalls, rock avalanches confined or unconfined) and lithologies, including few events in volcanic context

- A database containing exclusively rock avalanches and rockfalls from various lithologies (Corominas (1996), Mitchell et al (2020), Lucas et al.(2014))

*Intervenant

- A database containing exclusively rock avalanches in volcanic context. This database contains 22 events : 14 are extracted from the literature, 8 are historical large-scale rock avalanches from La Réunion Island.

The 8 events from La Réunion have been investigated in detail with Digital Elevation Models (DEM) and Orthophotos, from which we determined the runout distances, the fall heights and the volumes of collapsed material. The Heim's ratio is computed by dividing the fall height by the runout length

From these databases, we distinguished three log-linear laws relating the Heim's ratio to the landslide volume: the first one considering the entire database, the second one considering rock avalanches only, and the third one considering rock avalanches in volcanic context only. We compare these laws to two existing empirical laws, those of Corominas (1996) and Mitchell et al. (2020).

The results of the study show that rock avalanches in volcanic contexts are less mobile than in other lithological contexts when the volume involved is less than 10ˆ8 m3.

Specifically for La Reunion Island, we show that the eight historical events are best described by the empirical law deduced from the database of rock collapses in volcanic context. This result is important to quantify and map the runout hazard. Indeed, the use of an ill-suited empirical law would lead to over or under-estimate of the reach probability, and therefore could significantly change the geometry of the areas associated with a strong, medium or weak runout hazard.

This study is part of a project entitled "Triggering and runout conditions of large-scale rock avalanches at La Réunion Island" co-funded by the DEAL Reunion and BRGM

REFERENCES

Corominas, J. " The angle of reach as a mobility index for small and large landslides ". *Canada géotechnique* 33 (1996): 12.

Lucas, A., A. Mangeney, et J.-P. Ampuero. " Frictional Velocity-Weakening in Landslides on Earth and on Other Planetary Bodies ". *Nature Communications* 5, no 1 (2014): 3417. https://doi.org/10.1038/ncomms4417.

Mitchell, A., S. McDougall, N. Nolde, M.-A. Brideau, J. Whittall, et J. B. Aaron. " Rock Avalanche Runout Prediction Using Stochastic Analysis of a Regional Dataset ". *Landslides* 17, no 4 (2020): 777-92. https://doi.org/10.1007/s10346-019-01331-3.

Mots-Clés: landslide hazard, rock avalanche, volcano, runout, Heim's ratio

Landslides risk mapping using the Vigirisks web-tool: application in Normandie (France).

G.Grandjean, Y.Thiery, Hohmann, C.Negulescu, F.Smai (BRGM), O.Maquaire (Univ. Caen)

Abstract – Landslides threaten many parts of the world and cause many deaths and significant damage every year, and this should increase in the future due to climate change. To cope with this situation and prevent landslides impacts, a large variety of susceptibility and hazard mapping tools have been developed, either to assess current potential failure zones or to predict those that will appear in the near future. In the following, we present an application of the Vigirisks multirisks web-platform. This web-tools, developed by BRGM, propose computations allowing multi-risks mapping in a realistic manner, e.g., including cascading effects, vulnerability assessment and damages evaluation. The study site selected here is located in Diepe (Normandie, France); this is a typical case of complex flooding/landsliding processes. The Vigirisk web-tool was tested to evaluate risks when these two processes occur in the same time. We present here a simple "concomitant risks" workflow, implemented by using a weithing method.

Introduction

Landslides threaten many parts of the world and cause many deaths and significant damage every year, and this should increase in the future due to climate change. Landslides events are widely distributed throughout Europe, with a great concentration in mountainous areas. For example, between 1995-2014, 476 landslides caused 1370 deaths and 784 injuries. Annual economic loss in Europe is approximately estimated to 4.7 billion Euros (Haque et al., 2016).

To cope with this situation and prevent landslides impacts, a large variety of susceptibility and hazard mapping tools have been developed, either to assess current potential failure zones (Rossi et al., 2010; Reichenbach et al., 2018) or to predict those that will appear in the near future (Bernardie et al., 2021). A broad review of commonly used approaches can be found in Corominas et al. (2014) or in Reichenbach et al. (2004). Depending on the available data and its quality, we can use indirect empirical or data driven and physically based methods (Thiery et al., 2020).

In the following, we present an application of the Vigirisks multirisks web-platform (Tellez-Arenas, 2019). This web-tools (www.vigirisks.fr), developed by BRGM, has the ambition to propose a set of computations – implemented as workflows – allowing multi-risks mapping in a realistic manner, e.g., including cascading effects, vulnerability assessment and damages evaluation. The user can therefore realize several kinds of risks maps resulting from different kinds of hazard occurrence. In the present paper, we illustrate the case of a simple concomitant risks workflow occurring in the area of Dieppe (Normadie, France).

Data and method

The site selected in our study is located at the northern part of France, close to the city of Dieppe (Normandie, France); this is a typical case where complex flooding/landsliding processes can be observed, due to the particular geological settings and the occurrence of forcing rainfalls.

Different methods of analysis and mapping of the flooding or landslide hazard have been implemented in the Vigirisk plateform. The aim here is to show the possibilities offered by the original architecture of this web-tool in terms of single and multi-hazard analysis. Concerning landslides risks assessment, we already implemented and tested different algorithms, such as:

- The hierarchical analytical process technique (AHP): an empirical indirect method (Saaty, 1977) used for about fifteen years for mapping landslide hazard (Castellanos Abella and van Westen, 2008).
- The weight of evidence (WoE) method: a data-driven approach (Bonham-Carter, 1994). It needs to get sufficient data available to estimate the relative importance of evidential rules via the log-linear form Bayesian formulation (Spiegelhalter, 1986). It defines unconditional prior probability and conditional posterior probability, where the prior probability is the probability of an event, similar to past known events, for a given time period. This probability can be revised from various sources of information, to define the posterior probability and so, it can be successively revised and updated with the addition of new evidence.
- A damage indicator used to spatially evaluate risks caused by landslides and quantify potential multiscale consequences of elements at risk (EaR) when impacted by hazardous events. It extends the notion of Potential Damage Index (PDI) from Puissant et al. (2013) and Graff et al. (2019) by taking into account the specific number and nature of criteria to be integrated in the consequences analysis and weight them based on their spatial location or importance. In this way, it adapts and improves the PDI method to the context of our study by integrating spatial scales of EaR, taking advantage of the different geographical databases available.

In this paper, we only show the results of risk map obtained by a workflow to assess concomitant risk maps obtained with pre-existing hazard maps coupled with the extended PDI risks assessment approach. The concomitant effects are based on a predefined procedure specifically implemented to guide end-users. The concomitant risk map (CRC) obtained is therefore a weighted sum of these two risk maps with the possibility of predominance of the intensity of one risk over the other (0.75 vs. 0.25) or no predominance of one risk over the other (0.5 vs. 0.5).

From a computing point of view, Vigirisks is designed with a frontend Java-web connected to a backend server. The GUI is implemented as developed from various open source tools (Tellez-arenas et al., 2019). The OpenLayers JavaScript library allows the display and manipulation of produced maps. The backend server produces WPS services and uses a Postgres database for data management, scenarios translated into workflows, input parameters and simulation results (Fig.1). To operate such IT architecture a specific WebGIS interface was developed following the philosophy presented in Thiebes et al. (2013).

Results and conclusion

Figure 2 shows the CRC obtained after the realization of the workflows that combine, using a weighing approach, a landslide susceptibility map computed with AHP (Fig.2b) and a flooding map obtained by numerical modelling (Graff, 2020; Fig.2a). For the combination, each of the risk values of these maps where taken into account with the same weight of 0.5.

The resulting multi-risk map (Fig.2c) show the places where both of hazards could have an impact on assets located in the area. The level of risks appear to be generally medium over all the area with some places in low and high.

Even the combination of different kinds of risks can be interesting to have a global view of what could append in terms of damages in case of concomitance of several disasters, we see that some choice have to be made in the combination: we could have chosen to aggregate the two risks maps by taking the maximal value of each map's pixels, the result would have been different, increasing the areas impacted with the flooding.

The advantage of the Vigirisks platform lies in the different possibility to design the workflows, to adapt them for the particularities of scenarios, so that the user can produce a processing chain adapted to its field observations. Each if these workflows are stored and commented in the system so that they can be disseminated to all interested users.

In the following developments, we are considering integration of additional susceptibility/hazard assessment approaches as well as different strategies to combine them, depending on time/space concomitance or cascading affects are needed to be taken into account.

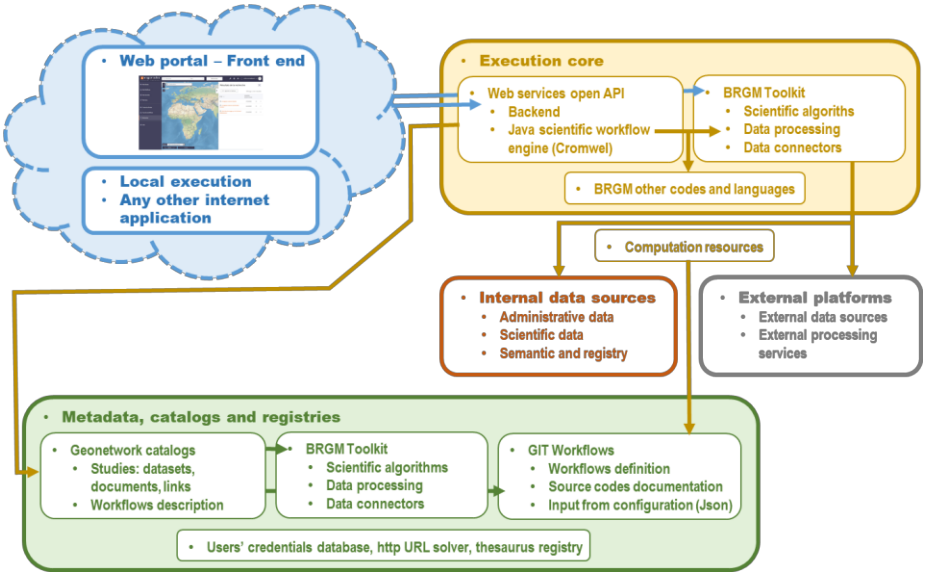


Figure 1: Vigirisks architecture

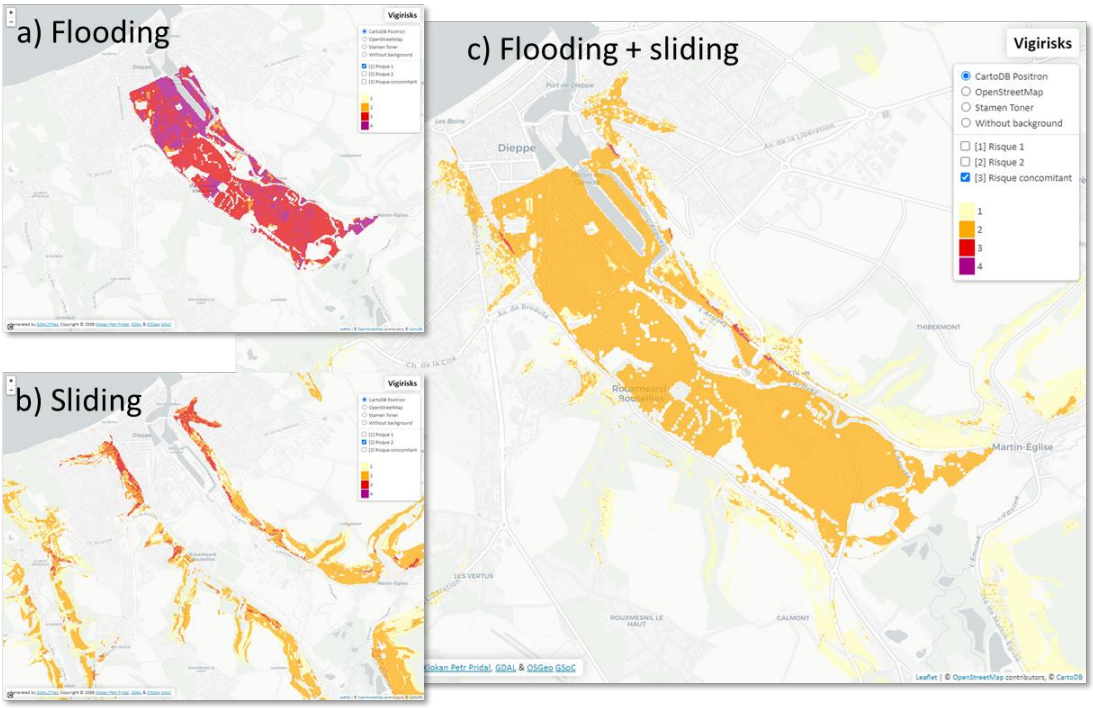


Fig.2: Resulting multi-risk maps from the Vigirisk workflow "concomitant risk": a) flood risks, b) sliding risks, and c) flooding + sliding risks.

References

Bernardie, S., Vandromme, R., Thiery, Y., Houet, T., Grémont, M., Masson, F., Grandjean, G., and Bouroullec, I.: Modelling landslide hazards under global changes: the case of a Pyrenean valley, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 21, 147–169

Bonham-Carter, G.F., 1994. Geographic Information System for Geoscientists: Modelling with GIS. Pergamon Press, Oxford. 398 pp.

Castellanos Abella, E.A., van Westen, C. 2008. Qualitative landslide susceptibility assessment by multicriteria analysis: A case study from San Antonio del Sur, Guantánamo, Cuba. Geomorphology, 94, 3–4, 453-466. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.10.038

Corominas, J, van Westen, C, Frattini, P, Cascini, L, Malet, JP, Fotopoulou, S., Catani, F., Van Den Eechaut, L, Mavrouli, O, Agliardi, F, et al. (2014). Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. Bulletin of Engineering Geology and Environment, 73: 209–263.

Graff, k, Lissak, C., Thiery, Y., Maquaire, O., Costa, S., Medjkane, M., Laignel, B. 2019.. Characterization of elements at risk in the multirisk coastal context and at different spatial scales: Multi-database integration (Normandy, France).. Applied Geography, Elsevier, 111, pp.102076. DOI : 10.1016/j.apgeog.2019.102076

Graff, K., 2020. Contribution à la cartographie multirisques de territoires côtiers : approche quantitative des conséquences potentielles et des concomitances hydrologiques (Normandie, France). PhD, Univ Caen, France, 425p.

Haque, U., Blum, P., Da silva, A.P.F., Keellings, D., 2016. Fatal landslides in Europe, Landslides 13, 6, 1545–1554.

Puissant, A., Van Den Eeckhaut, M., Malet, J.-P., Maquaire, O., 2013. Landslide consequence analysis: a region-scale indicator-based methodology. Landslides 11, 843–858.

Reichenbach, P., Galli, M., Cardinali, M., Guzzetti, F. & Ardizzone, F. (2004) Geomorphological mapping to assess landslide risk: concepts, methods and applications in the Umbria Region of Central Italy. In : Glade, T., Anderson, M. G., Crozier, M. (eds), Landslide hazard and risk : 429–468.

Reichenbach P., Rossi M, Malamud BD, Mihir M, Guzzetti F, 2018. A review of statistically-based landslide susceptibility models. Earth-Science reviews 180: 60-91.

Rossi, M., Guzzetti, F., Reichenbach, P., Mondini, A.C., Peruccacci, S., 2010. Optimal landslide susceptibility zonation based on multiple forecasts. Geomorphology 114 (3), 129–142.

Saaty TL, 1977. A scaling method for priorities in hierarchical structures. J. of Math. Psychology 15: 234-281.

Spiegelhalter, D.J., 1986. A statistical view of uncertainty in expert systems. W. Gale (Ed.), Artificial Intelligence and Statistics, Addison-Wesley, Reading, 17-55

Tellez-arenas, A. Hohmann, A. Quentin, A. Negulescu, C. Smaï, F., 2019. A web platform for storing, sharing and executing scientific workflows for Natural Risk Assessment: part 2 - description of an interoperable architecture based on open-source components. Geophysical Research Abstracts . 2019, Vol. 21, p1-1. 1p.

Thiebes, B., Bell, R., Glade, T., Jäger, S., Anderson, M. and Holcombe, L., 2013. A WebGIS decision-support system for slope stability based on limit-equilibrium modelling, Engineering Geology, 158, 109-118.

Thiery, Y.; Terrier, M.; Colas, B.; Fressard, M.; Maquaire, O.; Grandjean, G.; Gourdier, S. Improvement of landslide hazard assessments for regulatory zoning in France: STATE–OF–THE-ART perspectives and considerations. Int. J. Disaster Risk Reduct. 2020, 47, 101562. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2020.101562

How does anisotropy control rock slope deformation? A discrete element modelling investigation

Marius Huber*†[1], Luc Scholtès*[2], and Jérôme Lavé[1]

[1]Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques – Université de Lorraine, Institut National des Sciences de l'Univers : UMR7358, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR7358 / UPR2300 / EP2031 / UPR9046 – CNRS / Université de Lorraine, 15 rue Notre-Dame des Pauvres, 54500 Vandoeuvre-les-Nancy, France

[2]Laboratoire Magmas et Volcans – Institut National des Sciences de l'Univers : UMR6524, Institut de Recherche pour le Développement et la société : IRD163, Centre National de la Recherche Scientifique : UAR833, Université Clermont Auvergne : UMR6524, Observatoire de Physique du Globe de Clermont-Ferrand – Campus Universitaire des Cézeaux, 6 Avenue Blaise Pascal, 63178 Aubière Cedex, France

Résumé

Deep-seated failures of rock slopes, both in the form of rapid rockslides (e.g., Clastonbury and Fell, 2010) or slow-moving landslides (e.g., Crosta et al., 2013), are partly controlled by structural, lithological and topographical factors. Among other structural factors, layering, schistosity and foliation in rock material, which could be described as inherent material anisotropy, affect the initiation and evolution of deep-seated slope deformation in sedimentary and metamorphic rocks. However, there is currently no quantitative or even conceptual framework that clearly defines the parametric role of anisotropy on the occurrence and type of landslides. Numerical modelling approaches are widely used to link the impact of mountain-slope-scale rock-mechanical parameters and slope geometry on the stability and failure behaviour of rocky slopes (e.g., Katz et al., 2014; Spreafico et al. 2021), but very few have explored the influence of material anisotropy on slope stability. In order to address this important issue, we carry out a parametric study using a discrete element model implemented in the open source YADE DEM platform (Šmilauer et al., 2021).
After a validation test performed with an isotropic material, where we compare our numerical approach to an analytical slope stability solution (Leshchinsky et al.,1985), we introduce anisotropy (transverse isotropy) in our model by inserting preferentially oriented and weakened bonds between discrete elements (a weakness plane) as proposed by Dinç and Scholtès (2018).

The introduction of these oriented and weakened bonds allows us to adequately reproduce in numerical triaxial tests the variations of strength of anisotropic rocks (shales, gneisses,...) as a function of the orientation of the weakness plane with respect to the maximum stress. In order to explore the stability of mountain slopes, we make the hypothesis that the transposition of this behaviour on a large scale can be done essentially by degrading the material strength without modifying the formalism to introduce numerically the anisotropy. Working

*Intervenant

†Auteur correspondant: marius.huber@univ-lorraine.fr

on simple geometries (1000m high slope-step, ridge or valley), we then explore the influence of the weakness plane's orientation on failure occurrence and volume. Using a strength reduction technique where the interparticle strength components are progressively reduced up to failure (Bonilla-Sierra et al., 2015), we estimate for each studied case the required material strength that causes failure.

We show that certain orientations of the weakness plane relative to the topographic slope favour deep-seated deformation. We also observe significant disparities in material strength at failure, failure surface localization, and mobilized volume depending on the weakness plane orientation. For instance, the largest mobilized volumes are observed when the weakness plane rises 10◦ to 30◦ less than the slope angle and with an interparticle strength reduced less than for the other weakness plane orientations. These instabilities are associated with well-localized deformation at depth which produces morphological features that are commonly described along mountain ridges in association with slow-moving and deep-seated rock slope failures (e.g., Pánek and Klimeš, 2016).

Our results might help explain the appearance or absence of deep-seated failures in mountainous areas depending on the respective orientation relationship between the topography and the layering/foliation, and allow to better assess slope failure hazard induced by anisotropic rock strength.

We then compare the results of our modelling with natural cases of deep-seated failures, which occurred in the central Himalayas, where we conducted a field study, or at a more global scale from existing literature. Whereas in many places, anisotropic substrate seem indeed to be of primary importance in guiding slope failures or in controlling mountain valleys asymmetry. A few investigated Himalayan cases suggest that the degree of anisotropy in gneissic lithologies might not be sufficient for anisotropy to control failure direction.

References

Bonilla-Sierra, V., Scholtès, L., Donzé, F.V., and Elmouttie, M.K., 2015, Rock slope stability analysis using photogrammetric data and DFN–DEM modelling: Acta Geotechnica, v. 10, p. 497–511, doi:10.1007/s11440-015-0374-z.

Crosta, G.B., Frattini, P., and Agliardi, F., 2013, Deep seated gravitational slope deformations in the European Alps: Tectonophysics, v. 605, p. 13–33, doi:10.1016/j.tecto.2013.04.028.

Dinç, Ö., and Scholtès, L., 2018, Discrete analysis of damage and shear banding in argillaceous rocks: Rock Mechanics and Rock Engineering, v. 51, p. 1521–1538.

Glastonbury, J., and Fell, R., 2010, Geotechnical characteristics of large rapid rock slides: Canadian Geotechnical Journal, v. 47, p. 116–132, doi:10.1139/T09-080.

Katz, O., Morgan, J.K., Aharonov, E., and Dugan, B., 2014, Controls on the size and geometry of landslides: Insights from discrete element numerical simulations: Geomorphology, v. 220, p. 104–113, doi:10.1016/j.geomorph.2014.05.021.

Leshchinsky, D., Baker, R., and Silver, M.L., 1985, Three dimensional analysis of slope stability: International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, v. 9, p. 199–223, doi:10.1002/nag.1610090302.

Pánek, T., and Klimeš, J., 2016, Temporal behavior of deep-seated gravitational slope deformations: A review: Earth-Science Reviews, v. 156, p. 14–38, doi:10.1016/j.earscirev.2016.02.007.

Smilauer, V. et al., 2021, Yade documentation: The Yade Project, doi:10.5281/zenodo.5705394.

Spreafico, M.C., Sternai, P., and Agliardi, F., 2021, Paraglacial rock-slope deformations: sudden or delayed response? Insights from an integrated numerical modelling approach: Landslides, v. 18, p. 1311–1326.

Mots-Clés: modélisation numérique, stabilité des pentes, glissement de terrain profond, mécanique des roches, rupture de pente

Reconstruction et vérification des conditions de déclenchement du glissement de l'Hermitage aux falaises des Vaches Noires (Normandie)

Mohamed Kouah[1,2], Yannick Thiery[1], François Nicot[3], Antoine Wautier[4], Olivier Maquaire[2]

[1] Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), Orléans, France
[2] NORMANDIE UNIV, UNICAEN, CNRS, IDEES, 14000 CAEN, France
[3] INRAE, Université Chambéry, Université Savoie Mont Blanc, Laboratoire EDYTEM, UMR 5204, 5 bd. de la Mer Caspienne, 73376 Le Bourget-du-Lac, France
[4] INRAE, Université Aix-Marseille, UR RECOVER, 3275 Rte Cézanne, CS 40061, 13182, Aix-en-Provence Cedex 5, Marseille, France

Entre Houlgate et Villers-sur-Mer (Calvados, Normandie) sur 4,5 kilomètres, les falaises des Vaches Noires représentent un site au relief de badlands fortement actif en Normandie. L'évolution y est caractérisée par l'action de processus subaériens continentaux et marins (Cruden & Varnes, 1996 ; Maquaire & Malet, 2006). Différents types d'instabilités gravitaires sont observés : des glissements rotationnels, translationnels et complexes, accompagnés de chutes de blocs calcaires/crayeux se produisant en partie amont des falaises. À l'aval, la morphologie chaotique est affectée par des coulées boueuses argileuses aux dynamiques et aux modalités d'extensions diverses (Auger & Mary, 1968 ; Elhaï, 1963 ; Medjkane *et al.,* 2018 ; Roulland *et al.,*2019 & 2021).

Si le tracé général du trait de côte (base des falaises) est globalement rectiligne et régulier avec quelques petites indentations locales, au droit du hameau de l'Hermitage en partie centrale des falaises (commune d'Auberville), le tracé présente une courbure bien marquée (convexité tournée vers le Nord) sur environ 200 m de longueur, avec la présence de blocs de dimensions plurimétriques « posés » sur l'estran parfois éloignés de 60 m du tracé actuel du pied de falaise (Fig. 1b). En corollaire, le tracé de l'escarpement principal en amont (limite du plateau) présente une nette concavité avec un rentrant d'une soixantaine de mètres au maximum dans son axe. Cette morphologie particulière est caractéristique d'un « grand glissement rotationnel profond » marqué par une évolution périodique attestée depuis 1759.

Cette étude vise à définir les conditions de déclenchement et à comprendre le comportement hydromécanique de ce grand glissement de l'Hermitage à partir de : 1°) la reconstruction d'un profil topographique interprétatif anté et post-glissement issue de l'analyse d'anciens documents (cartographies anciennes, photographies aériennes, …), puis 2°) la mobilisation/transposition/adaptation de résultats d'une précédente modélisation des conditions de déclenchement de glissements de terrain sous logiciel Flac2D®, affectant la corniche rocheuse du site expérimental SNO Dynalit[1]. Ce site est localisé à l'extrémité orientale des falaises des Vaches Noires, à une distance de 1,5 km au nord-est du glissement de l'Hermitage.

Pour répondre à cet objectif, l'analyse est scindée en deux étapes :

[1] https://www.dynalit.fr/

1°) La réalisation d'un profil interprétatif anté et post-glissement sur la base d'une approche diachronique mobilisant des documents d'âges et de précisions diverses : anciens documents datant du 18ème à la seconde moitié du 20ème siècle (plan Terrier, cadastre napoléonien, carte d'État-Major, photographies aériennes) et plus récent du début 21ème siècle (orthophotographies, levé LIDAR). Ce travail a été entrepris par comparaison des marqueurs morphologiques (escarpement principal, escarpement secondaire et escarpement basal) définis dans les travaux de Roulland *et al.,* 2019.

2°) La définition d'un modèle géotechnique conceptuel tenant compte de la géologie et de l'hydrologie (fluctuations des niveaux de nappe). Pour la réalisation de ce modèle géotechnique, il est nécessaire de tenir compte de, i) la dégradation des caractéristiques de résistances en fonction de la profondeur dû au phénomène de décompression des falaises ; ii) les volumes représentatifs de quelques mètres cubes, induisent une difficulté concernant le type et le nombre d'essais à réaliser afin d'obtenir des caractéristiques hydromécaniques de résistance représentatives. Des difficultés identiques ont été rencontrées sur le site DYNALIT pour obtenir des caractéristiques représentatives des couches géologiques. Afin de s'affranchir de cette difficulté, il a été décidé de réaliser :

- Un calage des paramètres, en s'appuyant sur des évènements de glissements de terrain pour lesquels on connait les conditions de déclenchement, avec la caractérisation de la surface de rupture obtenue par comparaison de deux modèles numériques de terrain (MNT) réalisés à l'aide de la photogrammétrie SfM (*Structure from Motion*). A travers cette démarche inverse nous cherchons à déterminer les paramètres de sol conduisant à l'apparition de la surface de rupture avec les paramètres préalablement enregistrés.
- Une simulation de Monte-Carlo pour tenir en compte de la distribution aléatoire et naturelle des caractéristiques de résistance des formations. Cette méthode consiste à échantillonner les paramètres d'entrée de manière aléatoire et à effectuer un calcul déterministe pour chaque combinaison de paramètres. Les résultats obtenus sont ensuite traités statistiquement pour obtenir l'information probabiliste pour N réalisations, c'est-à-dire : i) évaluer la probabilité de rupture, ii) déterminer la moyenne et un l'écart type des variables de sortie.

Le modèle géotechnique du glissement de l'Hermitage est construit à partir des résultats obtenus par le calage des paramètres géotechniques du site DYNALIT et des données géomorphologiques et hydrologiques du site. Pour définir les conditions de déclenchement du grand glissement de l'Hermitage et quantifier l'effet des facteurs déclenchants (variation du niveau de la nappe phréatique et ses effets sur la diminution des caractéristiques des matériaux), plusieurs étapes de modélisation sont nécessaires sous le logiciel Flac2D® : i) l'initialisation de l'état de contrainte dans le sol, ii) un calcul d'écoulement pour obtenir le champ de pression interstitielle dans le sol, iii) un calcul en contraintes effectives, iiii) une étude de sensibilité sur les caractéristiques de résistance au cisaillement.

Ainsi, la modélisation numérique permet de bien identifier les zones de plasticité (Fig. 1d) reproduisant une surface de glissement circulaire assez proche de celle proposée dans le modèle conceptuel (Fig. 1c) avec une nappe phréatique à une profondeur de 20 m/TN.

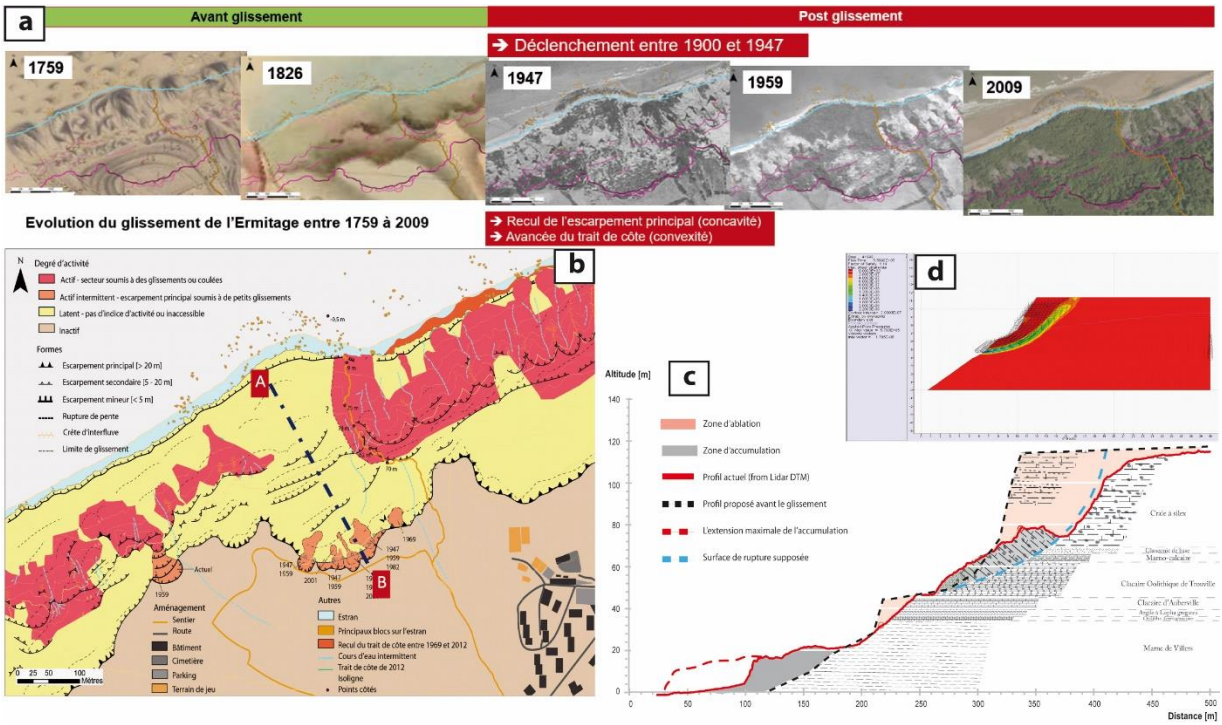


Figure 1 : Caractéristiques du glissement d'Hermitage sur les falaises des Vaches Noires à Auberville (Calvados, France) : **a).** Evolution du glissement de l'Ermitage sur fond de cartes et photographies aériennes vue sur les croquis morphologiques simplifiés de 1759 à 2009 représentée ; **b).** Carte morphodynamique de 2013 du secteur du glissement de l'Hermitage ; **c).** Modèle conceptuel anté et post-déclenchement du glissement de l'Hermitage (coupe A-B). ; **d).** Modélisation numérique sous logiciel Flac2D®.

Références

Auger, P., & Mary, G. (1968). Glissements et coulées boueuses en Basse-Normandie. Revue de Géo. Phy. et Géol. Dyn.(2), 10, 213-224.

Maquaire O., Afchain P., Costa S., Lissak C., Fressard M.,Letortu P., Davidson R., hiery Y. (2013) – Évolution à long terme des falaises des « Vaches Noires » et occurrence de glissements (Calvados, Basse-Normandie, France). Communications aux Journées 'Aléa Gravitaire', Grenoble, Recueil des actes des journées « Aléa Gravitaire », 7 p.

Medjkane M., Maquaire O., Costa S., Roulland T., Letortu P.,Fauchard C., Antoine R., Davidson R. (2018) – High resolution monitoring of complex coastal morphology changes: cross-eiciency of SfM and TLS-based survey (Vaches-Noires clifs, Normandy, France). Landslides, 15 (6), 1097-110.

Roulland, T., Maquaire, O., Costa, S., Compain, V., Davidson, R., & Medjkane, M. (2019). Dynamique des falaises des Vaches Noires : Analyse diachronique historique et récente à l'aide de documents multi-sources (Normandie, France). Géomorphologie : relief, processus, environnement, 25(1), 37-55. https://doi.org/10.4000/geomorphologie.12989

Roulland, T., Olivier, M., Costa, S., Medjkane, M., Davidson, R., Fauchard, C., & Antoine, R. (2021). Seasonal activity quantification of coast badlands by TLS monitoring over five years at the "Vaches Noires" cliffs (Normandy, France). Geomorphology, 400, 16. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.108083

Low cost data acquisition for investigating rockfall run-outs and statistical analysis

Frédérique Leblanc [1] (corresp. author), Vincent Couallier [2] & Dominique Daudon [3]

[1] *LJK-DATA UGA, 700 avenue centrale, IMAG - CS 40700, 38058 GRENOBLE cedex 9*
frederique.leblanc@univ-grenoble-alpes.fr
[2] *IMB-OPTIMAL, Université de Bordeaux vincent.couallier@u-bordeaux.fr*
[3] *3SR-Géomécanique UGA, BP53, 38041 GRENOBLE cedex 9*
dominique.daudon@univ-grenoble-alpes.fr

Abstract. In montain areas boulder falls have a significant risk of occuring and can cause heavy human and material damages. Hence it is important to estimate the maximal propagation distance of a rockslide. Herein are presented some résults obtained over experimental low coast data obtained on a reduced model, where main factors are controlled.

Keywords. Low coast experimental data, propagation distance, survival analysis, Weibull model, extreme quantiles

Résumé. Les chutes de bloc rocheux constituent un risque important dans les zones montagneuses. La trajectoire de chaque bloc est aléatoire et dépend de sa forme, de la topographie, et de nombreux autres facteurs. Les résultats présentés ici qui portent sur la distance de propagation maximale de l'un des blocs sont obtenus à partir de données acquises sur des essais, très peu coûteux, réalisés en laboratoire sur un modèle réduit et dans des environnements caractérisés par des facteurs contrôlés.

Mots-clés : données expérimentales à bas coût, distance de propagation, survie, modèle de Weibull, quantiles extrêmes

1 Introduction

Full-scale boulder fall real experiments are difficult to organize and expensive as demonstrated in the last C2ROP program (Bourrier&al 2020).Consequently, the lack of full documented data creates difficulties in evaluating the hazard and assessment of risks in the management of territories. Factors such as shape, initial velocity, initial orientation, or number of simultaneously thrown blocks may have great influence on run-outs and their effects can be statistically estimated.

Many tools and strategies are currently used to forecast run-outs. Whatever the learning method used to propose reliable estimations, are required data in larger number than the single real available historical data or those obtained with trials in real scale situation (like in carrier). Although some significant efforts are done to compile in some data base various and numerous historical events of rocksfall (see for ex. Eckert 2021), the huge diversity between described pasted events with respect to their low number makes very difficult model estimation that could

be reliable enough for prediction. However such a documentation is essential for calibrating parameters used in the algorithms that reach run-outs assessement.

Thus it is crucial to increase the volume of data which can be done in two ways : either by numerical simulations of trajectories using mechanics models and DEM algorithms (Bourrier 2022) but with some numerical coast increasing with the scale of the geographical studied site, or by acquisition of data (in laboratory) obtained over an experimental small scaled device (Daudon&al 2021).

Herein we propose a very low coast acquisition of data over a simple reduced model and some statistical analysis that permits to identify the factors that have the more significant effects on the run-outs and that should be investigated more precisely. When the complete acquisition process, including image processing and automatic enrichment of the data base, will be improved, various levels of the main interesting factors will be investigated. Then some forecast of maximum run-outs using regression models may be produced knowing the levels of factors (which qualify the rocks likely to fall and the environnemental conditions).

Further similitude studies will be next needed to apply the concept at realistic scales of engineering problems.

2 Experimental Device and Data

A simple scale model experimental system (see Figure 1 below), inspired by "Millau, Mizoen, and C2ROP" sites (Bourrier&al 2020, Cuervo&al 2015, Garcia&al 2020), was designed, and tested with repeated launches of various blocks over different substrates on a bi-planar academic slope of 45° (adjustable from 20° to 55°), the height of the free fall was 20 cm (adjustable from 10 cm to 30 cm).

At each essay are thrown n identical objects in some controlled conditions (shape of object, slope, fall-height...) that define a setup. Next is taken an image of the deposit area that is processed by suitable algorithm to retrieve the coordinates of the gravity centers.

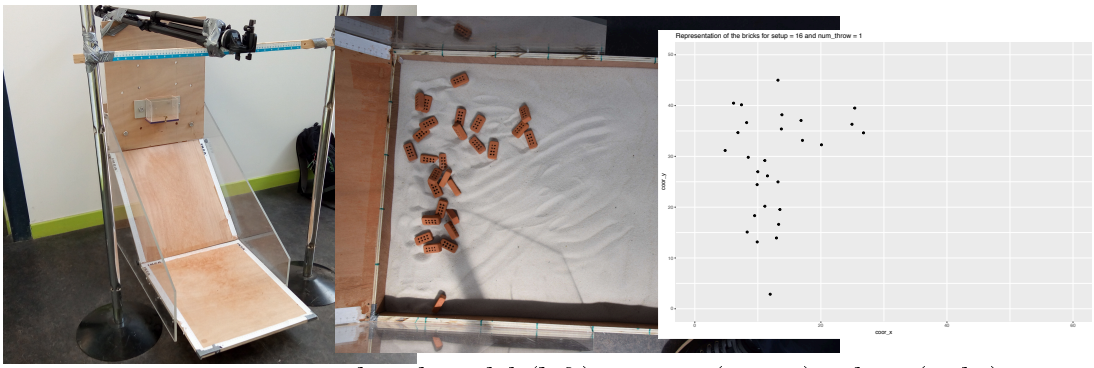


Figure 1 : reduced model (left) - image (center) - data (right)

The already various trials that have been done up to now are organised in a simple SQL data base (Piras 2019, Benlhabib 2021) describing the results of each essay. 22 different setups (each defined by some combination of factors levels) where tested and in each setup where repeated $N = 50$ launches of n objects ($n = 14, 28, 40$ or 42). After each launch a photo is taken.

The factors that caracterize a setup are the slope, the drop height, the materials of the slope and of the repository area, the shape and size of objects and their number n.

We present here some statistal results over the coordinate X_i (that gives the distance between the bottom of the slope and the stopping position of the block i). The study of Y_i that mesures the lateral deviation can be done in the same way but is not our main focus here.

3 Statistical Model and Results

From description of the data and study of the best models that could be used the Weibull looks efficient and fits well the unknown distribution of X. Mainly because with its two parameters (α, λ) it offers a rather flexible way of controlling shape (and possible disymmetry) and tails of the distribution. It is also often well adapted when some data are censored.

Indeed has to be taken in account that for each trial possible missing values (among the n blocks) occur when objects stop outside the deposit area catched by the photo. When estimating the survival function in any real value x ($P(X > x)$), we must take in account this lack of information since for some x we just know $x > L$. This was first done with the non parametric Kaplan-Meyer estimator which suggests clearly that the Weibull distribution fits as well the data. Moreover the choice of parametric model allows predictions of the survival function for any value x (not only for the range of observed values which is the case with non-parametric tool). Then for each launch (N launches of n objects in 22 setups) are estimated the Weibull distribution parameters by maximisation of likelyhood penalized according the proportion of censored data. Once the two parameters estimated for each essay (let us recall that roughtly we have N*22 trials), the survival function in any value x or quantile of any order can be evaluated.

Among various graphs the following one permits to identify the situations where résults significantly differ or look like and to appreciate the intra-variability in each setup. Are represented for each of them (labelled over the x-axis), the boxplot of the N probability of exceeding 40cm (left) or 70cm (right).

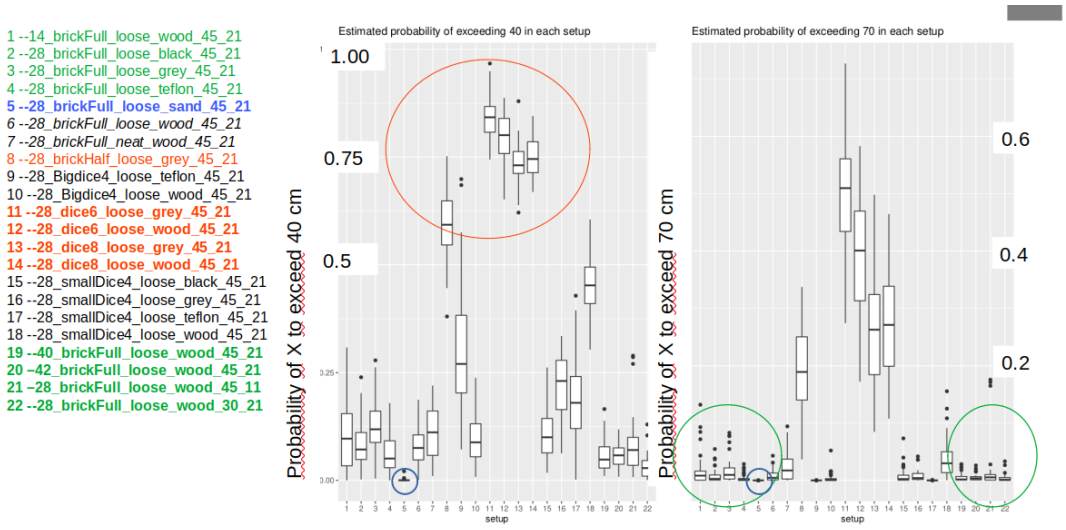


Figure 2 : survival at value 40cm (left) and 70cm (right) and in each of the 22 setups

We can make further remarks : looking at setups where some rather spherical and/or small object are used (the red ones) we see that in those cases the objects are stopping very far from

the bottom slope. In opposition the less spheric objects stop nearer. Let us also mention that when the deposit material is smooth (setup 5 with sand) and non elastic then the probability of exceeding 40cm or 70cm is very low regardless to any of other tested materials. Among the four levels tested for n there is no significant différential effect but larger is n less is the intra-setup variability.

4 Conclusions and perspectives

Once the image process and collect of data will be improved so that many more trials could be done and many data could be quickly produced, various values of slopes, drop height, sphericity of objects, other numbers of blocks, mecanical properties of materials,... will be investigated. Then some regression models (linear or not, taking in account censored data) can be adjusted, so that we could predict the maximum run-outs distance in function of the observed variables (controlled by the experimentator). This can be done with very few material but gives results over a reduced model. Next to be used in sites at real scale some mecanic study of the similitude law between small scale and real scale should be done.

A last question of interest would be to know if over a certain number of falling rocks the interactions between them could affect the result. In other worlds does the number of rolling rocks impact the maximum propagation distance and if yes, how ?

Aknowlegments : thanks to IDEX UGA "Excellence training period program", "CDP Risk program" and to "SARRA" (IRGA21 project).

Bibliographie

Benlhabib Y, (sept 2021) *Localisation d'objets dans une image et organisation des résultats*, rapport de stage.

Bourrier F., Toe D., Garcia B., Baroth J., Lambert S.(2020), *Experimental investigations on complex block propagation for the assessment of propagation models quality*, Landslides.10.1007/s10346-020-01469-5.

Bourrier F., Acary V. (2022), *Predictive Capabilities of 2D and 3D Block Propagation Models Integrating Block Shape Assessed from Field Experiments* Rock Mechanics and Rock Engineering, 55 (2), pp. 591-609.

Cuervo S., Daudon D., Richefeu V., Villard P., Lorentz J. (2015), *Discrete Element Modeling of a Rockfall in the South of the "Massif Central", France* , 1657-1661. 10.1007/978-3-319-09057-3_294.

Daudon, D., Couallier, V et Leblanc, F. (nov. 2021), *Small scale rock fall experiments and statistical laws for run-out*, Rock Slope Stability 2021, Chambery.

Eckert N, (nov. 2021), *A rockfall risk database for the French Alps*, Rock Slope Stability 2021, Chambery.

Garcia B., Richefeu V., Baroth J., Daudon D., Villard P. (2020), *Collision of Shaped Boulders With Sand Substrate Investigated by Experimental, Stochastic, and Discrete Approaches.* Journal of Geophysical Research: Earth Surface. 125. 10.1029/2019JF005500.

Piras, T. (juil. 2019) *chute de blocs rocheux : organisation et analyse statistique de données acquises sur modèle réduit*, rapport de stage.

First ambient seismic noise tomography applied to the study of Hell-Bourg's landslide (Reunion Island)

Benjamin Ricciardi–Larrode*†[1], Ianis Gaudot*[2], Bertrand Aunay*[1], and Claire Rault*[1]

[1]BRGM – BRGM – 5 Rue Sainte Anne, Saint-Denis, La Réunion, 97400, France
[2]BRGM – BRGM, F-45060 Orléans, France – 3 Avenue Claude Guillemin, 45100 Orléans, France

Résumé

Abstract

The Hell-Bourg landslide, located in the *Cirque de Salazie* (Reunion Island) is one of the largest studied inhabited landslides in the world with an estimated volume of 250 Mm3 (Rault et al., 2022). To be able to correctly evaluate hazards, knowledge of the landslide's structure is essential. However, its morphology and composition is quite complicated with many topographical jumps, crests and hollows and heterogeneous blocks of volcano flank collapses. As this landslide represent economic and human hazards, it has been studied for about 20 years. Our new geophysical campaigns were led to build 3D models of the landslide in terms of resistivity and shear wave velocity. This study concentrates on the shear wave velocity modelling as the 3D resistivity model was already computed (Rault et al., 2021).

Our project uses passive seismic data acquired by 99 three-component nodes (SmartSolo IGU-16HR 3C, 5 Hz resonance frequency), with average inter-station distance of 150 m. The data was recorded between October 30 and November 13, 2020 with a sampling interval of 2 ms. It is based on the study of the ambient seismic noise, method that has been develop throughout those 20 last years (Bensen et al., 2007; Shapiro and Campillo, 2004) . Using seismic-noise, we aim to retrieve a 3D shear-wave model of the Hell-Bourg landslide in order to investigate the internal structure of the landslide. This method lies on a mathematical operation that allows to compute cross-correlations between each pair of stations for the whole time period. It transforms one of the station as a virtual seismic shot and the other as a receiver. Classic active seismic processing can then be used to perform a 3D shear wave model of the landslide.

Due to the disturbed geological materials and the complex topography of the landslide (Rault et al., 2021), the seismic processing had to be adapted and a data selection based on the signal to noise ratio (SNR) was added in order to use only signals of sufficient quality. We calculated cross-correlations between 4851 pairs of stations. Among them, only 609 of them had a SNR higher than 15 between 1 and 25 Hz and passed our data quality selection. 415 dispersion curves were then picked manually and a first inversion was computed with 20 iterations. According to the different ranges of picked dispersion curves, it allowed us to image 1D shear wave velocity versus depth with maximum depth between 32 and 388 m and shear wave velocity between 50 and 1580 m/s.

*Intervenant
†Auteur correspondant: b.ricciardilarrode@brgm.fr

First 1D results are very encouraging and suggest that this method can provide relevant information on the internal structure of large and complex landslides. Indeed, they are coherent with previous results of compression wave velocity and their variations according to depth and localisation. Nonetheless, those are only the first results and they are still being processed and on the way to obtain a shear wave 3D model of the landslide. This model could then be cross-checked with the already obtained 3D resistivity model in order to deduce geomorphological and hydrogeological relationships.

References

Bensen, G.D., Ritzwoller, M.H., Barmin, M.P., Levshin, A.L., Lin, F., Moschetti, M.P., Shapiro, N.M., Yang, Y., 2007. Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements. Geophys. J. Int. 169, 1239–1260. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2007.03374.x

Rault, C., Thiery, Y., Chaput, M., Reninger, P.A., Dewez, T.J.B., Michon, L., Samyn, K., Aunay, B., 2022. Landslide processed involved in volcano dismantling from past to present: the remarkable open-air laboratory of the Cirque de Salazie (Reunion Island). Journal of Geophysical Research - Earth Surface.

Rault, C., Reninger, P.A., Samyn, K., Britri, A., Delatre, M., Thiery, Y., Aunay, B., 2021. New Insights from a Multi-Method Geophysical Investigation on a Very Large, Slow-Moving Landslide (Hell Bourg, Reunion Island). First Break 39, 71–78. https://doi.org/10.3997/1365-2397.fb2021063

Shapiro, N.M., Campillo, M., 2004. Emergence of broadband Rayleigh waves from correlations of the ambient seismic noise: CORRELATIONS OF THE SEISMIC NOISE. Geophys. Res. Lett. 31, n/a-n/a. https://doi.org/10.1029/2004GL019491

Mots-Clés: ambient seismic noise tomography, landslide, Cirque de Salazie, Reunion island, cross, checked models

Évaluation à petite échelle des coefficients de restitution des chutes de blocs
Small-scale assessment of rockfall coefficients of restitution

Bruma SOUZA[1,2], Jean BENOÎT[1], Marion BOST[2], Philippe REIFFSTECK[3]
[1] Université du New Hampshire, Département de Génie Civil, Durham NH, États-Unis
[2] Université Gustave Eiffel, GERS-RRO, Bron, France
[3] Université Gustave Eiffel, GERS-SRO, Champs sur Marne, France

RÉSUMÉ – Des capteurs de type Smart Rocks (SR) ont été utilisés en laboratoire pour des essais de chutes de blocs. Ces capteurs sont équipés de deux accéléromètres 3 axes ±400 g et ±16 g, d'un gyroscope haute fréquence ±4000 dps et d'un altimètre. Le tout est contenu dans une capsule de 58,0 mm de longueur et 25,4 mm de diamètre fixée à l'intérieur des blocs de test. Cet article résume les résultats des essais réalisés à petite échelle pour déterminer les coefficients de restitution d'un bloc de granite positionné avec un angle compris entre 0° et 45°. Des blocs de béton renforcés de fibres d'acier d'un kilogramme ont été lâchés dans des conditions contrôlées, et les mesures à l'aide du Smart Rock et des enregistrements vidéo ont été utilisées pour évaluer la translation et la rotation du bloc après impact pour les différentes inclinaisons de surface.

ABSTRACT –Smart Rock (SR) sensors were used in the laboratory for block drop tests. These sensors are equipped with a ±400 g and a ±16 g 3-axis accelerometer, a ±4000 dps high-rate gyroscope, and an altimeter. All are fit inside a capsule, 58.0 mm in length and 25.4 mm in diameter, and embedded in test blocks. This paper summarizes the results of small-scale tests to determine coefficients of restitution of a granite block positioned at angles ranging between 0° and 45°. One-kilogram concrete blocks reinforced with steel fibers were released under controlled conditions, and video and SR measurements were used to assess block translation and rotation after impact on different surface inclinations.

1. Introduction

Le rebond d'un bloc rocheux se produit lorsque des blocs se détachant des falaises impactent une pente rocheuse ou d'autres surfaces (sable, gravier, asphalte). Bien que le comportement de rebond dépende des caractéristiques du bloc et de la surface impactée, le rebond est défini mathématiquement par un ou deux coefficients, dénommés coefficients de restitution (COR). Ces coefficients sont utilisés comme données d'entrée dans les logiciels de modélisation de chutes de blocs 2D et 3D.

Le dimensionnement actuel des structures de protection est basé sur des estimations de la vitesse et de l'énergie cinétique (EC) des blocs rocheux en mouvement. Généralement, les logiciels de chutes de blocs ignorent ou prédisent de manière conservatrice certains aspects essentiels de la modélisation des chutes, tels que la rotation et le rebond du bloc (Turner et Duffy, 2012). Afin de réduire cette limitation, des blocs d'essais ont été instrumentés avec des capteurs haute fréquence d'accélération et de vitesse de rotation (Apostolov, 2016 ; Caviezel et al., 2018 ; Disenhof, 2018 ; Caviezel, 2021 ; Souza, 2021).

Les recherches réalisées à l'Université du New Hampshire (UNH, États-Unis) au cours de la dernière décennie ont permis de développer cinq générations successives de capteurs Smart Rock (SR), capables d'instrumenter des essais de chute de blocs sur le terrain et en laboratoire du point de vue du bloc en mouvement. Les derniers capteurs Smart Rocks sont des capsules de 58,0 mm de longueur et de 25,4 mm de diamètre (Figure 1), équipées de deux accéléromètres 3 axes de ±400 g et de ±16 g, d'un gyroscope haute fréquence ±4000 dps et d'un altimètre.

Chaque SR, positionné au centre de gravité des blocs d'essais, enregistre les données à une fréquence de 100 Hz ou 500 Hz (altimètre désactivé). Ces capteurs ont été utilisés dans une campagne expérimentale à petite échelle pour mieux comprendre la contribution de la rotation des blocs sur la restitution d'énergie après impact.

2. Méthodologie d'essais

Des largages de blocs ont été réalisés pour déterminer les coefficients de restitution d'un bloc de granite naturel (rugueux) de 60 cm de long, 45 cm de large et 30 cm d'épaisseur. Des blocs d'essais en béton d'un kilogramme ont été fabriqués en forme de rhombicuboctaèdre, utilisé dans la norme européenne ETAG 027 pour la certification des kits de protection contre les chutes de pierres. Les blocs d'essais ont été renforcés avec des fibres d'acier et ont présenté sur éprouvette, une résistance moyenne à la compression de 45 MPa après 15 jours. Chaque bloc comporte une réserve pour le capteur Smart Rock, qui a été serré avec un bouchon. Les mesures ont été enregistrées à une fréquence de 500 Hz.

Les blocs d'essais ont été lâchés de 1 et 2 mètres de haut sur le bloc de granite à l'aide d'un dispositif de chute avec un mécanisme de trappe. Ce mécanisme permet au bloc de test de tomber verticalement sans rotation. Le bloc de granite a été incliné avec des angles de surface (β) de 0°, 15°, 30° et 45°, et trois essais de chute ont été effectués pour chaque configuration de test.

Chaque essai a été enregistré avec deux caméras, frontale et latérale, à 240 fps. L'application Tracker 5.1.5 (Physlets) a été utilisée pour suivre le bloc en mouvement. Les deux perspectives de caméra ont fourni des informations de déplacement sur trois axes (Verticale, V – capturée avec les deux caméras ; Horizontale 1, H_1 – capturée avec la caméra latérale ; et Horizontale 2, H_2 – capturée avec la caméra frontale). Ces axes de référence ont permis d'obtenir les composantes de vitesse normale et tangentielle à chaque inclinaison de la surface d'impact, ainsi que de mesurer l'angle de déviation du bloc et l'inclinaison de la surface par rapport à la trajectoire projetée. Cette projection a été utilisée pour estimer les vitesses normale et tangentielle après impact. La Figure 1 présente la configuration expérimentale et une illustration du bloc d'essais avec le capteur SR.

3. Résultats et discussion

Les coefficients de restitution normal (COR_N) et tangentiel (COR_T) d'une roche naturelle, présentés à la Figure 1, ont été calculés pour chaque test en terme de ratios des vitesses immédiatement après et avant l'impact. Cette définition est actuellement la plus utilisée dans les modèles de chutes de blocs. Elle n'inclut pas la contribution de la rotation des blocs. De plus, les coefficients de restitution tangentiels ne peuvent pas être calculés pour des chutes à 90° sur des surfaces planes (0°), car la vitesse tangentielle avant impact est nulle dans cette condition.

Bien que les valeurs de COR n'aient pas différé de manière significative entre 1 et 2 mètres de hauteur, les différentes inclinaisons de surface ont produit des réponses de restitution d'énergie distinctes. Des inclinaisons de surface plus élevées ont entraîné une augmentation de COR_N et une diminution de COR_T. Ce comportement a été observé dans d'autres analyses sur surface rocheuse (Asteriou et al., 2012 ; Saeidi et al., 2014 ; Wang et al., 2018). On peut noter que dans ces essais préliminaires, les coefficients normaux et tangentiels convergent à 45° vers une valeur moyenne de 0,52 pour les deux hauteurs de chute.

L'augmentation de l'inclinaison de la surface augmente également la rotation du bloc. Les contributions croissantes de la rotation des blocs après impact sur des surfaces plus raides ont également conduit à des pertes d'énergie cinétique plus faibles. La contribution maximale de l'énergie cinétique de rotation lors d'un essai, équivaut à 37% de l'énergie cinétique de translation après impact. Ce pourcentage est cohérent avec les essais sur plâtre réalisés par Chau (2002), dont la proportion EC_{ROT}/EC_{TRANS} maximale correspondait à 34% à une pente de 40°.

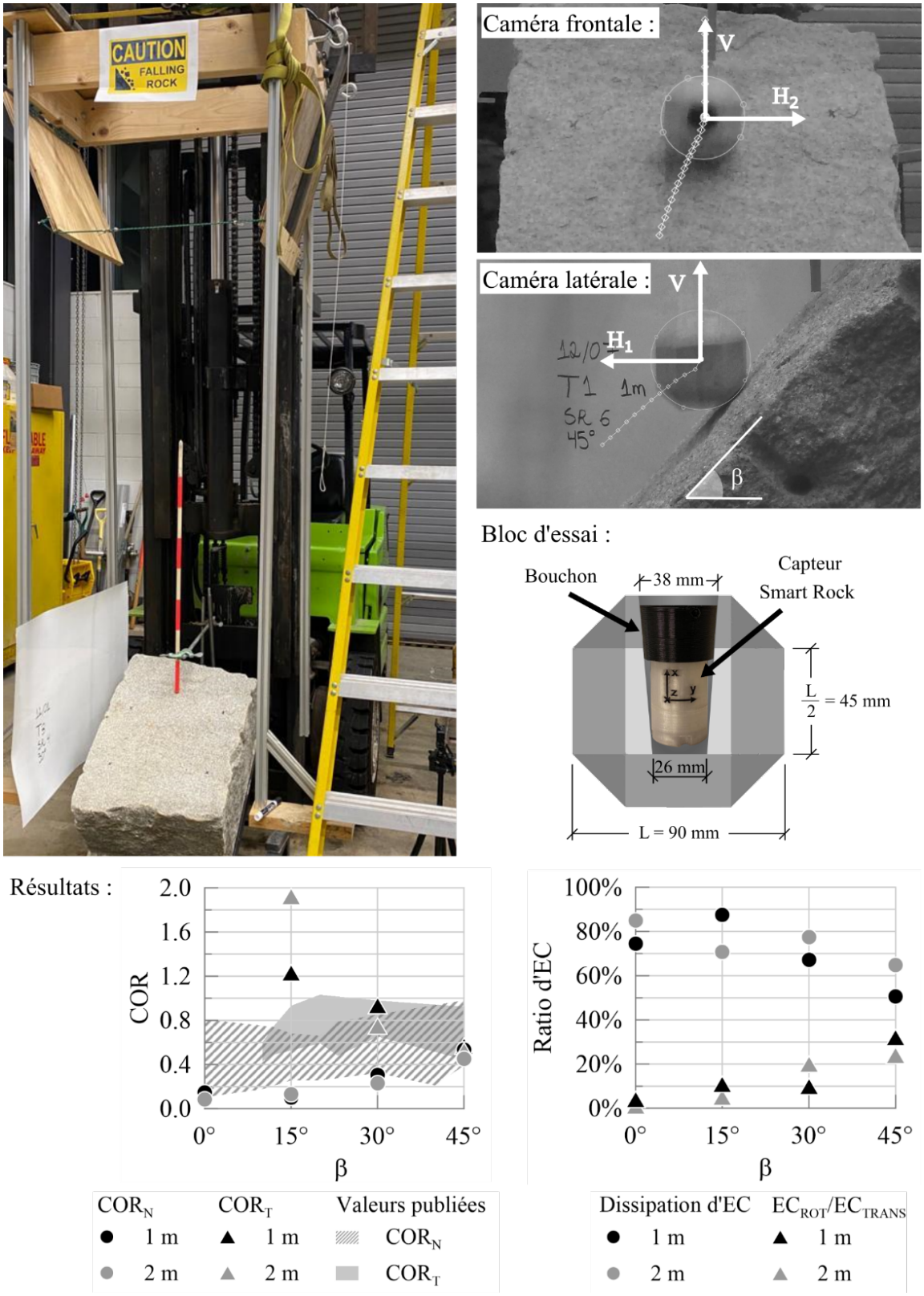


Figure 1. Capteur Smart Rock, informations sur le bloc de test, configuration expérimentale et résultats de test pour des hauteurs de chute de 1 et 2 m.

Les zones grisées des graphiques représentent les gammes de valeurs minimales et maximales publiées pour des essais de chute de blocs lâchés verticalement sur roche (Peng, 2000 ; Asteriou et al., 2012 ; Saeidi et al., 2014 ; Ansari et al., 2015 ; Wang et al., 2018). Sauf

pour la restitution tangentielle à 15°, les résultats obtenus sont compris dans la partie inférieure de la plage de la littérature, probablement en raison de la rugosité de surface rocheuse testée. Des valeurs de restitution d'énergie plus faibles ont en effet été observées sur des surfaces rugueuses par Ghana et al. (2019) par comparaisons de tests de chute sur des blocs de calcaire naturel (rugueux) et poli (lisse).

4. Conclusions et perspectives

Il existe un besoin croissant d'estimer de manière plus réaliste, les coefficients de restitution sur des surfaces typiques et utilisés pour prédire la trajectoire des chutes de blocs. Le Smart Rock peut être considéré comme un outil prometteur pour une évaluation énergétique plus précise. Cette recherche devrait permettre d'améliorer les paramètres d'entrée dans la modélisation des chutes de blocs, qui ne tient souvent pas compte de la contribution de la rotation des blocs dans les estimations d'énergie.

Les résultats des tests suggèrent que l'augmentation de l'inclinaison de la surface d'impact exerce un effet plus important sur la restitution d'énergie et la rotation des blocs que l'augmentation de la hauteur de chute. Il a ainsi été démontré que différentes inclinaisons de surface produisent des réponses de restitution d'énergie distinctes : l'énergie cinétique de rotation du bloc augmente de 0% à environ 30% de l'énergie de translation après impact en comparant les tests de 0° à 45°. Des tests supplémentaires en cours compléteront cette évaluation préliminaire sur des surfaces d'impact typiques (par exemple, roche, sable, gravier) à petite et grande échelle, couplées à la caractérisation de la surface d'impact.

Références bibliographiques

Ansari, M. K., Ahmad, M., Singh, R., and Singh, T. N. (2015). Correlation between Schmidt hardness and coefficient of restitution of rocks. Journal of African Earth Sciences, 104, 1-5.

Apostolov, A. (2016). Development and testing of motion tracking "Smart Rock" devices for geotechnical applications. (Master's thesis). University of New Hampshire, Durham, NH.

Asteriou, P., Saroglou, H., and Tsiambaos, G. (2012). Geotechnical and kinematic parameters affecting the coefficients of restitution for rock fall analysis. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 54, 103-113.

Caviezel, A., Schaffner, M., Cavigelli, L., Niklaus, P., Bühler, Y., Bartelt, P., and Magno, M. (2018). Design and evaluation of a low-power sensor device for induced rockfall experiments. ISEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 67(4), 767-779.

Caviezel, A., Ringenbach, A., Demmel, S. E., Dinneen, C. E., Krebs, N., Bühler, Y., ... & Bartelt, P. (2021). The relevance of rock shape over mass—implications for rockfall hazard assessments. Nature communications, 12(1), 1-9.

Chau, K. T., Wong, R. H. C., and Wu, J. J. (2002). Coefficient of restitution and rotational motions of rockfall impacts. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 39(1), 69-77.

Disenhof, C. R. (2018). Investigation of Surface Models and the Use of a Smart Rock for Rockfall Modeling. (Master's thesis). University of New Hampshire, Durham, NH.

Peng, B. (2000). Rockfall Trajectory Analysis – Parameter Determination and Application (Master's thesis). University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.

Saeidi, S., Gratchev, I., Kim, D. H., and Chung, M. (2014). Evaluation of restitution coefficients concerning surface roughness. In 23rd Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials (ACMSM23) Byron Bay, Australia (pp. 1-6).

Souza, B. M. M. (2021). Use of Smart Rocks to improve rock slope design. (Master's thesis). University of New Hampshire, Durham, NH.

Turner, A.K., Duffy, J.D. (2012). Evaluation of Rockfall Mechanics. In Turner, A.K. and Schuster, R.L. (Eds). Rockfall Characterization and Control, 285-333. Washington, D.C.: Transportation Research Board.

Wang, Y., Jiang, W., Cheng, S., Song, P., and Mao, C. (2018). Effects of the impact angle on the coefficient of restitution in rockfall analysis based on a medium-scale laboratory test. Natural Hazards and Earth System Sciences, 18(11), 3045-3061.

Quantitative landslide hazard assessment at 1:250 000 scale for Malawi (Southeastern Africa)

Yannick Thiery[1], Hendrix Kaonga , Harrison Mtumbuka[3], Jeremy Rohmer[1], Monique Terrier[1]

[1] BRGM, Direction Risques et Prévention, Orléans France

[2] Geological Survey Department, Zomba Office, Malawi

[3] Geological Survey Department, Mzuzu Office, Malawi

Keywords : landslide hazard, national scale, mapping, intense meteorological events, probability, Poisson law

Landslide are ubiquitous phenomena affecting many countries around the world. In recent years, in the context of landslide risk reduction and management an increasing number of landslide susceptibility or hazard maps were carried out at the national scale. These analyses are generally based on: (1) an existing inventory (national database or compilation of work carried out individually); (2) empirical indirect or data-driven methods. However, few studies, at this scale of work, take into account the temporality of events and/or the triggering factors to assess landslide hazard assessment. This statement is often due to a lack of information, especially for emerging countries, where a lack of spatial and temporal information on events and on triggering factors subsist.

Thus, if landslide inventories provide the first information to assess susceptibility, at national scale of work, it is also necessary to identify and analyze the components inducing hazard. For instance, it is possible by different ways to complete the analyses with annual frequency of landside events and/or meteorological or seismic events to assess quantitatively the landslide hazard (Corominas et al., 2014). This identification can be carried out by (i) direct approaches based on analysis of temporal data on past landslides (e.g. computations of the exceedance probability of landslide occurrence estimated by Poisson or binomial distributions); or (ii) by indirect approaches based on analysis of triggering factors (e.g. rainfalls volume, intensity and duration).

This contribution focuses on the methodology adopted during the GEMMAP[*] project to assess landslide hazard at national scale (i.e. 1:250,000) for Malawi, a landlocked country in southeastern Africa. This country is characterized by a large diversity of landscape and a topography composed of mountains, hills and plateaus, crossed by the Great Rift Valley and the Malawi Lake. It is experiencing many slope instabilities (i.e. debris-slides, debris-flows, slides, rockslides, rock-falls), principally due to its complex geology (weathered metamorphic lithology, complex structure, active seismic activity) and intense rainfalls (from tropical cyclones to depressions, World Meteorological Organization, WMO, https://public.wmo.int/en).

The methodology is split in four steps following the JTC-1 guidelines following the Eq. 1, either:

$$\mathbf{P(S) \times P(St) \times P(Me) = P(H)} \qquad \textbf{(Eq. 1)}$$

Where P(S) = spatial probability to have landslide (based on spatial modelling); P(St) = exceedance probability to have more than one landslide for one type meteorological event for an interval time (based on Poisson probability model); P(Me) = exceedance probability to have

more than one climatic event an interval time (based on Poisson probability model); P (H) = hazard probability.

i. The first step is based on an improvement of the landslide inventory by visual remote sensing and field surveys. A database was performed integrating information on the type of slope instability, activity, and triggering periods (Thiery et al., 2019).

ii. The second step consisted to assess and map landslide susceptibility by a data driven method for each type of selected landslide. The method used is based on Bayes' theorem (Weight of Evidence, Bonham-Carter, 1994) computing the spatial probability for each debris-slides, debris-flows, and slides (i.e. rotational and translational slides). A sensitivity analysis about spatial variables and their resolution was performed as well as statistical tests to validate results following the procedure described in Thiery et al. (2007). Once the best spatial variables selected 4 classes of susceptibility are retained (negligible, low, moderate, high) inspiring by the JTC-1 guidelines. This step corresponds to the first term of the equation 1 (P(S)).

iii. The third step focused on the temporal analyses of the events taking into account: (1) the rainfall recurrences time induced by different types of tropical meteorological events between 1946 and 2019 (n=28; World Meteorological Organization; P(Me) Eq. 1), (2) the recurrence time for the different landslide types for the same period (P(St) Eq. 1). Because cyclonic events are based on wind velocity, (Meteo-France classification WMO) no rainfall data were collected for Malawi. However, rainfall amounts and intensities are considered to be correlated with the strength of tropical cyclones (WMO), thus, it is considered that the more intense the cyclone, the heavier and more intense the rainfall. This analysis has led to compute the exceedance probability (i.e. based on Poisson distribution, Crovelli, 2000; Guzzetti et al., 2006) for:(1) each type of meteorological events and (2) each type of landslide for each susceptibility class for each type of meteorological event.

iv. The temporal probabilities were integrated to the landslide susceptibility maps by a matrix approach in order to obtain hazard maps for different landslides triggered by different meteorological events. Thus for each phenomenon, six hazard maps were obtained for six return periods from 1 to 100 years (1, 5, 10, 25, 50 and 100 years; Fig. 1).

The results obtained through this method allow establishing national hazard scenarios for the six return periods and for different type meteorological events and landslides (Fig.1). Furthermore, the approach being flexible, it allows modifying easily the hazard maps if new temporal information about landslides or meteorological events are integrated.

[*] The "Geological Mapping and Mineral Assessment of Malawi" project is led by the BRGM, with international partners: GTK (Geological Survey of Finland), and CGS (Geological Survey of South Africa) for the Government of Malawi through the Geological Survey Department (GSD).

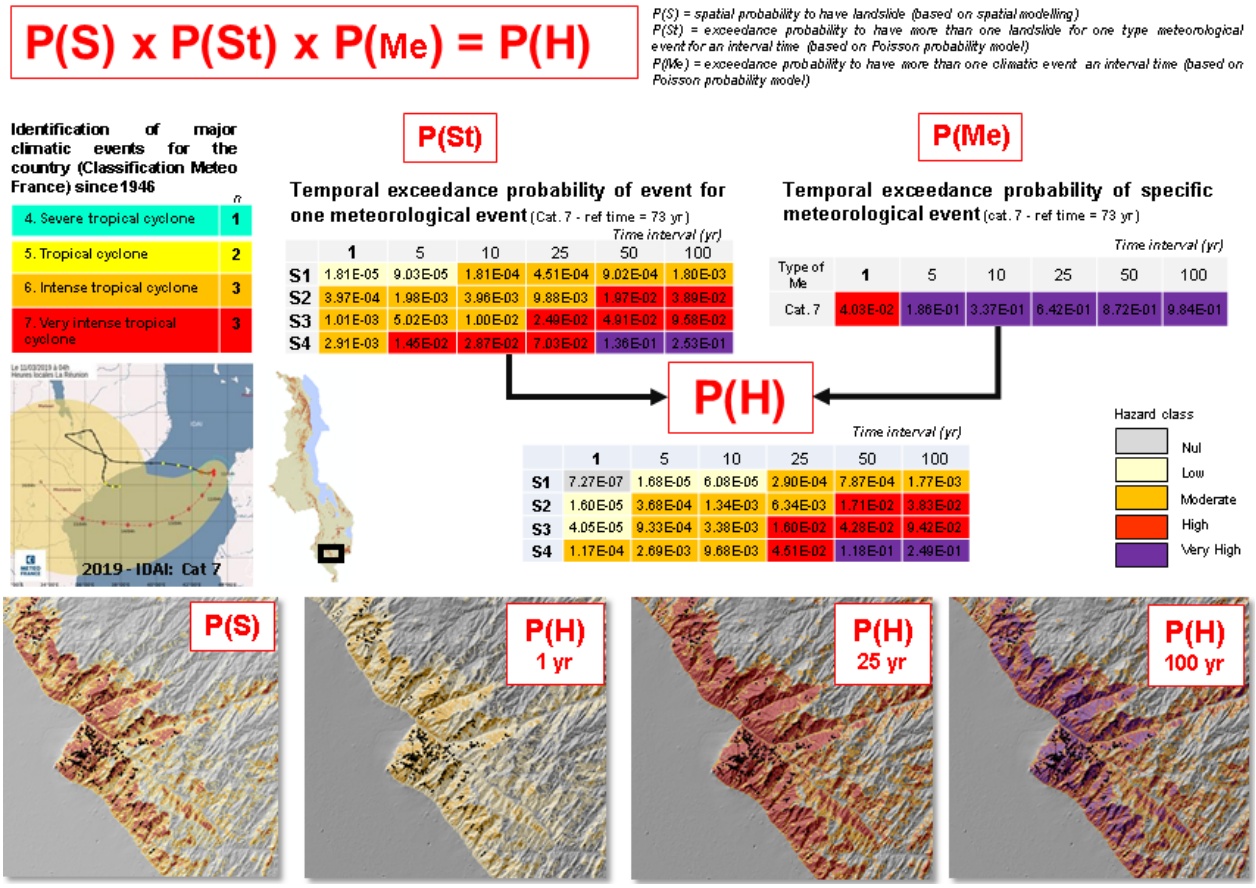


Figure 1. Rationale of the methodology to obtain national landslide hazard maps at 1:250 000 scale for Malawi (adapted from Thiery et al., 2021).

References

Bonham-Carter, G.F., 1994. Geographic Information System for Geoscientists: Modelling with GIS. Pergamon Press, Oxford. 398 pp.

Corominas, J, van Westen, C, Frattini, P, Cascini, L, Malet, JP, Fotopoulou, S., Catani, F., Van Den Eechaut, L, Mavrouli, O, Agliardi, F, et al. (2014). Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. Bulletin of Engineering Geology and Environment, 73: 209–263.

Crovelli, R.A. 2000. Probability models for estimation of number and costs of landslides. USGS report Open-file report 00-249. https://pubs.usgs.gov/of/2000/ofr-00-0249/ProbModels.html

Guzzetti, F., Reichenbach, P., Ardizzone, F., Cardinali, M. 2006. Landslide hazard assessment in the Collazzone area, Umbria, Central Italy. Natural Hazards and earth System Sciences, 6, 115-131. DOI:10.5194/nhess-6-115-2006

Thiery, Y., Malet, J.-P., Sterlacchini, S., Puissant, A., Maquaire, O., 2007. Landslide susceptibility assessment by bivariate methods at large scales: Application to a complex mountainous environment, Geomorphology, 92, 1–2, 38-59

Thiery, Y., Mtumbuka,H., Terrier, M.. Improvement of national landslide inventory for Malawi: from visual remote sensing analyses to field evidences. EGU General Assembly 2019, Apr 2019, Vienne, Austria. Vol. 21, pp.2019 - 8572, 2019.

Thiery, Y., Kaonga, H., Mtumbuka, H., Rhomer, J. Landslide hazard assessment and mapping for Malawi (Southeastern Africa): from susceptibility to hazard by integration of temporal exceedance probabilities related to tropical meteorological events. EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-6636, https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-6636, 2021

Evaluation de l'aléa rocheux de la falaise de Bonifacio: Observatoire multi-paramètres, modélisation et cartographie

Baptiste Vignerot*[1], Christian Franck*†[2], and Marie Malascrabes‡[3]

[1]Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) – Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique – 1039 rue de pinville 34000 Montepllleier, France

[2]Institut National de lÉnvironnement Industriel et des Risques – Ministère de l'écologie de l'Energie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire – Verneuil-en-Halatte ; Nancy ; Aix en Provence, France

[3]Centre dÉtudes et dÉxpertise sur les Risques, lÉnvironnement, la Mobilité et lÁménagement - Direction Méditerranée – Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement – Nice-Sophia, France

Résumé

L'État a lancé début juillet 2018 une étude dont l'objectif est l'amélioration de la connaissance de l'aléa rocheux sur le secteur de la Citadelle, avec pour objectif d'établir les scenarios de gestion du risque à mettre en place. Le programme d'étude mené, constitué d'un reseau d'observations, de forages instrumentés et de campagnes géophysiques a permis de valider la lithologie et la fracturation du massif et d'appréhender les forçages hydrogéologique et marin. Cette connaissance était nécessaire pour affiner le niveau d'alea et proposer une gestion du risque adaptée au contexte de falaise littorale.
Les études d'amélioration consistent en la réalisation d'observations et de mesures sur le terrain :

• mesure de la topographie de la falaise, par levé laser terrestre et photographies aériennes par drone et autogyre,dont la précision est centimétrique ; • mise en place d'instruments de mesure sur la paroi de la falaise (fissuromètre) mesurant en continu pour toute la durée de l'étude les déplacements relatifs des compartiments rocheux (installés début février 2019) (Franck et al. 2020); • imagerie du massif par radar géologique pour rechercher les réseaux en surface, les cavités et le prolongement de la fracturation observée en paroi et écoute des modes de vibration naturelle du massif (Levy et al. 2020); • mise en place de marqueurs en pied de falaise pour mesurer l'érosion à moyen et long termes liée à l'action de la houle.

Dans un troisième temps, les études consistent en la réalisation de trois forages depuis la haute ville recoupant la fracturation observée en paroi. Des observations en forage sont réalisées avant la mise en place d'instruments mesurant les déplacements relatifs des compartiments rocheux. Une campagne d'essais en laboratoire sur les échantillons de roches a permis de mieux caractériser les paramètres géomécaniques des différents matériaux.

*Intervenant

†Auteur correspondant: christian.franck@ineris.fr

‡Auteur correspondant: Marie.Malascrabes@cerema.fr

Un modèle global reprend l'ensemble de ces mesures et est complété par une étude sur l'infiltration des eaux dans le massif et sur l'action de la houle en pied de paroi. Après une phase de calculs géomécaniques, les différents scenarios de rupture sont élaborés pour préciser le degré d'aléa et améliorer la gestion du risque rocheux.
Le programme d'amélioration de la connaissance développé dans le cadre de cette étude aura permis de débuter une phase d'observation et de caractériser la géométrie de la falaise et ses forçages environnementaux et anthropiques. Il aura permis de définir les principaux paramètres du modèle global et les hypothèses retenues pour la modélisation géomécanique et les scenarios possibles de rupture. Le péril imminent a été levé, l'aléa a été requalifié sur l'ensemble de la zone d'étude et des recommandations en terme de gestion du risque ont été formulées

Mots-Clés: Aléa Eboulement, observatoire, modélisation, cartographie

Etude de l'instabilité de versant de Cima del Simano (Tessin, Suisse) - mesures des déformations et modélisations numériques 2D et 3D

Charlotte Wolff*[1], Marc-Henri Derron* , Michel Jaboyedoff , Li Fei , Tiggi Choanji , Valerie Baumann-Traine , Andrea Pedrazzini , and Carlo Rivolta

[1]Unil – Geopolis, 1015 Lausanne, Suisse

Résumé

Charlotte Wolff1, Valérie Baumann-Traine1, Carlo Rivolta3, Marc-Henri Derron1, Tiggi Choanji1, Li Fei1, Michel Jaboyedoff1, Andrea Pedrazzini2
1 Groupe RISK – Institut des Sciences de la Terre, Université de Lausanne, Lausanne, Suisse

2 Département géologique – Service cantonal du Tessin, Bellinzona, Suisse

3 Ellegi Srl – Siège opérationnel et administrative, Milan, Italie

1) Introduction

Le canton du Tessin dans les Alpes suisses présente des reliefs très escarpés, découpés par des vallées relativement étroites et favorables aux aléas gravitaires. L'une des instabilités qui vaut la peine d'être étudiée est celle de Cima del Simano dans la vallée de Blenio. En effet, son sommet, qui culmine à 2500m, présente de nombreuses fractures importantes ; par leurs ouvertures variant de 50cm à 5m, leurs profondeurs (de 50cm à 10m) et leurs longueurs (500m pour la plus grande). De plus, le gneiss composant la montagne est très fracturé. A son pied passe une route nationale importante permettant de relier les villes de Blenio au Nord et Biasca au Sud. L'instabilité présente donc un risque important pour les infrastructures dans la vallée, non seulement la route mais aussi la commune de Acquarossa et les villages situés sur le flanc de la montagne (Figure1).

Figure 1: Instabilité gravitaire Cima del Simano, A: Localisation, B: Cartographie des indices d'instabilité, C: Fracture principale au sommet, D: Indice de mouvement gravitaire du bloc Ouest vers le bas.

2) Matériel et méthodes

Afin de quantifier l'aléas potentiel de l'instabilité, une étude par analyse d'équilibre limite (LEM, Jiang et al., 2003) et par la méthode des éléments finis (FEM, Hammah et al., 2005) a été menée, à l'aide de la suite de logiciels Rocscience : a) Slide2 et RS2 pour une

*Intervenant

analyse 2D, et b) RS3 pour une analyse 3D. Les tests géotechniques sur le gneiss n'ayant pas encore été faits, les paramètres de Mohr-Coulomb choisis (cohésion et angle de friction interne) sont ceux issus de l'étude du glissement de terrain de Campo Vallemaggia, Tessin (Bonzanigo et al., 2007). Les facteurs de sécurité calculés donnent des indices sur la susceptibilité de rupture, ainsi que les zones de plus fortes contraintes et celles répondant aux déplacements les plus importants.

Les profils 2D et maillages 3D de la montagne, nécessaires aux calculs, ont été obtenus à l'aide d'un Lidar terrestre (Riegl VM6000) et par photogrammétrie SfM d'images de drones (Mavic Pro, Pix4Dmatic). A Simano, le gneiss présente plusieurs familles de discontinuités qui peuvent être utilisées dans le calcul de stabilité par la méthode FEM. Le logiciel Coltop a été utilisé pour extraire les orientations de ces principales familles.

Les contraintes subies par la montagne entrainant hypothétiquement des mouvements de faible amplitude, des mesures de déplacements millimétriques ont été réalisées par Insar satellitaire à partir des images radar Sentinel1, RadarSat et Terrasar-X (méthode PSI, Wegnüller et al. 2016) d'une part, et par Ground Based-InSAR (GB-Insar) d'autre part. Les mesures satellitaires et GB-Insar donnent respectivement une idée des déplacements verticaux et horizontaux. De plus, l'ouverture des fractures principales est mesurée annuellement, avec une résolution millimétrique.

Une fois les principales limites du glissement de terrain dessinées, la méthode SLBL (Slope Local Based Level, Jaboyedoff et al., 2005) est appliquée pour estimer les volumes mobilisés, puis la propagation du glissement est simulée à l'aide du logiciel DAN3D (McDougall et al., 2009) afin d'estimer les zones impactées, les zones de dépôts et leurs épaisseurs.

3) Résultats et discussion

La modélisation avec Slide2 montre nettement une surface de plus grande contrainte dont la limite supérieure se trouve au niveau de fractures visibles sur le terrain. Cette même surface de plus forte contrainte de cisaillement se retrouve également dans le modèle RS2. Les modèles 2D et 3D mettent en évidence des mouvements verticaux au niveau du sommet de la montagne et des mouvements horizontaux en dessous. Les cartes de déplacement issues de l'Insar corroborent ces modèles. En effet, l'Insar satellitaire montre des mouvements verticaux au sommet tandis que le GB-Insar détecte des mouvements horizontaux en dessous.

Pour tous les modèles, les facteurs de sécurité calculés sont relativement faibles (entre 1.1 et 1.4). Un facteur externe tel que des pluies intenses ou une charge sismique pourraient entrainer la rupture de l'instabilité et la propagation du glissement rocheux. Le modèle RS3 permet de délimiter la zone instable puis le SLBL permet de calculer un volume d'environ 35Mm3. La simulation de la propagation avec Dan3D évalue une épaisseur de dépôt de 25m au pied de la montagne, mais la propagation simulée atteint également la commune de Acquarossa, avec une épaisseur de dépôt de 9m.

4) Bibliographie

Bonzanigo, L., Eberhardt, E., Loew, S., Long-term investigation of a deep-seated creeping landslide in crystalline rock. Geological and hydromechanical factors controlling the Campo Vallemaggia landslide (2007), Canadian Geotechnical Journal, 44, 1157-1180.

Hammah, R. E., Yacoub, T. E., Corkum, B. C., Curran, J. H., The shear strength reduction method for the generalized Hoek-Brown criterion (2005), ARMA/USRMS 05-810.

Jaboyedoff, M. and Derron, M.H, A new method to estimate the infilling of alluvial sediment of glacial valleys using a sloping local base level, Jaboyedoff and Derron (2005), Geogr. Fis. Dinam. Quat, IT ISSN 1724-4757.

Jiang, H. D.; Lee, C. F.; Zhu, D. Y., Generalised framework of limit equilibrium meth-

ods for slope stability analysis (2003), Geotechnique, 53(4): 377-395.

McDougall, S., Hungr, O., Two numerical models for landslide dynamic analysis (2009), 35(5):978-992.

Wegnüller, U., Werner, C., Strozzi, T., Wiesmann, A., Frey, O., Santoro, M. Support in the GAMMA Software (2016), Procedia Computer Science, 10: 1305-1312.

Mots-Clés: LEM, FEM, Dan3d, glissement rocheux, Insar

Journées
Aléas
Gravitaires

JAG

MONTPELLIER 2022

10-11 Mai 2022

https://jag2022.sciencesconf.org/

Aléas et Risques Gravitaires

Les leçons de la catastrophe du 2 octobre 2020 dans la vallée de la Vésubie (Alpes-Maritimes, France) : quelles opportunités pour les territoires de montagne ?

Tony Rey*†[1], Célia Chevret[2], Thomas Candela[3], and Martin Robustelli[4]

[1]Laboratoire de Géographie et d'Aménagement de Montpellier – Université Paul Valéry Montpellier – 34000 Montpellier, France

[2]Université Paul Valéry Montpellier – Université Paul Valéry Montpellier – Route de Mende 34090 Montpellier, France

[3]Université Paul Valéry Montpellier / RisCrises – Laboratoire de Géographie et d'Aménagement de Montpellier – Route de Mende 34090 Montpellier, France

[4]RisCrises Global Solution – RisCrises Global Solution – 34000 Montpellier, France

Résumé

Le 2 octobre 2020, des précipitations diluviennes s'abattent sur l'arrière-pays niçois. Plusieurs vallées sont alors meurtries dont la vallée de la Vésubie où le bilan humain et socio-économique a été lourd de conséquences. Un retour d'expérience sur les conséquences de la crue torrentielle a été réalisé quelques mois après la catastrophe. D'une part, vous avons réalisé une évaluation des impacts géomorphologiques de la crue torrentielle et des phénomènes gravitaires, une évaluation de l'exposition des réseaux stratégiques aux inondations et aux mouvements de terrain. D'autre part, nous avons mené une analyse critique des documents de prévention et de gestion des risques alors en place au moment de la crue. Nos résultats soulignent les vulnérabilités de ce territoire de montagne, certaines intrinsèques comme la diversité des aléas naturels et leur intensité, l'enclavement des vallées, l'espace restreint... et d'autres externes comme l'urbanisation en zone à risque, le développement de réseaux stratégiques ou critiques non adaptés au contexte de la montagne.

Mots-Clés: Vésubie, crue torrentielle, mouvements de terrain, dommages, réseaux sensibles, reconstruction

*Intervenant

†Auteur correspondant: tony.rey@univ-montp3.fr

PHUSICOS platform, dedicated to Nature-Based Solutions for Risk Reduction and Environmental Issues in Hilly and Mountainous Lands : presentation and qualitative NBS assessment

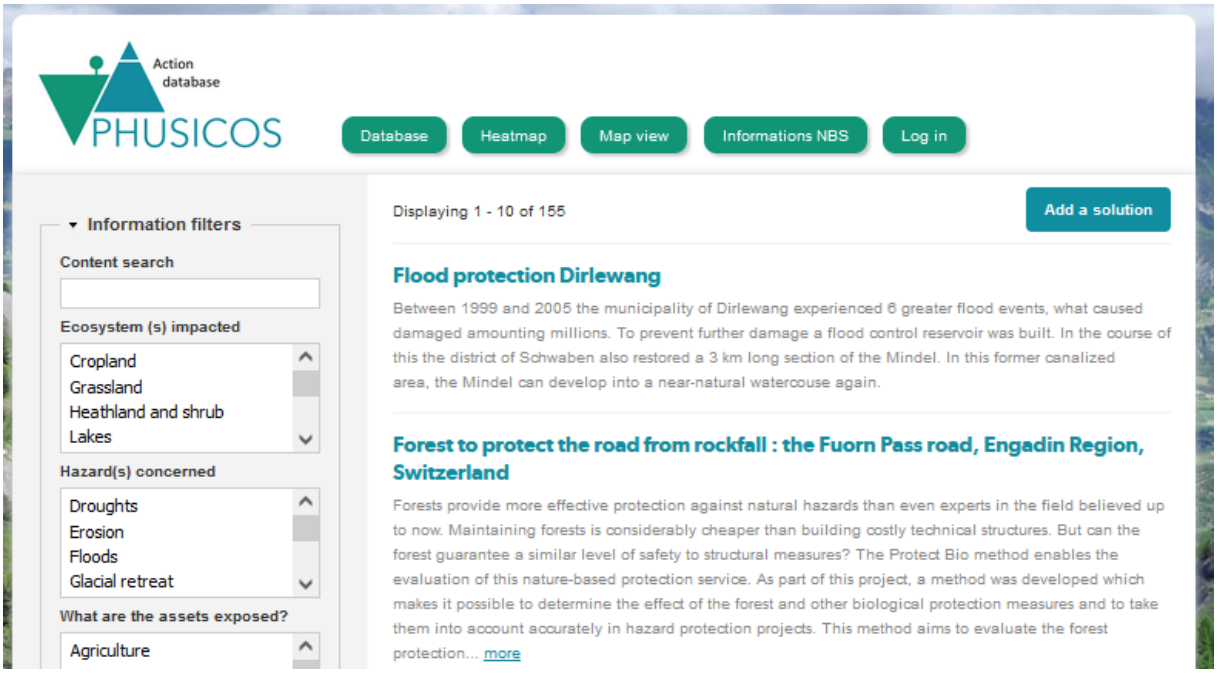
PHUSICOS platform aims at gathering nature-based solutions (NBS) relevant to reduce hydro-geological risks in mountain landscapes. The platform can be accessed directly through the web portal http://phusicos.brgm.fr. It is based on an Open Source CMS website, including a filter to store documents and a map server to bring ergonomic and powerful access.

To design the platform, an in-depth review of 11 existing platforms has been performed. Furthermore, a list of metadata has been proposed to structure the information. These metadata have provided the baseline for database. The PHUSICOS platform currently references 176 NBS cases and 83 documents of interest (review articles, assessment papers…). It is continuously enriched through the contribution of NBS community.

For that, a questionnaire based on relevant data, necessary for the definition and identification of the NBS (metadata, to be used for searching the NBSs within the platform) has been defined to enter new cases. A preliminary analysis of the data has been realized. To characterize and analyse the current solutions, we have worked on the following four categories: the nature of impacted ecosystems, the hazard(s) concerned, the other challenges treated by the NBS, the type of exposed assets.

The platform also proposes a qualitative assessment of the NBSs collected according to 15 criteria related with five ambits: disaster risk reduction, technical and economical feasibility, environment, society, and local economy. The criteria level is sufficiently general to be analysed for the entire PHUSICOS platform NBSs whatever the type of work, the realized approaches, the problematic or the spatial or temporal scale.

The structure of the platform and a first analysis of the qualitative NBS assessment are presented in this work.



PHUSICOS database and home page. The "Add a solution" button (top right) allows to access the form to propose new entries

A Baills, M Garcin, S Bernardie (2021) - Platform dedicated to nature-based solutions for risk reduction and environmental issues in hilly and mountainous lands. Sustainability 13 (3), 1094

Un aperçu de l'activité du glissement de terrain d'Avignonet (Alpes occidentales françaises) depuis le dernier maximum glaciaire à partir de l'analyse multi-paramètres de forages

Grégory Bièvre*[1] and Christian Crouzet[2]

[1]Institut des Sciences de la Terre – Université Grenoble Alpes, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR5275, Institut national des sciences de lÚnivers, Institut national des sciences de lÚnivers, Institut national des sciences de lÚnivers, Institut national des sciences de lÚnivers, Institut national des sciences de lÚnivers, Institut national des sciences de lÚnivers, Institut national des sciences de lÚnivers, Institut national des sciences de lÚnivers, Institut national des sciences de lÚnivers, Institut national des sciences de lÚnivers, Institut national des sciences de lÚnivers, Institut national des sciences de lÚnivers, Institut national des sciences de lÚnivers, Institut national des sciences de lÚnivers, Institut national des sciences de lÚnivers, Institut national des sciences de lÚnivers – BP 53 - 38041 Grenoble cedex 9, France

[2]Institut des sciences de la Terre (ISTerre) – Université de Savoie Mont Blanc, CNRS : UMR5275 – Technolac 73376 Le Bourget du Lac cedex, France

Résumé

Le glissement de terrain d'Avignonet, dans le Trièves, est constitué de sédiments paraglaciaires quaternaires parmi lesquels des niveaux imbriqués de till, d'argiles glacio-lacustres et fluviatiles. De nombreux sondages (forages et carottages) ont été réalisés entre le milieu des années 1980 et le milieu des années 2000 afin d'évaluer le contexte géologique et géotechnique de la partie habitée au sud de ce glissement de terrain lent (quelques mm à quelques décimères par an). Les paramètres hétérogènes disponibles à partir de ces différents forages rendent l'interprétation difficile. La diagraphie gamma-ray ainsi que les tests de susceptibilité magnétique et les tests à l'aide d'appareils de poche (résistance à la compresion et au cisaillement) sur des échantillons de carottes ont permis de distinguer les différentes unités lithologiques et géotechniques. La résistance mécanique obtenue à partir de l'enregistrement des paramètres de forage pendant le forage a été corrélée aux carottes et leur combinaison, ainsi que les observations conduites à l'affleurement, ont été utilisées pour délimiter les unités lithologiques et les surfaces de cisaillement, notamment à la faveur de l'observation de perturbations du gradient de compaction sédimentaire.

L'analyse conjointe de ces données avec les analyses d'affleurements et les données chronologiques révèle une grande complexité géologique avec l'intrication de diverses unités sédimentaires. Deux anciens glissements de terrain, de plusieurs dizaines de mètres de large, ont en outre été identifiés au sein du grand glissement d'Avignonet, d'une largeur de près de 2 km. Tous

*Intervenant

les résultats mettent en évidence une grande complexité lithologique et hydrogéologique qui a un impact sur la dynamique du glissement.

Ce travail montre l'intérêt d'une approche multi-proxy dans les études impliquant des unités sédimentaires quaternaires. Plus largement, la méthodologie développée ici pourrait être appliquée à d'autres sites présentant des contextes paléoenvironnementaux différents et présentant une compaction sédimentaire, tels que des environnements lacustres ou côtiers.

Mots-Clés: Glissement lent, forages, datations, Quaternaire

Approche statistique ou heuristique : Quelle méthode utiliser pour la cartographie de la susceptibilité aux mouvements de terrain pour les montagnes rifaines (Maroc)

Session 3 : Estimation quantitative de l'aléa et du risque gravitaire

Nada Boukhres[1,2], Mohamed Mastere[1], Yannick Thiery[3], Olivier Maquaire[2], Bouchta El Fellah[1,] Stephane Costa[2]

[1] UM5 Rabat- Institut Scientifique, Laboratoire de Géomorphologie et Géomatique, 10106 Rabat, Maroc.
[2] NORMANDIE UNIV, UNICAEN, CNRS, IDEES, 14000 CAEN, France
[3] BRGM, 3 avenue Claude Guillemin, BP 36009, 45060 Orléans Cedex 2, France.

Introduction

Le Maroc septentrional est exposé à de nombreux aléas naturels, en particulier, dans le domaine montagneux rifain. Cette zone est la plus exposée aux mouvement de terrain en raison : (1) de son relief accidenté aux altitudes qui s'élèvent au-delà de 2000 m (2456 m à Jbel Tidghine, point culminant du Rif) accompagné de crêtes rocheuses et de versants en pente forte, (2) sa structure géologique à formations lithologiques variées (grès, marnes, marno-calcaires, argiles, …), (3) sa tectonique active, et (4) ses précipitations totales annuelles à épisodes intenses orageux intenses.

Pour la gestion des risques générés par ces mouvements de terrain dans les secteurs densément peuplés et le long des infrastructures de transport, les autorités marocaines ont besoin d'une cartographie de cet aléa ; la difficulté réside dans le fait que peu de bases de données sont disponibles. Cette recherche menée dans le cadre du projet Toubkal « Partenariat Hubert Curien (PHC) franco-marocain, 2020-2022 » a pour objectif de proposer une méthodologie de cartographie de la susceptibilité, de l'aléa puis du risque pouvant être ensuite facilement transposable à des territoires semblables.

Pour se faire, nous avons choisi de faire un zoom sur la partie centrale, pour laquelle les travaux traitant de la même problématique sont rares voire très rares. La zone d'étude, d'une superficie de 636 km , est sujette à une variété de mouvements de terrain, superficiels et profonds, de type : coulées de débris (12%), coulées de boue (16%), éboulements (20%) et glissements de terrain (52%), liés aux sapements de berge, à la proximité des routes, etc. Ce dernier type est le plus fréquent et le plus actif par rapport aux autres types dans la zone d'étude. L'objectif de cette communication est de présenter les résultats obtenus pour évaluer la susceptibilité aux glissements de terrain (Van Westen et *al*., 1997) par deux méthodes (heuristique et statistique) afin d'identifier celle qui apparait la plus pertinente et la plus facilement reproductible et transférable.

Méthode

La méthodologie est classique et divisée en trois étapes :

- La première étape a consisté à établir un inventaire des évènements, fondé sur des observations de terrain, une analyse diachronique de photographies aériennes et des analyses d'images satellites via GooleEarth. Cela a permis de définir sept types de de mouvements de terrain.

- Après avoir sélectionné des variables prédictives représentant les facteurs de prédisposition, la deuxième étape a permis d'établir des cartes de susceptibilité selon deux méthodes différentes (fig.1) : une méthode qualitative (heuristique grâce à un système multicritère fondé sur une méthode de ranking couplée à une Analyse par Processus Hiérarchique AHP, Saaty, 1980) et une méthode quantitative (statistique par Rapport de Fréquences, FR). Cette étape a permis d'évaluer l'influence de chaque type de variables et de sélectionner les plus représentatives. Pour chacune des approches, neuf variables sont sélectionnées soit : la topographie (i.e. pente, altitude, courbure et exposition des versants), la géologie (lithologie et linéaments), l'occupation des sols, la distance par rapport aux routes et la distance par rapport au réseau hydrographique
- La troisième étape vise à sélectionner la meilleure carte obtenue parmi celles calculées avec les deux méthodes et le meilleur jeu de variables prédictives. La courbe du taux de prédiction et le calcul de l'aire sous la courbe (AUC) ont été utilisés pour assurer la capacité des deux modèles à reconnaitre les évènements inventoriés (Hussain et *al*., 2020).

Résultats

Les taux de réussite obtenus sont satisfaisants et assez comparables dépassant les 70%. Néanmoins, l'approche quantitative fondée sur le rapport de fréquence est meilleure avec un AUC de 87%, alors que cette dernière et de 76% pour la méthode heuristique.

Au-delà de ce résultat, montrant tout l'intérêt de la méthode quantitative sélectionnée, il est apparu que la manière de pondérer les classes de variables, représentant les facteurs de prédisposition, était plus aisée que la méthode qualitative, plus facilement explicable aux utilisateurs. Toutefois, cette approche nécessite une attention particulière aux objets à modéliser (i.e. dans notre cas différents mouvements de terrain). En effet, afin de s'affranchir des limites des objets et éviter de donner trop d'importance aux grands phénomènes, nous avons préféré tenir compte des centroïdes des objets plutôt que de l'enveloppe de la zone d'initiation. Cependant, si les résultats basés sur ces centroïdes sont satisfaisants, les probabilités finales obtenues doivent être prises comme un score et non une probabilité stricto-sensu (Thiery et *al*., 2007 ; Corominas et *al*., 2014).

Conclusion

À travers cette recherche, nous avons ainsi pu mettre en évidence (1) les secteurs les plus susceptibles aux différents glissements de terrain ; (2) une méthodologie simple de l'analyse de la susceptibilité peut être mise en œuvre dans le contexte de moyennes montagnes dans lesquelles les bases de données spatialisées sont assez rares ou incomplètes. Au-delà de ces considérations, la méthodologie proposée doit encore être testée sur d'autres sites afin d'être pleinement validée et les secteurs identifiés comme susceptibles devront faire l'objet d'une étude plus approfondie dans le cadre de la prévention et de la gestion du risque, notamment en intégrant la temporalité et l'intensité des phénomènes.

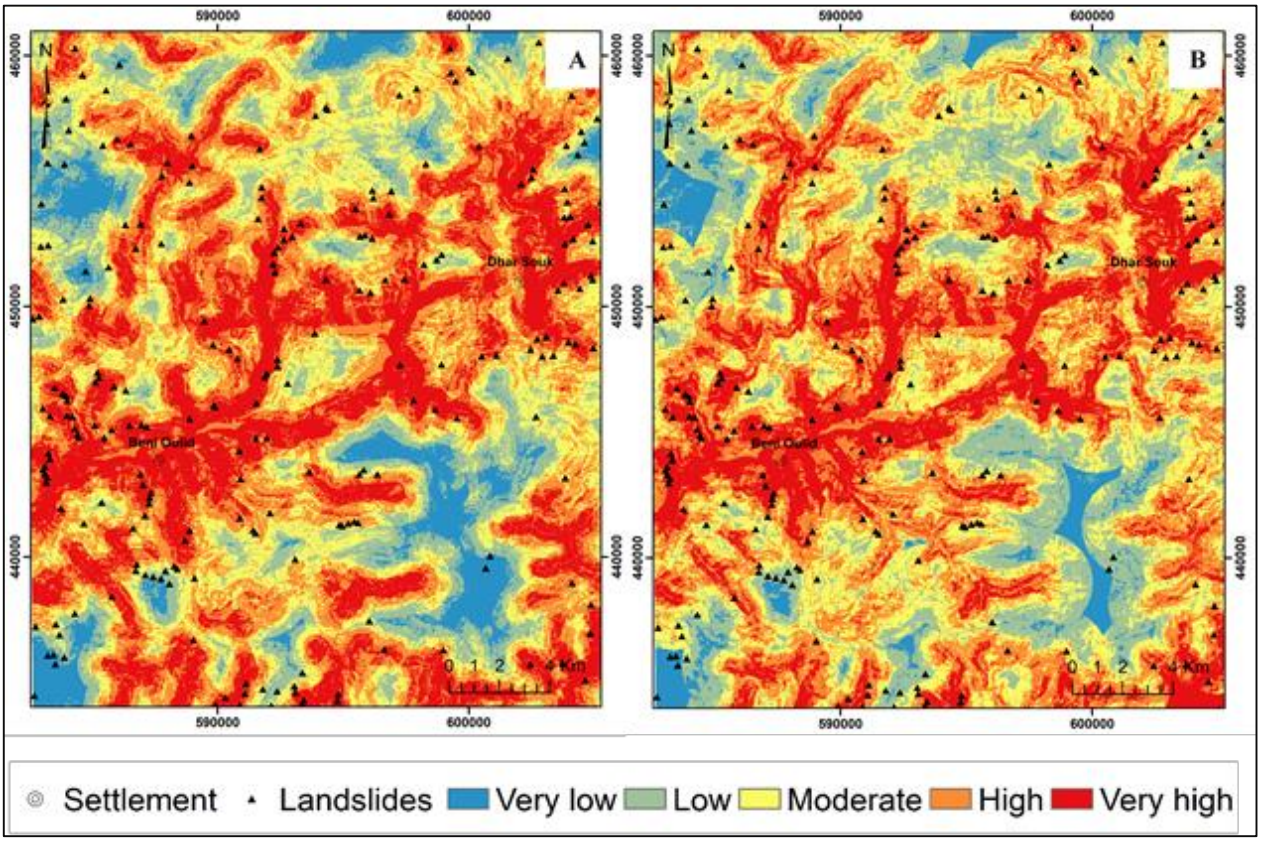


Figure 1 : cartes de susceptibilité aux glissements de terrain. (A : par le modèle AHP et B : par le modèle FR).

Références

1. Corominas J, van Westen CJ, Frattini P, Cascini L, Malet JP, Fotopoulou S, Catani F, van den Eeckhaut M, Mavrouli OC, Agliardi F, Pitilakis K, Winter MG, Pastor M, Ferlisi S, Tofani V, Hervás J, Smith JT (2014) Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk: bull Eng. Geol Environ 73(2):209–63
2. Hussain, D.; Hussain, T.; Khan, A. A.; Naqvi, S. A. A.; Jamil, A. A Deep Learning Approach for Hydrological Time-Series Prediction: A Case Study of Gilgit River Basin. Earth Sci. Informatics, 2020, 13 (3), 915–927. https://doi.org/10.1007/s12145-020-00477-2.
3. Saaty T (1980) The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation. McGraw-Hill, New York.
4. Thiery Y, Malet JP, Sterlacchini S, Puissant A, Maquaire O (2007) Landslide susceptibility assessment by bivariate methods at large scales: application to a complex mountainous environment. Geomorphology 92(1):38–59. Doi: 10.1016/j.geomorph.2007.02.020.
5. Van Westen, C. J., N. Rengers, M. T. Terlien, and R. Soeters. 1997. “Prediction of the occurrence of slope instability phenomena through GIS-based hazard zonation.” Geologische Rundschau 86 (2): 404–414. https://doi.org/10.1007/s005310050149.

Cartographie des susceptibilités aux glissements de terrain et aux chutes de blocs sur le département de la Savoie

Cadet Héloïse (SAGE ingénierie), David Rouquet (Tétras Libre), Anne Lescurier (Conseil Départemental 73), Nicolas Muller (Conseil Départemental 73)

Le projet *SIGALE* (Système d'Information Géoréférencé des ALEas gravitaires) vise à développer un système de gestion des aléas gravitaires (glissements de terrain et chutes de blocs) sur le réseau routier du département de la Savoie (*CD73*). Ce système utilise l'intelligence artificielle (*IA*) pour prédire un niveau d'alerte pour les aléas à partir de données comme la topographie, la couverture des sols, la lithologie, les précipitations et les températures. Cet article présente le calcul de deux indices utilisés dans le projet SIGALE pour évaluer la susceptibilité du terrain aux aléas. L'indice pour les glissements de terrain utilise l'approche du projet européen *ELSUS* (European Landslide Suscpetibility : Wilde et al. 2018). L'indice pour les chutes de blocs est de type zonage à grande échelle.

Une base de données d'évènements gravitaires historiques, géoréférencés sur la période 2008-2019, a été construite pour l'apprentissage. Notée *BDe*, elle est issue à 28 % des archives de la Société Alpine de Géotechnique (SAGE), à 69 % de la base de données interne au CD73 et à 3% d'informations internes de la Direction interdépartementale des routes Centre-Est (DIRCE). La BDe contient 1100 évènements dont 730 chutes de blocs et 370 glissements de terrain. Les évènements de la BDe concernent les routes gérées par le CD73 et la DIRCE, soit environ 3300 km linéaires. Le géoréférencement est uniquement fait sur ces routes.

Le projet SIGALE vise une surveillance sur l'ensemble du réseau routier, et non sur les seuls endroits ayant connu un événement par le passé. Pour les apprentissages et les évaluations, nous avons donc considéré environ 37 000 points, tous les 100 mètres le long des routes, en plus des points de la BDe. Cet ensemble de référence est appelé *PR100* (Points de Route 100m).

Landslide Susceptibility Index (*LSI*) :

Le LSI s'inspire de la méthodologie ELSUS (Wilde et al. 2018). Nous l'avons adaptée spécifiquement pour le territoire de la Savoie (73). Le LSI combine des informations de lithologie, de couverture des sols (base CORINE LAND COVER, notée *CLC*) et de la pente calculée sur un pixel de 10x10 m. Il est défini par :

$$LSI(i) = \sum_{j=1}^{3} \omega_j x_{ij}$$

avec :

- wj : le coefficient de pondération des attributs (pente, CLC et lithologie) en fonction de leur poids dans la susceptibilité aux mouvements gravitaires (par exemple la pente a une influence très importante, la couverture des sols moins)
- et xij : le coefficient qui pondère les différentes catégories associées à chaque attribut. Par exemple les pentes fortes auront un coefficient plus élevé que les pentes faibles.

Chaque coefficient est défini entre 0 et 1.

La Figure 1 ci-dessous représente la distribution des LSI pour les points de la BDe (points évènements, en bleu) et pour les autres points de l'ensemble de référence PR100 (non-évènements, en orange). Les deux distributions sont bien distinctes et indiquent que le LSI est pertinent pour séparer les zones de glissements de terrain aux zones sans glissement. Plus le LSI est élevé, plus on a de chance que le point ai connu un événement par le passé. Nous extrapolons cette observation en supposant que des points avec un LSI élevé, n'ayant pas forcément subi d'événement par le passé, sont plus fortement susceptibles de subir un événement dans le futur. Nous observons par ailleurs que des points événements ont un LSI faible, ce qui illustre les limites de l'approche.

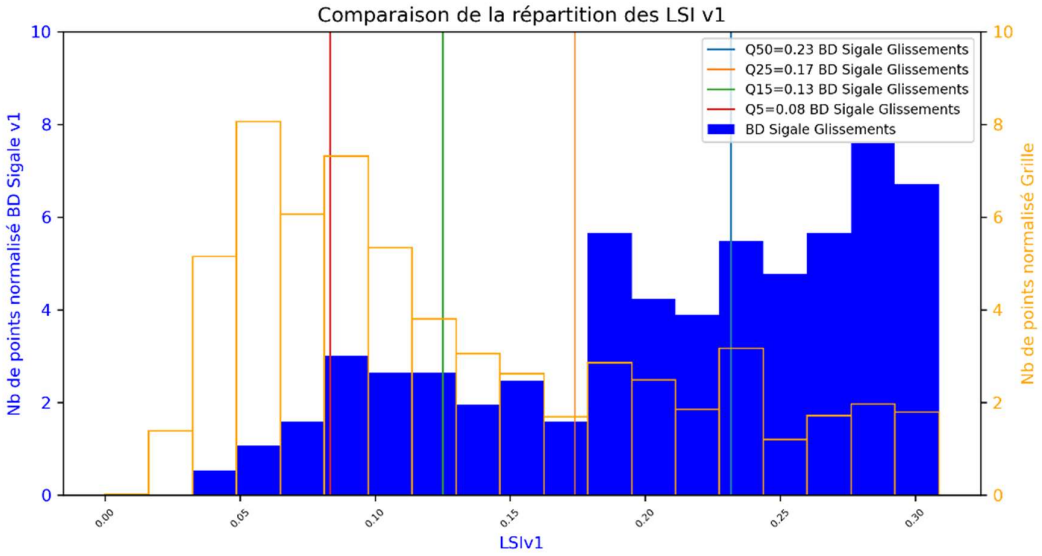


Figure 1: Histogramme des LSI pour les BDe en bleu et pour les 37000 points de la grille en orange

Nous évaluons la qualité de notre LSI par le calcul du pourcentage d'aire sous la courbe *ROC* (Receiver Operating Characteristics), notée *AUC* (Area Under The Curve). Il est d'environ 78% pour notre LSI sur le département de Savoie, contre 68% pour l'ELSUS sur les zones montagneuses d'Europe. Il y a donc une amélioration de 10 points avec cette approche à l'échelle du département. Pour définir un zonage avec 4 niveaux de LSI, les quantiles Q5, Q15 et Q25 présentés sur la Figure 1 sont utilisés.

Rockfall Susceptibility Index (RSI) :

La problématique des chutes de bloc diffère de celle des glissements de terrain, principalement car la géolocalisation dans la BDe (sur la route), peut être assez éloignée des falaises ou talus à l'origine de l'évènement. La détermination des zones sources est donc la première étape pour la définition du RSI, dont le but est de créer des zones homogènes en termes d'aléa rocheux. Pour cela le RSI se base sur une propagation à grande échelle avec le logiciel flow-R (Horton et al. 2013). Une étude paramétrique de flow-R est réalisée avec une itération des deux étapes suivantes :

1 – Définir automatiquement les zones sources d'éboulement rocheux (paramètres de distances à la route et de pente)

2 - Propager depuis ces zones sources (paramètres internes au logiciel)

Pour chaque couple de paramétrisations (zones sources et propagation), le pourcentage de chutes de blocs et de points PR100 compris dans les zones de propagation sont calculés. Le couple de paramétrisations retenu couvre 85% des chutes de blocs pour seulement 17% des autres PR100 et nous semble être bien représentatif des zones sensibles. La paramétrisation sélectionnée pour les zones sources est une pente supérieure à 45° (sur un raster de 5x5 m), à une distance maximale de 400 m du réseau routier.

Conclusion et application :

Les indices LSI et RSI permettent une spatialisation des susceptibilités aux glissements de terrain et aux chutes de bloc sur le département de la Savoie. Dans le projet SIGALE, ils sont utilisés comme « filtre spatial », pour l'apprentissage des modèles prédisant un niveau d'alerte à partir de données météorologiques. Ce filtrage initial est nécessaire pour appliquer les méthodes d'apprentissage car les aléas gravitaires sont des événements rares. En effet, sur 11 ans (4 015 jours), la base d'événements recense environ 1100 événements en Savoie. Ce nombre doit être comparé aux 37 000 points PR100 que nous surveillons avec un pas journalier, soit plus de 148 millions de « points spatio-temporels » considérés sur les données historiques (37 000 points x 4 015 jours). De tels déséquilibres sont rédhibitoires pour la plus part des algorithmes d'apprentissage.

L'application de filtres basés sur les LSI et les RSI permet déjà de réduire les zones de surveillance de 37 000 à 6619 pour les glissements et 2250 pour les chutes de blocs. Nous envisageons également d'utiliser ces indices pour pondérer les résultats issus des modèles IA.

Bibliographie:

Wilde, M., Gunther, A., Reichenbach, P., Malet, J. and Hervas, J., Pan-European landslide susceptibility mapping: ELSUS Version 2, JOURNAL OF MAPS, ISSN 1744-5647, 14 (2), 2018, p. 97-104, JRC105147

Horton P, Jaboyedoff M, Rudaz B and Zimmermann M: Flow-R, a model for susceptibility mapping of debris flows and other gravitational hazards at a regional scale. Natural Hazards Earth System Sciences, 13, 869-885, 2013, doi:10.5194/nhess-13-869-2013

Guide technique MEZAP

Aléa rocheux. Méthode « MEZAP »
Caractérisation de l'aléa rocheux dans le cadre d'un Plan de Prévention des Risques Naturels (PPRn) ou d'un Porter à connaissance (PAC)

Auteurs : Bastien Colas[1], Frédéric Berger[2], Rémy Martin[3]

Affiliations :

1) *BRGM, Montpellier, France*
2) *INRAE, Grenoble, France*
3) *ONF-RTM, Grenoble, France*

Contacts : b.colas@brgm.fr, remy.martin-02@onf.fr, frederic.berger@inrae.fr

Résumé :

Le guide technique MEZAP (MEthode de Zonage de l'Aléa chute de Pierres) s'adresse aux services de l'État amenés à commanditer des études de l'aléa rocheux dans le cadre de la réalisation d'un PAC (Porter à connaissance) ou d'un PPRn, ainsi qu'aux opérateurs (bureaux d'études, organismes publics) amenés à réaliser ces études. Elle intéresse également les collectivités qui peuvent dans certains cas souhaiter assurer la maitrise d'ouvrage de ce type de carte.

Ce document est le fruit des réflexions d'un groupe de travail initié en 2014 rassemblant les opérateurs publics de l'Etat (INRAE, BRGM, Cerema, Université G. Eiffel, ONF-RTM) et les représentants des services déconcentrés de l'État, sous pilotage du ministère de la Transition Écologique.

La MEZAP répond à la volonté de l'État de conserver une approche proportionnée aux attentes et aux moyens dédiés à la cartographie de l'aléa rocheux dans le cadre de PPRn ou de PAC. La MEZAP s'appuie sur une base commune de caractérisation de l'aléa rocheux et d'un vocabulaire commun. Elle propose une approche pragmatique de la cartographie de l'aléa rocheux, couvrant toute la gamme des phénomènes (de la pierre isolée jusqu'au phénomène de grande ampleur) permettant de garantir la cohérence des productions d'un territoire à l'autre.

L'objectif est d'aboutir à une méthodologie partagée dans la mesure où des hypothèses (simplificatrices) fortes sont faites pour permettre une approche « aléa » : définition d'une fréquence et d'une intensité, dans un contexte où il est connu que ces informations sont souvent inaccessibles (à défaut de longs travaux de recherche). Par conséquent c'est au travers d'une méthode commune qu'il est possible d'assurer l'homogénéité des cartes dont il faut le rappeler l'objectif reste de réguler l'acte de construire d'une manière homogène sur le territoire français.

La caractérisation de l'aléa rocheux dans la MEZAP est basée sur le croisement d'une intensité de phénomène de mobilisation de masse rocheuse et d'une probabilité d'atteinte de cette masse rocheuse en tout point du territoire à cartographier. L'atteinte se définit comme la résultante d'une probabilité de départ et d'une probabilité de propagation.

La MEZAP est construite sur la définition d'un ou plusieurs scénario(s) de référence qui détermine(nt) l'aléa de référence. Le choix du (des) scénario(s) de référence, quel(s) qu'il(s) soi(en)t, et celui de l'aléa de référence constituent des points d'arrêts avec concertation entre la MOA (le cas échéant appuyé par son AMO) et le prestataire. Les scénarios sont décrits en fonction i) de l'intensité du phénomène redouté : dépendante du volume unitaire ou du volume total se propageant vers les enjeux ; ii) de la propagation sur des longues ou courtes distances.

Comme spécifié par le guide PPRn, la MEZAP qualifie le niveau d'intensité du phénomène au travers d'une échelle de dommages au bâti courant. En conséquence, la hiérarchisation de l'intensité est régie par deux hypothèses simplificatrices fortes : i) l'intensité du phénomène est définie par le volume du bloc de l'aléa de référence ; ii) à un volume, est associé un niveau de dommage.

Dans le cadre de la MEZAP l'activité définit la probabilité de départ sur une période de référence de 100 ans. Elle est qualifiée par un indice d'activité estimé à partir notamment des évènements recensés lors de l'approche historique/documentaire, de traces de départ visibles (cicatrices en falaises), du nombre de blocs observés dans la pente ou des traces laissées dans la pente (impact laissées sur les arbres ou dans le sol …).

Afin d'objectiver l'évaluation de la propagation, la MEZAP en s'appuyant sur les recommandations du JTC-1 propose de relier qualification / quantification de la propagation.

L'atteinte de phénomène en tout point du territoire intègre la probabilité de départ et la probabilité de propagation. L'évaluation est menée à partir d'une matrice de croisement. L'aléa rocheux est finalement évalué à partir du croisement de l'atteinte du phénomène et de l'intensité associée suivant une matrice hiérarchisée. Pour rappel, la qualification de l'aléa dans la MEZAP intègre une référence au bâti standard pour la hiérarchisation de l'intensité de phénomène. De ce fait la MEZAP s'intéresse à la vulnérabilité du bâtiment (et des personnes dans le bâtiment) et non des personnes en dehors des bâtiments.

Remerciements :

Le guide technique MEZAP a été sous l'égide du Ministère de la Transition Ecologique (DGPR). Il bénéficie des contributions du groupe de travail MEZAP : BRGM, Cerema, Direction Départementale des Territoires de la Haute-Savoie, INERIS, INRAe, Ministère de la Transition Écologique, ONF-RTM, Université G. Eiffel.

References:

Besson, L., Durville, J-L., Garry, G., Graszk, E., Hubert, T., & Toulemont, M. (1999). Plans de prévention des risques naturels (PPR). Risques de mouvements de terrain. Guide méthodologique. La Documentation française. https://side.developpement-durable.gouv.fr/Default/doc/SYRACUSE/66935

C2ROP. (2020). Caractérisation de l'aléa éboulement rocheux - État de l'art. Cerema https://www. cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/caracterisation-alea-eboulement-rocheux-etat-art

Fell et al. (2008). Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning.

COLLECTION SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

Guide technique

Aléa rocheux

Méthode « MEZAP »
Caractérisation de l'aléa rocheux dans le cadre d'un Plan de Prévention des Risques Naturels (PPRn) ou d'un Porter à connaissance (PAC)

COLLECTION SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

brgm INRAE rtm Office National des Forêts brgmeditions

Premières analyses de l'avalanche poudreuse de gypse du Bois de la Glaive du 30 janvier 2021

Marc-Henri Derron*†[1], Tiggi Choanji , Li Fei , Amalia Carlota Gutierrez , Michel Jaboyedoff , Chunwei Sun , Charlotte Wolff , and Valérie Baumann Traine

[1]Groupe RISK - Université de Lausanne – Lausanne, Suisse

Résumé

Introduction

Le 30 janvier 2021, un glissement de terrain est signalé sur la colline du Bois de la Glaive (commune de Ollon, Suisse). Cet événement ayant provoqué la coupure d'une route communale, il est relayé par les médias locaux, et rapidement une vidéo de 15 secondes est disponible en ligne. On y voit une " coulée " blanche descendre à forte vitesse la pente boisée, emportant les arbres sur son passage. Plusieurs observations de terrain sont faites dans les heures qui suivent, ainsi que des scans LiDAR et vols de drone. L'observation la plus étonnante est que le dépôt du matériel de la coulée est sec (i.e. pas mouillé), aucun filet d'eau ou de boue ne s'en échappe.

Cet événement, que l'on peut qualifier de glissement superficiel à son stade initial, prend place dans le versant sud-ouest de la colline du Bois de la Glaive qui est elle-même affectée par un glissement de terrain profond aux caractéristiques suivantes : extension 700 x 400 m, pente moyenne 40○, deux surfaces de glissement à 25 et 50 m de profondeur (Traveletti et al., 2010). Les roches formant cette colline sont les gypses Triasiques (Badoux, 1960) de la zone submédiane des Préalpes (Swisstopo, 2005).

Caractéristiques de l'événement de janvier 2021

La coulée de janvier 2021 affecte une zone d'environ 160 m de long sur 30 m de large (zone de dépôt incluse). La différence d'altitude entre l'escarpement sommital et le dépôt est de 140 m, la pente dans la partie supérieure est de 43○ et l'angle de propagation de la coulée de 39○. L'épaisseur de la zone glissée est d'environ 2 m. La comparaison des données LiDAR (aérien 2015 vs terrestre 2021) a permis d'estimer le volume érodé à 3350 m3 et le volume déposé à 3450 m3.

Dans la niche d'arrachement, un profil de sol très particulier est visible : un horizon organique brun de 30 cm d'épaisseur au sommet, puis _˜1,5 m de matériau granulaire très fin (jaunâtre au sommet et blanc à la base). Ce matériau est complètement meuble et peut être ramassé simplement à la main (comme du sable) ; il semble être le composant principal de la masse de glissement. En dessous, ou parfois sur le côté de ce matériau pulvérulent, on trouve des graviers et des blocs de gypse.

*Intervenant

†Auteur correspondant: marc-henri.derron@unil.ch

Figure : A : Orthophoto " drone " de l'événement de janvier 2021. B : vue depuis le pied. C : Coupe longitudinale du glissement de terrain illustrant les emplacements de la ligne d'énergie. D : Vitesses calculées par la technique de la ligne d'énergie et comparaison avec les vitesses obtenues par couplage vidéo - nuage de points, le long du profil de la pente.

Facteurs déclenchants

L'événement de janvier 2021 a été précédé de deux autres, plus petits, dans des secteurs voisins, en janvier 2018 et mars 2020. Ces trois événements ont été utilisés pour tenter d'identifier si un facteur météorologique particulier pouvait avoir déclenché ces glissements (précipitation, fonte de la neige, variation de température, vent). Il apparait que les précipitations et la fonte de la neige puissent avoir joué un rôle pour les événements 2021 et 2020. Néanmoins, ces conditions météorologiques ne présentaient pas un caractère exceptionnel. La stabilité de ce secteur est très précaire (matériau peu cohérent, forte pente, racines peu profondes) et on peut s'attendre à ce que des événements de ce type arrivent avec ou sans facteurs déclenchants nettement identifiables. Et rappelons que le matériel déposé en 2021 était pulvérulent et sec, et qu'il n'y a avait pas d'eau suintant au niveau de la surface de rupture.

Analyse des vitesses

Deux approches ont été utilisées pour déterminer les vitesses d'écoulement de l'événement de 2021 : 1) l'analyse de la séquence vidéo, et 2) la technique de la ligne d'énergie (Heim, 1932; Jaboyedoff & Labiouse, 2011).

Pour l'analyse de la vidéo, une approche manuelle et une semi-automatique par filtrage ont été utilisées pour suivre le front de la coulée (avec respectivement 1 et 10 images par seconde extraites de la séquence vidéo de 14s). Le front est ensuite reporté sur le nuage de point LiDAR pour calculer les vitesses. Pour la technique de la ligne d'énergie, deux lignes sont considérées. La première joint le centre de gravité de la masse glissé (dans la position originelle) au centre de gravité du dépôt. La seconde joint le sommet de la niche d'arrachement au point le plus distant du dépôt.

Les vitesses estimées par ces différentes méthodes ont pu être comparées entre elles pour la période où les données vidéos sont disponibles. En particulier, la vitesse estimée à l'aide de la vidéo est comprise entre celles des deux lignes d'énergie. Le pic de vitesse au niveau de la route est visible sur tous le profiles. Ces estimations sont donc cohérentes entre-elles, bien qu'obtenues avec des techniques totalement indépendantes. Une vitesse de propagation de 10 à 20 m/s dans la zone centrale parait donc réaliste.

Conclusion

Le substrat gypseux et le climat local du Bois de la Glaive ont permis le développement d'un sol particulier, un dolomitosol à horizon gypsique (Biedermann et al. 2014). Ce sol est pulvérulent et sans cohésion jusqu'à environ 2 m de profondeur. Reposant sur une pente à environ 40◦, il est particulièrement instable. En analysant les archives de photos aériennes, au moins 7 événements du type de celui de 2021 sont visibles depuis 1935. Il est à noter que l'événement de 2018, voisin de celui de 2021, semble avoir eu lieu précisément au même endroit qu'un événement visible sur les images de 1935. Ceci laisse penser qu'un siècle suffit à reformer cette couche instable dans ce substrat particulièrement sensible aux processus d'altération de surface.

Les propriétés particulières de ce matériau ont aussi une influence sur les stratégies possibles de réduction des risques. La rapidité de " l'avalanche poudreuse " de gypse observée en 2021 (avec une vitesse d'environ 15 m/s au niveau de la route) limite considérablement les moyens d'alarme une fois le processus démarré.

Bibliographie

Badoux, H., 1960. Notice explicative feuille Monthey no 1284, Atlas géologique de laSuisse 1:25000. Swiss Geological Commission, Berne.

Biedermann, Y., Gobat, J. M., & Vittoz, P. (2014). Typologie des sols sur gypse et végétation associée en Suisse. Bull Soc vaud Sc Nat, 94(1), 107-129.

Heim, A.: Bergsturz und Menschenleben, Fretz und Wasmuth, Zurich, 218 pp., 1932 (in German).

Jaboyedoff, M., & Labiouse, V. (2011). Preliminary estimation of rockfall runout zones. Natural Hazards and Earth System Sciences, 11(3), 819-828.

Swisstopo 2005: Carte tectonique de la Suisse au 1:500'000.
Travelletti, J., Demand, J., Jaboyedoff, M., & Marillier, F. (2010). Mass movement characterization using a reflexion and refraction seismic survey with the sloping local base level concept. Geomorphology, 116(1-2), 1-10.

Mots-Clés: glissement superficiel, gypse, altération, propagation

Rainfall-triggered landslide: a global approach of present and future landslide risk

Flahaut J., Boiselet A., Castet C.,

Axa Climate, Paris, France

Introduction

Direct economic losses and physical damages resulting from natural disasters are estimated at $343 billion in 2021 (AON report, 2021). This is the seventh most expensive year on record. In this context, companies increasingly need to understand and quantify their current and future exposure to all these risks to prioritize investments for their reduction.

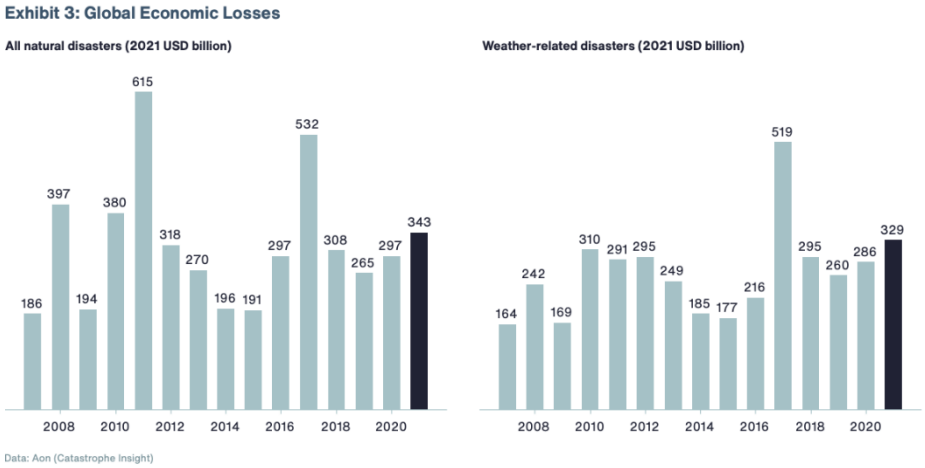


Figure 1 : Overall Economic Losses due to Natural Disasters since 2007, the year 2021 is the 7th largest year of loss

Among all these natural risks, the characterization of gravity collapse is one of the least developed to answer companies and communities needs. It is often required to provide a homogeneous worldwide assessment of this risk. In addition, the awareness of climate change and its impacts leads companies to investigate the evolution of risks for the coming years. It therefore seems necessary to define the current global risk, but also to integrate the potential evolutions related to climate change.

To address these risk characterization issues, we rely on Kirschbaum et al. (2017a, 2017b, 2018, 2021) studies on the development of the LHASA (Landslide Hazard Assesment for Situational Awareness) model. This model is designed to assess the level of risk of landslide occurring for monitoring purposes and has the advantage of providing global coverage.

Daily rainfall data from the Era 5 reanalysis weather model were used. Produced by ECMWF Copernicus Climate Change Service (C3S), these data were combined with data from the Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL) global climate model produced by the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) to perform a downspout to generate fine scale precipitation projections.

INTERNAL

1. LHASA Model: Interests and Limitations for Risk Characterization

The landslide forecast made by the LHASA model[3] is based on two distinct aspects: the characteristics of the terrain favoring or not the occurrence of an event (called susceptibility) and the meteorological characteristics favoring or not its triggering (based on the rainfall occurring in the last 7 days)."

Landslide susceptibility is established by Stanley & Kirschbaum (2017a) by considering topography, geology, seismic risk with distance to active faults, deforestation as well as the road system. The integration of all these parameters defines an index of landslide susceptibility, increasing with the apparent predisposition of the soil to be destabilized.

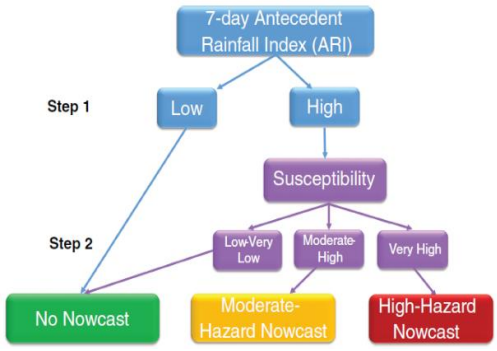


Figure 2 : Structure of the LLHASA model decision tree from Kirschbaum, D., & Stanley, T. (2018).

The definition of the probability of triggering an event considers this susceptibility index and the calculation of rainfall. It is thus a question of quantifying the frequency of exceedance of a rainfall threshold locally considered as potentially triggering landslides associated with medium to high susceptibility.

The approach of precipitation of the model LHASA, is carried out with l'Antecedent Rainfall Index (ARI). This is a metric established as a weighted average slipped over 7 days of daily precipitation including the current day as presented in equation (A)

$$ARI = \frac{\sum_{t=0}^{6} p_t w_t}{\sum_{t=0}^{6} w_t} \quad \text{Equation A}$$

with where $w_t = (t+1)^{-2}$ the t is the number of days before the present between 0 and 6 days.

Therefore, the threshold considered as potentially triggering landslides is established as the 95th percentile of the local ARI over a historical reference period.

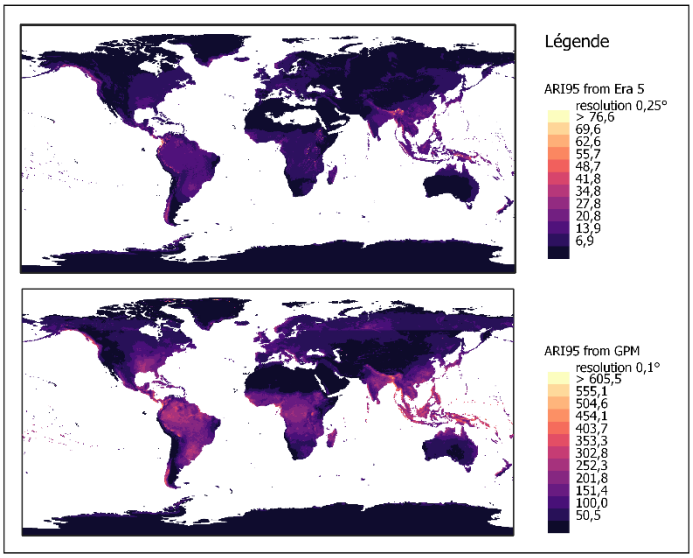


Figure 3 : Maps of the spatial distribution of the ARI95 thresholds from Era 5 data (top) and GPM IMERG and TMPA data from Kirsbaum et al., 2018 (bottom)

The use of ERA 5 data first implies a different resolution compared to the data considered for the design of the LHASA model. In addition, the analysis of ARI 95 thresholds from ERA 5 presents differences. Kirschbaum and Stanley (2018) presents a ARI95 threshold map built from 16 years of recorded data satellite remote sensing of the GPM mission whose data has a resolution of 0.1°. However, the data of Era 5 reanalysis, available for the period 1979 to present enable to isolate a period of 30 years of data à a resolution of 0.25°.

Thus, we have adapted the LHASA approach with ERA 5, by counting threshold crossings on different time scales to define the monthly and annual threshold overrun frequencies to discriminate landslide risk in the world.

2. Mainstreaming climate change

AXA Climate provides its clients with an assessment of their exposure to a wide range of current risks, but also considering the evolution of climatic conditions by 2030 and 2050.

To integrate the different trajectories of greenhouse gas concentrations in the atmosphere as defined by the members of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) into these risk studies, precipitation projections for two RCP scenarios were selected. The RCP (Representative Concentration Pathway) scenarios rcp4.5 and rcp8.5 are considered to characterize future gravity risk. They correspond respectively to an optimistic scenario of greenhouse gas emission reductions and to the radiative forcing scenarios in the absence of measures to reduce greenhouse gas emissions.

The integration of scenarios will impact the definition of climate domains. This will lead to a variation in the estimates of precipitations in terms of volume and/or the occurrence of extreme events.

In response to climate change leading to increased precipitation, variations in the hydrological cycle, extreme weather conditions, heavy short-lived showers (storms), melting ice in the Alps, and other weather events; the frequency of activation and the areas of occurrence of landslides are likely to vary considerably in the future. In addition, future changes in land use, including deforestation, affect the susceptibility to slippage, which will be revised using projections of vegetation cover losses.

In conclusion, for a geographical area of study, we can estimate a change in susceptibility, but especially a change in the frequency of exceeding the threshold which serves as an approximation to define the occurrence of events or not.

In detail, for each RCP scenario, rainfall projections were used to determine:

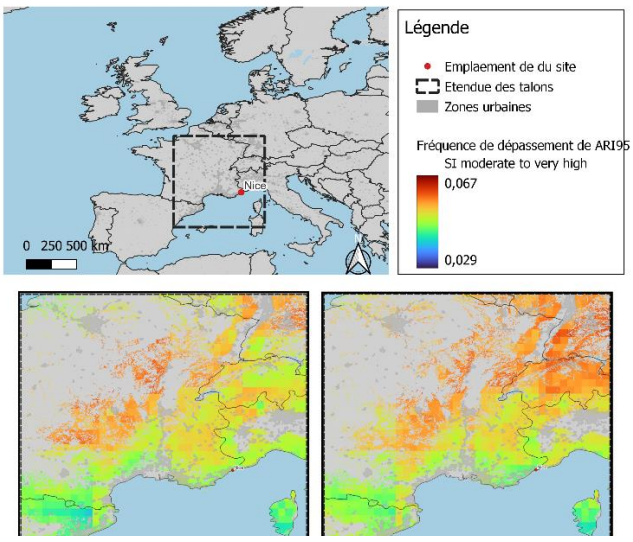


Figure 4: Location of a study site (top)et Frequency of exceedance of ARI 95 of the areas of susceptibility to slippage Medium to Very High in 2030 (bottom left) and 2050 (bottom right)

- annual frequency of exceeding the 95th percentile of ARI for the period 2020-2030.
- annual frequency of exceeding the 95th percentile of ARI for the period 2020-2050.

These frequencies were then classified as increasing, decreasing or stable by comparison with the period of reference.

For example, if a study was requested for a site located in Nice area (cf figure 4). With this approach, one would estimate when presence of a strong landslide susceptibility, the frequency with which the ARI95 threshold is exceeded between 2015 and 2020 east of 4,52 %, which amounts to a high risk.

This risk tends to worsen in a 2030 horizon if we refer to the scenarios rcp4.5 (4.76%) and rcp8.5 (4.64%).

3. Conclusion

Prior to this work, the categorization of landslide risk at Axa Climate was assessed by susceptibility to landslide that does not consider the presence of triggers and climate change factors. Through this study, we can estimate the risk of current gravity processes as well as project the evolution of these risks according to various climate scenarios for each site of a company spread around the world. This approach allows for a relative classification of the level of gravity risk at site level, allowing companies to focus their adaptation and mitigation efforts.

In addition, this methodology will make it possible to integrate future evolutions of climate change models and scenarios (CMIP6 models...) and makes it possible to explore in future work the seasonality on a regional scale of gravity risks as well as its future evolution.

References

Aon Weather, Climate and Catastrophe Insight report, 2021 https://www.aon.com/getmedia/1b516e4d-c5fa-4086-9393-5e6afb0eeded/20220125-2021-weather-climate-catastrophe-insight.pdf.aspx

Khan S., Kirschbaum D. B., Stanley T. Investigating the potential of a global precipitation forecast to inform landslide prediction, Weather and Climate Extremes, Volume 33, 100364, ISSN 2212-0947 (2021). https://doi.org/10.1016/j.wace.2021.100364.

Kirschbaum D. & Stanley T. Satellite-Based Assessment of Rainfall-Triggered Landslide Hazard for Situational Awareness, Erath's Future, 6, 505-523 (2018). https://doi.org/10.1002/2017EF000715

Stanley, T., Kirschbaum, D.B. A heuristic approach to global landslide susceptibility mapping. Nat Hazards ***87,*** *145–164 (2017).* https://doi.org/10.1007/s11069-017-2757-y

Stanley T., Kirschbaum D. B., George J. Huffman, and Robert F. Adler. Approximating Long-Term Statistics Early in the Global Precipitation Measurement Era, Earth Interactions 21, 3 (2017). https://doi.org/10.1175/EI-D-16-0025.1

Stanley T., Kirschbaum D. B., Sobieszczyk S., Jasinski M.F., Borak J.S., Slaughter S.L. Building a landslide hazard indicator with machine learning and land surface models, Environmental Modelling & Software, Volume 129, 104692, ISSN 1364-8152 (2020). https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104692.

Earthquake-induced landslides in Haiti: seismotectonic and climatic influences, size-frequency relationships

H.B. Havenith[a], Kelly Guerrier[b], Romy Schlögel[a,c], Dominique Boisson[b], Claude Prépetit[d]

[a]University of Liege, Department of Geology, Georisk and Environment, Belgium (hb.havenith@uliege.be)
[b]Université d'Etat d'Haïti, Faculté des Sciences, LMI-CARIBACT, URGéo Haïti
[c]Centre Spatial de Liège, Belgium
[d]Unité Technique de Sismologie, Bureau des Mines et de l'Energie, Delmas 31, Port-au-Prince, Haiti

ABSTRACT

First analyses of landslide distribution and triggering factors are presented for the region affected by the August, 14, 2021, Nippes, earthquake (Mw=7.2) in Haiti. Landslide mapping was mainly carried out by comparing pre- and post-event remote imagery (~0.5 -1-m resolution) available on Google Earth Pro® and Sentinel-2 (10-m resolution) satellite images. The first covered about 50% of the affected region (for post-event imagery and before completion of the map in January 2022), the latter were selected to cover the entire potentially affected zone. On the basis of the completed landslide inventory, comparisons are made with a catalogue compiled by others for the January, 12, 2010 seismic event (Mw=7.0), including one open inventory (by Harp et al., 2016, United States Geological Survey) that was also used for further statistical analyses (see plots of landslides triggered in 2010 and 2021 on the maps in Fig. 1). Additionally, we studied the pre-2021 earthquake slope stability conditions. These comparisons show that the total number of landslides mapped for the 2021 earthquake (7091) is smaller than the one observed by two other research teams for the 2010 event (23,567, for the open inventory also used here and 30,828 for the other publication by Gorum et al., 2013). However, these fewer landslides triggered in 2021 cover much wider areas of slopes (>80 km^2) than those induced by the 2010 event (~25 km^2 – considering the open inventory). A simple statistical analysis indicates that the lower number of 2021-landslides can be explained by the 'under-mapping' of smallest landslides triggered in 2021, partly due to the lower resolution imagery available for most of the areas affected by the recent earthquake; this is also confirmed by an inventory completeness analysis based on size-frequency statistics. The much larger total area of landslides triggered in 2021, compared to the 2010 earthquake, can be related to different physical reasons: a) the larger earthquake magnitude in 2021; b) the more central location of the fault segment that ruptured in 2021 with respect to coastal zones; c) and possible climatic preconditioning of slope stability in the 2021-affected area. These observations are supported by (1) a new pre-2021 earthquake landslide map, (2) rainfall distribution maps presented for different periods (including October 2016 - when Hurricane Matthew had crossed the western part of Haiti), covering both the 2010 and 2021 affected zones, as well as (3) the shaking intensity prediction and related simplified Newmark Displacement maps.

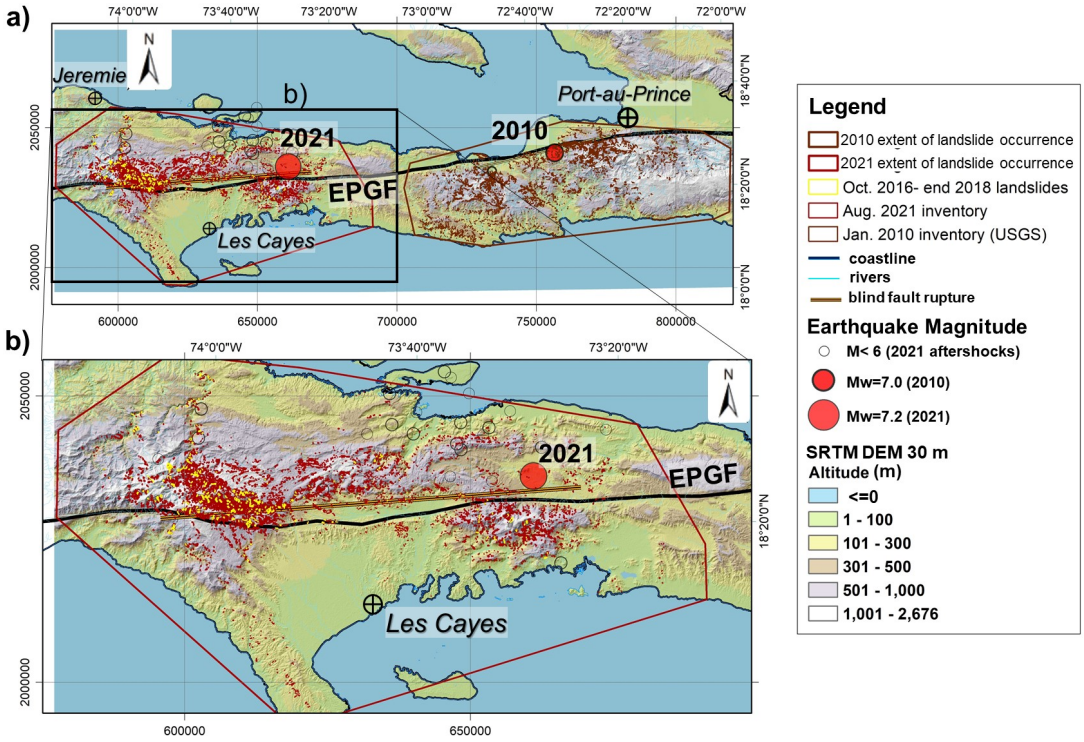


Fig. 1. a) Study region with areas affected, respectively, by the two Mw >= 7 events. Individual landslides triggered in 2010 (Harp et al., 2016, inventory) are mapped as small brown polygons (appearing as points at this scale) and the maximum extent of landslides triggered in 2010 is outlined by the large brown polygon. Landslides mapped for the 2021 event are shown as small dark red polygons within the maximum landslide extent area outlined by the large dark red polygon. b) Focus on the region hit by the August 2021 earthquake, with 7091 landslide locations shown by dark red polygons. See also main shock and after-shock (empty circles) location (from earthquake.usgs.gov) and outline of the (roughly 80 km long) blind fault rupture (extracted from USGS page: https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000f65h/finite-fault).

References

Gorum, T., van Westen, C.J., Korup, O., van der Meijde, M., Fan, X. van der Meer, F.D. (2013). Complex rupture mechanism and topography control symmetry of mass - wasting pattern, 2010 Haiti earthquake. *Geomorphology*, 184, 127-138.

Harp, E.L., Jibson, R.W., Schmitt, R.G. (2016). Map of landslides triggered by the January 12, 2010, Haiti earthquake: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Map 3353, 15 p., 1 sheet, scale 1:150,000. doi:10.3133/sim3353.

Glissements de terrain induits par les tremblements de terre en Haïti : influences sismotectoniques et climatiques, relations taille-fréquence

H.B. Havenith[a], Kelly Guerrier[b], Romy Schlögel[a,c], Dominique Boisson[b], Claude Prépetit[d]

[a]Université de Liege, Département de Géologie, Georisk and Environment, Belgium (hb.havenith@uliege.be)
[b]Université d'Etat d'Haïti, Faculté des Sciences, LMI-CARIBACT, URGéo Haïti
[c]Centre Spatial de Liège, Belgium
[d]Unité Technique de Sismologie, Bureau des Mines et de l'Energie, Delmas 31, Port-au-Prince, Haiti

RÉSUMÉ

Les premières analyses de la distribution des glissements de terrain et des facteurs de déclenchement sont présentées pour la région touchée par le tremblement de terre de Nippes (Mw=7.2) du 14 août 2021 en Haïti. La cartographie des glissements de terrain a été réalisée principalement en comparant l'imagerie satellites avant et après l'événement (résolution ~0,5 - 1-m) disponible sur Google Earth Pro® et les images satellites Sentinel-2 (résolution 10-m). Les premières couvraient environ 50 % de la région touchée (pour l'imagerie post-événement et avant l'achèvement de la carte en janvier 2022), les secondes ont été sélectionnées pour couvrir l'ensemble de la zone potentiellement touchée. Sur base de l'inventaire des glissements de terrain, des comparaisons sont faites avec un catalogue compilé par d'autres pour l'événement sismique du 12 janvier 2010 (Mw=7.0), y compris un inventaire ouvert (par Harp et al., 2016, United States Geological Survey) qui a également été utilisé pour d'autres analyses statistiques (voir les graphiques des glissements de terrain déclenchés en 2010 et 2021 sur les cartes de la Fig. 1). De plus, nous avons étudié les conditions de stabilité de pente avant le séisme de 2021. Ces comparaisons montrent que le nombre total de glissements de terrain cartographiés pour le séisme de 2021 (7091) est inférieur à celui observé par deux autres équipes de recherche pour l'événement de 2010 (23 567, pour l'inventaire ouvert également utilisé ici et 30 828 pour l'autre publication de Gorum et al., 2013). Cependant, ces glissements de terrain moins nombreux déclenchés en 2021 couvrent des zones de pentes beaucoup plus larges (>80 km2) que ceux induits par l'événement de 2010 (~25 km2 - en considérant l'inventaire ouvert). Une analyse statistique simple indique que le nombre inférieur de glissements de terrain en 2021 peut s'expliquer par la "sous-cartographie" des plus petits glissements de terrain déclenchés en 2021, en partie en raison de l'imagerie de moindre résolution disponible pour la plupart des zones touchées par le récent tremblement de terre ; ceci est également confirmé par une analyse de l'intégrité de l'inventaire basée sur des statistiques de taille-fréquence. La superficie totale beaucoup plus importante des glissements de terrain déclenchés en 2021, par rapport au tremblement de terre de 2010, peut être liée à différentes raisons physiques : a) la magnitude plus importante du tremblement de terre en 2021 ; b) la localisation plus centrale du segment de faille qui s'est rompu en 2021 par rapport aux zones côtières ; c) et un éventuel pré-conditionnement climatique de la stabilité des pentes dans

la zone affectée en 2021. Ces observations sont étayées par (1) une nouvelle carte des glissements de terrain avant le séisme de 2021, (2) des cartes de distribution des précipitations présentées pour différentes périodes (y compris octobre 2016 - lorsque l'ouragan Mathieu avait traversé la partie occidentale d'Haïti), couvrant à la fois les zones affectées de 2010 et de 2021, ainsi que (3) la prédiction de l'intensité des secousses et les cartes simplifiées de déplacement de Newmark qui s'y rapportent.

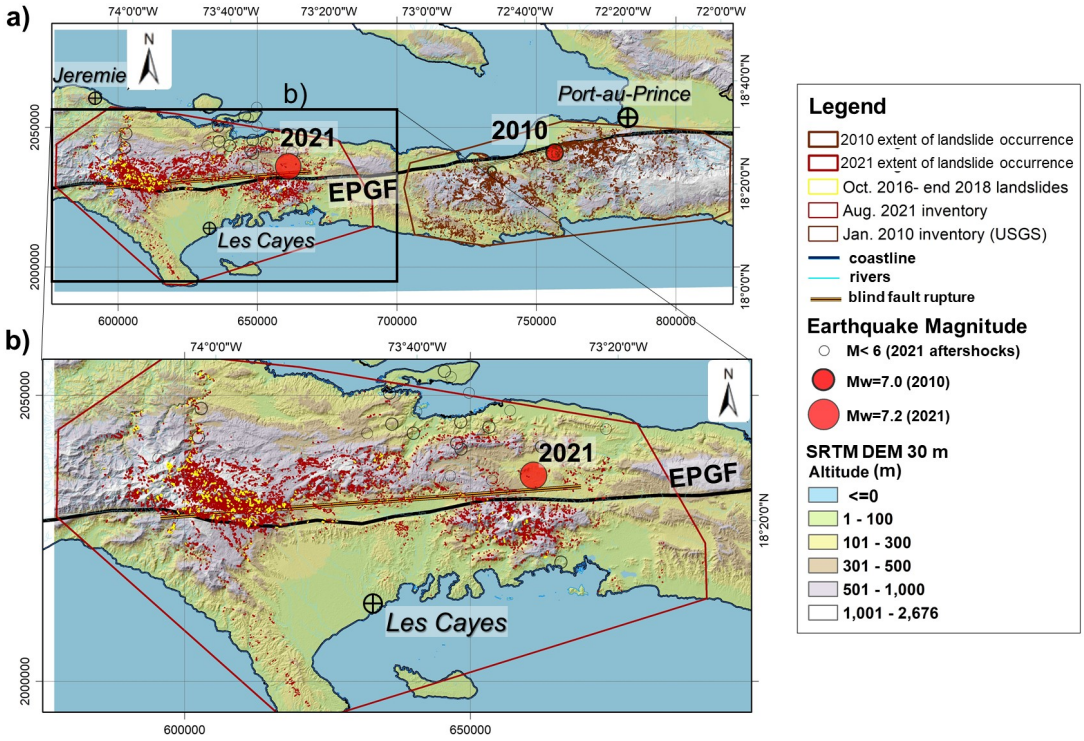


Fig. 1. a) Région d'étude avec les zones affectées, respectivement, par les deux événements Mw >= 7. Les glissements de terrain individuels déclenchés en 2010 (inventaire par Harp et al., 2016,) sont représentés par de petits polygones bruns (apparaissant comme des points à cette échelle) et l'étendue maximale des glissements de terrain déclenchés en 2010 est délimitée par le grand polygone brun. Les glissements de terrain cartographiés pour l'événement de 2021 sont représentés par de petits polygones rouge foncé à l'intérieur de la zone d'extension maximale des glissements de terrain délimitée par le grand polygone rouge foncé. b) Concentration sur la région touchée par le séisme d'août 2021, avec 7091 emplacements de glissements de terrain représentés par des polygones rouge foncé. Voir également l'emplacement du choc principal et de l'après-choc (cercles vides) (à partir de earthquake.usgs.gov) et le contour de la rupture de la faille aveugle (d'environ 80 km de long) (extrait de la page USGS : https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000f65h/finite-fault).

Références

Gorum, T., van Westen, C.J., Korup, O., van der Meijde, M., Fan, X. van der Meer, F.D. (2013). Complex rupture mechanism and topography control symmetry of mass - wasting pattern, 2010 Haiti earthquake. *Geomorphology*, 184, 127-138.

Harp, E.L., Jibson, R.W., Schmitt, R.G. (2016). Map of landslides triggered by the January 12, 2010, Haiti earthquake: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Map 3353, 15 p., 1 sheet, scale 1:150,000. doi:10.3133/sim3353.

Aléa de rupture des sources d'éboulements : quelques aspects de sa quantification

Michel Jaboyedoff, Li Fei, Mariam Ben Hammouda, Tiggi Choanji, Marc-Henri Derron, Federico Franzosi*, Amalia Gutierrez, Zenan Huo, Jinjing Wang, Charlotte Wolff

Groupe Risque, Institut des Sciences de la Terre, Université de Lausanne, CH-1015 Lausanne, Suisse. (michel.jaboyedoff@unil.ch)

***Department of Earth and Environmental Sciences, University of Milano-Bicocca, 20126 Milano, Italie**

Mots clés *source d'éboulement, aléa, volume, activité*

Résumé : *Deux méthodes d'amélioration de l'évaluation de l'aléa d'éboulement sont présentées. Sur la base d'une approche matricielle de l'aléa, la première méthode tente d'évaluer l'aléa de rupture d'une instabilité rocheuse de taille moyenne en se basant sur l'activité des chutes de blocs et la déformation. La seconde méthode est une validation de la distribution cumulative de fréquence temporelle du volume obtenue en comparant le résultat de l'inventaire des volumes éboulés et la distribution obtenue en utilisant les volumes instables potentiels. Ces méthodologies sont à un stade précoce de développement, les résultats ne sont pas encore confirmés.*

Intrpduction

Nous présentons deux tentatives pour améliorer l'évaluation de l'aléa de rupture des chutes de pierres et d'éboulement. La première est basée sur l'approche de l'aléa matricielle, elle tente d'évaluer la rupture d'une instabilité rocheuse de taille moyenne sur la base de deux paramètres: l'activité de l'éboulement et la déformation. Elle part du principe qu'une masse rocheuse se déforme avant la rupture, ce qui est mesuré comme par le déplacement divisé par la longueur du glissement de terrain dans la direction du déplacement. Lorsque celle-ci est supérieure à 0,001 % par an, cela commence à être significatif. Si cela est associé à une fréquence temporelle de chutes de pierres supérieure à 0,1 par an pour des blocs de plus de 1 m^3, l'aléa est significatif. La matrice est créée avec quatre classes numérotées de 1 à 4 pour les deux paramètres d'activité et plus la somme des deux est élevée, plus le niveau de danger est élevé.

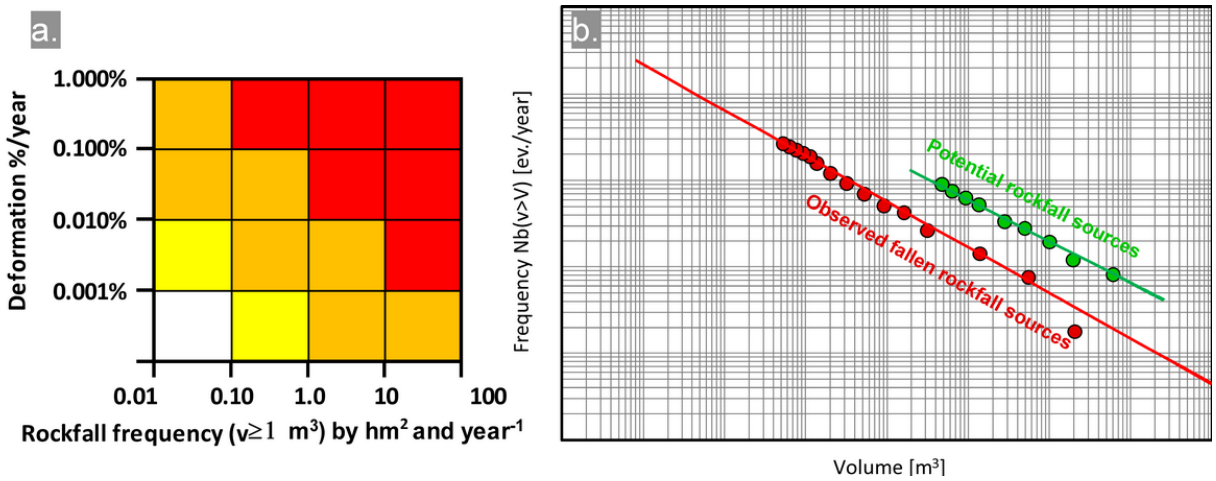


Figure 1. A. Niveaux d'aléa de rupture basés sur la fréquence des chutes de pierres et les déformations. Rouge = élevé, orange = moyen, jaune = faible et blanc = nul. B. Exemple synthétique de la méthode qui consiste à comparer les distributions (loi puissance) des volumes observés et potentiels et vérifier qu'elles possèdent toutes les deux des valeurs de pente b similaires.

La deuxième tentative est une validation de la distribution cumulative de fréquence temporelle des volumes obtenue en comparant le résultat de l'inventaire des volumes de roches éboulés par

événement et la distribution obtenue en utilisant les volumes instables potentiels. Les distributions de volumes peuvent être obtenues en comparant des nuages de points pour les volumes éboulés et en utilisant des structures ou d'autres méthodes pour définir les volumes instables et leurs limites. Ces méthodologies sont à un stade précoce de développement, les résultats ne sont pas encore confirmés, mais elles peuvent être testées et utilisées dans le cas d'un risque rapide et d'une évaluation du risque.

Loi de distribution des volumes

Une distribution en loi de puissance des volumes des sources de chutes de blocs ou d'éboulements a été montrée pour la première fois dans la vallée de Yosemite (Wieczorek et al., 1995) et confirmée par une étude récente (Guerin et al., 2020). La fréquence temporelle de rupture de volume supérieur ou égal à V est donnée par (Dussauge-Peisser et al., 2003):

$$\mathrm{N}(v \geq V) = \frac{1}{S}\frac{N_0}{\Delta t}\left(\frac{\mathrm{V}}{V_0}\right)^{-b} = a\,V^{-b}$$

où N_0 est le nombre d'événements supérieurs ou égaux à V_0, issus d'une surface de falaise S, qui se sont produits au cours d'une période Δt et b est l'exposant qui peut être déduit de la distribution cumulative des volumes tirée d'un inventaire. La période de retour τ est donnée par :

$$\tau(v > V) = \frac{1}{\mathrm{N}(v \geq V)}$$

Récemment, Hantz et al. (2020) ont utilisé l'indice de résistance géologique (GSI) et l'espacement des joints pour caractériser les paramètres a et b de la loi de puissance appliquée à l'aléa non localisé dans une paroi rocheuse.

Aléa d'éboulement important

L'aléa d'éboulement peut être estimé à l'aide d'une méthode simple, basée sur l'évaluation de l'activité, en particulier dans le cas de pentes rocheuses proches de l'équilibre (Figure 1a). L'activité d'une instabilité rocheuse de taille moyenne menant à la rupture peut être caractérisée sur la base de la déformation, soit par le rapport du déplacement observé de la longueur de l'instabilité dans la direction de la déformation (Chigira, 2009), soit par l'activité des chutes de blocs (Jaboyedoff et al., 2012). Ainsi, lorsque la déformation d'une masse rocheuse est accompagnée d'une activité de chutes de blocs, plus la déformation et/ou les chutes de blocs sont élevées, plus l'instabilité est susceptible de rompre. Ainsi, une matrice peut être construite avec la déformation et la fréquence de chutes de bloc par unité de surface. Cette dernière peut être définie par un paramètre de la loi de puissance avec les unités [hm^{-1} $year^{-1}$].

Validation des lois de puissance

Créer un bon ajustement linéaire dans les graphiques en échelle log-log est souvent assez facile, mais cela ne signifie pas que les résultats soient pertinents, cela signifie qu'il est important de vérifier la validité des résultats. On peut d'abord le confirmer en effectuant plusieurs années de relevé en comparant les valeurs a et b pour chaque année. De considérer une année est important pour éviter l'impact des saisons sur l'activité, ou alors il faut choisir la même saison pour la comparaison.
Une autre solution consiste à créer une distribution des volumes potentiellement instables et susceptibles de tomber et à comparer la valeur b des deux distributions. Le volume d'instabilité potentielle peut être défini soit par un simple calcul en utilisant les structures comme limites, soit en utilisant le niveau de base local incliné (SLBL) (Jaboyedoff et al., 2020).
Si les volumes d'instabilités éboulées observés suivent une distribution en loi de puissance, elle peut être comparée à la distribution des volumes potentiellement instables. Si les valeurs b sont similaires de moins de ±0,1, cela peut prouver que les volumes tombés caractérisent bien la morphologie de la paroi rocheuse et on peut conclure que l'aléa de rupture possède un bon niveau de confiance. Cela

a été montré dans une carrière qui subit des glissements de terrain, dont nous ne pouvons pas reproduire les données et sur l'instabilité de la Brenva (Jaboyedoff et al., 2019).

Discussion et conclusion

La première méthode est une tentative d'obtenir un niveau d'aléa en observant les deux types d'activités, soit les déformations (mouvements) et les chutes de pierres. Elle part du principe que lorsque les deux sont présentes, l'aléa de rupture est accru, ce qui a été observé dans plusieurs exemples. Cette première tentative utilise les limites proposées par Hantz et al. (2020) pour l'activité et les prolonges, sur la base d'une échelle logarithmique. En ce qui concerne les niveaux de déformation, elle a utilisé les valeurs proposées pour les grands glissements de terrain (Jaboyedoff et al., 2012). Tout doit être amélioré en utilisant plus d'études de cas pour fixer les limites des deux échelles logarithmiques de la matrice. Son application est probablement utile pour évaluer la rupture près de l'équilibre limite.

La seconde méthode tente de rendre plus objectif l'aléa de rupture basé sur la relation loi de puissance volume - fréquence temporelle. En effet, il n'existe pas de réelle validation de la distribution en loi de puissance, car la variabilité du facteur b peut être importante. Pour cela, les volumes potentiellement instables sont estimés à l'aide d'estimations de volume basées sur diverses méthodes telles que SLBL. L'accord des deux valeurs de b peut être un test pour la qualité de l'hypothèse de loi de puissance pour le volume. Mais celle-ci doit être appliquée dans de nombreux autres cas pour être validée. De tels comportements ont déjà été observés et partiellement vérifiés au niveau de l'ensemble du versant (Jaboyedoff et Evans, 2005), montrant qu'elle nécessite des développements supplémentaires.

Référence

Chigira, M. 2009. September 2005 rain-induced catastrophic rockslides on slopes affected by deep-seated gravitational deformations, Kyushu, southern Japan. Engineering Geology 108 : 1-15.

Dussauge, C., Grasso, J.-R., Helmstetter, A., 2003. Statistical analysis of rockfall volume distributions : Implications for rockfall dynamics. Journal of Geophysical Research : Solid Earth, 108(B6).

Guerin, A., Stock, G.M., Radue, M.J., Jaboyedoff, M., Collins, B.D., Matasci, B., Avdievitch, N. & Derron, M.-H. 2020b. Quantifying 40 years of rockfall activity in Yosemite Valley with historical Structure-from-Motion photogrammetry and terrestrial laser scanning. Geomorphology, 107069, doi : https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107069.

Hantz, D., Colas, B., Dewez, T., Lévy, C., Rossetti, J.-P., Guerin, A. & Jaboyedoff, M. 2020. Caractérisation quantitative des aléas rocheux de départ diffus. Rev. Fr. Géotechnique, 163, 2.

Jaboyedoff M, Derron M.-H., Pedrazzini A., Blikra L., Crosta G. B., Froese C., Hermanns R., Oppikofer T., Stead D. 2012. Évaluation rapide de la susceptibilité des instabilités de roches massives. Dans Eberhardt E. et al. (Eds) : Landslides and Engineered Slopes. Protecting Society through Improved Understanding. Actes du 11e symposium international et du 2e symposium nord-américain sur les glissements de terrain (Banff, Canada, 3-8 juin 2012) CRC press, 459-465.

Jaboyedoff M., Guérin A., Noël F., Li F., Derron M.-H., Troilo F., Bertolo D. and Thuegaz P. 2019. Structural and hazard assessment of the Brenva rockslide scar (Mont-Blanc massif, Aosta Valley, Italy). EGU2019-10867, NH3.16/GM7.7/HS11.42

Jaboyedoff, M., Carrea, D., Derron, M.-H., Oppikofer, T., Penna, I.M. & Rudaz, B. 2020. A review of methods used to estimate initial landslide failure surface depths and volumes. Engineering Geology, 267, 105478, doi : https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105478.

Jaboyedoff M., Evans S.G. 2005. Distribution auto-similaire du nombre cumulé de volumes de glissements de terrain potentiels. Geophysical Research Abstracts, Vol. 7, 05815, SRef-ID : 1607-7962/gra/EGU05-A-05815, EGU.

Wieczorek, G. F., S. P. Nishenko, et D. J. 1995. Varnes, Analysis of rock falls in the Yosemite Valley, California, Proc. U.S. Symp. Rock Mech., 35e, 85-89.

Diagnostic d'exposition de l'A43 et travaux d'urgence de protection à la Praz (73)

Pierre DUPIRE[1], Rémy MARTIN[1], Nicolas VILLARD[2]

(1) ONF Service RTM, pierre.dupire@onf.fr, remy.martin-02@onf.fr - (2) NGE Fondations, nvillard@nge.fr

Mots-clés : éboulement, urgence, protection, container, « low-tech »

1 CONTEXTE

Le 22 et 23 décembre 2018, un éboulement de l'ordre de 200 m3 se produit au Freney (73), entrainant la fermeture de la RD1006 et de la voie ferrée. Le 16 février 2019, un nouvel éboulement de l'ordre de 40 m3 produit des fragments allant de 200 à 500 l.
La SFTRF, gestionnaire de l'A43 en Maurienne a sollicité le service ONF-RTM pour une analyse de l'exposition du viaduc des Teppes, secteur déjà bien connu pour les chutes de blocs.

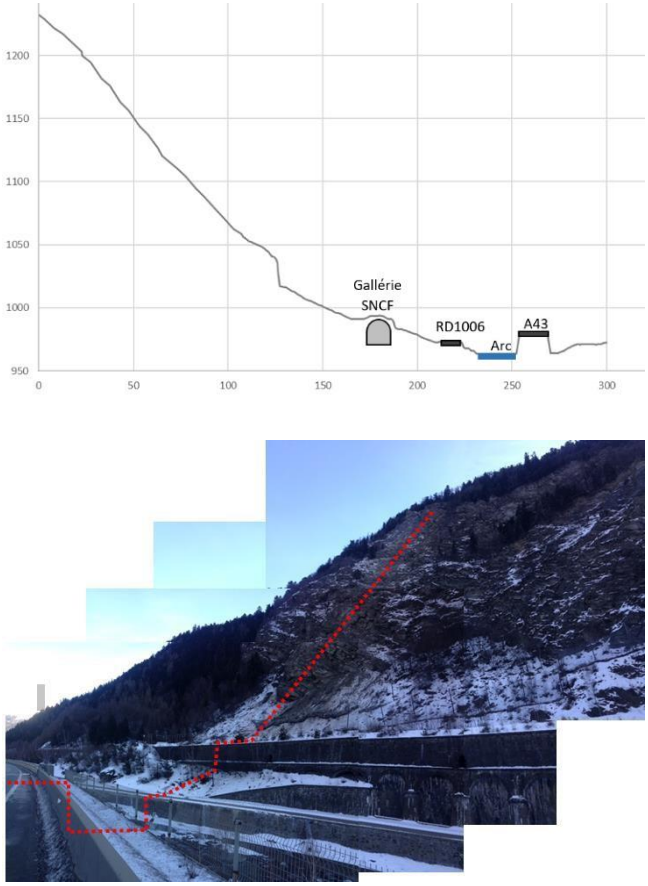


Figure 1 : profil type de propagation des blocs

Sur ce versant, 3 enjeux sont successivement présents sur les trajectoires : voie ferrée (tunnel), route départementale 1006 et A43 (voir figure 1). De fait, le Conseil Départemental de la Savoie et la SNCF, assistés du bureau d'étude SAGE, prévoyaient des travaux de purge en falaise à compter du 11 mars 2019. Le volume prévu de purge était compris entre 500 et 1 000 m3. Ces déroctages faits à l'explosif et à la main allaient être autant d'événements artificiels sur le modèle de celui du 16 février. Ils impliquaient de préciser l'exposition de l'A43 pour la SFTRF avant le commencement des travaux, l'autoroute étant alors l'unique accès en Haute-Maurienne.

2 EXPOSITION DE L'A43

L'hypothèse de l'atteinte par une propagation « classique » (succession de rebonds dans la pente), est rapidement identifiée comme peu probable pour cet événement que ce soit par les résultats de calculs trajectographiques menés par la SAGE ou bien par l'analyse de l'ONF-RTM. Cependant le phénomène attendu étant une projection d'éclats, nous ne sommes pas dans le domaine de validité des outils trajectographiques « courants ». Le RTM a donc proposé une approche plus adaptée en réalisant une analyse des trajectoires « balistiques », sous diverses hypothèses, de point d'éjection sur le versant, de vitesse et d'angle d'éjection. À l'aide d'un outil simple (développement Excel), les trajectoires susceptibles d'atteindre la plateforme de l'A43 ont été identifiées.

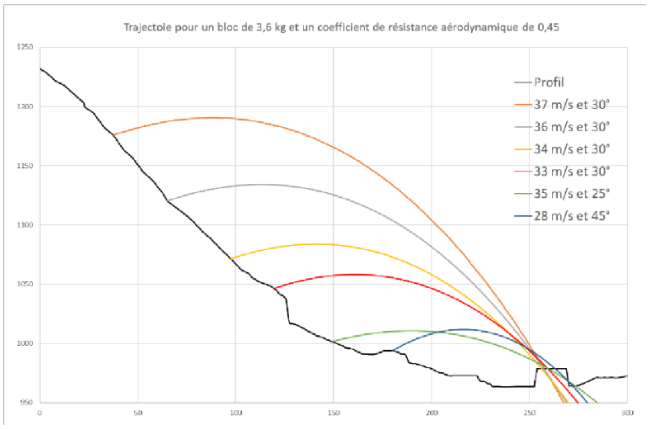


Figure 2 : trajectoires balistiques permettant d'atteindre l'A43

Au regard de la topographie et selon des lois balistiques qui permettent de définir la trajectoire d'un projectile sphérique à partir de son point de départ, sa vitesse initiale et l'angle de sa trajectoire, il a ainsi pu être démontré qu'avec des vitesses d'éjection de l'ordre de 28m/s en pied de versant, 35m/s à mi-versant et 38m/s au sommet pour des angles de 20 à 45° le viaduc de l'A43 pouvait être atteint. Ces vitesses ne sont pas irréalistes dans un mécanisme de fragmentation après impact d'un bloc provenant d'un événement naturel ou d'une purge depuis le sommet. 0,8 % des trajectoires mécaniquement possibles passent par la plate-forme de l'A43 si la vitesse initiale de la pierre est supérieure à 35 m/s.
Ce niveau d'exposition a conduit la SFTRF à trouver une solution temporaire de protection.

3 PROPOSITION DE PARADES

La diversité des trajectoires susceptibles d'atteindre l'A43 (cf. figure 3) rend complexe une solution d'interception. Des trajectoires très « plongeantes » avec des blocs passant à plus de 10 m au-dessus du bord de l'A43 peuvent atteindre la plateforme de l'extrémité de la plateforme de l'autoroute. Le principe de parade retenu a donc été d'élever un ouvrage d'interception le plus haut possible et de faire passer les véhicules au plus près au pied du dispositif.

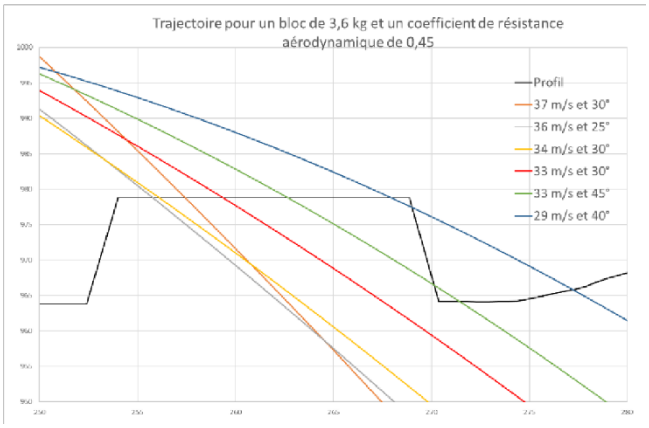


Figure 3 : trajectoires possibles au droit de l'A43 selon les lois de la balistique et différentes hypothèses.

Selon les calculs, les vitesses potentielles des pierres pouvant atteindre l'A43 sont comprises en 40 et 80 m/s (140 et 290 km/h). Or de précédentes études avaient conduit pour ces vitesses à retenir comme types de protections :

- ouvrages semi-rigides (blocs béton, gabions…),
- doubles nappes de filets HR avec élongation transversale importante,
- tôles d'acier (ép. > 3 mm).

L'A43 étant en viaduc, des contraintes fortes limitaient ces solutions techniques :

- impossibilité de s'ancrer dans le tablier du viaduc (écrans, haubans, ancrages) : ouvrage auto stable requis,
- poids admissible limité (blocs béton) : légèreté,
- résistance à la perforation haute vitesse,
- disponibilité rapide (~ 1 semaine),
- limitation de l'exposition du personnel,
- géométrie hauteur 6 m, longueur 150 ml.

Pour répondre à ces contraintes et trouver une solution adaptée l'ONF-RTM s'est rapproché de NGE Fondations : une solution originale consistant à édifier un rempart temporaire en conteneurs maritimes a alors été imaginée et retenue par la SFTRF. Légère, rapidement disponible, avec 2 parois de tôle successives, cette solution paraissait adaptée pour l'arrêt des pierres de grandes vitesses. Compte tenu des résultats de l'analyse balistique, de la forme des blocs (élancement) et de leur vitesse, le risque de perforation du conteneur n'était pas écarté.
La circulation était tout de même interrompue au moment des tirs.

La conception mécanique a permis un assemblage simplifié :

- 2 rangées de conteneurs de 12 ml en pied et 6 ml en tête,
- jonction des conteneurs par pièces de pont (arrimage),
- réhausse par une double barrière grillagée HR,
- fabrication de raccords en serrurerie,
- appui simple sur bastaings (faibles volumes des blocs) permettant le franchissement d'un joint de dilatation du viaduc
- pré-montage rapide au camion-grue

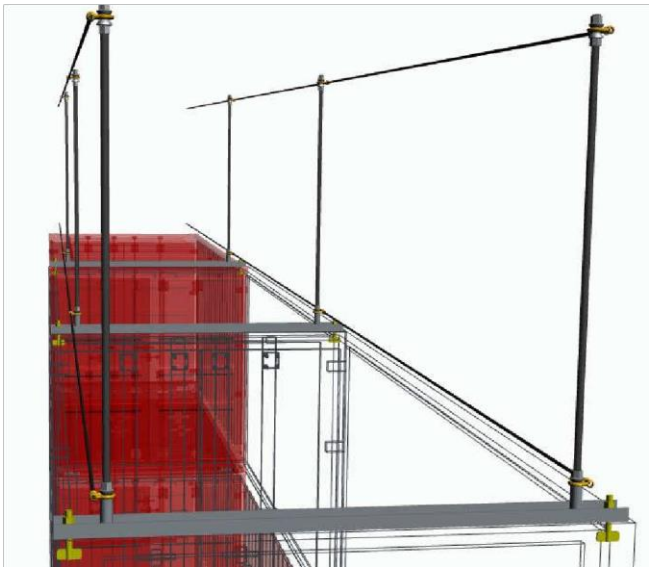


Figure 4 : CAO des jonctions de conteneurs + réhausse

4 UN CHANTIER LOGISTIQUE

40 conteneurs ont été mis-en-œuvre début mars 2019 depuis le port fluvial de Lyon. Si leur transport a été planifié par train via SNCF et TSO / NGE (gares multi-modales à Lyon et Modane à proximité), les délais de réalisation et contraintes logistiques ont finalement imposé l'acheminement par camion.

Deux ateliers de levage par camion grue ont été mobilisés ainsi que 6 agents cordistes et personnels dédiés à la circulation. Le montage a été achevé en 3 jours dans des conditions hivernales (neige + vent lors du levage) et sous coupure du sens montant (double sens descendant), seul axe permettant la desserte de la Haute-Maurienne (RD fermée pour les travaux du département et SNCF)

Figure 1 : vue d'ensemble du montage sous alternat, de l'ouvrage terminé et détail de conception

5 RETOUR D'EXPÉRIENCE

Les conteneurs ont été en place pendant toute la durée des travaux Département / SNCF en falaise (6 mois). L'expérience a confirmé la pertinence du choix des intervenants car au moins 4 impacts ont eu lieu dont un perforant la face amont, et déformant la face aval sans la traverser. Cette solution temporaire fut une réussite car, en dehors des tirs, aucune atteinte des deux voies sens descendant n'a été recensée.
Par ailleurs, un léger poinçonnement de la couche de roulement a été relevé au niveau des angles des conteneurs.
A l'issue du démontage, une modélisation d'impact a été menée rétroactivement par éléments finis (NGE / Engineerisk) afin de reproduire le phénomène de perforation observé pour un bloc pesé à 50 kg.

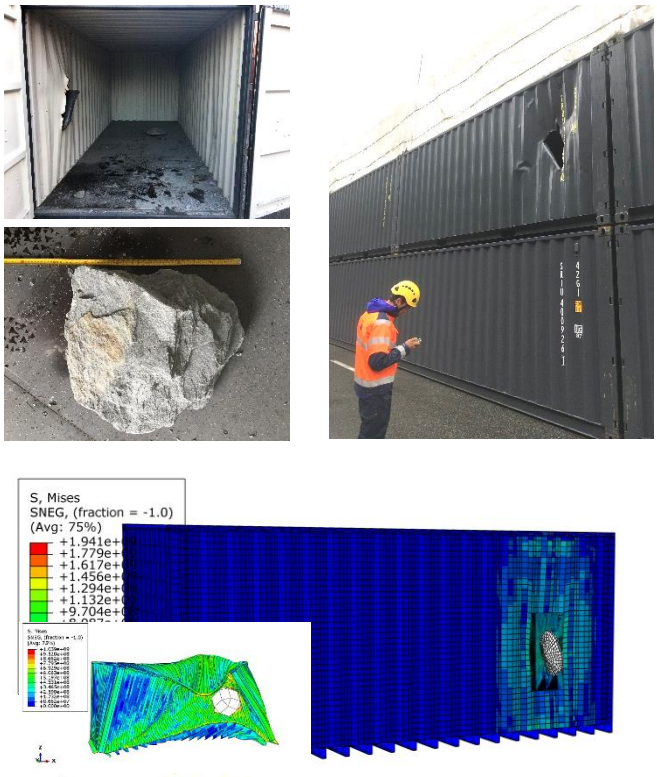


Figure 2 : impacts réels et modélisation à rebours de la perforation par éléments finis

Par ailleurs cette modélisation permet d'explorer le dimensionnement des conteneurs sur d'autres applications (impacts type bloc ETAG 2000 kJ).

Ce « kit d'urgence » de protection, modulaire et composite, peut ainsi être utilisé :
- vide, sous poids propre (comme dans le cas présent) pour les impacts de petits blocs à haute vitesse,
- lesté (remplissage en matériaux, blocs béton)
- fondé (sur ancrages ou micropieux)
- haubané sur ancrages, avec dissipateurs…

6 CONCLUSIONS & PERSPECTIVES

Cette parade est confirmée comme bien adaptée aux chutes de blocs en conditions d'urgence ou temporaire.

Elle peut également s'envisager pour d'autres applications de mouvements de terrain (glissements, petites coulées…).

Ce procédé s'avère utilisé plus largement (cf. panorama ci-après). La justification empirique peut maintenant être dépassée par des études reposant sur des outils d'ingénierie adaptés.

Figure 3 : autres exemples d'applications : Nouvelle-Zélande, Australie, USA, RD1212 Arly (73), RN 106 Alès (30)…

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Point presse SFTRF, mars 2019
- Rapport ONF RTM, février 2019
- Etude NGE Fondations, mars 2019
- Géotechnique Solscope, avril 2020
- Webinaire INDURA / Sixense / SNCF, mai 2020
- Rapport d'essais NGE sur ouvrages rigides, 2021
- Expertise NGE / SNCF Brison, juillet 2016
- Berthet-Rambaud et al., analyse numérique éléments finis conteneurs NGE, septembre 2019
- Williams et al. Innovative rockfall solutions based on calibration and field testing, Mining, Metallurgy & Exploration, 2018
- Villard et al., NGE Christchurch rockfall report AVALON, CCC / NZTA, 2011
- WSDOT, Rattlesnake ridge landslide report, 2019

Study on the potential of Nature Based Solutions for the protection of a rockfall site at Artouste (French Pyrenees)

Clara Levy*†[1], Bastien Colas[1], Séverine Bernardie[1], Antonio Pignalosa[2], Francesco Pugliese[3], Carlo Gerundo[3], Juan Antonio Ballesteros Canovas[4], Santiago Fàbregas[5], and José Carlos Robredo Sánchez[6]

[1]Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) – Ministère de la Transition écologique et solidaire, Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique – 3 avenue Claude Guillemin 45100 ORLEANS, France

[2]UNINA – Via Claudio, 21 80125 Naples, Italie

[3]UNINA – Via Claudio, 21 80125 Naples, Italie

[4]Spanish Research Council – National Museum of Natural Sciences, Madrid, Espagne

[5]AECT Pirineos-Pyrénées – Sallent de Gállego, Huesca, Espagne

[6]Univ. Politecnica de Madrid – Madrid, Espagne

Résumé

The H2020 PHUSICOS project aims at providing new insights into the effectiveness of Nature-based solutions (NBSs) against natural hazards in the context of climate change. One of the demonstration sites is the mountain region of Pyrenees located in the municipality of Laruns (French). The site consists of a very steep slope prone to rockfalls (on average higher than 40○), which overlooks the D934 road that gives access to the Portalet pass in Spain. The average daily traffic ranges between 1500 - 2500 vehicles/day to more than 3000 vehicles/day during summer and winter weekends. The road is highly exposed to rockfall that has caused a fatality and large damages over the last years.
Here, we aimed to quantify the benefits of NBSs (forest & protection systems) on the mitigation of rockfall hazard at road level. The rockfall hazard assessment was based on field expertise as well as on the use of high-resolution airborne LIDAR, Terrestrial Laser Scanners (TLS), botanical surveys and 3D numerical-based simulations of boulder propagation. This rockfall hazard assessment was achieved according to the following steps: 1) mapping of the rockfall departure zones, 2) inventory of boulders/events and the definition of scenarios with different classes of boulder volumes (e.g., 0.25 m3 and 1.00 m3) and associated return periods (e.g., 10 and 100 years, respectively), 3) simulations of boulders trajectories using the Rockyfor3D software (Dorren et al., 2006), where the implementation of different NBSs as well as the protective effect of the forest were carried out.

Particular attention was paid to correctly map source areas and estimate input settings for simulations of boulders trajectories. Thus, source areas were defined by applying the method proposed by Loye et al. (2009) on morphometric analysis of DTMs, which allows defining

*Intervenant

†Auteur correspondant: c.levy@brgm.fr

different slope thresholds corresponding to an increasing probability for a pixel to belong to a cliff. A clustering approach was then designed to map continuous release areas: cliff neighbouring pixels with slope steeper than these intermediate thresholds were also included in sources areas. Moreover, the soil roughness (here, the probability of a boulder to meet an obstacle of a certain height along the path) was estimated based on the differences between DTMs of different cell sizes and degree of smoothing. The modelled roughness was then validated based on field data from some sample areas. The soil type mapping, as needed to carry out simulations of boulder trajectories, was carried out by combining different sources of information: 1) the geological map of the area, 2) the clustering of homogeneous slope zones, 3) the clustering in zones of homogeneous roughness, 4) the detailed inspection of the 3D shaded view of the DTM, 5) the detailed inspection of the high resolution orthophotography of the study site. Again, the modelled soil types were validated based on field data from some sample areas.

Rockfall simulations were then validated with botanical-based evidence in two selected plots (Moya et al., 2010). In particular, we focused on the analyses of scars on trees as they represent the potential height of boulder transport and can be dated dendrochronologically to identify temporal rockfall patterns. Moreover, a detailed forest inventory was performed in the studied site using mobile terrestrial laser scanning (MTLS) in order to detect the position of each tree as well as information such the tree species, the tree diameter at breast height (DBH) and the height of each tree. To extend the information obtained from the detailed surveys over the entire survey area, we performed and calibrated a semi-automated forest model based on a canopy height model (CHM) developed by comparing the DSM and the DTM using the Ecorisq FINT software (Dorren, 2017; Dorren et al., 2006).

The considered NBSs consist of wooden rockfall barriers of 2.25 m height with absorption energy of 100 kJ. Based on the modelling outputs, no relevant improvements of rockfall hazard are noted with NBS (except locally). However, a shift of the highest values of kinetic energy and rebound height is obtained. Thus, the designed NBSs are not sufficient to significantly reduce the risk of rockfalls, but such NBSs might be considered as an additional solution for dampening the rockfall intensity limiting the sizing and, thus, the economic and environmental impacts of other interventions such as steel rockfall barriers.

Acknowledgements:

This work has been conducted within H2020 PHUSICOS project (Grant Agreement No. 776681).

References:

Dorren, L., 2017. FINT - Find Individual Trees User manual.

Dorren, L., Maier, B., Berger, F., 2006. Assessing protection forest structure with airborne laser scanning in steep mountainous terrain, in: Workshop on 3D Remote Sensing in Forestry. p. 242.

Dorren, L.K.A., 2015. Rockyfor3D (v5. 2) revealed-transparent description of the complete 3D rockfall model. EcorisQ paper (www. ecorisq. org).

Loye, A., Jaboyedoff, M., & Pedrazzini, A. (2009). Identification of potential rockfall source areas at a regional scale using a DEM-based geomorphometric analysis. Natural Hazards and Earth System Sciences, 9(5), 1643-1653.

Moya, J., Corominas, J., Arcas, J. P., & Baeza, C. (2010). Tree-ring based assessment of rockfall frequency on talus slopes at Solà d'Andorra, Eastern Pyrenees. *Geomorphology*, *118*(3-4), 393-408.

Mots-Clés: Rockfall, simulations, nature based solution, forest, wood barriers, parametrization

Rôle des variations positives de température sur les pentes rocheuses

Véronique MERRIEN-SOUKATCHOFF[1], Muriel Gasc-Barbier[2]
[1] Laboratoire Géomatique & Foncier (EA 4630), Conservatoire National des Arts et Métiers, Case courrier EPN01-C, 2, rue Conté, CEDEX 03, 75141 Paris, France; veronique.merrien@lecnam.net
[2] GeoCoD, Cerema, avenue Albert Einstein, CS 70499, 13593 Aix en Provence, CEDEX 03, France

RÉSUMÉ : Le rôle des fluctuations de température (positive) sur la déstabilisation ou le déplacement des versants rocheux est de plus en plus évoqué. Le résumé recense et classe les publications autour de ce thème, impliquant des sites *in situ,* en fonction des observations, des mesures, des mécanismes explicatifs et esquisse quelques défis à relever dans les années à venir.

Mots-clés : roche, talus, rupture, thermomécanique, *in situ*

Introduction

Les effets thermomécaniques sur les affleurements rocheux sont de plus en plus cités depuis une vingtaine d'années. Ce résumé vise à répertorier les publications autour de ce thème, impliquant des sites *in situ* (hors expérimentations en laboratoire), et à les classer selon les observations, les mesures et les mécanismes possibles.

Observations

Depuis une vingtaine d'années, les observations de rupture ou de mouvements de falaises et de versants attribués à des effets thermiques se multiplient. Des évènements attribués jusqu'ici au gel dégel se voient parfois reclassés comme consécutifs aux variations de température cycliques ou comme résultant de températures exceptionnelles.
Deux types d'évènements sont observés : des ruptures superficielles, en pelure d'oignon, souvent associées à de fortes insolations, par exemple (Collins and Stock 2016; Eppes 2022; Eppes et al. 2010; Leith et al. 2014; Vargas et al. 2004) et des ruptures de volumes rocheux plus importants (Gunzburger et al. 2004; Merrien-Soukatchoff and Gasc-Barbier 2020; Vargas et al. 2009)
Les ruptures en pelure d'oignon se répètent sur les mêmes sites et peuvent donc être suivies et instrumentées. Pour les volumes importants, il s'agit souvent de phénomènes non récurrents attribués à des causes thermomécaniques faute d'autres facteurs déclencheurs, mais pour lesquels il n'existait pas de mesures météorologiques sur site au moment de l'évènement. Des mesures peuvent être mises en place a posteriori pour expliquer les évènements et être disponibles en cas de phénomène similaire.
Faute d'inventaires et d'observations comparables systématiques, il est difficile de juger si ce classement en 2 catégories est pertinent ou s'il s'agit d'un phénomène unique pouvant mettre en jeu des volumes rocheux allant du mm^3 au dam^3. Cependant, les gros volumes semblent délimités par des fractures macroscopiques préexistantes alors que les ruptures en pelures d'oignon semblent se développer dans la matrice rocheuse (cette dernière pouvant présenter de la microfracturation).

Mesures

Parallèlement aux observations, des mesures de température, déplacement, déformation, variation d'angle en surface et en profondeur se développent.
Si les mesures de températures dans l'air sont fréquentes, les mesures dans les massifs rocheux et particulièrement en profondeur sont plus rares. Elles ont commencé à être développées dans les années 80 par les géomorphologues, plutôt dans des environnements soumis à des périodes de gel. On peut citer les mesures de (Coutard and Francou 1989; Gruber et al. 2004; Hall 1999; Messenzehl and Dikau 2017) dans les Alpes. Dans un environnement plus tempéré (Safanda 1999) a mesuré la température dans des forages dans les monts Krušné Hory en République tchèque, tandis que les mesures de (Jenkins et Smith 1990) se localisent aux îles Canaries et celles à haute fréquence de (Molaro and McKay 2010) concernent des environnements désertiques hyperarides.
Les mesures de température en profondeur peuvent permettre d'en déduite la diffusivité thermique in situ (Gunzburger and Merrien-Soukatchoff 2011) et une température moyenne équivalente de surface (Clément et al. 2008). (Gunzburger and Merrien-Soukatchoff 2011) ont montré l'influence de la température de l'air et du rayonnement solaire sur la température de la roche et confirment le rôle de

l'angle et de l'orientation de la pente mentionnés par (Safanda 1999). Les premiers proposent un modèle pour estimer le rayonnement solaire qui est rarement mesuré sur les sites. Les mesures de température de la Roque Gageac citées par Gasc-Barbier et al. (2021) donnent des valeurs de conductivités telles qu'il faut invoquer le rôle thermique des fractures ou l'insuffisante isolation du forage pour les expliquer. Notons que la température de la roche en surface peut être obtenue par thermographie infrarouge (Fiorucci et al. 2018).
Les mesures de déplacements liées aux variations de température peuvent être séparées entre les mesures concernant l'ensemble du massif rocheux et celles mesurant un déplacement le long ou dans des fractures. (Krähenbühl 2004), (Gunzburger et al. 2004), (Watson et al. 2004), sont parmi les premiers à avoir cherché à identifier des mouvements globaux de massif rocheux liés aux variations de température. (Gunzburger et al. 2005) considèrent que les mesures topographiques sont incapables de mesurer le déplacement d'ensemble d'un versant, en l'absence des fractures impliquées dans ce mouvement. Des mesures de déviation angulaire par inclinomètre sont aussi parfois citées (Clément 2008), (Gischig et al. 2011b). Plus récemment, les techniques de télédétection telles que le Lidar, la thermographie infrarouge (Guerin et al. 2020), la photogrammétrie, le radar au sol sont utilisés dans le but de capter des variations topographiques liées à des effets thermiques.
De nombreux auteurs mesurent des variations d'ouverture de fissures associées à des variations de température (Bakun-Mazor et al. 2011; Cloutier et al. 2015; Collins et al. 2018; Gischig et al. 2011a; Grøneng et al. 2011; Mufundirwa et al. 2011; Taboada et al. 2017; Vlcko et al. 2009), (Gasc-Barbier et al. 2020), (Marmoni et al. 2020). Ces mesures sont toujours superficielles du fait de la difficulté d'instrumenter des fractures profondes. La dérive éventuelle des instruments eux-mêmes n'est pas toujours clairement discutée afin de l'exclure.
Les mesures de déformation par extensomètre ou par jauges de déformations associées à une mesure de température en profondeur sont moins fréquentes. Les déformations sont mesurées sur des bases de quelques centimètres (Clément 2008), à quelques mètres dans les extensomètres. Lorsque les déformations sont mesurées avec des extensomètres, elles sont susceptibles de traverser des fractures qui ont un effet sur la déformation, mais aussi sur le champ de température dans le forage du forage. Seuls les extensomètres accumulent la déformation sur une épaisseur plurimétrique et intègrent donc un mécanisme en profondeur.
Les différentes mesures citées sont généralement ponctuelles et superficielles et posent le problème de leur intégration dans un modèle conceptuel d'ensemble. Par ailleurs, il serait préférable pour une bonne compréhension des mécanismes de disposer de mesures fréquentes et fiables sur de longues périodes, sans dérive dans le temps, ce qui pose le problème de la fiabilité, l'absence de dérive et la stabilité des équipements et des fonds pour permettre le suivi.
Par ailleurs, les instruments peuvent influencer l'appréciation du mécanisme de déformation, de déplacement voir de rupture. Les fissuromètres placés sur des fractures existantes induisent une perception "discontinue" alors que les extensomètres et les inclinomètres qui intègrent les déplacements ou les variations d'angles suggèrent un massif rocheux continu.

Calculs, mécanismes et modélisation proposés

Différents calculs, parfois analytiques, mais plus souvent numériques, sont proposés à partir des observations thermomécaniques et de mesures sur les pentes. Lorsque les modèles tentent d'expliquer les effets superficiels, ils considèrent généralement la fracturation, alors que la compréhension du comportement globale d'une pente se base souvent sur une perception continue du massif rocheux.
De nombreuses thermomécaniques sont mises en œuvre autour de l'idée de propagation de rupture due aux cycles thermiques et à la fatigue (Alcaino-Olivares et al. 2021; Clément 2008; Collins et al. 2018; Stock et al. 2012; Vargas et al. 2009). (Eppes 2022) précisent les mécanismes liés à la croissance critique ou sous-critique des fractures. Elle ne fait aucune distinction de taille entre la propagation des fractures et l'altération mécanique produisant des sédiments clastiques ou de plus grands volumes de chutes de pierres. Il est amusant de noter que des modèles continus sont souvent utilisés pour évaluer un champ de contraintes qui sera ensuite utilisé pour expliquer la propagation des fractures. Cette démarche peut s'avérer problématique, car les grandes fractures profondes

impliquées dans une rupture de grand volume ont un rôle dans la distribution des températures dans la roche et, par ailleurs, les fractures modifient l'état de contrainte dans le massif rocheux.
La modélisation discontinue utilisée par exemple par (Gunzburger et al. 2005) et (Bakun-Mazor et al. 2020) est plutôt utilisée pour comparer les déplacements in situ mesurés et modélisés, mais cette modélisation soulève de nombreuses questions sur les propriétés mécaniques et thermiques à attribuer aux fractures. Par exemple (Messenzehl and Dikau 2017) considèrent que la faible porosité et perméabilité de la roche dans leur site d'étude peut encore justifier l'utilisation d'un modèle de conduction pour leur site d'étude.

Défis et conclusions

Les observations et des mesures mentionnant les effets des variations positives de températures sur les pentes rocheuses se multiplient et il est probable sur nous ne sommes qu'au début de la collecte des données. Des inventaires les plus importants pourraient confirmer si la répartition entre la rupture superficielle des nappes et le plus grand volume de chutes de pierres impliquant des fractures préexistantes est pertinente ou non.
L'influence de la température sur les mesures elles-mêmes est à clairement discuter. L'insolation n'est pas suffisamment mesurée et prise en compte.
Les propriétés thermiques in situ des fractures et au-delà de l'ensemble du massif rocheux sont encore mal prises en compte dans les calculs thermomécaniques de surface alors qu'il existe une littérature riche à la fois liée à la géothermie et aux stockages souterrains, mais aussi des mesures globales faites par les géophysiciens (voir par exemple (Tabbagh 1985)).
Le rôle de la propagation de la rupture, de la fatigue ou du fluage potentiel doit être clarifié. La preuve de ces mécanismes est difficile à trouver, jusqu'à présent seule leur potentialité est souvent montrée.
Le développement d'observations au laboratoire compatible avec les observations in situ (niveau de température), cyclicité seraient utile pour mieux comprendre les phénomènes thermomécaniques de surface.

Références

Alcaino-Olivares, R., Leith, K., Ziegler, M. & Perras, M. 2021. Thermo-mechanical fatigue cracking of the bedrock on an island in the Baltic Sea. *GEONIAGARA*, Niagara Falls, Canada.

Bakun-Mazor, D., Hatzor, Y.H., Glaser, S.D. & Santamarina, J.C. 2011. Climatic Effects On Key-block Motion: Evidence From the Rock Slopes of Masada World Heritage Site. *In*: Association, A.R.M. (ed.) *45th U.S. Rock Mechanics / Geomechanics Symposium* American Rock Mechanics Association, San Francisco, California.

Bakun-Mazor, D., Keissar, Y., Feldheim, A., Detournay, C. & Hatzor, Y.H. 2020. Thermally-Induced Wedging–Ratcheting Failure Mechanism in Rock Slopes. Rock Mechanics and Rock Engineering, **53**, 2521-2538, doi: 10.1007/s00603-020-02075-6.

Clément, C. 2008. *Auscultation d'un versant rocheux soumis aux sollicitations thermiques naturelles. Cas des Rochers de Valabres (Alpes-Maritimes)*PhD, INPL, Ecole des Mines de Nancy.

Clément, C., Gunzburger, Y., Merrien-Soukatchoff, V. & Dünner, C. 2008. Monitoring of natural thermal strains using hollow cylinder strain cells: The case of a large rock slope prone to rockfalls. *In*: Chen, Z., Zhang, J., Li, Z., Wu, F. & Ho, K. (eds.) *Landslides and Engineered slopes, From the past to the future, Proc. 10th Int. Symp. Landslides (ISL)*. Taylor and Francis Group (London), Xi'an (China), 1143-1149.

Cloutier, C., Locat, J., Charbonneau, F. & Couture, R. 2015. Understanding the kinematic behavior of the active Gascons rockslide from in-situ and satellite monitoring data. Engineering Geology, **195**, 1-15, doi: https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.05.017.

Collins, B.D. & Stock, G.M. 2016. Rockfall triggering by cyclic thermal stressing of exfoliation fractures. Nature Geosci, doi: 10.1038/ngeo2686
http://www.nature.com/ngeo/journal/vaop/ncurrent/abs/ngeo2686.html#supplementary-information.

Collins, B.D., Stock, G.M., Eppes, M.-C., Lewis, S.W., Corbett, S.C. & Smith, J.B. 2018. Thermal influences on spontaneous rock dome exfoliation. Nature Communications, **9**, 762, doi: 10.1038/s41467-017-02728-1.

Coutard, J.P. & Francou, B. 1989. Rock temperature measurements in two alpine environments: implications for frost shattering. Arctic & Alpine Research, **21**, 399-416.

Eppes, M.-C. 2022. 3.03 - Mechanical Weathering: A Conceptual Overview. *In*: Shroder, J.F. (ed.) *Treatise on Geomorphology (Second Edition)*. Academic Press, Oxford, 30-45.

Eppes, M.C., McFadden, L.D., Wegmann, K.W. & Scuderi, L.A. 2010. Cracks in desert pavement rocks: Further insights into mechanical weathering by directional insolation. Geomorphology, **123**, 97-108.

Fiorucci, M., Marmoni, G.M., Martino, S. & Paciello, A. 2018. Experimental Evidences of Thermo-Mechanical Induced Effects on Jointed Rock Masses Through Infrared Thermography and Stress-Strain Monitoring. *ISRM European Rock Mechanics Symposium - EUROCK 2018*.

Gasc-Barbier, M., Merrien-Soukatchoff, V. & Villarraga-Diaz, C. 2020. Effet de cycles thermiques sur un massif rocheux : observations et mesures au laboratoire et in situ. Rev. Fr. Geotech., 4.
Gischig, V.S., Moore, J.R., Evans, K.F., Amann, F. & Loew, S. 2011a. Thermomechanical forcing of deep rock slope deformation: 1. Conceptual study of a simplified slope. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, **116**, F04010, doi: 10.1029/2011jf002006.
Gischig, V.S., Moore, J.R., Evans, K.F., Amann, F. & Loew, S. 2011b. Thermomechanical forcing of deep rock slope deformation: 2. The Randa rock slope instability. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, **116**, F04011, doi: 10.1029/2011jf002007.
Grøneng, G., Christiansen, H.H., Nilsen, B. & Blikra, L.H. 2011. Meteorological effects on seasonal displacements of the Åknes rockslide, western Norway. Landslides, **8**, 1-15, doi: 10.1007/s10346-010-0224-x.
Gruber, S., Hoelzle, M. & Haeberli, W. 2004. Rock-wall temperatures in the Alps: Modelling their topographic distribution and regional differences. Permafrost and Periglacial Processes, **15**, 299-307.
Guerin, A., Jaboyedoff, M., Collins, B.D., Stock, G.M., Derron, M.-H., Abellán, A. & Matasci, B. 2020. Remote thermal detection of exfoliation sheet deformation. Landslides, doi: 10.1007/s10346-020-01524-1.
Gunzburger, Y. & Merrien-Soukatchoff, V. 2011. Near-surface temperatures and heat balance of bare outcrops exposed to solar radiation. Earth Surface Processes and Landforms, **36**, 1577-1589.
Gunzburger, Y., Merrien-Soukatchoff, V. & Guglielmi, Y. 2005. Influence of daily surface temperature fluctuations on rock slope stability: case study of the Rochers de Valabres slope (France). International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, **42**, 331-349.
Gunzburger, Y., Merrien-Soukatchoff, V., Senfaute, G., Guglielmi, Y. & Piguet, J.-P. 2004. Field investigations, monitoring and modeling in the identification of rock fall causes. *In*: Lacerda, W., Ehrlich, M., Fontoura, S.A.B. & Sayao, A.S.F. (eds.) *Landslides: evaluation and stabilization, Proceedings of the Ninth International Symposium on Landslides*. Taylor & Francis Group, Rio de Janeiro, 557-563.
Hall, K. 1999. The role of thermal stress fatigue in the breakdown of rock in cold regions. Geomorphology, **31**, 47-63.
Krähenbühl, R. 2004. Temperatur und Kluftwasser als Ursachen von Felssturz. **9**, 19-35, doi: 10.5169/seals-224989.
Leith, K., Moore, J.R., Amann, F. & Loew, S. 2014. In situ stress control on microcrack generation and macroscopic extensional fracture in exhuming bedrock. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, **119**, 594-615, doi: 10.1002/2012jb009801.
Marmoni, G.M., Fiorucci, M., Grechi, G. & Martino, S. 2020. Modelling of thermo-mechanical effects in a rock quarry wall induced by near-surface temperature fluctuations. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, **134**, 104440, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2020.104440.
Merrien-Soukatchoff, V. & Gasc-Barbier, M. 2020. Effect of thermal cycles on rocks outcrops. *XIII International Symposium on Landslides*, Carthagène, Colombia.
Messenzehl, K. & Dikau, R. 2017. Structural and thermal controls of rockfall frequency and magnitude within rockwall–talus systems (Swiss Alps). Earth Surface Processes and Landforms, **42**, 1963-1981, doi: 10.1002/esp.4155.
Molaro, J.L. & McKay, C.P. 2010. Processes controlling rapid temperature variations on rock surfaces. Earth Surface Processes and Landforms, **35**, 501-507.
Mufundirwa, A., Fujii, Y., Kodama, N. & Kodama, J.-i. 2011. Analysis of natural rock slope deformations under temperature variation: A case from a cool temperate region in Japan. Cold Regions Science and Technology, **65**, 488-500, doi: https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2010.11.003.
Safanda, J. 1999. Ground surface temperature as a function of slope angle and slope orientation and its effect on the subsurface temperature field. Tectonophysics, **306**, 367-375.
Stock, G.M., Martel, S.J., Collins, B.D. & Harp, E.L. 2012. Progressive failure of sheeted rock slopes: the 2009–2010 Rhombus Wall rock falls in Yosemite Valley, California, USA. Earth Surface Processes and Landforms, **37**, 546-561, doi: 10.1002/esp.3192.
Tabbagh, A. 1985. A New Apparatus for Measuring Thermal Properties of Soils and Rock in Situ. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, **GE-23**, 896-900, doi: 10.1109/TGRS.1985.289475.
Taboada, A., Ginouvez, H., Renouf, M. & Azemard, P. 2017. Landsliding generated by thermomechanical interactions between rock columns and wedging blocks: Study case from the Larzac Plateau (Southern France). EPJ Web of Conferences, **140**, 14012, doi: 10.1051/epjconf/201714014012.
Vargas, E.d.A.J., Castro, J.T., Amaral, C. & Figueiredo, R.P. 2004. On mechanisms for failure of some rock slopes in Rio de Janeiro, Brazil: Thermal fatigue? *In*: Lacerda, W., Ehrlich, M., Fontoura, S.A.B. & Sayao, A.S.F. (eds.) *Landslides: evaluation and stabilization, Proceedings of the Ninth International Symposium on Landslides*. Taylor & Francis Group, Rio de Janeiro, 1007-1011.
Vargas, E.d.A.J., Chavez, E., Gusmão, L. & Amaral, C. 2009. Is thermal fatigue a possible mechanism for failures of some rock slopes in Rio de Janeiro, Brazil? *43rd U.S. Rock Mechanics Symposium and 4th U.S.-Canada Rock Mechanics Symposium*, Asheville, NC.
Vlcko, J., Greif, V., Grof, V., Jezny, M., Petro, L. & Brcek, M. 2009. Rock displacement and thermal expansion study at historic heritage sites in Slovakia. Environmental Geology, **58**, 1727-1740.
Watson, A.D., Moore, D.P. & Stewart, T.W. 2004. Temperature influence on rock slope movements at Checkerboard Creek. *In*: W., L., M, E., S.A.B, F. & A.S.F, S. (eds.) *Landslides: evaluation and stabilization, Proceedings of the Ninth International Symposium on Landslides*. Taylor & Francis Group, Rio de Janeiro, 557-563.

Déclenchement sismique des mouvements de terrains : Rôle de l'effet de site topographique

Aline Bou Nassif*[1], Emeline Maufroy[1], Pascal Lacroix[1], Emmanuel Chaljub[1], Mathieu Causse[1], and Pierre Yves Bard[1]

[1]Institut des Sciences de la Terre – Université Grenoble Alpes, Univerité Savoie Mont Blanc, Centre national de la recherche scientifique - CNRS (France), Institut de Recherche pour le Développement - IRD (FRANCE), Université Gustave Eiffel, Institut des Sciences de la Terre – ISTerre, OSUG-C (Maison des Géosciences), 1381, rue de la Piscine, 38610 GIERES, France

Résumé

Lors d'un séisme en zone de montagnes, les ondes sismiques peuvent êtres focalisées ou défocalisées dans le relief, selon sa géométrie. La focalisation de ces ondes peut conduire à une amplification locale du signal sismique enregistré en surface. Cette amplification aussi appelée effet de site topographique peut favoriser le déclenchement des mouvements de terrain (Meunier et al., 2008) et peut causer d'importants dégâts. Cet effet topographique génère une variabilité spatiale du mouvement sismique très importante à des très petites échelles spatiales (hectométrique ou décamétrique) (Maufroy et al., 2015), or la distribution des mouvements de terrain co-sismique montre aussi des variations spatiales très fortes à ces échelles (e.g. Specht et al., 2019 ; Gorum et al., 2011 ; ...). L'idée de ces travaux est donc d'étudier le rôle de l'amplification topographique dans le déclenchement des mouvements de terrains à petite échelle spatiale.
Dans un premier temps, on se concentre sur l'estimation de l'effet de site topographique lors d'un séisme. De précédentes études ont montrées que la réponse sismique d'un site topographique donné à différents séismes est variable ce qui reflète la dépendance de cette réponse non seulement à la forme du relief mais aussi à la localisation de la source sismique. Pour mieux comprendre les origines de cette variabilité, nous déterminons les paramètres qui contrôlent les niveaux d'amplification topographique, en se concentrant sur la zone de champ proche du séisme (à moins d'une longueur de faille de l'épicentre). Nous couplons des données de simulation numérique 3D de la propagation des ondes sismiques avec des méthodes d'intelligence artificielle (réseaux de neurones) pour identifier ces paramètres-clés. Nous proposons ensuite une nouvelle définition du phénomène d'éclairage sismique, qui explique pourquoi les amplifications sont généralement plus importantes sur les crêtes opposées au champ des ondes incidentes, rendant donc ces pentes plus susceptibles au déclenchement des mouvements de terrains. Nous proposons également une méthode pour calculer ce paramètre et quantifier sa contribution en l'incluant dans un nouvel estimateur du mouvement sismique. Le nouvel estimateur dépend de la fréquence et utilise uniquement un modèle numérique de terrain et une position de la source sismique pour prévoir les niveaux d'amplification topographiques (Effet de site topographique).

Dans un deuxième temps, afin d'étudier le lien entre les amplifications du mouvement sismique et la répartition spatiale des mouvements de terrain induits en zone montagneuse, nous

*Intervenant

confrontons l'estimateur à l'inventaire des mouvements de terrain déclenchés par le séisme de Gorkha en 2015 (Mw 7.8, Népal). La contribution relative des différents paramètres de l'estimateur (courbure, orientation des pentes) varie dans l'espace et en fréquence, suggérant l'implication de plusieurs phénomènes physiques dans le déclenchement des mouvements de terrain cosismiques.

Premièrement, les mouvements de terrain sont souvent concentrés sur des pentes amplifiées à basse fréquence, avec une direction opposée au champ d'onde incident. (Figure 1a). Puis, les alignements de mouvements de terrain dans l'espace ont tendance à suivre l'apparence de la courbure topographique à petites échelles et ce phénomène peut être estimé en utilisant le nouveau proxy à hautes fréquences. (Figure 1b). Finalement, Les mouvements de terrain sont aussi concentrés aux interfaces entre les zones amplifiées et désamplifiées, ce qui peut indiquer des zones où la déformation de la pente est maximum (Figure 1c).

Les résultats obtenus permettent d'améliorer les méthodes actuelles de prévision de l'aléa sismique et ouvrent la voie vers l'inclusion de l'effet topographique dans les shakemap. Ces résultats ouvrent également des perspectives intéressantes pour l'estimation de l'aléa gravitaire sous forçages sismiques dans les zones montagneuses. Nous présenterons également l'application de cet estimateur du mouvement sismique à d'autres inventaires de mouvements de terrains induits par d'autres séismes continentaux.

Mots-Clés: Glissements de terrain induits, mouvement du sol, effet de site topographique

Reconstruction 3D de la stratigraphie en contexte volcanique pour contraindre des scénarios d'effondrements : l'exemple de la Falaise Samperre (Martinique, Petites Antilles)

Marc Peruzzetto*[1], Yoan Legendre[1], Aude Nachbaur[2], Thomas J.b. Dewez[1], Yannick Thiery[1], Clara Levy[1], and Benoit Vittecoq[2]

[1]Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) – BRGM – Orléans, France
[2]Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) – BRGM – Martinique, France

Résumé

Les instabilités gravitaires peuvent être des menaces importantes pour les populations et les infrastructures. Evaluer l'ales associé nécessite d'estimer les géométries et les mases potentiellement instables. Cette caractérisation peut être particulièrement difficile en contexte volcanique où se succèdent des phases d'accumulation de matériaux éruptifs, des phases d'érosions et des phases d'altération de ces matériaux. Il est alors complexe de reconstruire la géométrie des différentes unités géologique et de leurs interfaces, qui peuvent n'être ni planaires ni parallèles. Cette reconstruction est d'autant plus compliquée lorsque le site étudié est dangereux et/ou difficile d'accès, et donc que les possibilités d'obtenir des données de terrain sont réduites.
Dans ce travail, nous montrons comment des observations à distances peuvent être utilisées pour déterminer la géométrie d'une masse instable pour un escarpement rocheux en contexte volcanique difficile d'accès. Nous utilisons des photographies aériennes, des orthophotographies et des relevés topographiques pour décrire la nature et la géométrie des différentes unités géologiques composant l'escarpement et identifier les unités stables et les unités instables. Ces résultats permettent ensuite de reconstruire la paléo-morphologie du site qui exerce un contrôle prépondérant sur les instabilités et d'estimer les volumes potentiels de plusieurs scénarios d'effondrements.

Le cas d'étude de la Falaise Samperre (Martinique, Antilles Françaises) sélectionné pour ce travail est un escarpement produisant des éboulements de manière régulière depuis les années 50. Ces phases de déstabilisation peuvent être paroxysmale comme en 2010 et 2018 (e.g. le volume en 2018 est estimé entre 3,5 x 106 m^2 et 5 x 106 m^2). Ces effondrements constituent un réservoir de matériaux en pieds de falaise qui peuvent être remobilisés sous forme de coulées de débris. Ces dernières se propagent dans la rivière du Prêcheur jusqu'au village en aval, situé sur le cône alluvial. Ainsi, les bâtiments et les habitants sont exposés en cas de débordement de ces coulées de débris, comme ce fut le cas en 2010. Par ailleurs, en cas de crue la destruction du pont enjambant la rivière empêcherait l'accès par la route isolant la rive Nord de la rivière du Prêcheur où demeurent plus de 400 personnes. Dans ce contexte, il est important de déterminer le volume de matériaux qui pourrait encore s'effondrer de la

*Intervenant

falaise Samperre, et donc alimenter de futures coulées de débris.

Nous montrons que ces déstabilisations sont probablement associées à la vidange d'une paléo-vallée comblée par des dépôts pyroclastiques. La géométrie du fond de cette paléo-vallée est reconstruite grâce à l'exploitation des modèles topographiques et photogrammétries. Le volume compris entre le fond de la paléo-vallée et la surface de la topographie actuelle permet alors d'estimer le volume de matériaux qui pourraient être encore remobilisés dans les décennies à venir. Nous calculons ainsi un volume de 8 x 10ˆ6 mˆ3. La prise en compte de contraintes géomorphologiques de surface donne un volume plus petit de 3.5 x 10ˆ6 mˆ3 correspondant au volume possible du prochain épisode d'effondrements.
La quantification de ces volumes est importante pour la gestion des risques sur le moyen/long terme au village du Prêcheur. De manière plus générale, ils contribuent également à décrire les mécanismes d'instabilités gravitaires en contexte volcanique. Ils permettent aussi de mieux quantifier la contribution de ces instabilités de volumes intermédiaires (10ˆ6 – 10ˆ7 mˆ3) au démantèlement des édifices volcaniques.

Mots-Clés: volcan, avalanche de blocs, paléo, morphologie, volume

Vers une estimation globale et quantifiée de l'aléa glissement de terrain en Nouvelle Calédonie.

Prémaillon, M.[1]; Thiery, Y. [2]; Colas, B. [1]; Guyomard, Y.[3], Mengin, M. [3], Mardhel, V. [4]; Monge, O.[3].

[1]BRGM, Montpellier, France (m.premaillon@brgm.fr, b.colas@brgm.fr)
[2]BRGM, unité Risque et prévention, Orléans, France (y.thiery@brgm.fr ; r.vandromme@brgm.fr)
[3]DIMENC, Direction de l'Industrie, des Mines et de l'Energie de la Nouvelle-Calédonie, Nouméa (yael.guyomard@gouv.nc; mathieu.mengin@gouv.n c; olivier.monge@gouv.nc)
[4]BRGM, Nouméa, Nouvelle Calédonie (v.mardhel@brgm.fr)

La caractérisation quantifiée de l'aléa mouvement de terrain à large échelle spatiale (i.e.1 :25 000ème-1 :50 000ème) peut s'avérer être un exercice complexe car elle nécessite, en prérequis, la collecte d'informations spatiales et temporelles précises. Dans beaucoup de cas, la quantification est partielle ou relative en raison, soit d'un manque d'information sur les phénomènes eux-mêmes (type, intensité, date d'occurrence par exemple), soit sur les facteurs de prédisposition et/ou de déclenchement. Ainsi, actuellement de nombreuses cartes « d'aléa » produites caractérisent dans les faits une susceptibilité à l'apparition de phénomènes qui est évaluée de façon qualitative suivant des méthodes empiriques.

La Nouvelle Calédonie est une île du Pacifique très montagneuse et soumise à de fortes pluies et à des cyclones tropicaux, elle est donc affectée par de nombreux type d'instabilités (chute de blocs, glissements de terrains, laves torrentielles, coulées). Les conséquences de ces phénomènes peuvent être désastreuses en termes de dégâts humains ou matériels. En 2016, par exemple, la commune de Houaïlou a été affectée par des laves torrentielles dévastatrices qui ont causé la mort de 5 personnes, 3 disparitions, 8 blessés ainsi que des dégâts matériels importants. Cependant, bien que le territoire soit très impacté, l'aléa mouvement de terrain est peu pris en compte pour l'aménagement. Les quelques cartes existantes, réalisées à dire d'expert, constituent une solide base de connaissance. Mais faute de méthode d'évaluation commune, ces cartes ne sont pas homogènes entre elles, ce qui peut rendre délicate leur valorisation.

C'est dans ce contexte en 2019, qu'une collaboration entre le DIMENC (Direction de l'Industrie, des Mines et de l'Energie de la Nouvelle-Calédonie) et le BRGM s'est créée pour développer une méthodologie globale d'estimation quantitative de l'aléa mouvement de terrain. Cette cartographie est destinée dans un premier temps à 15 communes de Nouvelle Calédonie. Ce travail est effectué à l'échelle du 1:25000ème en s'appuyant sur les recommandations du JTC-1 (Fell et al., 2008).

Afin d'évaluer l'aléa glissement de terrain de manière homogène à l'échelle du territoire, une méthodologie quantitative a été mise en place. Celle-ci prend en compte la susceptibilité (probabilité spatiale d'occurrence du phénomène, en séparant l'initiation et la propagation), la probabilité temporelle d'occurrence (utilisation analyse diachronique), et enfin l'intensité du phénomène (i.e. qualifiée par la vitesse de propagation du phénomène et par dommages potentiels induits). Cette méthodologie est déclinée par type de phénomène (glissements de terrain sur matériaux grossiers et sur matériaux fins, laves torrentielles et chutes de blocs). Les six étapes principales de la méthode sont :

- Inventaire des phénomènes par observations de terrain et comparaison diachronique de photos aériennes ;

- Division de l'information lithologique en deux cartes : substrat et régolithe (formations superficielles allochtones et autochtones). La cartographie du régolithe, à l'échelle du 1 :10 000ème, réalisée par le Service Géologique de Nouvelle-Calédonie (SGNC), fait partie intégrante du programme ;
- Calcul de la susceptibilité spatiale d'initiation par approche probabiliste bivariée pour chaque type de phénomène inventorié ;
- Intégration de la probabilité temporelle d'occurrence ;
- Modélisation de la propagation par simulation numérique basée sur l'angle de ligne d'énergie;
- Intégration de l'intensité du phénomène en fonction de l'estimation des volumes et/ou de la vitesse de la propagation pour évaluation de l'aléa.

Ces différentes étapes permettent d'obtenir des valeurs de probabilités d'occurrence spatio-temporelle qui sont ensuite déclinées en classes d'aléa.

La méthodologie a été dans un premier temps testée et validée sur la commune pilote de Mont Dore (643 km) qui avait été lourdement impactée en 1988 par le cyclone « Anne ». La commune a été séparée en deux moitiés : une pour construire la carte et l'autre pour la valider. Cette première validation a très récemment été complétée par une seconde *a posteriori*, la commune ayant été touchée en février 2022 par le cyclone tropical Dovi. Celui-ci a provoqué 57 glissements de terrain dans des matériaux fins en secteur urbain. La méthodologie a aujourd'hui été appliquée à un tiers des communes concernées par le programme.

Grâce à cette collaboration, une méthodologie utilisable de manière opérationnelle sur tout le territoire a été mise en œuvre (Colas et al., 2021, BRGM/RP-71122-FR). Les cartes d'aléa créées permettront une adaptation locale de l'aménagement du territoire. De manière plus globale, cette étude permet également de :

- Améliorer notre connaissance et la compréhension des différents types de mouvements de terrain dans un contexte volcano-sédimentaire et ultrabasique soumis à des altérations très variables ;
- Cartographier et améliorer la connaissance du régolithe, ce qui n'avait jamais été intégré pour ce type d'analyse en Nouvelle-Calédonie.

Bibliographie :

Colas, B., Thiery, Y., Guyomard, Y., Mengin, M., Vendromme, R., Monge, O., (2021). Cartographie de l'aléa mouvement de terrain. Méthode générale. (Nouvelle Calédonie). Echelle 1 :25 000ème. Rapport d'avancement 2021. BRGM/RP-71122-FR, DIMENC/SGNC-2021(12). 182 p., 125 illustrations, 3 annexes.

Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E., Savage, W.Z., 2008. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning. Eng. Geol. 102, 99–111. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.014

From landslide susceptibility to risk mapping for France: improvement and application at 1:500,000 scale of work

Thiery, Y[1].; Grandjean, G[1] ; Cottereau, Y[1].; Colas, B[1].; Maquaire, O.[3] ; Fressard, M.[4] ; Premaillon, M[1].; Bernardie, S. [1] ; Gourdier, S. [1]

[1] BRGM, Directions Risques et Prévention, 45 000 Orléans France
BRGM, Direction des Actions territoriales, 34 000 Montpellier, France
[3] Normandie Univ, UNICAEN, CNRS, IDEES, 14 000 CAEN, France
[4] CNRS UMR 5600, Environnement, ville et société (EVS) ,69676 BRON, France

Keywords : landslide susceptibility, landslide risk, national scale, mapping, quantitative method

Introduction

Assessing landslide risk at national scale has become a major issue for countries, as these maps provide a first overview and qualitative information of the areas potentially susceptible to landslides. In Europe, for more than ten years, several maps have been proposed at the initiative of the JRC (https://esdac.jrc.ec.europa.eu/themes/european-landslide-expert-group). Thus, several maps were produced whether at supranational scale (Gunther et al., 2013; Wide et al., 2018) or at national scale (e.g. for Italy, Triglia et al., 2013; Romania, Bălteanu et al., 2020; Austria, Lima et al., 2021). In France, some tests for metropolitan territory and Corsica were proposed based on expert knowledge as in 1984 (Delauney, 1984) and later on the basis of the approach proposed by Hervás et al. (2007, 2010; Tier 1 approach; Malet et al., 2009). The first results of the Tier 1 approach at the million scale were improved in 2013 (Malet et al., 2013). However, while this map presents a first result for landslide susceptibility assessment, limitations can be highlighted. These limitations are:

i. Methodological, for instance lithology reclassification and weightings are subjective and based on the expertise of the person in charge of the map. At this scale of work, it is complex to know the influence of each class of variables on the susceptibility to landslides; this is why Hervàs et al. (2010) also proposes a Tier 2 approach based on a more objective calculation and quantification of the susceptibility or hazard.
ii. Geographical, with areas underestimated in term of susceptibility class in particular slopes of plateau areas knowing landslides.
iii. Linked to the improvement of some spatial variables in term of resolution and nomenclature such as the DTM, the national landslide database (BD-MVT), or lithological map.

Thus, this work proposes a new approach for national landslide susceptibility mapping (NLSM) for France. Furthermore, it is proposed to go further and realize landslide risk maps at the national scale. The principles are based on the guidance given by Hervás et al. (2010), Günther et al. (2010, 2014), Sedan et al. (2012), and Wide et al. (2018), which are:

i. The computations are performed using a data driven method (quantitative method) and not a heuristic method limiting the subjectivity of the weightings.
ii. New spatial variables are tested in order to spatially improve the unidentified areas.

Finally, the risk is assessed on the principles of Sedan et al (2012) for each municipality with a selection of the stakes based on land use. These issues at this scale are the built-up area and the linear roads of each municipality.

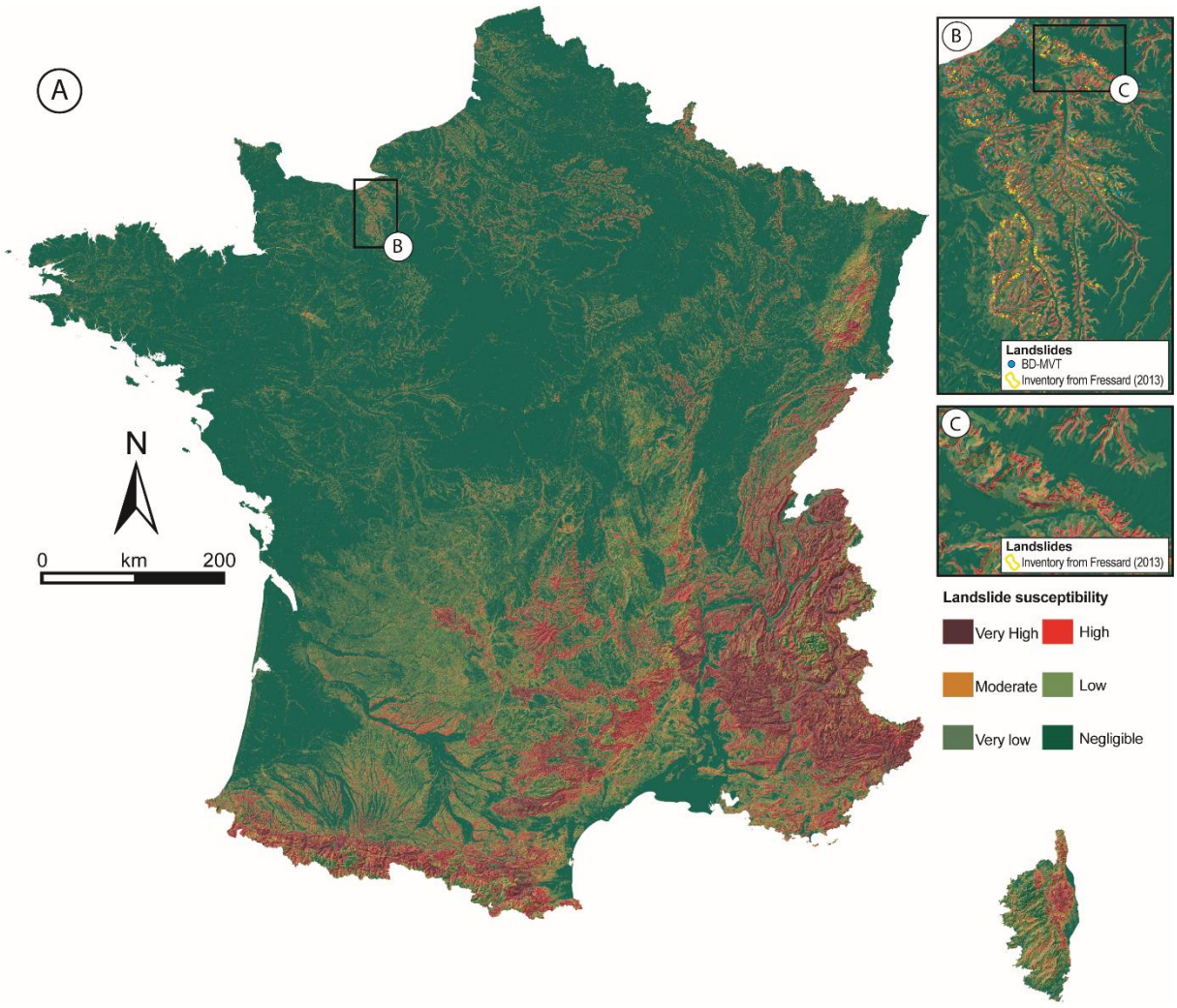


Figure 1. *National landslide susceptibility map (NLSM) obtained with quantitative method (WoE method). A. LSM for metropolitan territory and Corsica. B Zoom of the NLSM for the Pays de Caux (with BD-Mvt and independent landslide inventory; Fressard, 2013). C. Zoom for the Touques area (with independent landslide inventory; Fressard, 2013).*

Methodology

To achieve these objectives, the strategy was divided into two phases with phase 1 focusing on susceptibility analysis, and phase 2 performing risk computations. The first phase was carried out in four steps:

i. Selection of the best spatial variables (i.e. topography, geomorphology, geology, land use, physio-geographic area ...) according to the aptitude to spatial variables to build landslide susceptibility maps recommended by Thiery et al. (2007), the computations were performed with a cell size of 250 m in order to optimize the calculation time.

ii. Once the best set of spatial variables were defined, in order to meet the objectives set for the working scale, the calculations were carried out with a cell size of 50m and on a partition of the country in 18 physio-geographical units based on topographic and climatic units.

iii. Each unit was subjected to a statistical validation procedure with four tests before reclassification into 6 classes following the limits given by the JTC-1. The limits are given for guidance purposes. The reclassified maps are then merged to obtain a single national landslide susceptibility map.

iv. Finally, the final landslide susceptibility map (Fig. 1) was compared to different local landslide databases not implemented in the national landslide database (BD-MVT) and to different national, regional, and local landslide susceptibility maps for different areas.

The second steps consisted in crossing the national landslide susceptibility map with a map of the stakes represented by the built-up areas and the roads for each commune (Sedan et al., 2012). Four types of maps were obtained with:

i. Absolute risk maps representing the surface (in m) of built areas or road length (in m) affected by moderate, high and very high susceptibility by municipality

ii. Relative risk maps representing dimensionless maps. These maps are the result of a ratio between the built-up surfaces or the road surfaces and the total surface of the municipality.

Results

The results show that the national landslide susceptibility map (NLSM, Fig. 1) obtaining by the procedure based on the principle of selection of the best variables and computation by physio-geographical units significantly improves the map. For the whole territory, the relative error is 0.27, the success rate is 72.8% and the prediction rate is 73.7%. The non-recognition rate is low, meaning that few phenomena are in the negligible class (9%). If we retain the edge areas (e.g. plateau edges) known to produce landslides, they are very well identified with recognition rates higher than 80% (Fig. 1B & 1C).

We can add that 80-97%of the landslides from local databases not introduced in the computation process are well identified in, very high, high and moderate susceptibility. There are strong similarities between the landslides susceptibility maps obtained at other scales and by other techniques, and despite a different number of classes, the very high, high and moderate classes retained for the NLSM overlap well with the high and moderate classes of the other maps without large overlapping.

Finally, the cross-referencing with simplified maps of the stakes (built-up areas and linear roads) makes it possible to identify the communes that potentially have the highest landslide risks.

Discussion - conclusion

If the results of the NLSM are very satisfactory from a statistical and expert point of view, the results for the risk maps are less conclusive. Indeed, the treatment of simplified issues for the built-up environment was carried out from the Corine Land Cover database. Even though it was improved over time, its resolution does not allow obtaining all built-up areas, especially when the habitat is loose. Thus, some municipalities appear without buildings and consequently are not integrated in the maps of absolute and relative risks. It is therefore necessary to re-process the numerical computations by municipality with a more spatially precise database such as the landuse database from THEIA (https://www.theia-land.fr/product/carte-doccupation-des-sols-de-la-france-metropolitaine/).

Finally, the landslide susceptibility and risk maps for a scale of 1:500,000 is a new spatialization tool that can be integrated into the global assessment scheme of landslide hazard in France with a nested scale approach proposed by Thiery et al (2020). These two tools could allow to better target the municipalities not yet been integrated in the global scheme of PPRs elaboration or that are not a priority although they could have landsliding probability. Thus, it would be

necessary, after reprocessing the risk maps, to compare the results with the GeoHazards database (http://www.georisques.gouv.fr/), which provides information on the PPRs planned, in progress or approved.

References

Bălteanu et al., 2020. National-scale landslide susceptibility map of Romania in a European methodological framework. Geomorphology, 371. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107432

Fressard Mathieu, 2013. Les glissements de terrain du Pays d'Auge continental (Normandie, France) Caractérisation, cartographie, analyse spatiale et modélisation. Géographie. Université de Caen. ⟨tel-00968473⟩

Günther, A., Reichenbach, P., Malet, J.-P., Van Den Eeckhaut, M., Hervás, J., Dashwood, C., Guzzetti, F., 2013. Tier-based approaches for landslide susceptibility assessment in Europe. Landslides 10: 529-546.

Günther, A., Van Den Eeckhaut, M., Malet, J.-P., Reichenbach, P., Hervás, J., 2014. Climate-physiographically differentiated Pan-European landslide susceptibility assessment using spatial multi-criteria evaluation and transnational landslide information. Geomorphology, 224: 69-85

Hervás, J. (Ed.), 2007. Guidelines for Mapping Areas at Risk of Landslides in Europe. Proc. Experts Meeting, JRC, Ispra, Italy, 23-24 October 2007. JRC Report EUR 23093 EN, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 53 pp.

Hervás, J., Günther, A., Reichenbach, P., Malet, J.-P., Van Den Eeckhaut, M., 2010. Harmonised approaches for landslide susceptibility mapping in Europe. In: Malet, J.-P., Glade, T., Casagli, N. (Eds.), Proc. Int. Conference Mountain Risks: Bringing Science to Society, Florence, Italy, 24-26 November 2010. CERG Editions, Strasbourg, pp. 501-505.

Malet, J.-P., Thiery, Y., Puissant, A., Hervás, J., Günther, A., Grandjean, G., 2009. Landslide susceptibility mapping at 1:1M scale over France: exploratory results with a heuristic model. In: Malet, J.-P., Remaître, A., Boogard, T. (Eds), Proc. International Conference on Landslide Processes: from Geomorphologic Mapping to Dynamic Modelling, 6 -7 February 2009, Strasbourg, France. CERG Editions, Strasbourg, pp. 315-320.

Malet, J.-P., Puissant, A., Alexandre, M., Mathieu, A., Van Den Eeckhaut, M., Fressard, M., 2013. Integrating spatial multi-criteria evaluation and expert knowledge for national-scale landslide susceptibility analysis: application to France. In: Margottini, C., Canuti, P., Sassa, K. (Eds.), Landslide Science and Practice (Proc. Second World Landslide Forum, 3-7 October 2011, Rome), Springer, Heidelberg, Vol. 1, pp. 303-311.

Lima, P., Steger, S. & Glade, T. Counteracting flawed landslide data in statistically based landslide susceptibility modelling for very large areas: a national-scale assessment for Austria. Landslides 18, 3531–3546 (2021). https://doi.org/10.1007/s10346-021-01693-7

Sedan, O., Terrier, M., Hohmann, A., Kobayashi, H., Mathon, C., Rohmer, J. 2011 Scenario départemental de risque mouvements de terrain, méthodologie et processus de réalisation. Rapport final. BRGM/RP-9065. 291 p. https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-59065-FR.pdf

Thiery, Y., Malet, J.-P., Sterlacchini, S., Puissant, A., Maquaire, O., 2007. Landslide susceptibility assessment by bivariate methods at large scales: Application to a complex mountainous environment, Geomorphology, 92, 1–2, 38-59

Trigila, A. et al. (2013). Landslide Susceptibility Mapping at National Scale: The Italian Case Study. In: Margottini, C., Canuti, P., Sassa, K. (eds) Landslide Science and Practice. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-31325-7_38

Wilde, M., Günther, A., Reichenbach, P., Malet, J.-P., Hervás, J., 2018. Pan-European landslide susceptibility mapping: ELSUS Version 2. Journal of Maps, 14(2), 97-104 and supplemental map.

Risk reduction on identification of the shrinkage/swelling of clays through the implementation of new generations of sensors (DIAG SÉCHERESSE project)

Authors : M VIDAL, R CHOCHON, T LEBOURG, M. HERNANDEZ and UESAS

Drought and clay shrinkage/swelling phenomena are among the most worrying climatic and gravitational hazards with regard to the vulnerability of exposed populations, particularly because of the increase in the frequency and intensity of hot spells in the coming decades and their consequences on man-made structures. As part of a thesis on the measurement of meteoric water versus the inference of water resources on soil movements, we have developed deformation acquisition methods based on the new generations of sensors developed at Géoazur over the last decade. Currently, a research project involving the UNION d'EXPERTS and the CNRS has made buildings available to initiate research on the measurement and identification of shrinkage/swelling and thermal expansion phases.

The shrinkage/swelling hazard is characterised by strong variations in humidity within the clays that make up the soil. In the context of research on climate change, it has been shown that an increase in extreme precipitation and a downward trend in annual accumulations (tropicalization of the climate) is likely (source: 5th IPCC report, 2014). Since the 2010s, we have already observed highly variable annual rainfall totals from one year to the next, and to a lesser extent, more and more declarations of natural disasters linked to geotechnical disorders.

Research organisations (CNRS, etc.) have been working for years within the framework of scientific observatories on new generations of autonomous and interconnected sensors that allow variations in the physical properties and deformations of the observed environment to be recorded in near-real time. On the other hand, non-research organisations (UNION d'EXPERTS) working on the characterisation of deformations and determining factors for decision-making purposes need to discretise the deformation typology.

It turns out that for decades, there has been ambiguity about the nature of deformation and its typology (drought vs. leaching, drought vs. creep or drought vs. differential settlement/weight bearing...).

We present here new methods of instrumentation and analysis of this phenomenon of ground movement through an exploration of the test sites made available.

Shrinkage/swelling phenomenon: a mineral approach versus an in-situ behavioural approach

Clay soils are sensitive to shrink-swell phenomena because clays react chemically and physically to the environment, but this sensitivity to swelling varies according to the proportions and mineralogical varieties of the clays present. The mechanical and hydraulic properties of clay soils are controlled both by their mineralogy, the microstructural arrangement of clay and non-clay

particles within the soil, and by water-solid interactions. Physically there is a relationship between clay and water and it is mainly the amount of water entering and leaving the clay materials that defines its shrinkage and swelling potential. The interaction between water and clay is still a complex research subject, and we propose to focus on the in-situ behaviour of clayey soils in order to really measure the shrinkage and swelling cycles and to differentiate them from thermal expansion.

Observation of shrink-swell phenomena and implementation of a network

We have selected 4 individual houses with typical shrinkage-swelling structural alterations in the Var and Alpes-Maritimes departments (South-East France). These buildings have multiple active interior and exterior cracks.

The presence of clay in the soils is confirmed by the BRGM geological maps and by geotechnical investigations (GTR classification, blue test, Atterberg limit).

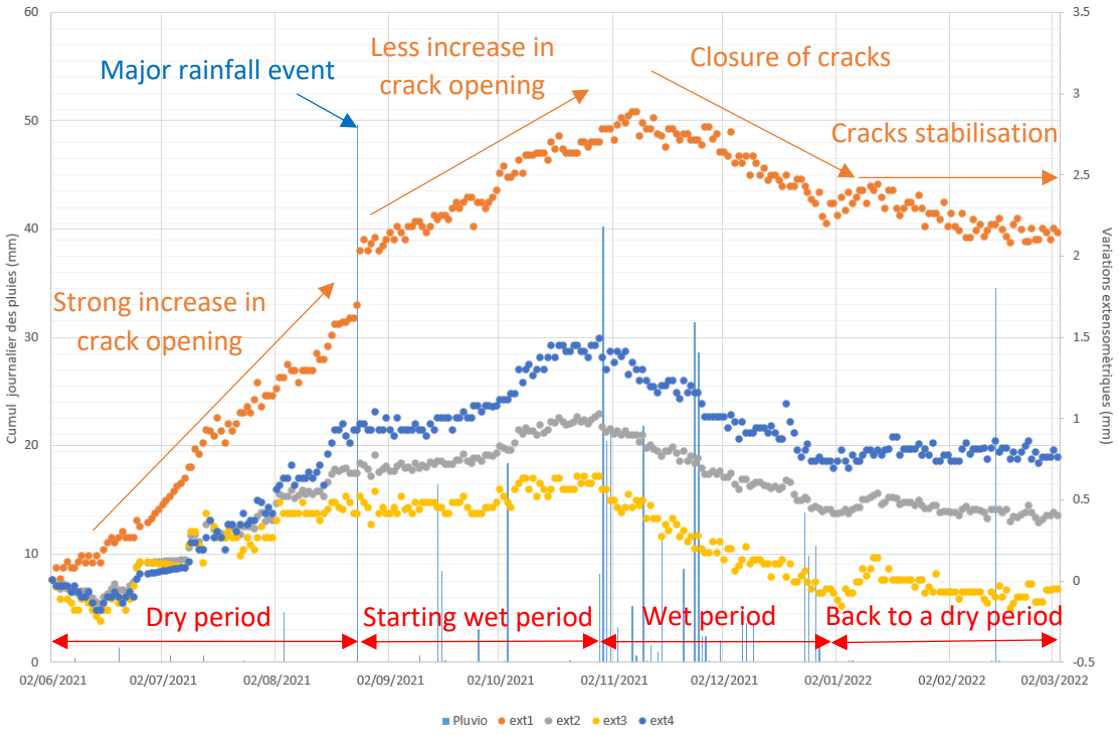
Description of the typical instrumentation system and networks

The experimental sites were instrumented by a sensors network. In order to follow the building structure deformation, we installed strain sensors (crackmeters), perpendicular to the cracks, allowing the continuous reading of its opening and closing with a sub-millimetre precision. We also observed the ground surface deformations nearby foundations, by instrumenting the building peripheral slabs with clinometric sensors.

A weather station equipped with rain gauge and temperature sensor, among other things, allows us to measure locally the hydrometeorological inputs.

Examples of long term behaviour

In the figure below, we observe the deformations of 4 cracks instrumented on one of the experimental sites over a representative period of clay shrinkage-swelling cycle (one year). During the first dry period (from June to September) we observe a scarcity of rain events, an increase in temperature, and a rapid cracks opening. The beginning of the wet period is marked by a strong precipitation event which slows down the cracks opening. At the beginning of the winter and with the rainfall increase, the cracks close again. The rainfall deficit at the beginning of 2022 marks a stabilisation of the cracks, which do not return to their initial state.



Conclusion

The French insurance expertise is based on a G1ES geotechnical service (NFP94-500). This methodology does not always clearly identify the causes of building structural alterations. It has a problem of representativeness when samples are taken in heterogeneous environments like missing a clay pocket.

The shrink-swell cycle affects building structure with an inverse dynamic according to the expected material thermal expansion. The structure deformation shows annual signature governed by rainfall with a typical temporal shift.

In view of the results of this DIAG SÉCHERESSE project, we propose a methodology based on annual instrumental monitoring to highlight the clays shrinkage-swelling. Our methodology thus makes it possible to carry out an 'odometer swelling test' at the scale of the building structure, but is relatively long since it depends on the shrink-swell cycle observation.

This observation time can be reduced by new generation of autonomous sensors using IoT communication. Those sensors permit a fast instrumentation, also the real-time data transmission allows to identify the clay shrinkage-swelling hazard before annual cycle.