## Rôle du karst et du climat sur les risques gravitaires et leurs impacts sur la ressource en eau dans les vallées maralpines

### Contexte

Ce projet se propose d'étudier les risques gravitaires dans les milieux carbonatés et leurs conséquences sur la ressource en eau, aussi bien en termes quantitatif que qualitatif. En effet, sur le pourtour méditerranéen, les formations carbonatées sont caractérisées par une intense karstification. Le degré de karstification contrôle d'une part la disponibilité de la ressource en eau ainsi que la réponse hydrodynamique des cours d'eau face aux évènements climatiques avec en particulier des crues éclairs bien documentées dans ces milieux (Fleury et al., 2013 ; Le Mesnil et al., 2022). Cette karstification, couplée à l'héritage des processus tectoniques, peut être aussi à l'origine de la déstabilisation et du déclenchement de mouvements de terrain. En cas d'évènements climatiques intenses, la mise en charge hydraulique du karst et les crues qui en découlent peuvent déclencher toute une diversité de processus gravitaires, amplifiant ainsi le risque et les conséquences sur l'environnement et les sociétés de ces territoires (De Waele et al., 2010 ; Dufresnes et al., 2020 ; Nannoni et al., 2020). La mise en place de mesures adéquates d'adaptation ou de remédiation après des catastrophes liées aux processus gravitaires et hydro-sédimentaires (i.e. mobilisation de sédiments par l'eau) nécessite d'améliorer notre compréhension du rôle du karst dans la genèse de ces aléas, en particulier en domaine carbonaté. Ces effets combinés du comportement du karst (réponse hydrologique et rôle sur la stabilité des terrains) constituent un verrou scientifique important et encore peu étudié. Nous avons choisi de concentrer nos travaux sur un site d'étude très emblématique vis-à-vis de ces questions : la vallée de la Roya, dans les Alpes Maritimes, affectée par les tempêtes Alex en octobre 2020 et Alina en octobre 2023. La tempête Alex, à l'origine de pluies intenses sur les massifs du bassin versant de la Roya, a provoqué un événement torrentiel qui a dévasté la vallée et ses affluents, et conduit à des dégâts considérables estimés à plus d'un milliard d'euros. Alina, trois ans plus tard, n'a pas provoqué autant de désordres malgré des intensités de pluie très importantes localement.

### Objectifs et approche

Nous proposons dans ce projet de développer une approche transdisciplinaire au sein du groupe de recherche STORY de Sorbonne Université, comprenant les laboratoires ISTeP, METIS, Médiations et l'Institut d'Alembert, et le LSCE. L'objectif principal est d'étudier le fonctionnement hydro-sédimentaire lors des événements extrêmes, à la fois en surface (en se concentrant initialement sur la vallée de la Roya et ses affluents, avec deux thèses Sorbonne Université déjà en cours depuis 2023) et à partir du milieu souterrain (dans un contexte karstique, pour ce projet de thèse), en tenant compte des connaissances locales et des enjeux liés à l'eau en tant que bien commun et aux risques associés. Ce PRD vise à aborder le sujet en trois phases distinctes, couvrant le passé, le présent et le futur.

**Dans le passé** : Certains mouvements de terrains déclenchés pendant la tempête Alex semblent être liés à des instabilités anciennes des massifs, potentiellement influencées par des évènements hydroclimatiques extrêmes depuis la dernière glaciation. La sismicité modérée des Alpes du Sud joue également un rôle significatif dans la fragilisation des massifs rocheux, pouvant déclencher des mouvements de terrain. Chacun de ces évènements est susceptible de générer des circulations de fluides dans les factures ou dans les failles existantes (Denchik et al., 2019) qui peuvent conduire à des précipitations de calcite pendant ces mouvements transitoires. On retrouve sur certaines zones de glissement des concrétions carbonatées ayant enregistré une série d'évènements ponctuels, dont l'intensité peut être modérée ou très forte. Il est admis que les évènements extrêmes (tectoniques et/ou climatiques) sont les déclencheurs de ces glissements (Jones et al., 2021). Nous envisageons de documenter ce passé via une **analyse géochronologique** (méthode U/Th par spectrométrie de masse) et géochimique de la calcite de certaines concrétions bien positionnées pour représenter les mouvements de terrain. Les vallées du Cairos et de la Brigue ont été identifiées comme le massif calcaire affecté par des mouvements de terrain anciens (glissement de Bottin) qui a eu l'impact le plus important sur son système karstique. La grotte de Merim, dans un affluent du Caïros et la grotte de la Noce, dans la Brigue, seront investiguées. La méthode est couramment employée sur des stalagmites de grottes, carrières ou même dans des réseaux d'adduction d'eau (Plagnes et al., 2002, 2003 ; Soubies et al., 2005 ; Barôn et al., 2022). Elle permet de proposer une chronologie précise et absolue des évènements ayant conduit à la précipitation de calcite de l'actuel (quelques années ou dizaines d'années) jusqu'à 600 ka. Nous nous attendons avec ces concrétions à dater les évènements climatiques significatifs qui au cours de l'Holocène auraient pu déclencher des mouvements de terrain. Ce travail sera couplé à une étude géologique, sédimentologique et géomorphologique qui visera à donner à donner un cadre d'évolution de la vallée. L'ensemble des éléments obtenus sera mis en perspective pour établir un calendrier aussi précis que possible des évènements subis par la vallée.

**A l'actuel :** On constate aujourd'hui sur le territoire, un impact considérable sur la ressource en eau disponible pour la population et ses activités depuis la tempête Alex. Par exemple, le débit de la source du Merim qui alimente Saorge en eau potable a diminué de 30% depuis cet évènement extrême. La tempête Aline a touché la même zone géographique trois années plus tard. Elle a provoqué des pluies torrentielles survenues après une longue période de sécheresse, mais n'ont pas provoqué le même niveau de désordres en termes de mouvements de terrain (Liébault et al. 2024). On peut penser que le karst et ses capacités de stockage dans sa structure interne ont joué un rôle d'amortisseur dans la mise en charge des réseaux et dans la réponse hydrodynamique des cours d'eau (Maréchal et al., 2008). L'état hydrique initial pourrait donc être déterminant dans la genèse des mouvements de terrain. La question du rôle du karst comme déclencheur ou comme amortisseur dans la genèse

des mouvements de terrain à l'actuel se heurtent malheureusement à un déficit d'observations et d'enregistrements scientifiques bien positionnés, pourtant nécessaires pour évaluer qualitativement et quantitativement les changements du fonctionnement hydrodynamique des hydrosystèmes (avant-après un évènement climatique et/ou tectonique), et mener une analyse quantitative des déplacements de matière entre leur source et les zones de dépôts. Nous envisageons d'équiper certains sites d'enregistreurs de niveaux piézométriques et des lacs, de débit des sources et des rivières du vallon du Cairos mais aussi de suivre l'activité des processus gravitaires par imagerie LIDAR. Un diagnostic de la structure et du fonctionnement de l'hydrosystème actuel (post Alex et Aline) sera établi à partir d'analyses géologiques, géomorphologiques et des nouvelles informations acquises sur le terrain. Une étude rétrospective sur l'état pré-Alex des systèmes karstiques sera en parallèle menée selon une approche innovante de science participative. Il s'agit de produire un jeu de données original qui alimentera les interprétations et les connaissances des différents domaines scientifiques. Nous proposerons un observatoire participatif pour suivre le karst sur le long terme, impliquant des lycéens accompagnés et des habitants locaux formés par nos soins. Ce programme sera étroitement lié à un volet éducatif, axé sur la compréhension du territoire et de son fonctionnement naturel, notamment en ce qui concerne la ressource en eau et les impacts des activités humaines. Cette initiative est menée en collaboration avec l'association Cultures en Terrasses et le groupe de recherche de SU, STORY, en partenariat avec la MAIF.

**Pour le futur :** Nous étudierons les prédictions climatiques pour la vallée de la Roya sous l'impact du changement climatique en utilisant les données de précipitations et de températures du projet d'intercomparaison des modèles couplés (CMIP5) via les données DRIAS 2020, ainsi que trois scénarios climatiques (RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5). Notre analyse portera sur l'évolution des températures, de la pluviométrie annuelle, de l'intensité et de la fréquence des événements pluvieux jusqu'à la fin du siècle dans la région. Cette approche prospective guidera les propositions d'adaptation locales visant à protéger la société et les territoires contre les risques associés.

**Mots clefs** : *Karst, Risques gravitaires, Risques hydro-climatiques, Evènements extrêmes, Ressource en eau, Résilience, Gestion intégrée de l'eau, Collaboration transdisciplinaire*

## Equipe encadrant et taux d'encadrement

- *Valérie Plagnes : hydrogéologue / karstologue (40%) Apporte une expertise spécialisée dans la caractérisation hydrodynamique des systèmes karstiques en milieu carbonaté, essentielle pour comprendre le rôle du karst dans les risques gravitaires et son interaction avec les processus hydrologiques.*
- *Christian Gorini : sédimentologue / sciences sociales (30%) Apporte une expertise considérable dans la sédimentologie, la dynamique des bassins sédimentaires et les risques géologiques. Son implication dans des projets de recherche sur les événements climatiques extrêmes et son engagement dans des initiatives de science participative enrichissent le projet.*
- *Sara Lafuerza : sédimentologue / mouvement de terrain (30%) Apporte une expertise précieuse dans l'étude des glissements de terrain et des géohazards, en particulier dans les environnements marins. Sa connaissance approfondie des processus géologiques, géotechniques et géophysiques est cruciale pour comprendre les risques gravitaires dans les milieux carbonatés et leurs impacts sur la ressource en eau.*
- *La/Le doctorant.e devra posséder des compétences en géologie et géomorphologie. Une expertise en hydrologie et hydrogéologie est essentielle pour étudier les processus liés à l'eau dans les systèmes karstiques et une maîtrise des méthodes de modélisation et d'analyse de données pour interpréter les résultats des études sur le terrain. Des compétences solides en travail sur le terrain sont requises pour mener des enquêtes en environnements montagneux et karstiques. Enfin, une aptitude à collaborer avec des chercheurs de différentes disciplines et à intégrer des approches transdisciplinaires est indispensable.*

## Bibliographie


Barôn I, Plan L, Bernhard, G, Melichar R, Mitrovic-Woodell I, Rowberry M, Scholz D (2022). Three large prehistoric earthquakes in the Eastern Alps evidenced by cave rupture and speleothem. Geomorphology, 408..

De Waele J., Martina M.L.V., Cossu Q.A., Sanna L., Cabras S., *Flash flood* hydrology in karstic terrain: Flumineddu Canyon, central-east Sardinia (2010), Geomorphology 120, Issues 3–4, 162-173

Dufresne C., Arfib B., Ducros L., Duffa C., Giner F., Rey V. (2020) *Karst* and urban *flood*-induced solid discharges in Mediterranean coastal rivers: The case study of Las River (SE France). Journal of Hydrology 590, 125194

Fleury P., Maréchal J.C., Ladouche B. *Karst* flash-*flood* forecasting in the city of Nîmes (southern France) (2013), Engineering geology 164, 26-35

Jones JN, Boulton SJ, Bennett GL, et al (2021) Temporal Variations in Landslide Distributions Following Extreme Events: Implications for Landslide Susceptibility Modeling. J Geophys Res Earth Surf 126:e2021JF006067. https://doi.org/10.1029/2021JF006067

Le Mesnil M., Charlier J.B., Moussa R., Caballero Y. (2022) Investigating *flood* processes in *karst* catchments by combining concentration-discharge relationship analysis and lateral flow simulation, Journal of Hydrology 605, 127358

Liébault F, Melun G, Piton G, et al (2024) Geomorphology Channel change during catastrophic flood : Example of Storm Alex in the Vésubie and Roya valleys. Geomorphology 446:. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.109008

Nannoni A., Vigna B;, Fiorucci A., Antonelli M., De Waela J. (2020) Effects of an extreme flood event on an alpine karst system, Journal of Hydrology 590, Page 125493

Maréchal J.C., Ladouche B., Dörfliger N. (2008) *Karst* flash flooding in a Mediterranean *karst*, the example of Fontaine de *Nîmes*, Engineering Geology 99, Issues 3–4, Pages 138-146

**Plagnes V., Causse Ch., Genty D., Paterne M., Blamart D., 2002. A climatic record from 187 to 74 ka from a speleothem of the Clamouse Cave (South of France). *Earth and Planetary Sciences Letters 201, 87-103***

**Plagnes V., Causse Ch., Fontugne M., Valladas H., Chazine J.M., Fage L.H., 2003. Cross dating (Th/U and $^{14}$C) limits for an open system: calcite covering prehistoric paintings in Borneo. *Quaternary Research, 60, 172-179***