

# Analyse, représentation et modélisation des processus hydrogravitaires complexes pour une meilleure caractérisation des multialéas en contexte de climat changeant

## Métier

Risques naturels

## Intitulé du poste

Thèse en analyse, représentation et modélisation des processus hydrogravitaires complexes pour une meilleure caractérisation des multialéas en contexte de climat changeant.

## Contrat

Doctorat

## Temps de travail

Temps complet

## Durée du contrat

36 mois

## Contexte

Les environnements montagneux continentaux présentent une grande diversité de contextes géomorphologiques, depuis les massifs glaciaires et volcaniques jusqu'aux secteurs de piémont<sup>1</sup>. Ces milieux sont soumis à de multiples interactions physiques le long des profils de pente, où la gravité, les dynamiques hydrologiques et les transferts sédimentaires interagissent, avec des complexités additionnelles liées à l'isotherme zéro : cycles de gel-dégel, stockage et fonte nivale. Les processus hydromécaniques en jeu (déformation, rupture, écoulement, transport, etc.) engendrent une large gamme d'aléas hydrogravitaires : glissements de terrain, chutes de blocs, coulées boueuses, laves torrentielles, ruissellement érosif, etc.

Pris isolément, chacun de ces phénomènes est aujourd'hui relativement bien décrit et fait l'objet de typologies et de méthodes de cartographie éprouvées donnant des résultats robustes utilisés pour des portés à connaissance voire pour des documents réglementaires (Par exemple, la BD-MVT en France recense plusieurs dizaines de milliers d'objets, souvent décrits selon ces typologies standardisées)<sup>2 3 4</sup>. Toutefois, ces processus sont fréquemment couplés, interdépendants et/ou en cascade. Leur dynamique devient alors complexe, souvent non linéaire<sup>5</sup>, et difficile à anticiper : un glissement peut alimenter une lave torrentielle, une crue peut déclencher des instabilités

---

<sup>1</sup> <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107723>

<sup>2</sup> <https://doi.org/10.3390/app10227960>

<sup>3</sup> <https://doi.org/10.3390/geosciences7040135>

<sup>4</sup> <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.101562>

<sup>5</sup> <https://doi.org/10.1126/science.adp9559>

de versant, les glissements de terrain évoluant en laves torrentielles<sup>6</sup>. Au-delà des événements ponctuels, ces interactions combinent des processus de faible intensité mais récurrents avec d'autres, plus rares, de forte intensité, produisant des configurations multialéas particulièrement difficiles à caractériser, que ce soit du point de vue de leur physique complexe ou de leur dimension stochastique.

Depuis quelques décennies, le changement climatique accentue cette complexité : les événements extrêmes<sup>7 8</sup> (pluies méditerranéennes, cyclones, fonte accélérée des glaciers et du permafrost) deviennent plus fréquents et plus intenses<sup>9 10</sup> et/ou voient leur saisonnalité et leur localisation évoluer. Parallèlement, la pression anthropique (urbanisation, infrastructures, artificialisation) renforce la vulnérabilité des territoires et perturbe les équilibres géomorphologiques<sup>11 12</sup>. Les tempêtes récentes en France (e.g., Alex en 2020) ou les cyclones aux Antilles (Maria, 2017) illustrent la violence de crises où s'entremêlent extrêmes météorologiques, inondations et glissements de terrain<sup>13 14 15</sup>. Celles-ci contribuent largement, conjuguées à des évolutions de l'occupation des sols, à l'augmentation régulière du coût des catastrophes dites naturelles, désormais bien documenté et qui pourrait encore accélérer (e.g. arrivée de feux de forêts importants en montagne qui pourraient renforcer l'activité des processus gravitaires après incendies). D'où un besoin d'identifier les changements dans les processus complexes et leurs causes et d'inclure la dimension non stationnaire dans les modèles d'aléas multivariés de façon explicite.

Pour comprendre et caractériser les aléas et leurs évolutions, des exemples de réalisations passées et de leur contexte (climat, occupation des sols, enjeux dont dépendent les sources d'information etc.) sont indispensables. C'est d'autant plus vrai pour les aléas complexes qui impliquent des processus d'interaction par définition assez rares. Malheureusement les séries longues sont rares et un prérequis est donc de combiner au maximum tout ce qui peut être rassemblé : données instrumentales, archives historiques, proxies, mesures géomorphologiques etc. Par exemple, au-delà de leurs impacts humains et matériels, les événements majeurs laissent une empreinte durable dans les paysages. Les cicatrices qu'ils impriment (talus érodés, dépôts sédimentaires, zones dévastées par les crues ou les laves torrentielles) constituent des stigmates visibles de leur intensité. Ces marques morphologiques deviennent des archives naturelles, inscrivant dans le relief la mémoire des crises passées<sup>13</sup>. Elles constituent également des indicateurs mesurables, permettant d'analyser la mémoire géomorphologique des événements récents et d'alimenter les démarches de cartographie post-crise ou de modélisation prédictive. Ainsi, elles participent à la construction d'une mémoire collective et scientifique des territoires, en nourrissant à la fois les perceptions sociales du risque et les outils d'anticipation<sup>16</sup>. Si ces événements paraissent exceptionnels à l'échelle humaine, des crises d'intensité comparable, voire

---

<sup>6</sup> <http://dx.doi.org/10.5772/50447>

<sup>7</sup> <https://hal.science/hal-04708863/>

<sup>8</sup> <https://doi.org/10.3390/d17020119>

<sup>9</sup> <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00183.1>

<sup>10</sup> [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)JE.1943-5584.0002122](https://doi.org/10.1061/(ASCE)JE.1943-5584.0002122)

<sup>11</sup> <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.08.011>

<sup>12</sup> <https://doi.org/10.1002/esp.2223>

<sup>13</sup> <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.109008>

<sup>14</sup> Thiery et al. (in prep.) Slope Geomorphological response of three valleys in the Southeast of France following the Large Infrequent Disturbance Alex: what role for landslides? Catena.

<sup>15</sup> [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_FullReport.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_FullReport.pdf)

<sup>16</sup> <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.09.015>

supérieure, se sont probablement déjà produites au cours du Quaternaire. Les observations réalisées dans la vallée de la Vésubie après la tempête Alex révèlent, par exemple, des coupes sédimentaires suggérant d'anciens épisodes de mobilisation massive de matériaux<sup>13</sup>. De même, les travaux géomorphologiques menés dans les Alpes du Sud<sup>17 18 19</sup> ont montré que des phases climatiques marquées ont profondément modifié l'équilibre entre érosion et accrétion, en particulier lors des alternances glaciaires–interglaciaires. Ces héritages sont encore visibles dans les terrasses alluviales ou les dépôts morainiques. Combiner cette dimension paléo-géomorphologique avec des informations systématiques et des sources d'archives paraît essentiel pour replacer les catastrophes récentes dans une perspective de long terme et mieux évaluer la récurrence possible de crises extrêmes.

D'un point de vue méthodologique, le concept de multialéas a fait l'objet de développements importants au cours des dernières années, notamment dans le contexte de la prise en compte des effets du changement climatique<sup>20</sup>. Par contraste, très peu de méthodes ont été proposées à ce jour pour évaluer les aléas multiples, notamment de manière quantitative. Cette lacune s'explique notamment par la difficulté à quantifier les nombreuses interactions en jeu, telles que celles entre les aléas et les mesures d'atténuation. Ainsi, l'opérationnalisation de l'analyse multi aléas reste largement lacunaire, de sorte que les aléas restent traités en silos, avec une potentielle sous-estimation des pertes importantes résultant des conjonctions défavorables.

## **Objectifs de la thèse**

L'objectif général de ce travail est de proposer une méthodologie d'analyse et représentation des processus hydrogravitaires complexes afin de mieux caractériser les situations multialéas dans un contexte de climat changeant. Il s'agit notamment de proposer de nouvelles représentations spatialisées permettant d'opérationnaliser la cartographie multialéas dans un contexte non-stationnaire. En guise de preuve de concept, l'approche développée est appliquée à un site alpin emblématique. Cette recherche s'inscrit dans le cadre du projet ciblé COCHAIR<sup>21</sup> (PEPR IRiMa), et contribue plus particulièrement au WP2 consacré aux analyses multirisques. Les objectifs spécifiques et jalons prévus sont :

### **1. Identification et modélisation qualitative de situations représentatives multialéas:**

Le travail visera d'abord à compiler, croiser et compléter les informations disponibles et/ou « facilement » acquérables sur le site choisi, de façon à constituer un historique événementiel aussi long et complet que possible incluant les processus hydrogravitaires et leur contexte. Il s'agira ensuite d'identifier la nature des interactions en jeu à travers leurs enchaînements, leur concomitance, leurs rétroactions ou leurs effets en cascade à travers le temps. Sur la base de ces observations et d'analyses bibliographiques

---

<sup>17</sup> Jorda, M., 1988. Évolution des versants sud alpins de moyenne altitude au cours du Quaternaire Supérieur (vallées du Haut-Verdon et de la Moyenne Durance). *Géologie Alpine*, 64, 49-59

<sup>18</sup> Jorda M., 1993. Histoire des paléo-environnements tardi- et postglaciaires sud-alpins de moyenne altitude, essai de reconstitution cinématique. *Géomorphologie et Aménagement de la Montagne*, Hommage à P. Gabert, CNRS, Caen, 99-111

<sup>19</sup> [https://www.persee.fr/doc/geo\\_0003-4010\\_1984\\_num\\_93\\_516\\_20254#geo\\_0003-4010\\_1984\\_num\\_93\\_516\\_T1\\_0235\\_0000](https://www.persee.fr/doc/geo_0003-4010_1984_num_93_516_20254#geo_0003-4010_1984_num_93_516_T1_0235_0000)

<sup>20</sup> Zscheischler, J., Westra, S., Van Den Hurk, B. J., Seneviratne, S. I., Ward, P. J., Pitman, A., ... & Zhang, X. (2018). Future climate risk from compound events. *Nature climate change*, 8(6), 469-477.

<sup>21</sup> <https://www.pepr-risques.fr/fr/chaieres-collectives-4-chaieres-de-recherche-pour-renforcer-activites-transversales-du-pepr-risques>

(notamment typologies existantes<sup>22 23</sup>), des modèles conceptuels (graphs spatio-temporels dynamiques, graphs causaux) seront élaborés afin de représenter le fonctionnement des situations les plus caractéristiques et comment ce dernier a évolué avec le fonctionnement du système (e.g. évolutions du climat, de l'occupation des sols, installation d'ouvrages de protection, etc.).

## **2. Développer un modèle quantitatif holistique du système transitoire multialéas:**

Les modèles qualitatifs serviront ensuite de support à une modélisation intégrée quantitative relativement « rustique » du point de vue des processus en jeu mais décrivant de manière holistique les mécanismes principaux à l'origine des aléas et de leurs interactions. L'approche se basera notamment sur les modèles statistiques de valeurs extrêmes dont les paramètres feront explicitement le lien au contexte non stationnaire. Le forage de ce modèle avec les conditions transitoires disponible pour la zone d'étude permettra de simuler l'évolution du système multialéas sur la période 1958-2100. Les résultats seront exploités à travers un ensemble de mesures scalaires et vectorielles permettant de quantifier l'évolution des aléas en intégrant les incertitudes liées aux états futurs du système climatique (scenarion socio-économique, modèles GCM-RCM, etc.).

## **3. Approfondir l'analyse spatialisée de situations multialéas caractéristiques**

Un troisième axe du travail consistera à sélectionner et approfondir au sein du système étudié des cas récurrents d'interactions multiprocessus, tels que la transformation d'un glissement en lave torrentielle, l'amplification du ruissellement érosif après un incendie, ou encore le déclenchement d'instabilités de versant lors d'une crue. Ces situations seront analysées avec des modèles quantitatifs permettant d'évaluer les bilans de masse, les transferts sédimentaires, les vitesses d'écoulement et les cinétiques de déstabilisation. Pour ce faire, différentes approches de simulations numériques mécanistiques ou mécano-probabilistes capables de préciser les forçages (climatiques, sismiques, anthropiques), les facteurs de déstabilisation et les mécanismes d'aggravation seront déployées dans l'objectif d'améliorer la compréhension et la prédiction des situations multi-aléas potentiellement les plus critiques

Ces modélisations seront confrontées aux événements réels documentés, en mobilisant différents types de données : inventaires d'événements, relevés LiDAR, restitutions photogrammétriques, archives hydrologiques ou encore observations de terrain sur la base de scores de type CRPS ou Brier. Cette étape permettra les aléas plausibles lors de crises extrêmes et les incertitudes associées aux jeux de données, aux hypothèses retenues dans la modélisation et aux modes de représentation cartographique. Cela permettra de proposer des indicateurs robustes pour qualifier la fiabilité des scénarios plausibles identifiés et simulés par « *stress tests* » (*c'est-à-dire des simulations poussées dans des conditions extrêmes en termes de forçages, au-delà des observations disponibles, afin de tester la résilience des modèles*) et de hiérarchiser leur pertinence pour l'évaluation et la gestion des situations multialéas.

---

<sup>22</sup> Mani, P., Allen, S., Evans, S. G., Kargel, J. S., Mergili, M., Petrakov, D., & Stoffel, M. (2023). Geomorphic process chains in high-mountain regions—A review and Classification approach for natural hazards assessment. *Reviews of Geophysics*, 61(4).

<sup>23</sup> Curt, C. (2021). Multirisk: What trends in recent works?—A bibliometric analysis. *Science of the Total Environment*, 763, 142951.

Les résultats seront intégrés grâce à une méthode de cartographie dynamique capable d'intégrer la complexité des processus hydrogravitaires en contexte non-stationnaire. Cette démarche explorera des représentations combinant outils SIG, analyses spatiales et les résultats des modélisations développées dans les axes 2 et 3. Elle permettra ainsi de traduire de façon spatialisée l'état du système multi aléas et son évolution à différents horizons temporels ou de réchauffement. L'objectif est de rendre compte de la diversité des interactions multialéas, des intensités associées à des niveaux de probabilité dimensionnant (e.g. 100 ans), de leurs évolutions et des incertitudes associées. Cette sortie constituera l'apport de la thèse à l'opérationnalisation de l'analyse multialéas afin de proposer des outils et informations utilisables pour la gestion des territoires exposés.

### **Sites d'étude et ancrage projet**

Il est proposé d'appliquer les développements méthodologiques de la thèse de façon prioritaire au bassin de Barcelonnette, moyenne Ubaye, archétype de terrain où les aléas hydrogravitaires sont nombreux et diversifiés, rendant la gestion des risques associés complexes, et où un ensemble important de données qu'il s'agira de consolider et de croiser est déjà disponible. Si nécessaire ou si le temps le permet, un second site aux caractéristiques complémentaires sera défini au cours de la thèse.

Des projets en cours comme IRIMONT (risques en montagne, IRiMa), VIGIMONT (système de vigilance des glissements de terrain et des laves torrentielles en montagne, ANR), CAMURI (modélisation multirisque, INRAE) pourront offrir un cadre au sujet (échanges de données, développements méthodologiques, etc.). Des comparaisons avec des contextes climatiques et géomorphologiques contrastés pourront notamment aider à identifier les facteurs de contrôle, les signatures morphologiques et les modalités de représentation des crises multi-aléas.

### **Spécificité et localisation du poste**

Le recrutement s'inscrit dans l'équipe « Risques Instabilités Gravitaires » du BRGM au sein de la direction DRIS. Dans un environnement favorable à l'équilibre vie professionnelle/vie privée, notamment grâce au télétravail, le BRGM se distingue par son climat de bienveillance et de convivialité. Labellisé HRS4R en 2021, notre souhait est de vous accompagner tout au long de votre vie professionnelle au sein du BRGM. Nous mettons à votre disposition de nombreux dispositifs pour développer vos compétences et votre expertise, avec des possibilités d'évolutions et de mobilités géographiques. Au BRGM, vous bénéficierez de plusieurs avantages tels que des JRTT, un restaurant d'entreprise, des infrastructures sportives, des prestations vacances et loisirs, etc.

Néanmoins, le temps de travail sera partagé entre le BRGM et l'Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE), un laboratoire public de recherche en Sciences de la Planète et de l'Environnement, dont les tutelles sont le CNRS/INSU, l'IRD, l'Université Grenoble Alpes (UGA), INRAE et Grenoble-INP au sein de l'Observatoire des Sciences de l'Univers de Grenoble. En son sein, l'équipe ECRINS concentre ses activités sur les risques gravitaires et la cryosphère en montagne. Elle développe des connaissances sur les processus, la caractérisation et l'évolution des risques et de leurs composantes, les méthodes de prévention et de gestion et l'aide à la décision. La connaissance territorialisée des risques en montagne, de leurs composantes (aléas, vulnérabilités,

enjeux exposés) et de leur contexte (climat, occupation des sols, pratiques) ainsi que leur modélisation ainsi un de ses domaines d'action historique. Ce double ancrage acté permettra de maximiser les synergies entre les deux entités BRGM et IGE impliquées. Une convention permettra de garantir l'accueil à Grenoble dans les meilleures conditions (accès aux ressources, locaux, restaurant administratif, etc.).

### **Localisation du poste**

BRGM, Orléans, France

Laboratoire IGE, Grenoble, France

### **Ecole Doctorale et Encadrement**

La thèse s'effectuera au sein de l'ED STEP : <https://edstep.univ-grenoble-alpes.fr/>

Formellement, la thèse sera encadrée par G. Grandjean (BRGM) et N. Eckert (IGE). Néanmoins une équipe d'encadrement élargie regroupant des membres des deux entités (S. Bernardie, Y. Thiery, C. Levy – BRGM ; F. Giacona, G. Chambon - IGE) sera mise en place afin de permettre l'assemblage des compétences requises.

### **Modalités de candidature**

Le BRGM vous garantit une procédure de recrutement transparente. Pour postuler envoyez-nous votre candidature (CV actualisé et lettre de motivation) jusqu'au 31 mai 2026. Sachez que tous nos postes sont ouverts à toutes et à tous, au BRGM, nous sommes attaché·e·s à la diversité ! Nous étudierons votre dossier de recrutement dès la fin de diffusion prévue. Si votre candidature est retenue, nous vous contacterons pour des entretiens de recrutement pendant lesquels vous échangerez avec la direction recruteuse, la direction RH et une direction transverse.

### **Contact**

[g.grandjean@brgm.fr](mailto:g.grandjean@brgm.fr)

[nicolas.eckert@inrae.fr](mailto:nicolas.eckert@inrae.fr)