

**INRAE**  
la science pour la vie, l'humain, la terre



**C**hutes de Blocs  
**R**isques **R**ocheux  
**O**uvrages de **P**rotection



**UNIVERSITÉ DE GENÈVE**

# Quantification du risque rocheux et optimisation des mesures de protection

N. Eckert, IGE, Inrae / Université Grenoble Alpes  
M. Farvacque, ISE, Université de Genève

Rencontres MOA

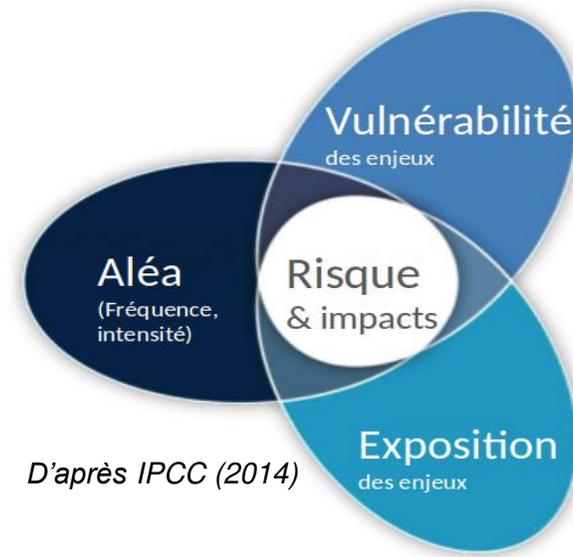
Lyon, 27/01/2023



**PROJET NATIONAL**  
*Labellisé par le réseau RAGC  
(Recherche appliquée en génie civil)*



- Le risque matérialise des interactions potentielles dans un système d'intérêt entre un aléa et des enjeux exposés et vulnérables
- Pour évaluer/maitriser le risque: besoin d'une grandeur, la métrique/mesure de risque: « simple » score ou grandeur quantitative
- Expression via du formalisme mathématique



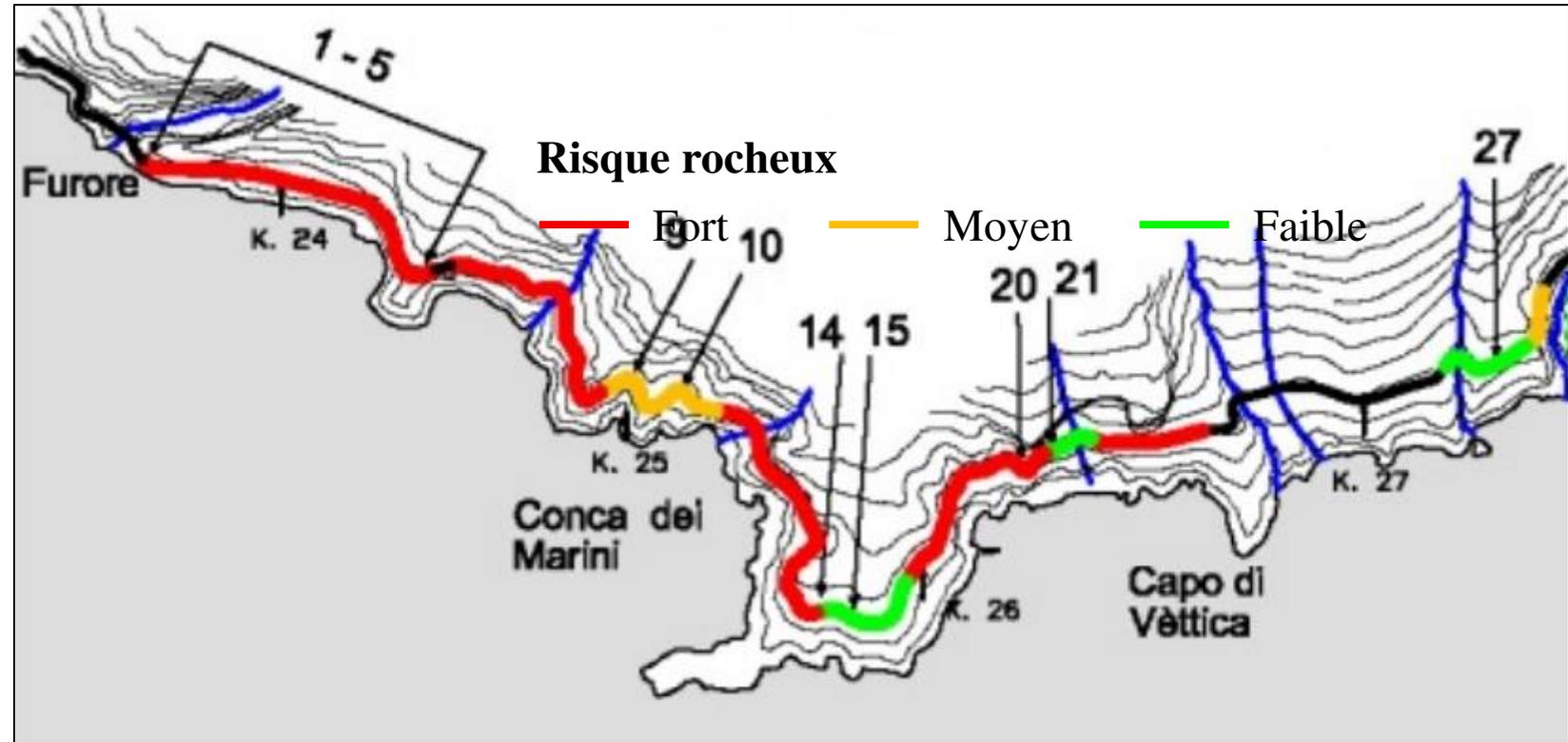
*D'après IPCC (2014)*



$$ES_{\alpha} = \mathbb{E}(X|X \leq VaR(X, \alpha))$$

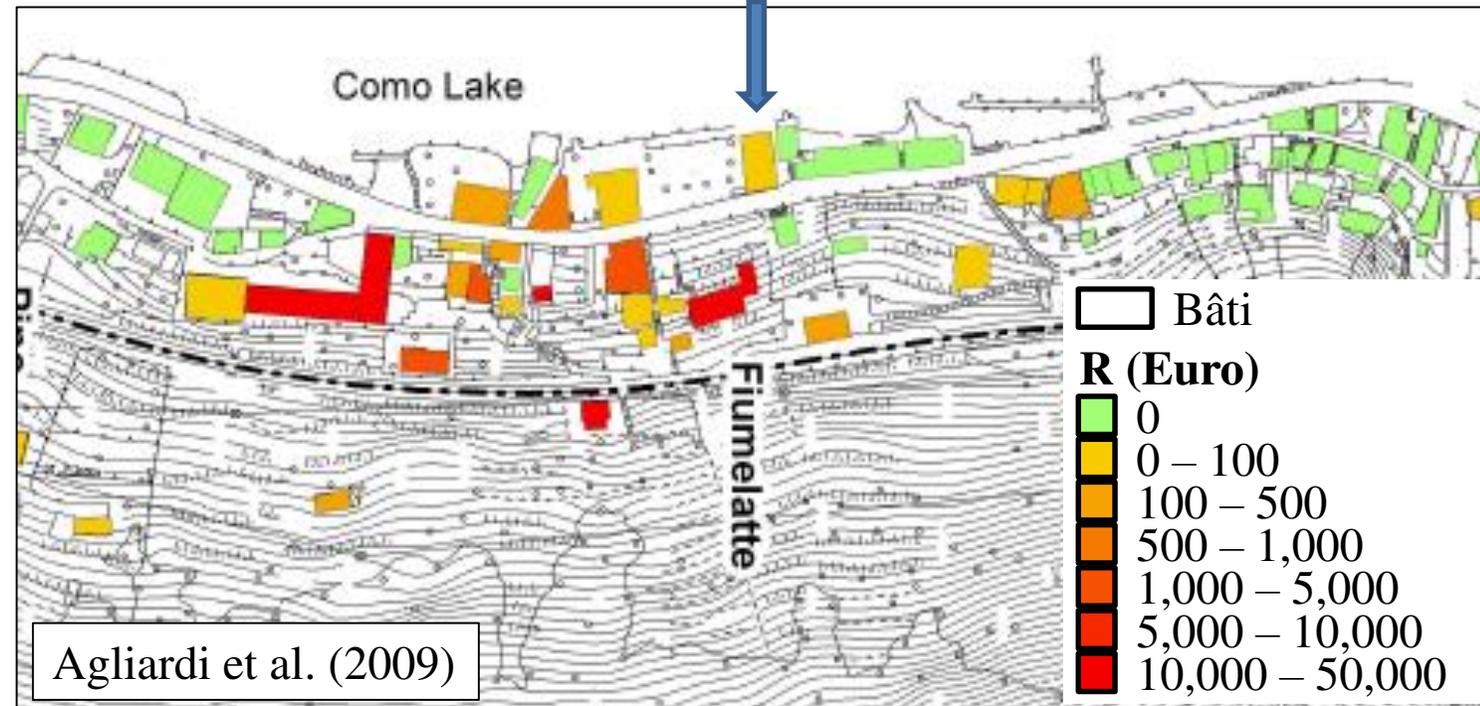
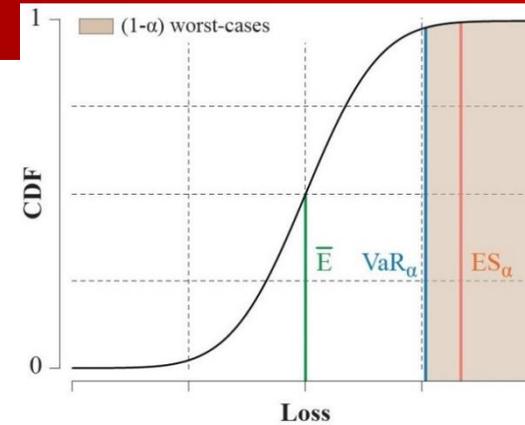
*Une mesure de risque, l'espérance de queue*

- Combinaison de « scores » sur l'aléa, les enjeux (localisation, taux d'exposition) et leur vulnérabilité
- Risque souvent résumé par les termes **fort, moyen, faible**



Budetta and Nappi (2013)

- Valeurs de risque **objectives** et **reproductibles**
- Combinaison **numérico-probabiliste** de l'aléa avec enjeux et leur vulnérabilité
- Chaque terme de l'équation du risque est quantifié pour établir **la distribution des dommages potentiels** et en déduire une estimation du risque (choix d'une mesure), enjeu par enjeu ou de façon agrégée



## Principales études QRA risque rocheux

| REFERENCE                                | TITLE   |
|--|---|
| <a href="#">Corominas et al. (2005)</a>  | Quantitative assessment of the residual risk in a rockfall protected area.  |
| <a href="#">Agliardi et al. (2009)</a>   | Integrating rockfall risk assessment and countermeasure design.   |
| <a href="#">Michoud et al. (2012)</a>    | Rockfall hazard and risk assessments along roads at a regional scale: example in Swiss Alps.                            |
| <a href="#">Budetta et al. (2016)</a>    | Quantitative rockfall risk assessment for an important road by means of the rockfall risk management (RO.MA.) method.   |
| <a href="#">Moos et al. (2017)</a>       | Integrating the mitigating effect of forests into quantitative rockfall risk analysis: two case studies in Switzerland. |
| <a href="#">Unterrader et al. (2018)</a> | Rockfall in the Port Hills of Christchurch: Seismic and non-seismic fatality risk on roads.                             |

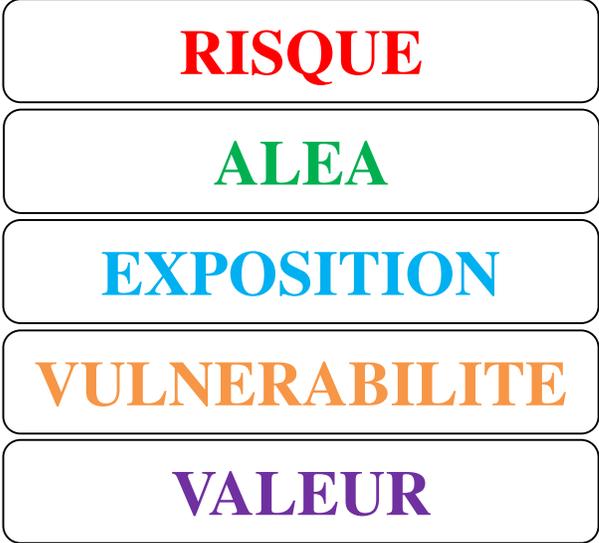
## Limites de l'existant:

- Sous-estimation de la variabilité de la distribution de l'aléa (trop peu de volumes et de surfaces potentielles de départ considérés)
- Restrictions à des zones déjà impactées
- Quantification de la vulnérabilité peu poussée

## Vers une approche plus holistique (thèse Manon Farvacque, Arc Environnement avec soutien Indura/C2ROP)

- Prendre **toutes les zones potentielles de départ**
- Considérer un **large éventail de volumes**
- Utilisation intensive des modèles de simulations trajectographiques (et ainsi considérer **l'ensemble des zones à risque**)
- Utilisation de **courbes de vulnérabilité physiques** (et donc prise en compte des énergies des blocs)
- **Risque individuel vs. risque collectif pour enjeux existants ou potentiels: bâti, habitants et enjeux circulants (coûts directs)**





|                  |                                     |
|------------------|-------------------------------------|
| <b>R</b> Risque  | <i>f</i> Fréquence                  |
| <i>z</i> Enjeu   | <i>p</i> Proba. atteinte            |
| <b>D</b> Dommage | <b>E</b> Energie                    |
| <i>v</i> Volume  | <b>q</b> Exposition                 |
| <b>Z</b> Valeur  | <i>v<sub>Cl</sub></i> Classe volume |

$$R_z = Z \times q(z) \int f(v) \left[ \int p_z(E|v) D_z(E) dE \right] dv \quad Eq. (1)$$

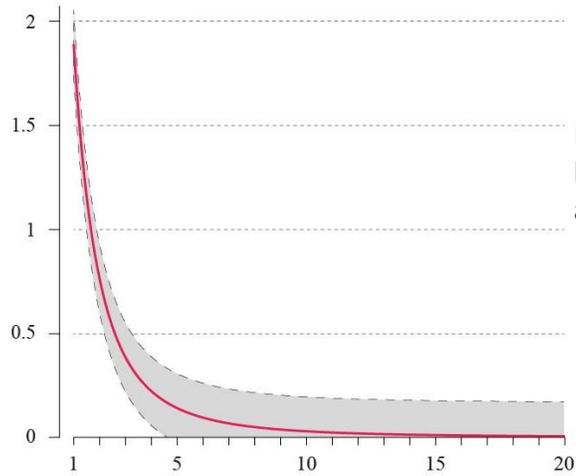


*Numerical model set-up:*

Formule intégrale simplifiée en sommes discrètes sur un ensemble de simulations de **plusieurs classes de volumes v<sub>Cl</sub>**



$$R_z = Z \times q(z) \sum_{i=1}^l f(v_{Cl_i}) \times p_z(v_{Cl_i}) \times \bar{D}_z(v_{Cl_i}) \quad Eq. (2)$$

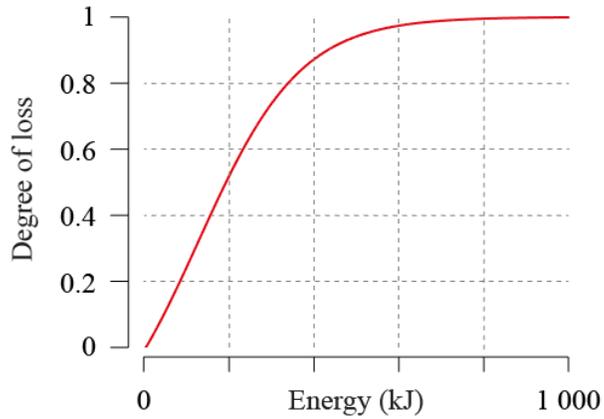


Distribution locale des tailles de blocs à Crolles (Farvacque et al., 2020)

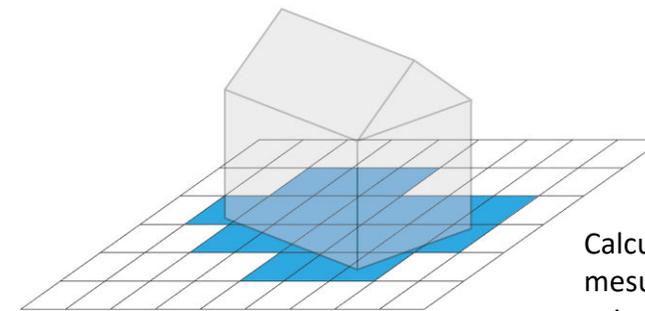


Simulations trajectographiques à partir de l'ensemble des zones sources

$$R_z = Z \times q(z) \sum_{i=1}^l f(v_{cli}) \times p_z(v_{cli}) \times \bar{D}_z(v_{cli})$$

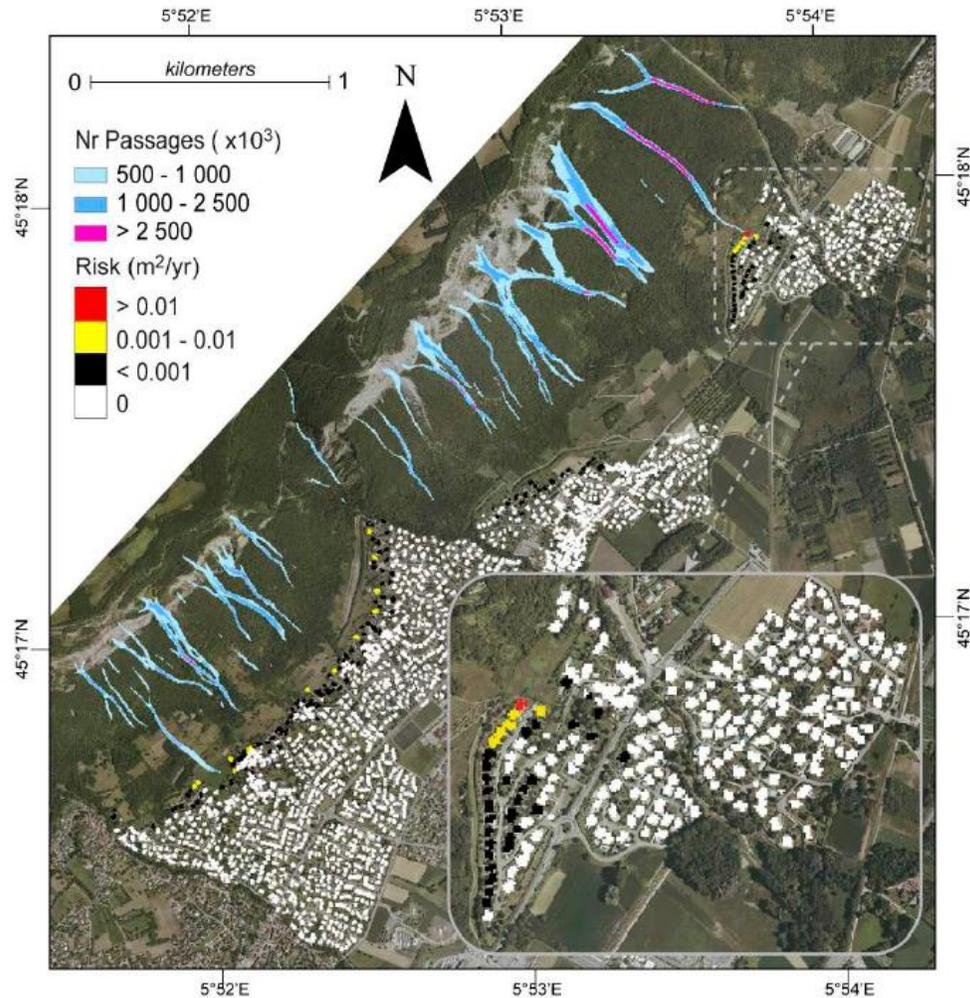


Courbe de vulnérabilité (bâti standard, Agliardi et al., 2009)



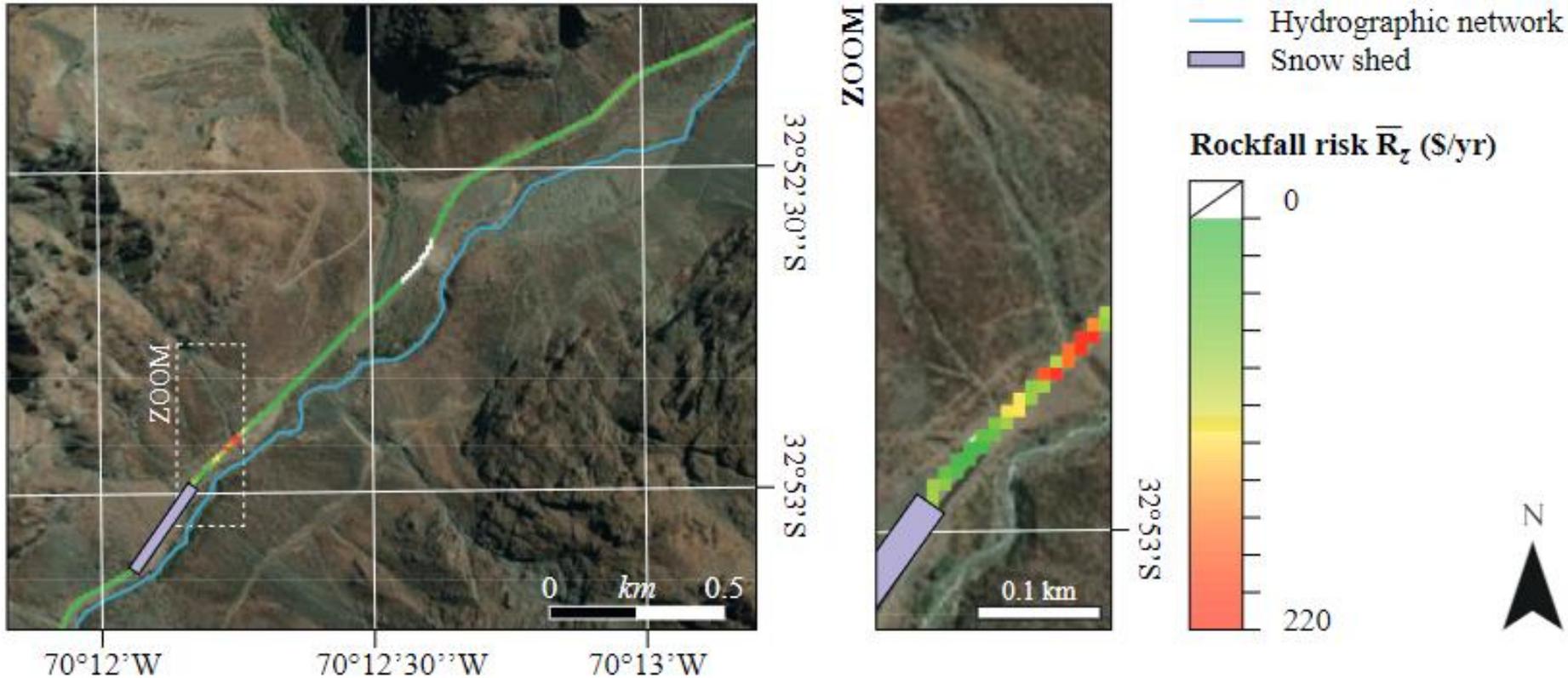
Calcul du commage moyen (ou autre mesure de risque) pour chaque enjeu existant sur le cadastre

## Dommmage moyen sur le bâti existant



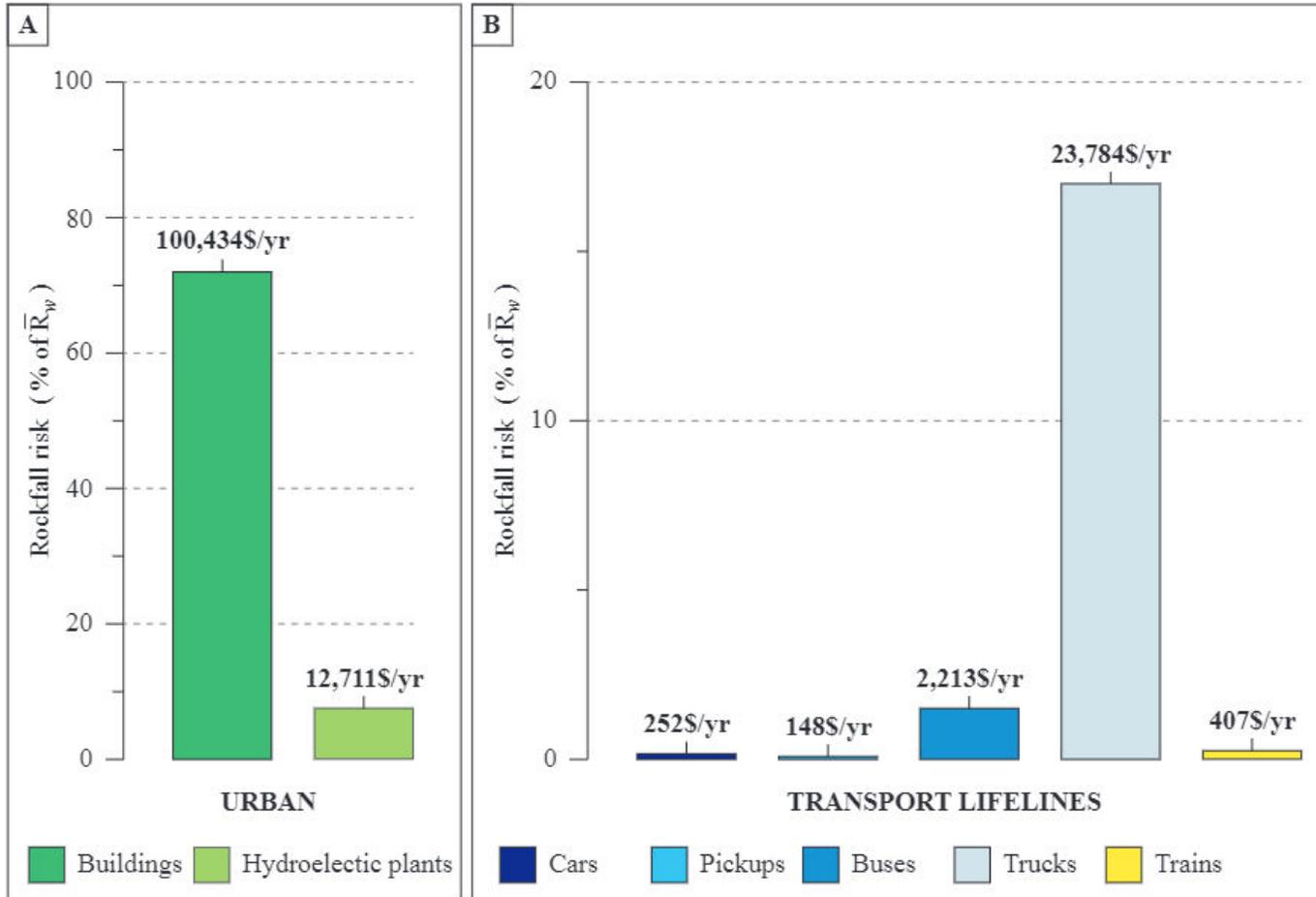
- Dommage moyen exprimé en m<sup>2</sup>/an détruits pour le bâti existant
- Commune de Crolles, France (*Farvacque et al., 2020*)

## Dommmage moyen pour enjeux ciculants



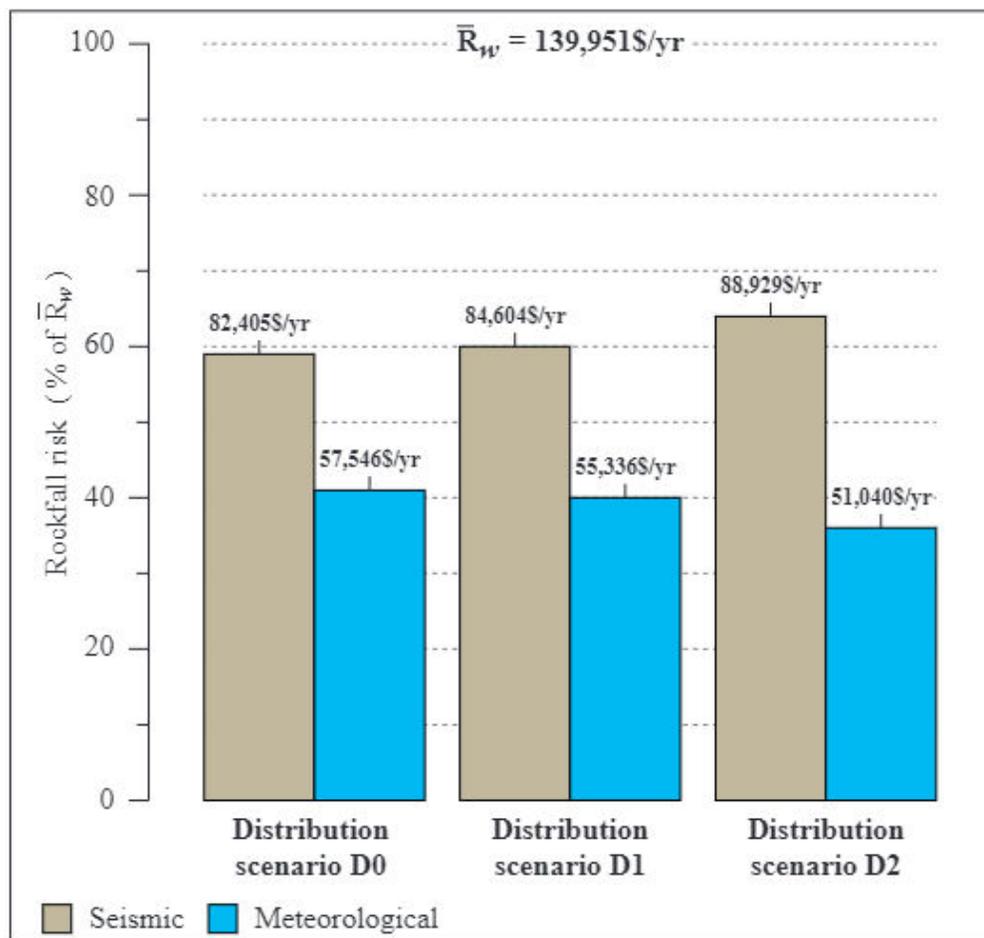
- Risque moyen (\$/an) par section de route, enjeux du linéaire routier confondus (voitures, pickups, bus, camions)
- Vallée d'Uspalatta, Chili (*Farvacque et al., en révision*)

## Risque total pour tous les enjeux



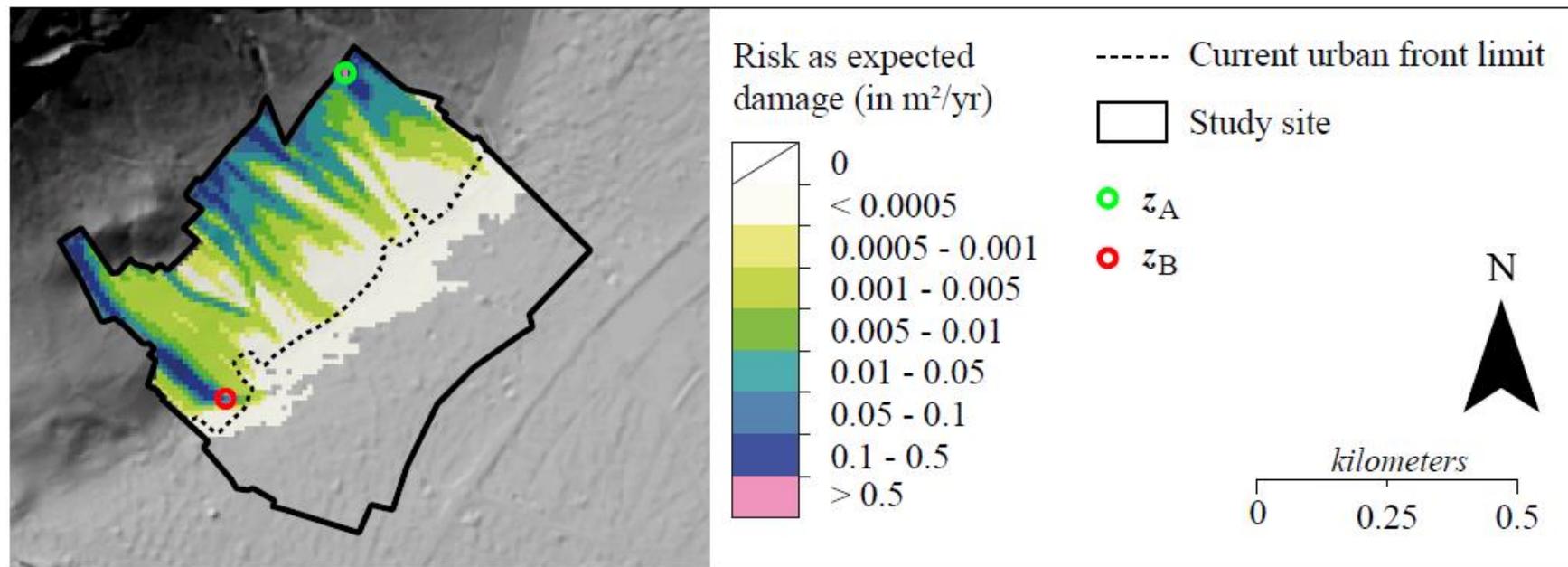
- Risque total moyen (\$/an) pour chaque « groupe » d'enjeux (bâtis, usines hydro-électriques, voitures, pickups, bus, camions, trains)
- Vallée d'Uspalatta, Chili (*Farvacque et al., en révision*)

## Décomposition du risque rocheux en fonction des facteurs déclencheurs de l'aléa



- Risque rocheux (en \$/an et % du risque total  $R_w$ ) pour les distributions D0, D1 and D2 représentant une pondération différente parmi les classes de volume entre les chutes de pierres déclenchées par des séismes et celles déclenchées par des phénomènes météorologiques
- Poids respectifs des différents drivers
- Vallée d'Uspalatta, Chili (Farvacque et al., en révision)

## Risque individuel plutôt que sur l'existant



- Risque moyen (m<sup>2</sup>/an détruits) pour enjeux potentiels (bâtiments) le long d'un versant
- Commune de Crolles, France (Farvacque et al., 2020)



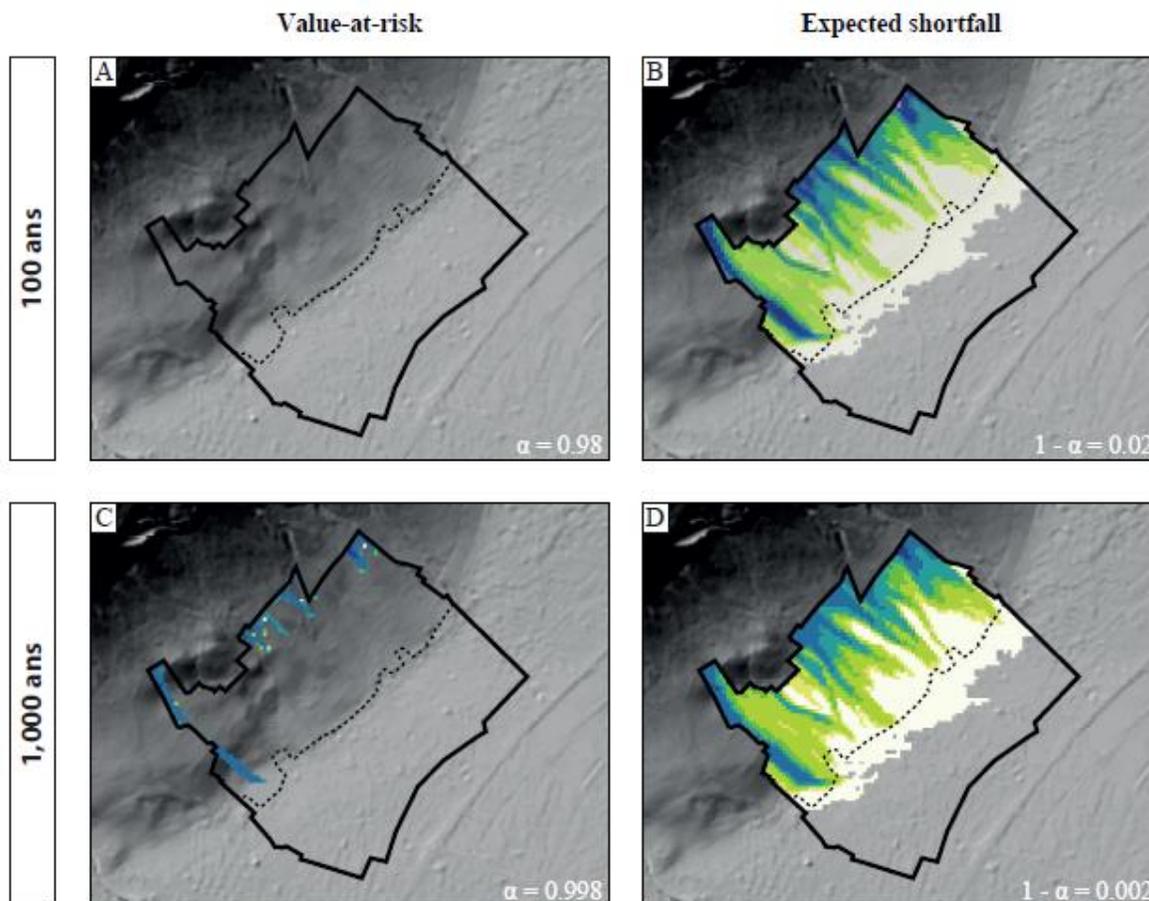
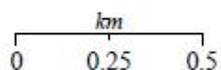
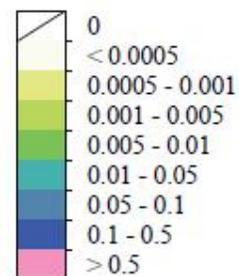
Quantification du risque, rencontre MOA

## Mesures de risques basées sur des quantiles

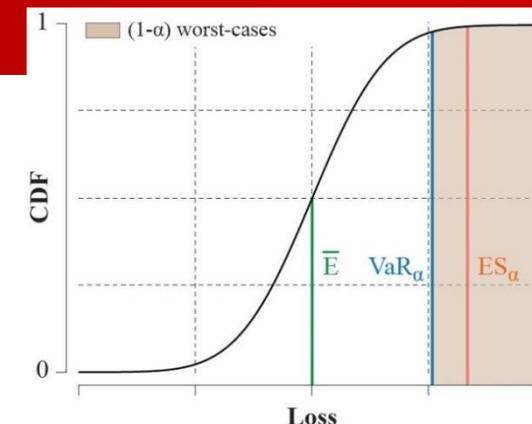
----- Limite front urbain actuel

□ Site d'étude

Risque (m<sup>2</sup>/an)

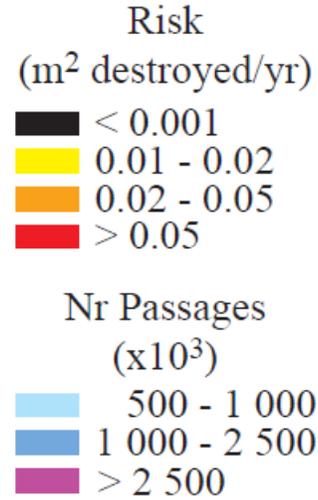
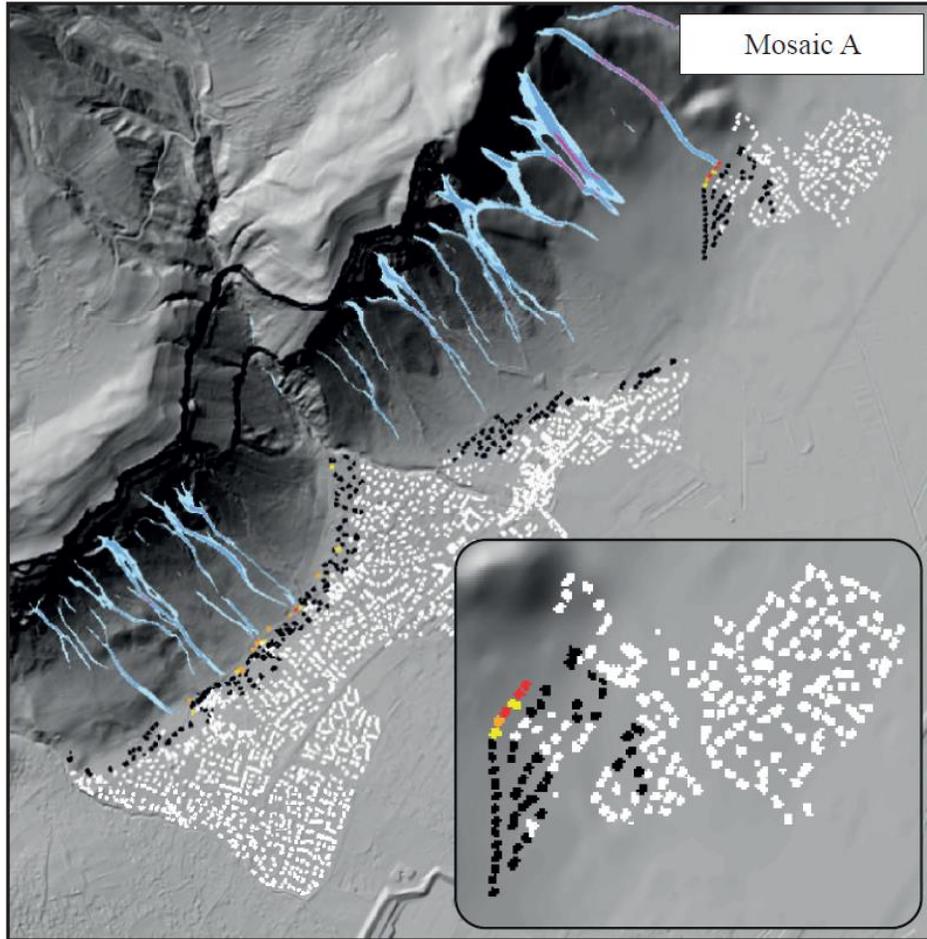


Risque individuel sur la commune de Crolles, France (Farvacque et al., 2021)



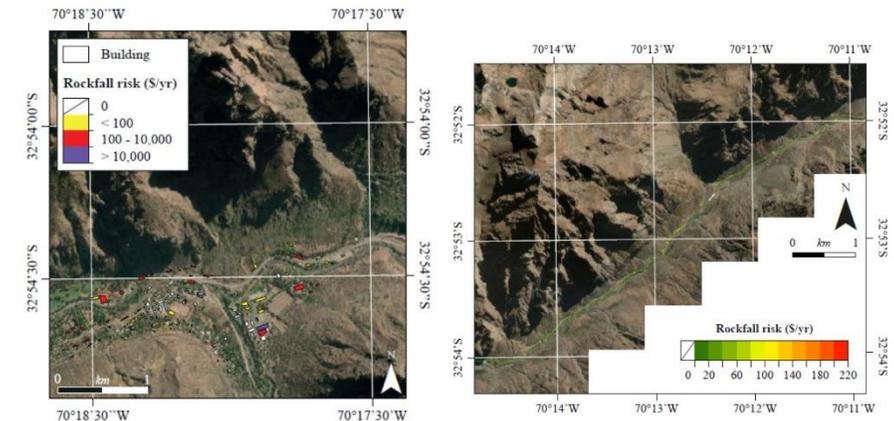
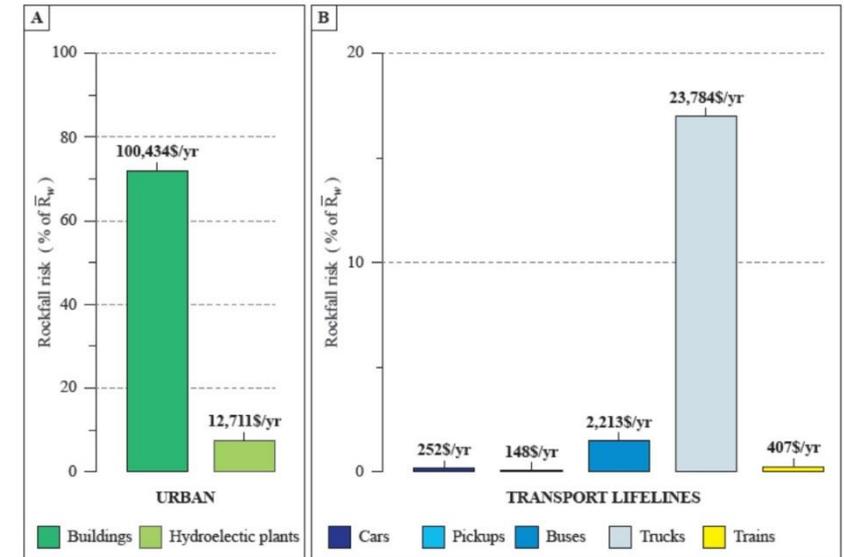
- Cartographie du risque rocheux (en m<sup>2</sup> détruits par an) à partir de la value-at-risk (A, C) et de l'expected shortfall (B, D) pour des horizons  $t$  de 100 ans (A, B) et 1 000 ans (C, D)
- Ces deux mesures permettent d'évaluer les dommages minimum et moyen attendus dans les  $(1-\alpha)\%$  pires scénarios de la distribution des dommages

## Evaluation de la non-stationnarité du risque (via ici occupation des sols)



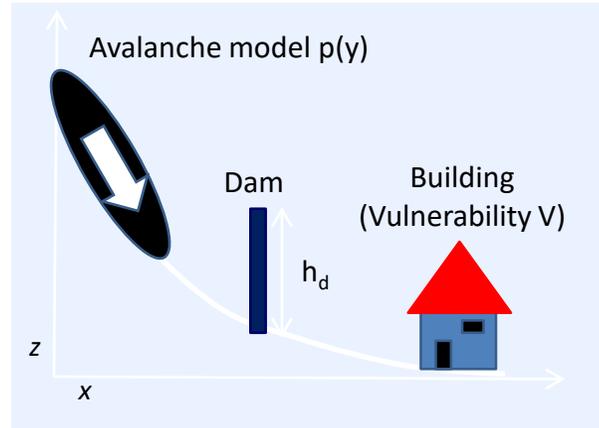
- Risque moyen (m<sup>2</sup>/an détruits) pour l'existant dans un motif paysager observé par le passé (1950s - prédominance de prairie)
- Commune de Crolles, France (*Farvacque et al., 2019*)
- **Piste future:** Intégrer plus systématiquement les changements dans l'aléa (climat, occupation des sols) ou les enjeux pour anticiper le risque dans un contexte socio-environnemental évoluant rapidement et substantiellement.

- Principe de la QRA: combinaison numérico-probabiliste de l'aléa (chute de bloc) avec enjeux et leur vulnérabilité
- Risque individuel et collectif pour enjeux existants ou potentiels: bâti, habitants et enjeux circulants (coûts directs)
- Développement/amélioration des méthodologies d'évaluation quantitative du risque, application zonage du risque
- Différentes mesures de risques: dommage espéré et mesures basées sur des quantiles
- « Ouverture » non stationnaire: prise en compte des changements paysagers (à développer)
- Pas de prise en compte d'actions sur le risque qui visent à le maîtriser

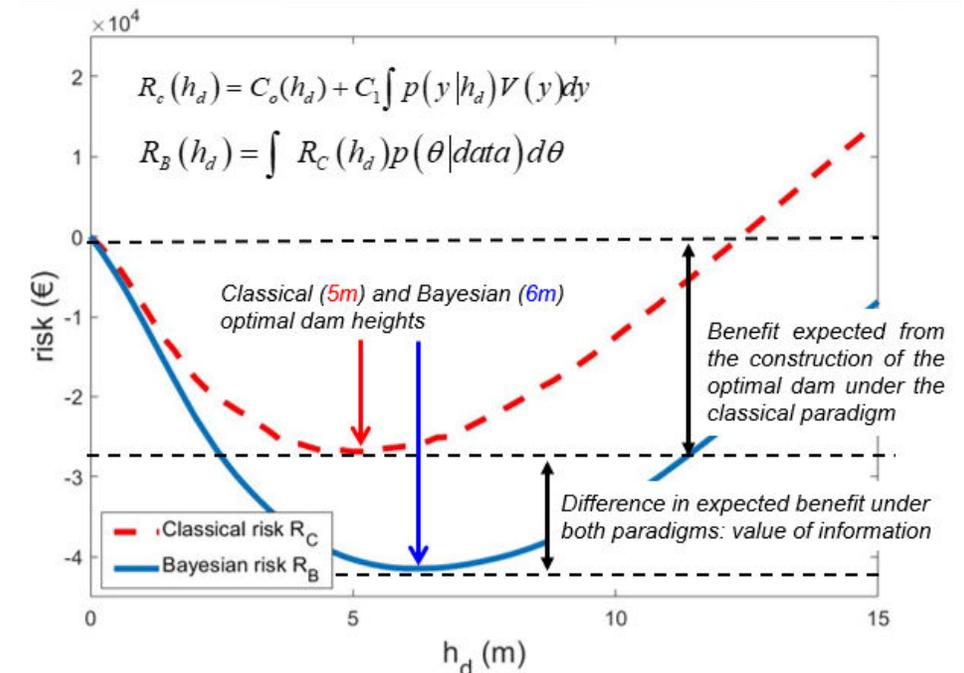


Risque "total" pour la vallée d'Uspalatta, Chili (Farvacque et al., en révision)

- Maitrise /minimisation du risque via mesures de gestion/protection
- Approche économétrique « classique » : minimisation d'un coût total intégré (méthodes coût-bénéfices améliorées)
- « Longue » expérience Inrae dans le domaine des avalanches
- Exemple largement traité: dimensionnement optimal d'une digue (coût de construction versus protection)



Dimensionnement optimal d'une digue paravalanche, Eckert et al SERRA 2009



- Prise en compte conjointe de la fragilité des enjeux et de l'ouvrage: « système à 4 états »
- Formulation générique du risque
- Lien entre dommage structural et efficacité fonctionnelle : obtention de bornes pour la minimisation

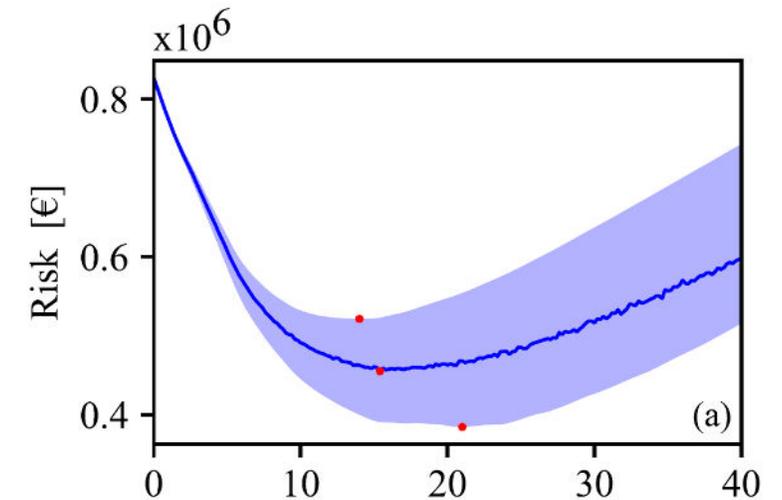


Cold Regions Science and Technology  
Volume 199, July 2022, 103559



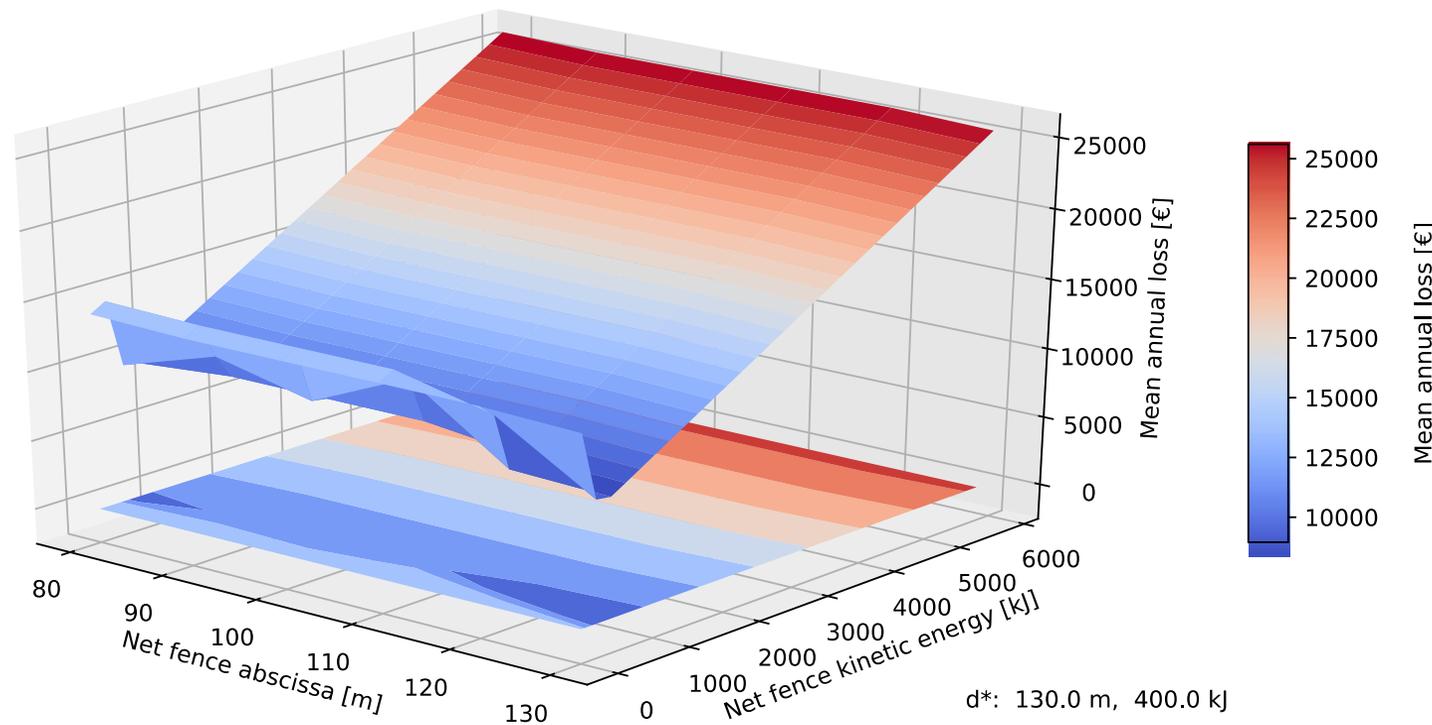
A framework to account for structural damage, functional efficiency and repair costs within the optimal design of countermeasures: Application to snow avalanche risk mitigation

Philomène Favier<sup>a</sup>, Nicolas Eckert<sup>b</sup>, Thierry Faug<sup>b</sup>, David Bertrand<sup>c</sup>, Isabelle Ousset<sup>b</sup>, Gabriel Candia<sup>d</sup>, Juan Carlos de la Llera<sup>e</sup>



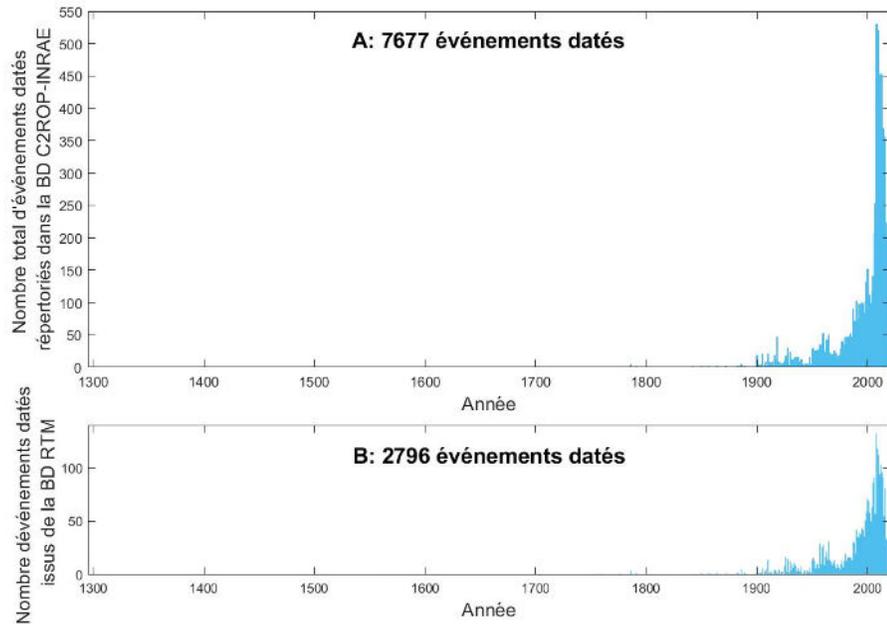
$$R = C_0 h_d + \lambda A C_0 h_d \int_{\Omega_y} V_d(y) p(y) dy + \lambda A C_1 \int_{\Omega_y} [V_d(y|h_d) V_b(y|h_d=h_{eff}) + (1 - V_d(y|h_d)) V_b(y|h_d)] p(y) dy,$$

- Optimisation des ouvrages de protection dans le contexte du risque rocheux: du potentiel
- Adaptation aux spécificités nécessaires : type d'ouvrage, prise en compte de ses effets sur l'aléa
- Développements préliminaires effectués, nécessité de passer à l'échelle des « vrais problèmes »

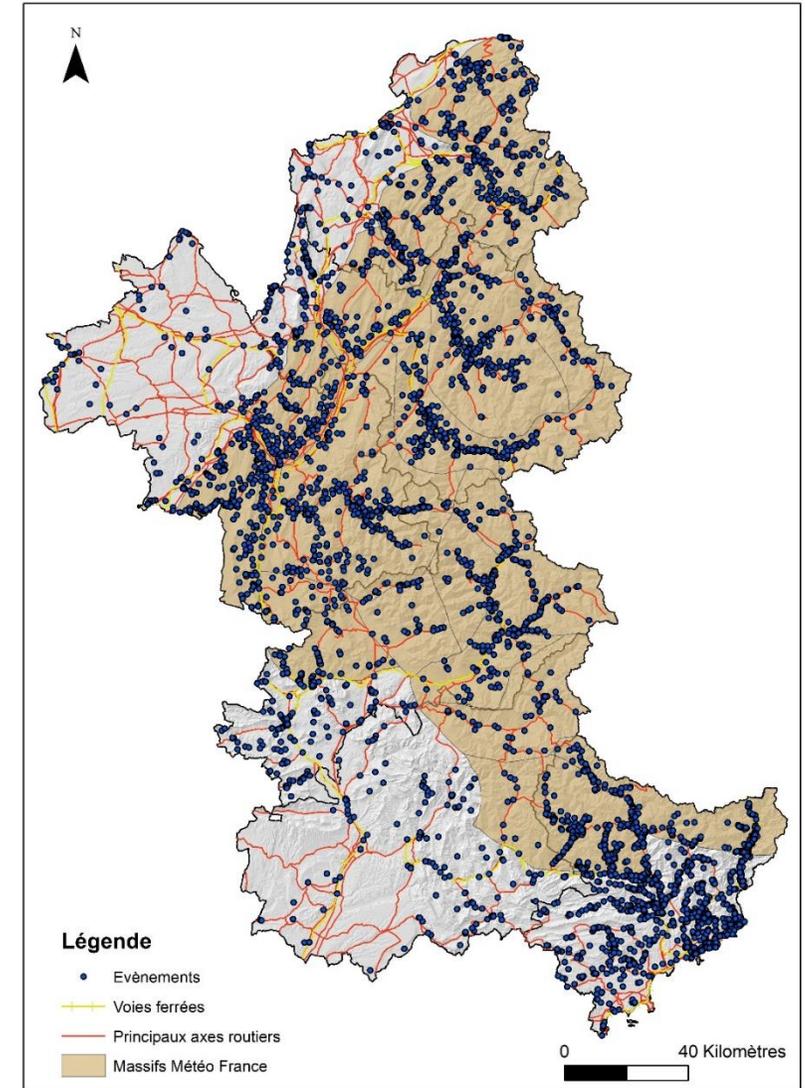


Dimensionnement optimal d'un filet pare-blocs par minimisation du risque "total" (Favier et al., 2021)

- Base de données C2ROP/INRAE
- Information capitalisée, homogénéisée (critique des sources, dédoublonnage, homogénéisation des variables, exploitation des données textuelles)
- Restitution/aux MOAs

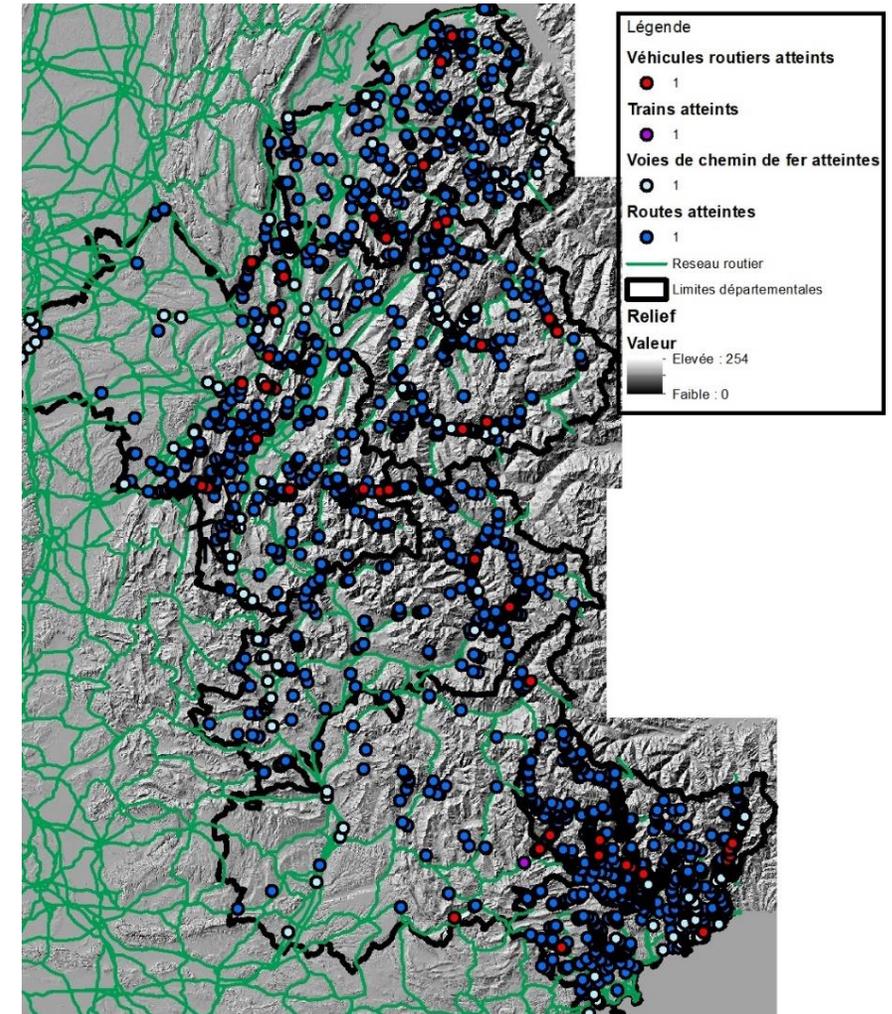


Chronologie des événements de la base C2ROP-INRAE au 01/01/2020. A) Ensemble des événements. B) Evénements issus des fonds RTM.



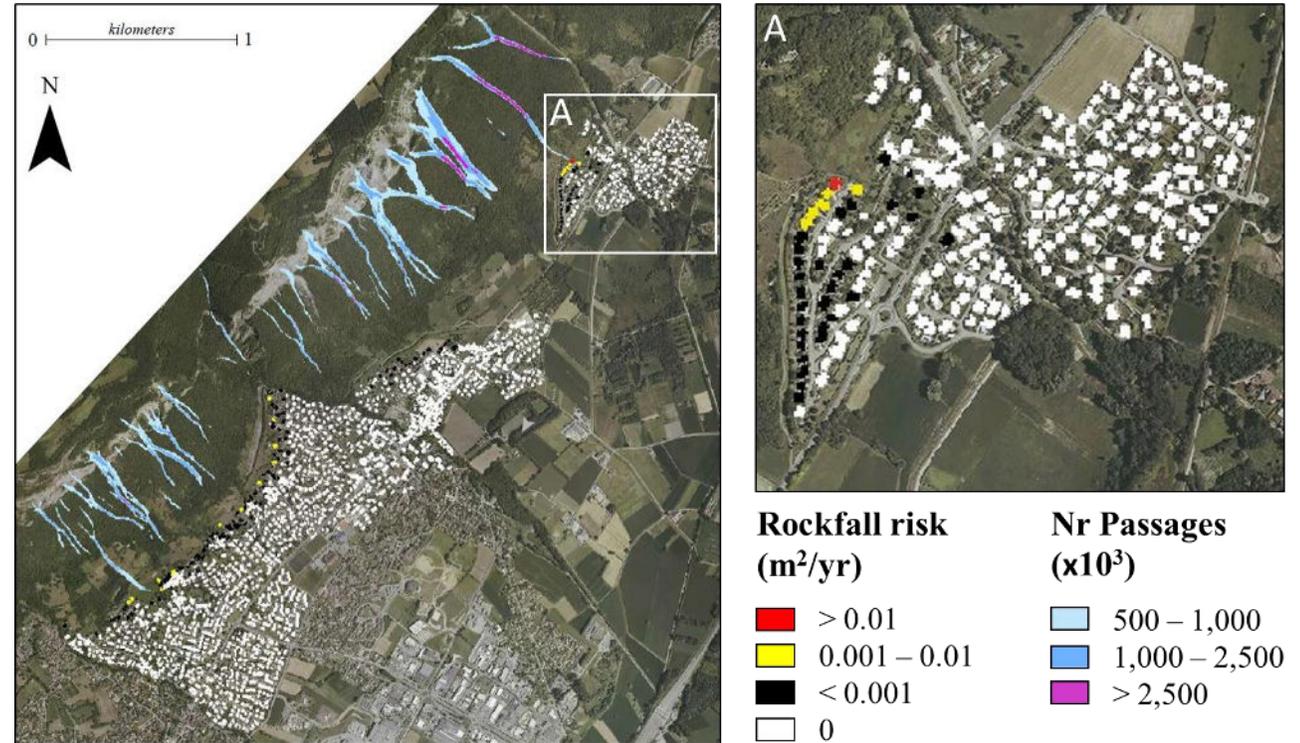
Localisation des événements de la base de la base C2ROP-INRAE.

- La suite: volonté de continuer
- Retards mais on reprend « fort »: projet Carnot SIBlocAlpes, recrutement Camille Defernand
- (Très) prochaines étapes:
  - Intégration des nouvelles données déjà fournies par MOAs (en cours)
  - Reprise de contact: complétion/extension
  - Exploitation approfondie (impacts)
  - Echanges/restitution
- On a besoin de vous !



Localisation des événements de la base de la base C2ROP-INRAE ayant atteint des voies de communications et des véhicules circulants au 30/07/2021

- Action « Modélisation quantitative risque rocheux avec prise en compte des changements socio-environnementaux » inscrite dans C2ROP2
- Existant solide: thèse Manon Farvacque / Action R3.1.2 de C2ROP1 (collaboration continuera via UNIGE partenaire de C2ROP2)
- Potentiel de développement fort, souhait de concilier « théorie et pratique », sur l'optimisation des ouvrages par minimisation mais aussi « simplement » sur le calcul de risque, éventuellement avec prise en compte de non-stationnarités/évolutions (lien avec action « climat »)
- Appel à manifestation d'intérêt: thématique(s), co-construction de projets (pour force de travail), etc.
- Besoin de participation à la poursuite de la capitalisation des données rocheuses



Risque pour le bâti existant en 2017 sur la commune de Crolles (Farvacque et al. 2020)

- Eckert, N., Mainieri, R., Bourrier, F., Giacoma, F., Corona, C., Le Bidan, V., & Lescurier, A. (2020). Une base de données événementielle du risque rocheux dans les Alpes Françaises. *Revue Française de Géotechnique*, (163), 3.
- Farvacque, M., Eckert, N., Candia, G., Bourrier, F., Corona, C., Toe, D. (In revision). Holistic rockfall risk assessment in high mountain areas affected by seismic activity: application to the Uspallata valley, Central Andes, Chile. *Risk Analysis*.
- Farvacque, M., Corona, C., Lopez-Saez, J., Mainieri, R., Stoffel, M., Bourrier, F., Eckert, N., Toe, D. (2021). Estimating rockfall release frequency from blocks deposited in protection barriers, growth disturbances in trees, and trajectory simulations. *Landslides*. DOI: 10.1007/s10346-021-01719-0
- Farvacque, M., Eckert, N., Bourrier, F., Corona, C., Lopez-Saez, J., Toe, D. (2021). Quantile-based individual risk measures for rockfall-prone areas. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 53, 101932. DOI: 10.1016/j.ijdr.2020.101932
- Farvacque, M., Eckert, N., Bourrier, F., Corona, C., Lopez-Saez, J., Toe, D. (2020). Évaluation quantitative du risque rocheux : de la formalisation à l'application sur les linéaires et les zones urbanisées. *Revue de Géotechnique Française*, 163,7. DOI: 10.1051/geotech/2020016
- Farvacque, M., Lopez-Saez, J., Corona, C., Toe, D., Bourrier, F., and Eckert, N. (2019b). Quantitative risk assessment in a rockfall-prone area: the case study of the Crolles municipality (Massif de la Chartreuse, French Alps). *Géomorphologie: relief, processus, environnement*. 25(1):7–19. DOI: 10.4000/geomorphologie.12778
- Farvacque, M., Lopez-Saez, J., Corona, C., Toe, D., Bourrier, F., and Eckert, N. (2019a). How is rockfall risk impacted by land-use and land-cover changes? Insights from the French Alps. *Global and Planetary Change*, 174:138-152. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2019.01.009