



HAL
open science

Apports de la dendrogéomorphologie pour la connaissance de l'évolution de l'aléa rocheux dans les Préalpes françaises calcaires

Robin Mainieri, Christophe Corona, Nicolas Eckert, Jérôme Lopez-Saez,
Franck Bourrier

► To cite this version:

Robin Mainieri, Christophe Corona, Nicolas Eckert, Jérôme Lopez-Saez, Franck Bourrier. Apports de la dendrogéomorphologie pour la connaissance de l'évolution de l'aléa rocheux dans les Préalpes françaises calcaires. *Revue française de Géotechnique*, 2020, 163, pp.12. 10.1051/geotech/2020014 . hal-03129962

HAL Id: hal-03129962

<https://hal.science/hal-03129962>

Submitted on 23 Aug 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Apports de la dendrogéomorphologie pour la connaissance de l'évolution de l'aléa rocheux dans les Préalpes françaises calcaires

Robin Mainieri^{1,*}, Christophe Corona², Nicolas Eckert³, Jérôme Lopez-Saez^{4,5} et Franck Bourrier³

¹ Univ. Grenoble Alpes, INRAE, UR LESSEM, 2, rue de la Papeterie, BP 76, 38400 Saint-Martin-d'Hères, France

² GEOLAB, UMR6042 CNRS/Université Clermont Auvergne, Maison des sciences de l'homme, 63057 Clermont-Ferrand cedex 2, France

³ Univ. Grenoble Alpes, INRAE, UR ETNA, 2, rue de la Papeterie, BP 76, 38400 Saint-Martin-d'Hères, France

⁴ Institute of Environmental Sciences, University of Geneva, 66, boulevard Carl Vogt, 1227 Carouge, Suisse

⁵ Dendrolab.ch, Department of Earth Sciences, University of Geneva, 13, rue des Maraîchers, 1205 Geneva, Suisse

Résumé – Depuis deux décennies, de nombreuses publications scientifiques ont mis en évidence les impacts du changement climatique sur la fréquence des chutes de pierres dans les parois englacées de haute altitude. À plus basse altitude, les inventaires rares et incomplets existants n'ont pas permis d'identifier un impact significatif de l'augmentation des températures. Dans ce travail, nous avons utilisé une approche dendrogéomorphologique, basée sur l'étude des perturbations dans les cernes de croissance des arbres, pour reconstituer l'activité passée des chutes de pierres sur deux versants forestiers des Préalpes françaises calcaires (massifs du Vercors et du Diois). Les incertitudes liées à la diminution du nombre d'arbres dans le temps ont été précisément quantifiées grâce à un inventaire forestier exhaustif et à une cartographie à haute résolution du peuplement forestier. En accord avec la littérature, la comparaison des reconstitutions dendrogéomorphologiques avec les réanalyses météorologiques SAFRAN montre que les précipitations estivales et les événements pluvieux intenses sont les principaux facteurs qui conditionnent l'activité de l'aléa sur les deux sites. En revanche, aucun impact significatif des températures ou des cycles de gel-dégel n'a pu être détecté. À l'échelle décennale (60 dernières années), nous expliquons l'augmentation apparente de l'activité des chutes de pierres depuis 1959 dans le Vercors par la recolonisation forestière rapide de la parcelle étudiée au cours des dernières décennies et par une sur-représentation des jeunes arbres, plus sensibles aux impacts. Dans le massif du Diois, l'absence de tendance dans la reconstitution dendrogéomorphologique au cours des dernières décennies suggère que le réchauffement climatique n'a pas eu d'impact sur la fréquence de l'aléa à basse altitude. Cependant, le nombre réduit de sites et la robustesse limitée des analyses statistiques développées suggèrent que ces résultats doivent être interprétés avec prudence et devront nécessairement être répliqués dans le futur afin de conclure définitivement quant à l'absence de réponse au réchauffement de l'aléa rocheux dans les zones de basse altitude des préalpes calcaires.

Mots clés : dendrogéomorphologie / aléa rocheux / facteurs météorologiques / changements climatiques et environnementaux / statistiques / Préalpes françaises calcaires

Abstract – **The potential of dendrogeomorphology to assess the evolution of rockfall activity in the calcareous massifs of the Alps.** Over the past two decades, several studies have highlighted the consequences of climate change on rockfall frequency in glaciated cliffs. At lower elevations, scarce and incomplete existing inventories have not identified a significant impact of temperature increases. In this work, we used a dendrogeomorphological approach, based on analyses of growth disturbances in tree rings, to reconstruct the past activity of rockfall on two forested slopes in the calcareous French Alps (Vercors and Diois massifs). This work proposes a clear methodological guideline to optimize sampling strategies and to precisely quantify uncertainties in dendrogeomorphic reconstructions back in time. Our results clearly evidence that the high-resolution mapping of stems combined with a careful selection of tree-species improve the robustness of our reconstructions. In agreement with the literature, the comparison of

* Auteur de correspondance : robin.mainieri@inrae.fr

dendrogeomorphological reconstructions with SAFRAN meteorological reanalyses evidence that summer precipitations and intense rainfall-events are the main drivers for rockfall activity at both sites. However, no significant impact of temperatures or freeze–thaw cycles could be detected. In order to investigate potential impacts of global warming on rockfall activity, we compare decadal fluctuations in both tree-ring records with climatic series available for the period 1959–2017. In the Vercors massif, we explain increasing rockfall activity observed since 1959 by a rapid forest recolonization and the over-representation of young sensitive trees in the tree-ring reconstruction rather than by climate change. In the Diois massif, the absence of significant trend suggests that a premature warning of increasing rockfall hazard is not supported by the existing data. Yet, the weak robustness of the multiple regression models used here, the limited increase of temperature at the study sites and the incompleteness of our tree-ring reconstructions suggest that these results have to be treated considered with caution.

Keywords: dendrogeomorphology / rockfall / meteorological triggers / climate and environmental changes / statistics / calcareous French Alps

1 Introduction

Les chutes de pierres sont un des aléas les plus fréquents dans les régions de montagne où elles sont susceptibles d’occasionner des dégâts matériels et humains importants (Hantz *et al.*, 2003 ; Gardner, 1970 ; Erismann et Abele, 2001 ; Dussauge-Peisser, 2002). Ces événements sont difficilement prédictibles en raison du caractère diffus du processus et de la multiplicité des facteurs déclenchants.

L’influence des précipitations intenses, de la fonte des neiges, des amplitudes thermiques (thermoclastie) ou des cycles de gel–dégel (cryoclastie) a été démontrée grâce à des méthodes de suivi en continu des parois (voir par exemple la synthèse proposée par D’Amato *et al.*, 2016). Néanmoins, le plus souvent, ces suivis n’excèdent pas quelques années. Des relations sans équivoque ont également été établies entre l’augmentation de l’activité des chutes de pierres, la fonte du pergélisol et le réchauffement climatique (Deline, 2009 ; Ravanel *et al.*, 2010 ; Ravanel et Deline, 2011 ; Weber *et al.*, 2019). Cependant, ces études se sont concentrées sur des événements de grande ampleur (souvent plus de 100 m³) et sur des parois de haute altitude (> 2500 m) caractérisées par la présence de permafrost. En revanche, à des altitudes inférieures, où se concentrent la majorité des enjeux potentiellement vulnérables, le poids respectif des différents facteurs météorologiques et les impacts du réchauffement climatique sur l’activité des chutes de pierres restent mal documentés. Cette lacune est liée notamment à la rareté ou au caractère récent des inventaires systématiques et à des biais souvent induits par la sur-représentation des événements catastrophiques dans les archives historiques (Ibsen et Brunsden, 1996).

Sur les versants boisés, lors de leur propagation, les blocs interagissent avec les peuplements forestiers (Dorren *et al.*, 2007). Les impacts sur les tiges endommagent le tissu cambial et perturbent la croissance radiale. En milieu tempéré, l’analyse et la datation de ces perturbations (*growth disturbances* [GD]) dans les cernes de croissance annuels des arbres permet de reconstituer la chronologie des chutes de pierres (Alestalo, 1971 ; Stahle *et al.*, 2003 ; Stoffel *et al.*, 2005b ; Stoffel et Corona, 2014). Ces reconstitutions dendrogeomorphologiques ont été utilisées pour calculer et cartographier la récurrence des chutes de pierres dans différents contextes topo-climatiques (Stoffel *et al.*, 2005a ; Trappmann *et al.*, 2014 ; Morel *et al.*, 2015 ; Mainieri *et al.*,

2019a). Pourtant, à l’exception des études de Perret *et al.* (2006), Silhán *et al.* (2011) et Zielonka et Wronska-Walach (2019), ces reconstitutions n’ont été pas été comparées aux données climatiques afin d’évaluer les impacts du réchauffement climatique, en particulier à basse et moyenne altitudes.

Sur cette base, la présente contribution propose une évaluation de l’impact du changement climatique sur l’aléa rocheux aux altitudes basses à moyennes des Préalpes françaises calcaires *via* une approche dendrogeomorphologique. Cette dernière a nécessité au préalable la mise en place de plusieurs améliorations méthodologiques permettant de quantifier les incertitudes liées à l’approche employée. Ainsi, l’évolution de la capacité d’interception des peuplements forestiers (Stoffel *et al.*, 2005a ; Trappmann et Stoffel, 2015) a été précisément quantifiée sur la base d’une cartographie systématique des tiges présentes sur deux versants archétypaux des Préalpes françaises calcaires et intégrée aux reconstitutions dendrogeomorphologiques. Ensuite, afin d’identifier les facteurs déclenchants de l’aléa, les reconstitutions dendrogeomorphologiques obtenues grâce aux améliorations méthodologiques mises en place ont été comparées avec les séries météorologiques décennales extraites des réanalyses SAFRAN (Durand *et al.*, 2009a, 2009b). Enfin, plusieurs régressions linéaires multiples calculées entre les fluctuations décennales de l’activité des chutes de pierres et du climat ont été utilisées pour discuter des impacts du réchauffement climatique. Ces recherches ont été pleinement menées dans le cadre de la thèse de doctorat de Robin Mainieri (2020), dont cette contribution propose une vue d’ensemble des méthodologies, résultats, et conclusions.

2 Sites d’étude

Les sites d’étude sont situés dans les Préalpes françaises, dans les massifs du Vercors (Saint-Guillaume) et du Diois (Valdrôme) (Fig. 1a). Ils sont distants de 60 km (Fig. 1b).

À Saint-Guillaume, la parcelle étudiée est localisée sur le versant nord de la montagne de la Pâle, en aval du Rocher du Bouchet (4456’18”N, 535’11”E, 1350–1490 m asl, Fig. 1c). Sur ce site, la paroi (1450–1540 m d’altitude), orientée vers le nord-est, est composée de calcaire jurassique (Tithonique) à lits décimétriques subhorizontaux. Cette lithologie limite le débit des chutes de pierres à des volumes compris entre quelques décimètres cubes et quelques mètres cubes. Dans la zone de propagation (1380–1490 m d’altitude), un talus

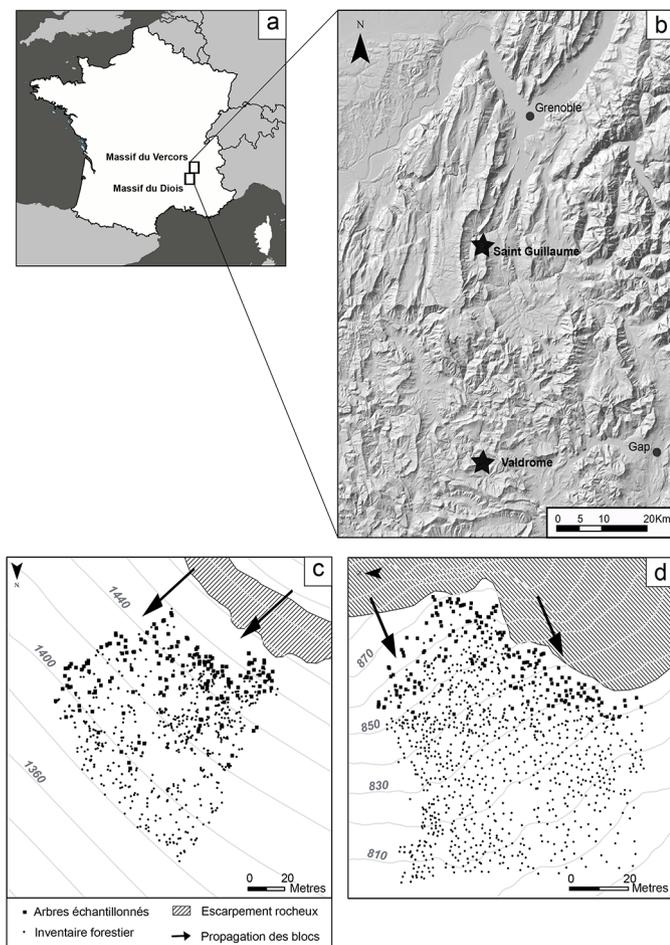


Fig. 1. Localisation des sites d'étude dans les Alpes françaises calcaires (a, b). Le versant du Rocher du Bouchet (c) est situé dans le massif du Vercors, sur la commune de Saint-Guillaume (Isère). La parcelle de Valdrôme (Drôme) est située dans le massif du Diois, à 60 km au sud de Grenoble et à 30 km à l'ouest de Gap (d). Sur les deux sites, les arbres ayant un diamètre à hauteur de poitrine (DBH) > 4 cm ont été répertoriés de manière exhaustive et cartographiés à une résolution de < 1 m.

Fig. 1. Location of the study sites in the calcareous French Alps (a, b). The Rocher du Bouchet (c) studied slope is located in the Vercors massif, in the Saint-Guillaume municipality. The Valdrôme plot is located in the Diois massif, 60 km south of Grenoble and 30 km west of Gap (d). On the studied plots, tree stems with DBH > 4 cm have been exhaustively listed and mapped at 1 m resolution.

d'éboulis d'âge quaternaire est partiellement colonisé par un peuplement forestier mixte. Il est caractérisé par un granoclassement longitudinal des volumes n'excédant pas quelques décimètres cubes à l'apex et dépassant fréquemment le mètre cube dans la partie apicale. La pente du versant varie entre 26 et 46 (moyenne : 38) et le profil convexo-concave est caractérisé par la présence d'un replat topographique (10) dans la partie distale (1100 m d'altitude). La parcelle étudiée a une superficie d'environ 1 ha (110 × 90 m). Elle est occupée par un peuplement forestier mixte dense (800 arbres ha⁻¹) composé principalement de *Abies alba* (sapin blanc), *Picea abies* (épicéa commun), *Acer pseudoplatanus* (érable sycomore), *Fagus sylvatica* (hêtre commun), *Fraxinus excelsior* (frêne

élevé), *Sorbus aria* (alisier blanc), *Sorbus aucuparia* (sorbier des oiseleurs) et *Ulmus glabra* (Orme de montagne). Aucune trace d'exploitation forestière récente (souches) n'a été observée sur le site. Les chutes de pierres sont le processus géomorphologique dominant à l'origine de la majorité des cicatrices observées sur les tiges. D'autres processus ne peuvent pas être totalement exclus, en particulier dans la partie sommitale de la parcelle, où des avalanches de neige d'ampleur limitée sont susceptibles de se produire. Les archives municipales ne contiennent aucune donnée sur les événements géomorphologiques passés.

À Valdrôme, la parcelle étudiée est située sur le versant occidental de la montagne des Arcs (4432'90 N, 533'76 E, 790–880 m asl, Fig. 1a). Sur ce site, la falaise est constituée de calcaires marneux jurassiques (Tithonique) caractérisés par une stratification subhorizontale et un diaclasage subvertical dense. Cette lithologie limite le volume des pierres détachées (quelques centimètres cubes à quelques décimètres cubes). La présence de cicatrices récentes au niveau de la paroi et les blocs frais observés sur le versant témoignent de l'activité contemporaine des chutes de pierres. Le versant, dont la pente est comprise entre 35 à 45 degrés (40 degrés en moyenne), est traversé par la route qui mène au village de Valdrôme à une altitude de 730 m. En contrebas (720 m d'altitude), ce dernier est limité par le lit de la Drôme. La parcelle étudiée (1,3 ha, 110 × 115 m, Fig. 1d) est occupée par un peuplement forestier monospécifique (1800 arbres.ha⁻¹) composé de *Pinus nigra* (pin noir d'Autriche). Les arbres ont été plantés par le service de restauration des terrains en montagne (RTM) afin de protéger la route des chutes de pierres. Sur la parcelle étudiée, 1479 arbres ont été cartographiés avec une grande précision (résolution < 1 m). Bien qu'aucun événement n'ait été recensé dans les archives historiques, les observations de terrain (cicatrices sur les tiges, présence de blocs déposés dont la surface n'a pas été altérée par les intempéries et qui sont dépourvus de mousse ou de lichen) confirment que les chutes de pierres sont le processus géomorphologique dominant sur ce versant.

3 Matériels et méthodes

3.1 Inventaire forestier

Sur les deux parcelles, tous les arbres dont le diamètre à hauteur de poitrine (DBH) excédait 4 cm ont été cartographiés. La position de chaque arbre a été déterminée (±100 cm) au moyen d'un théodolite mesurant l'azimut (boussole), la distance (Vertex) et la pente (inclinomètre). Ces derniers ont été positionnés dans un système d'information géographique (SIG) en tant que géo-objets. Pour chaque tige, l'espèce, le diamètre, le nombre et la position des blessures visibles résultant de la collision avec une pierre ont été relevés (voir pour plus de détails Mainieri *et al.*, 2019b). Les cartes obtenues ont été utilisées afin d'optimiser nos stratégies d'échantillonnage (voir ci-dessous).

3.2 L'approche dendrogéomorphologique

À l'heure actuelle, les approches paléo-environnementales à haute résolution spatiotemporelle permettant de reconstruire l'évolution d'un aléa sur plusieurs siècles sont rares.

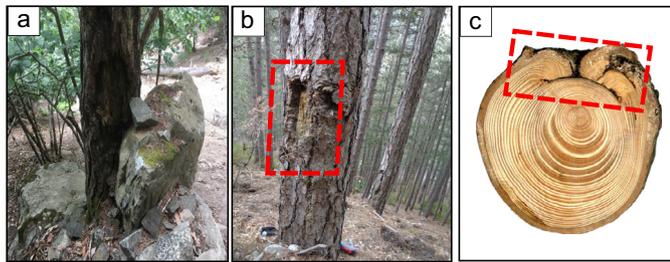


Fig. 2. L'impact mécanique d'une pierre ou d'un bloc contre un arbre (a) va endommager son cambium et créer une blessure (b). En cicatrisant, l'arbre va peu à peu refermer cette blessure qui reste tout de même visible dans les cernes de croissances de l'arbre (c).

Fig. 2. *The mechanical impact of the block on stem (a) damages its cambium and causes an injury (b). The tree will gradually close this wound, which is still visible in the growth rings (c).*

L'approche dendrogéomorphologique, basée sur l'utilisation des arbres en tant que témoins silencieux des événements naturels passés, offre cette opportunité (Lopez-Saez, 2011 ; Corona *et al.*, 2012). Cette dernière est fondée sur l'étude des perturbations de croissance dans les cernes d'arbres. Cette discipline permet donc de dater un événement avec une résolution chronologique annuelle à saisonnière (Stoffel *et al.*, 2006 ; Lopez-Saez, 2011), de reconstituer les changements environnementaux, mais également de spatialiser les processus géomorphologiques (Astrade *et al.*, 2012). La reconstruction des chutes de blocs par le biais d'une approche dendrogéomorphologique est complexe, en raison, notamment, du caractère sporadique du processus. Les cicatrices, liées à la destruction locale puis à la régénération du tissu cambial suite à des impacts de blocs, sont les principales perturbations observées (Fig. 2). Bien que certaines études aient débuté dès les années 1990 avec les travaux de Gsteiger (1989, 1993) et Schweingruber (1996), ce n'est qu'à partir des investigations de Stoffel (2005) que les études vont porter sur la fréquence, la magnitude, la répartition spatiale et la saisonnalité des chutes de pierres dans la vallée de Zermatt (Alpes suisses). Ces études pionnières ont permis de démontrer que 70 % des blessures engendrées par les chutes de pierres restaient visibles sur la tige, même si l'impact avait eu lieu plusieurs décennies auparavant. Stoffel et Perret (2006) ont démontré que les cicatrices restaient visibles plus longtemps chez les espèces avec une écorce fine que sur les essences avec une écorce épaisse. Plusieurs études ont tenté de quantifier la robustesse des reconstitutions dendrogéomorphologiques notamment en se basant sur des seuils déterminés de manières empiriques tels (1) qu'un nombre minimal d'arbres échantillonnés (Perret *et al.*, 2006 ; Schneuwly et Stoffel, 2008a, 2008b ; Silhán *et al.*, 2013), (2) répartis de manière homogène sur le versant (Stoffel, 2005), (3) un diamètre exposé minimal (Silhán *et al.*, 2011) ou un changement abrupt de la fréquence annuelle des chutes de blocs (Moya *et al.*, 2010).

3.3 Reconstitution de l'activité des chutes de pierres

Le concept de CIP (*Conditionnal Impact Probability*) a été développé par Moya *et al.* (2010), puis précisé par Trappmann

et al. (2013) et Favillier *et al.* (2017). Il est utilisé pour estimer la probabilité d'interception d'une trajectoire de chutes de blocs par un peuplement forestier. Lorsque le CIP est proche de 0, le peuplement forestier n'intercepte qu'un nombre limité de trajectoires. Lorsqu'il vaut 1, toutes les chutes de blocs sont potentiellement interceptées par les tiges. À cet effet, il intègre le diamètre et la position des arbres sur le versant mais également le diamètre moyen des blocs. Sur la base de modèles de régression linéaire âge-diamètre établis pour chaque espèce (voir pour plus de détails Mainieri *et al.*, 2019a), nous avons estimé l'âge des arbres cartographiés sur chaque parcelle puis quantifié l'évolution annuelle du CIP. Cette valeur a ensuite été utilisée pour corriger les reconstitutions dendrogéomorphologiques. Le nombre de chutes de pierres ajusté (RR) pour l'année t est ainsi calculé comme :

$$RR_t = NGD_t / CIP_t, \quad (1)$$

où NGD représente le nombre de perturbations de croissance et CIP la capacité d'interception du peuplement forestier. En outre, sur la base de notre inventaire systématique, nous avons également utilisé le CIP pour optimiser la stratégie d'échantillonnage. Ainsi, sur chaque trajectoire potentielle, un seul arbre, situé le plus en amont, a été échantillonné. Les tiges localisées, en aval, sur la même trajectoire, ont été systématiquement exclues et n'ont pas fait l'objet de prélèvements.

Sur les arbres sélectionnés, les prélèvements ont été réalisés au moyen d'une tarière de Pressler (max. 40 × 0,5 cm). Chaque cicatrice visible, identifiable par la présence de tissu calleux, a été échantillonnée (Sachs, 1991 ; Larson, 1994). Afin d'optimiser la détection de blessures entièrement cicatrisées qui ne sont plus visibles à la surface des tiges, trois prélèvements additionnels ont été réalisés, dans le sens de la pente. Compte tenu de la distribution verticale des cicatrices sur les tiges montrant que les hauteurs d'impacts excèdent très rarement 2 m, ces derniers ont été positionnés à des hauteurs de 0,5, 1,0 et 1,5 m pour chaque arbre.

Sur chaque carotte prélevée, les cicatrices et les canaux résinifères traumatiques ont été systématiquement datés. En revanche, les réductions de croissance, pouvant résulter d'une décapitation suite à un impact, ont été systématiquement exclues des reconstitutions. En effet, Favillier *et al.* (2017) et Mainieri *et al.* (en préparation) ont démontré que ces perturbations pouvaient fréquemment résulter de facteurs exogènes (climat, épidémies de pathogènes) et étaient susceptibles de brouiller considérablement le signal géomorphologique.

3.4 Données météorologiques

Pour chaque site d'étude, les covariables météorologiques ont été extraites des réanalyses SAFRAN. Ces dernières combinent des observations météorologiques *in situ*, synoptiques et des profils verticaux provenant d'un modèle météorologique (Durand *et al.*, 2009b). La principale caractéristique de SAFRAN est son traitement par massifs selon une dimension altitudinale, pour plusieurs orientations. Dans le Vercors, les données ont été extraites, pour la période 1959–2017, dans la tranche d'altitude 1500–1800 m en

exposition nord; dans le Diois, dans la tranche d'altitude 300–600 m, en exposition ouest. [Delonca et al. \(2014\)](#) et [D'Amato et al. \(2016\)](#) ont synthétisé les variables météorologiques susceptibles d'influencer l'activité des chutes de pierres dans les régions calcaires. La durée et l'intensité des précipitations, qui augmentent la pression interstitielle, ainsi que les cycles gel–dégel sont parmi les facteurs déclenchants les plus fréquemment cités. Par conséquent, le cumul de précipitations, le nombre d'évènements pluvieux supérieurs à 10 et 20 mm.jour⁻¹, les températures moyennes et le nombre de cycles gel–dégel (défini comme le nombre de jours où $T_{\max} > 0^{\circ}\text{C}$ et $T_{\min} < 0^{\circ}\text{C}$) ont été extraites de la réanalyse SAFRAN.

3.5 Identification des principaux facteurs déclenchants

Dans la littérature, les reconstitutions dendrogéomorphologiques, de résolution annuelle, ont traditionnellement été comparées avec des données météorologiques de résolution mensuelle à saisonnière. Afin de mieux circonscrire les paramètres météorologiques déclenchants, nous avons développé une procédure en quatre étapes qui comprend successivement :

- le calcul des coefficients de corrélation de Pearson entre l'activité des chutes de pierres et les covariables météorologiques sélectionnées, pour des périodes allant de 1 à 36 décades consécutives ;
- l'extraction des covariables les plus fortement corrélées aux reconstitutions ;
- l'inclusion de ces covariables dans des modèles de régression multiple pas à pas (*stepwise*) permettant d'identifier celles qui expliquent la variabilité interannuelle des chutes de pierres. La performance des modèles a été évaluée, sur chacun des sites, à l'aide de plusieurs indicateurs tels que les critères d'information d'Akaike (AIC) et le coefficient de détermination R^2 ajusté ;
- enfin, en utilisant un écart par rapport à la valeur moyenne (*z-score*), trois classes caractérisées par des chutes de pierres modérées ($z\text{-score} < -1$), moyennes ($1 > z\text{-score} > -1$) et fortes ($z\text{-score} > 1$) ont été distinguées.

La moyenne et la variance de chaque covariable incluses dans les régressions multiples ont été calculées pour chacun des groupes puis comparées au moyen d'une ANOVA unidirectionnelle et de la distribution F de Fisher-Snedecor (voir [Mainieri et al., 2020](#) pour plus de détails).

Dans un second temps, et afin d'étudier l'impact potentiel des fluctuations climatiques sur l'activité des chutes de pierres, les reconstitutions dendrogéomorphologiques et les variables météorologiques ont été lissées en utilisant une moyenne mobile sur 15 ans. Des modèles de régression simple et multiple ont été testés en utilisant les reconstitutions lissées comme variables prédites, ainsi que les séries climatiques lissées, les années et la profondeur d'échantillonnage (nombre d'arbre vivant à l'année t) comme combinaisons de variables explicatives. Tous les modèles retenus sont significatifs à $p < 0,0001$ ([Mainieri, 2020](#)).

4 Résultats

4.1 Reconstitutions de l'activité des chutes de pierres à partir des cernes de croissance

À Saint-Guillaume, 477 et 446 perturbations de croissance (GD) ont été datées sur les 179 arbres échantillonnés pour les périodes 1906–2017 et 1959–2017. Le coefficient d'interception a augmenté de 18 % en 1907 à 89 % en 2017 (41 % à 89 % pour la période 1959–2017). Après correction, l'activité maximale des chutes de pierres a été reconstruite en 1999, 2002, 2008, 2010, 2012 et 2013. La fréquence corrigée (RR) augmente de 5,5 à 14,5 impacts par an pour les périodes 1959–1988 et 1989–2017 ([Fig. 3a](#)). Le test Mann-Kendall calculé sur des fenêtres temporelles glissantes d'une durée minimale de 30 ans montre, à l'exception des périodes postérieures à 1987, une augmentation linéaire significative du nombre de chutes de pierres pour la majorité des fenêtres considérées ([Fig. 3c](#)).

À Valdrôme, les échantillons prélevés ont permis d'identifier 162 et 136 perturbations de croissance dans les séries de cernes au cours des périodes 1890–2017 et 1959–2017. Le coefficient d'interception du peuplement forestier dépasse le seuil de 0,5 en 1924 (0,52). Pour la période 1958–2017 couverte par les réanalyses météorologiques, ce dernier, très élevé, n'augmente que modérément (de 0,85 à 0,88). Après corrections, les fréquences annuelles maximales d'impacts sont reconstituées en 1960, 1977, 1981, 1984, 1995 et 2002. À l'inverse, aucune blessure n'a pu être retrouvée en 1958–1959, 1967, 1971, 1988, 2001, 2003 et 2005. Le nombre moyen d'impacts observé entre 1959 et 1988 (2,4 impact.an⁻¹) est comparable à la période 1989–2017 (2,8 impact.an⁻¹). Les décennies 1960–1969 (1,4 impact.an⁻¹) et 2000–2009 (1,6 impact.an⁻¹) sont caractérisées par des fréquences d'impacts plus faibles ([Fig. 3b](#)). L'analyse de Mann-Kendall montre qu'aucune tendance linéaire significative n'est détectée ($p < 0,01$) dans la reconstitution quelle que soit la fenêtre temporelle considérée ([Fig. 3d](#)).

4.2 Les facteurs météorologiques déclenchants des chutes de pierres

La procédure en quatre étapes décrite précédemment met en évidence que les cumuls de précipitations et les évènements pluvieux de forte intensité sont les principaux facteurs météorologiques qui conditionnent la fréquence des chute de pierres à Saint-Guillaume et à Valdrôme ([Fig. 4](#)). En revanche, les analyses statistiques n'ont pas permis de mettre en évidence un impact des cycles de gel–dégel et des variations de température sur les fluctuations interannuelles du processus. En détail, à Valdrôme, les corrélations entre la reconstitution et les variables météorologiques, calculées sur des périodes de 10 à 360 jours consécutifs, pour la période 1958–2017, montrent que les précipitations estivales et le nombre annuel d'évènements pluvieux > 10 mm sont les covariables météorologiques qui conditionnent le plus fortement la dynamique des chutes de pierres ([Fig. 4a](#)). La [figure 5](#) montre la distribution des variables météorologiques incluses dans le modèle de

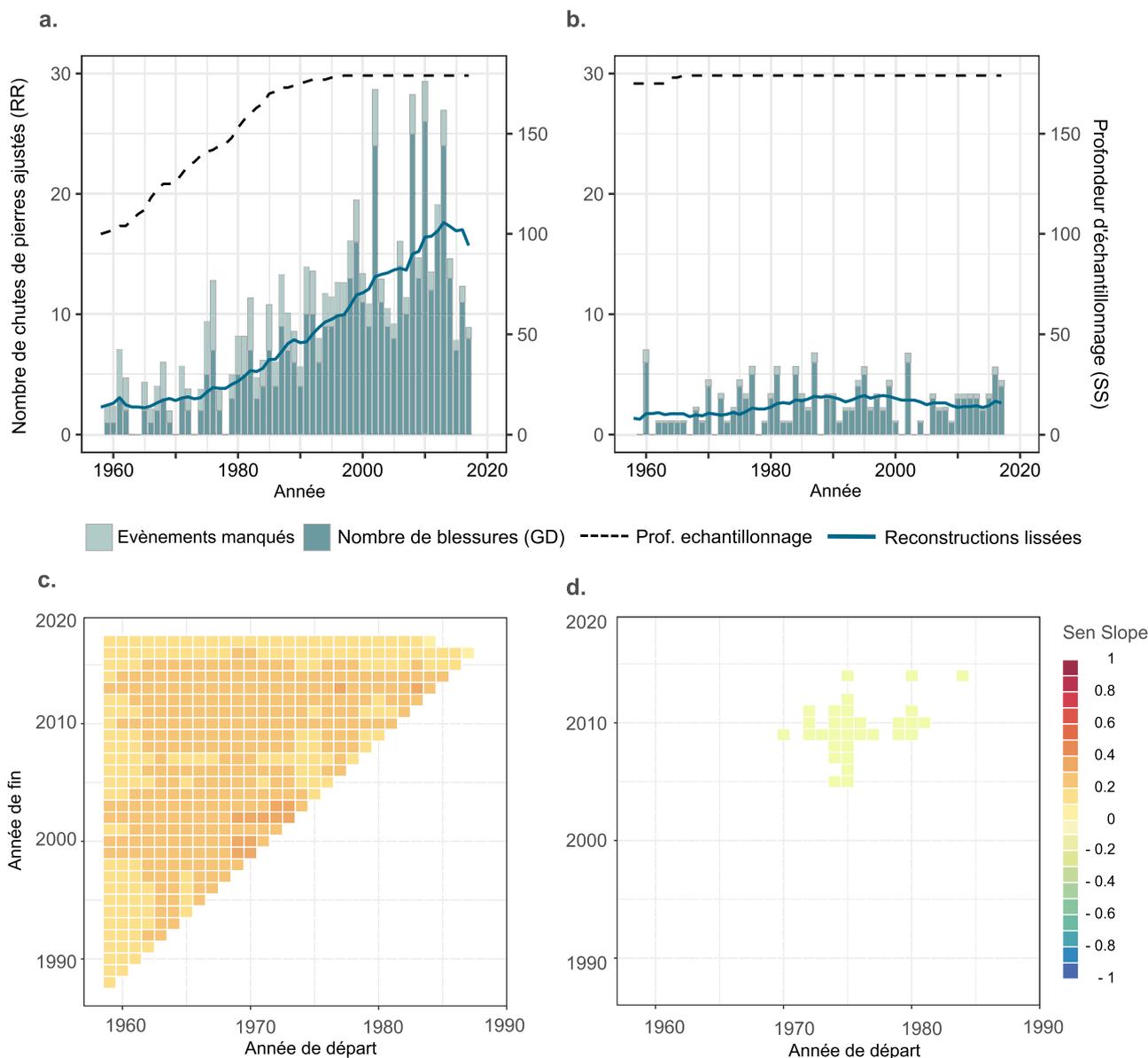


Fig. 3. Fluctuations de l'activité des chutes de pierres reconstituées à partir des analyses des cernes de croissance à Saint-Guillaume (a) et à Valdrôme (b) et tendances linéaires (pente de Theil-Sen) détectées dans les deux reconstitutions (c : Saint-Guillaume; d : Valdrôme). La significativité de la tendance ($p < 0,05$) a été testée à l'aide du test de Mann-Kendall (MK). Pour chaque reconstitution, le test MK a été calculé sur la période 1959–2017 couverte par les séries météorologiques, pour des fenêtres temporelles mobiles d'une durée variant de 30 à 59 ans. Ces fenêtres débutent entre 1959 et 1988 (axe des abscisses) et se terminent entre 1988 et 2017 (axe des ordonnées).

Fig. 3. Fluctuations of rockfall activity reconstructed from tree-ring analyses at Saint-Guillaume (a) and Valdrôme (b) sites and linear monotonic trends detected in both reconstructions (c: Saint-Guillaume; d: Valdrôme). The significance of the trend ($P < 0.05$) has been tested using the Mann-Kendall test. For each reconstruction, the MK test was computed over the 1959–2017 period covered by meteorological series, for moving time windows with length varying from 30 to 59 years. Starting years (x-axis) range between 1959 and 1988, ending years (y-axis) between 1988 and 2017.

régression multiple en fonction des trois classes d'années identifiées. L'analyse de la variance (ANOVA) montre des différences significatives ($p < 0,05$) entre les classes pour les précipitations journalières estivales (calculées sur 60 jours centrés autour du 21–30 août) et le nombre de jours annuel caractérisé par des précipitations > 10 mm.

À Saint-Guillaume, sur la période 1989–2017, caractérisée par l'absence de tendance dans la reconstitution, les précipitations estivales expliquent près de 50 % des fluctuations interannuelles de l'activité reconstituée (Fig. 4b). En revanche, aucune relation n'a été trouvée entre nos reconstitutions et les cycles de gel-dégel.

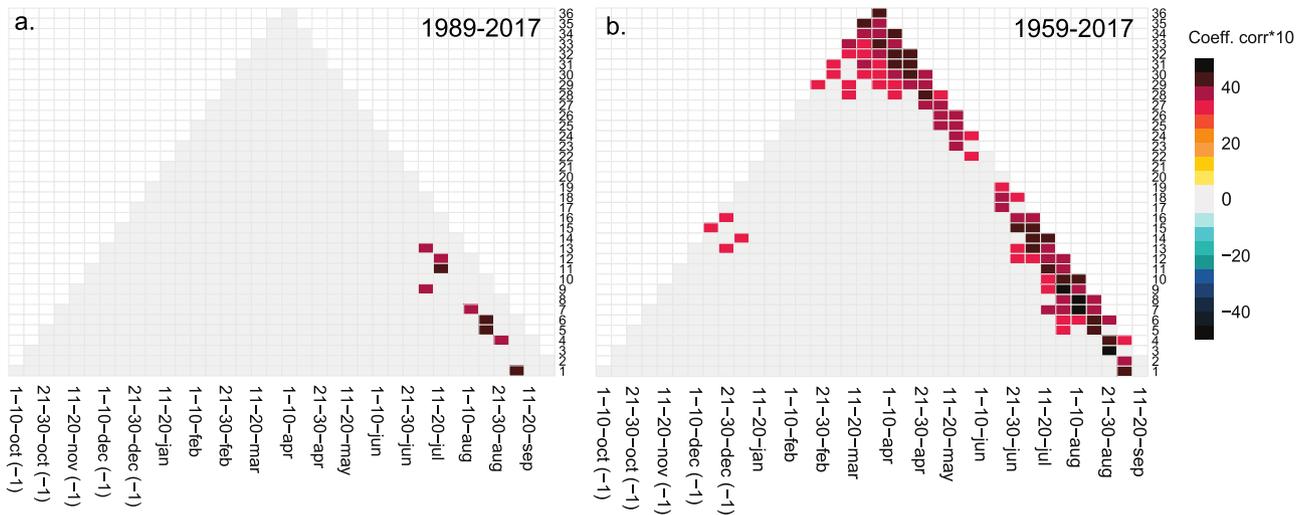


Fig. 4. Corrélations entre les reconstructions dendrogéomorphologiques (Saint-Guillaume (a) et Valdrôme (b)) et le cumul des précipitations calculées pour des périodes allant de 1 à 36 décades consécutives. Pour le site de Saint-Guillaume, la reconstitution dendrogéomorphologique est considérée comme robuste à partir de 1989 (CIP>0,5). Pour le site de Valdrôme, le peuplement forestier, plus homogène (en termes d'âge et d'espèce), permet d'obtenir une reconstitution robuste à partir de 1959.

Fig. 4. Correlations between reconstructions derived from tree-rings (Saint-Guillaume (a) and Valdrôme (b)) and rainfall computed over 1 to 36 consecutive 10-day periods extending from 1st–10th October (n–1) to 21st–30th September (n). For the Saint-Guillaume site, the dendrogeomorphic reconstitution is reliable since 1989 (CIP>0.5). For the Valdrôme site, the forest stand is more homogeneous (in terms of age and species), allowing a reliable reconstitution to be obtained since 1959.

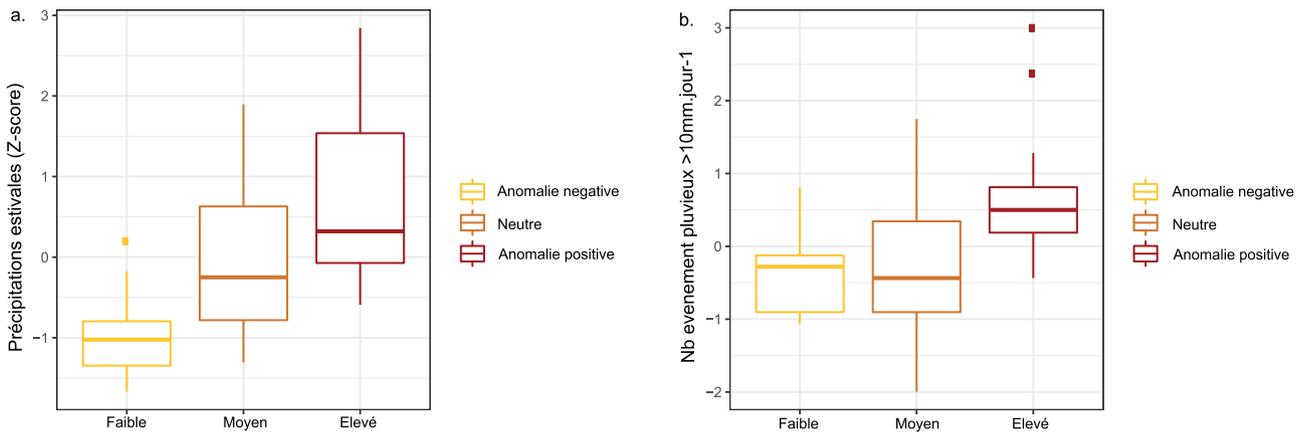


Fig. 5. Distribution des précipitations estivales (a) et du nombre annuel d'évènements pluvieux > 10 mm (b) pour les années caractérisées par des activités faibles (z -score < -1), moyennes ($1 > z$ -score > -1) et élevées (z -score > 1) des chutes de pierres.

Fig. 5. Boxplot of summer rainfall (a) and annual number of rainfall events > 10 mm (b) for years with low (z -score < -1), medium ($1 > z$ -score > -1) and high (z -score > 1) rockfall activity.

4.3 Corrélation entre l'activité des chutes de pierres et les variables climatiques

Les corrélations entre les séries lissées sont présentées dans la [tableau 1](#). Les coefficients de corrélation positifs et très significatifs calculés entre les reconstitutions issues des cernes de croissance lissées et la variable « années » confirment que l'activité de l'aléa a nettement augmenté dans le temps sur les deux sites. Les températures moyennes ($r=0,64$), les précipitations annuelles ($r=0,49$) et, dans une moindre mesure, le nombre annuel de cycles de gel-dégel ($-0,37$) sont corrélés de manière significative ($p < 0,05$) avec la

reconstitution lissée de Saint-Guillaume. Le nombre annuel de jours caractérisés par des précipitations intenses ($p < 10$ mm. jour⁻¹) n'est pas significativement corrélé à l'activité des chutes de pierres ($r=0,03$). À Valdrôme, la matrice de corrélation diffère de celle de Saint-Guillaume. En effet, à l'échelle décennale, le nombre annuel de cycles de gel-dégel ($r=0,82$), les précipitations annuelles ($r=0,61$) et les pluies intenses ($r=0,61$) sont les principaux facteurs de l'activité des chutes de pierres. L'impact de la température moyenne est, quant à lui, minimisé ($r=-0,32$; $p < 0,05$) par rapport au site de Saint-Guillaume.

Tableau 1. Matrices de corrélation calculées pour les deux reconstitutions des chutes de pierres (RR et RR-std, standardisée afin d'éliminer la tendance liée à l'augmentation du nombre d'arbres au cours des dernières décennies), les paramètres météorologiques (PR : cumul annuel des précipitations ; PR10 : nombre annuel de précipitations >10 mm ; Tmoy : température annuelle moyenne ; FT cycles : nombre annuel de cycles de gel-dégel), et des variables additionnelles (année, SS : évolution du nombre d'arbres échantillonnés au cours de la période 1959–2017). Les séries de chutes de pierres et les covariables météorologiques ont été lissées en utilisant une moyenne mobile sur 15 ans, les années et le nombre d'arbres échantillonnés ont été conservés avec une résolution annuelle. Les valeurs en gras diffèrent de 0 avec un niveau de significativité $p < 0,05$.

Table 1. Correlation matrices computed for the (detrended) rockfall reconstruction (RR-std, RR), meteorological parameters (PR: annual rainfall total; PR10: annual number of rainfall events >10 mm; Tmean: mean annual temperature; FT cycles: annual number of freeze-thaw cycles), and additional variables (year, SS: sample size). Rockfall and meteorological series have been smoothed using a 15-year moving average, years and sample size have been retained with an annual resolution. Embolded values are non-zero at a $P < 0.05$ significance level.

	RR	RR-std	PR	PR10	Tmoy	FT cycles	Années	SS
<i>Saint-Guillaume</i>								
RR	1,00	1,00	0,49	0,03	0,64	-0,37	0,96	0,90
RR-std		1,00	0,46	0,00	0,65	-0,40	0,95	0,88
PR			1,00	0,85	0,04	0,30	0,38	0,61
PR10				1,00	-0,21	0,42	-0,08	0,19
Tmoy					1,00	-0,84	0,65	0,44
FT cycles						1,00	-0,33	-0,04
Années							1,00	0,91
SS								1,00
<i>Valdrôme</i>								
RR	1,00	1,00	0,61	0,61	-0,32	0,82	0,69	0,70
RR-std		1,00	0,60	0,60	-0,32	0,82	0,69	0,70
PR			1,00	0,92	-0,14	0,76	0,85	0,57
PR10				1,00	-0,38	0,78	0,64	0,61
Tmoy					1,00	-0,62	0,11	-0,69
FT cycles						1,00	0,70	0,89
Années							1,00	0,52
SS								1,00

À Saint-Guillaume, sur la base du critère AIC et de la sélection pas à pas, les modèles de régression multiple (non présentés ici) les plus robustes incluent les précipitations annuelles, les années, les températures et les cycles de gel-dégel. À Valdrôme, aucun des modèles proposés est totalement satisfaisant. D'un point de vue physique, les modèles incluant les cumuls de précipitations annuels et les températures moyennes semblent pourtant les plus convaincants ($R^2 = 0,42$).

5 Discussion et conclusion

5.1 Impacts des conditions météorologiques et du changement climatique sur l'activité des chutes de pierres dans les zones non englacées

L'approche dendrogéomorphologique nous a permis de reconstituer l'évolution des chutes de pierres sur les versants de Saint-Guillaume et de Valdrôme au cours des dernières décennies. L'analyse de tendances réalisées au moyen du test de Mann-Kendall et de la pente de Sen démontrent que la fréquence des chutes de pierres est quasi stationnaire au cours de la période couverte par les données SAFRAN à Valdrôme et, depuis 1989, à Saint-Guillaume. Pour ces périodes, les corrélations entre les reconstitutions et les covariables météorologiques mettent en évidence le rôle des précipitations estivales et de forte intensité sur l'activité des chutes de pierres.

Nos résultats coïncident avec ceux obtenus par [D'Amato et al. \(2016\)](#) à partir des données Lidar sur la paroi calcaire du Saint-Eynard (Massif de la Chartreuse, située respectivement à 40 et 90 km au nord de Saint-Guillaume et de Valdrôme). Les auteurs rapportent ainsi que l'activité des chutes de pierres est en moyenne multipliée par un facteur de 26 lorsque l'intensité moyenne des précipitations dépasse 5 mm.h^{-1} . Ils attribuent cette activité accrue à l'augmentation de la pression interstitielle dans les microfissures et au rôle de lubrifiant joué par la précipitation ([Matsuoka, 2019](#)). Nos résultats ne nous ont, en revanche, pas permis de mettre en évidence l'impact de la cryoclastie malgré son rôle avéré dans la littérature ([Matsuoka et Sakai, 1999](#); [Frayssines et Hantz, 2006](#); [D'Amato et al., 2016](#); [Matsuoka, 2019](#)). Ainsi, les impacts de la gélifraction mis en évidence en laboratoire ([Lautridou et al., 1985](#); [Rovéra, 1990](#)) et par les observations de terrain ([Francou, 1987](#)), dont les impacts en milieu calcaire sont étroitement conditionnés par l'humectation du substrat, n'ont pas pu être mis en évidence dans nos travaux. De manière plus détaillée, nos modèles de régression multiple – conçu pour limiter les variables redondantes – suggèrent que la fréquence des chutes de pierres sur les deux sites augmente avec des précipitations estivales supérieures à la moyenne ainsi qu'un nombre annuel d'évènements pluvieux de forte intensité ($> 10 \text{ mm.jour}^{-1}$) également supérieur à la moyenne. Malgré la rigueur de la procédure mise en oeuvre afin d'améliorer la détection des chutes de pierres dans les cernes de croissance,

ces modèles expliquent au mieux 50 % la variabilité interannuelle des chutes de pierres, ce qui reste comparable à la littérature (Perret *et al.*, 2006 ; Silhán *et al.*, 2011 ; Zielonka et Wronska-Walach, 2019). Nous expliquons cette limite par la multiplicité des facteurs susceptibles de déclencher des chutes de pierres (contexte géologique par exemple). En ce sens, et afin de valider à la fois la robustesse de nos reconstitutions ainsi que les facteurs déclenchants identifiés ici, nous souhaiterions un couplage plus systématique des analyses dendrogéomorphologiques avec des suivis géodynamiques et microclimatiques dans le futur.

En ce qui concerne les fluctuations (pluri)décennales, un grand nombre d'études (Deline, 2009 ; Ravanel et Deline, 2011 ; Ravanel *et al.*, 2013 ; Weber *et al.*, 2019) ont démontré un lien entre le réchauffement climatique, la fonte du permafrost et l'augmentation de l'activité des chutes de pierres dans les parois alpines englacées. En revanche, à plus basse altitude, le caractère rare et lacunaire des inventaires n'a pas permis d'identifier clairement les impacts de l'augmentation des températures sur cet aléa (Sass et Oberlechner, 2012). Ici, les reconstitutions dendrogéomorphologiques ont été lissées avec une moyenne mobile de 15 ans pour mettre en avant les fluctuations à moyen terme de l'activité des chutes de pierres et de détecter un impact potentiel du réchauffement climatique. À Saint-Guillaume, il existe une forte tendance à l'augmentation dans la reconstitution malgré les efforts mis en place afin de limiter les biais liés à la diminution du nombre d'arbre dans le temps et la difficulté à retrouver des traces de perturbations dans les arbres sur la période 1958–2017. L'analyse diachronique de photographies aériennes depuis 1946 (non présentée ici) suggère que cette tendance résulte d'une recolonisation rapide de la forêt sur la parcelle étudiée au cours des dernières décennies. Bien que l'impact des fluctuations du climat sur l'activité ne puisse pas être totalement exclu, il semblerait que cette tendance à l'augmentation soit en grande partie liée à la sur-représentation des jeunes arbres (plus sensibles aux impacts ; Silhán et Stoffel, 2015) dans notre reconstitution.

Dans le massif du Diois (Valdrôme), la forêt de reboisement n'a pas connu d'évolution comparable. Des corrélations significatives ont été calculées, à l'échelle décennale, entre l'activité des chutes de pierres, les cumuls de précipitations (corrélation positive) et les températures moyennes (corrélation négative). Cependant, l'absence de tendance significative sur la période étudiée suggère que les chutes de pierres ont peu été affectées par le réchauffement climatique récent. Ces résultats doivent être interprétés avec prudence compte tenu de la robustesse limitée des modèles de régression multiple testés à Valdrôme, de l'augmentation limitée de la température depuis 1959 et des limites que peut présenter les reconstitutions dendrogéomorphologiques en ce qui concerne leur capacité à enregistrer les chutes de pierres de faible magnitude qui sont les plus susceptibles d'être affectées par le réchauffement climatique (Krautblatter et Moser, 2009). Néanmoins, ils fournissent de premiers éléments probants concernant l'évolution de versants peu étudiés jusqu'ici.

5.2 Densification de l'échantillonnage à l'échelle des Alpes françaises calcaires

Les résultats obtenus dans cette étude mettent en évidence la détection complexe des impacts du réchauffement

climatique sur l'activité des chutes de pierres. Cette dernière résulte, entre autres, des divergences observées dans nos deux reconstitutions dendrogéomorphologiques et aux interférences entre la recolonisation forestière et l'activité de l'aléa qui induisent du bruit dans la reconstitution de Saint-Guillaume. Dans le futur, nous pensons que des tendances plus robustes, potentiellement liées aux fluctuations climatiques, pourraient être extraites d'une analyse régionale reposant sur un nombre accru de sites d'études et permettant de s'affranchir des signaux locaux. Afin d'augmenter le rapport coût-bénéfice d'une telle approche, nous suggérons :

- de privilégier les peuplements monospécifiques et idéalement une dizaine de versants reboisés comparables à celui de Valdrôme ;
- d'ajuster la taille des parcelles étudiées en limitant leur extension vers l'aval tout en augmentant leur extension latérale ;
- d'échantillonner systématiquement les premières rangées d'arbres, situées à proximité des parois rocheuses.

Les chronologies qui en résultent pourraient être analysées au moyen d'une régression logistique hiérarchique spatio-temporelle bayésienne (Eckert *et al.*, 2010 ; Jomelli *et al.*, 2015 ; Lavigne *et al.*, 2015). Celle-ci permet en effet de (1) de supprimer les tendances liées à la diminution du nombre d'arbres vivants dans le passé afin (2) d'extraire un signal commun à l'échelle régionale et (3) de comparer ce dernier avec les fluctuations du climat. À cet effet, les données mensuelles par points de grille disponibles auprès du Climate Research Unit (CRU, Jones *et al.*, 2012, résolution $0,5 \times 0,5$ lat/long, 1880–récent), de l'université de Berkeley (BEST, Muller *et al.*, 2013, 1×1 lat/long, 1753–récent) ou la base de données HISTALP (Efthymiadis *et al.*, 2006, $0,1 \times 0,1$ lat/long, 1760–2010) disponibles sur plus d'un siècle pourraient être utilisées pour comparer des périodes différentes sur le plan climatique. Afin de capitaliser sur les résultats acquis, il serait préférable de développer ces reconstitutions à l'échelle des Préalpes françaises calcaires. Cependant, un fort potentiel existe également dans d'autres massifs forestiers de moyenne altitude (Pyrénées, Vosges, Jura) où le réchauffement climatique pourrait avoir modifié, encore plus fortement que dans les Alpes, l'activité des chutes de pierres.

Remerciements. Ces travaux de recherche ont bénéficié de l'appui du projet national C2ROP (Chutes de blocs, Risques Rocheux, Ouvrage de protection) soutenu par le ministère français de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie et du projet CDP-Trajectories soutenu par l'Agence nationale de la recherche dans le cadre du programme « Investissements d'avenir » (ANR-15-IDEX-02). R.M. a bénéficié d'une allocation doctorale du Labex OSUG@2020, cet article constitue un résumé des travaux effectués dans le cadre de cette thèse.

Références

- Alestalo J. 1971. Dendrochronological interpretation of geomorphic processes. *Fennia Int J Geogr* 105(1). Available from <https://fennia.journal.fi/article/view/40757>.
- Astrade L, Stoffel M, Corona C, Lopez Saez J. 2012. L'utilisation des cernes de croissance des arbres pour l'étude des événements et des

- changements morphologiques : intérêts, méthodes et apports des recherches alpines à la dendrogeomorphologie. *Geomorphol Relief Process Environ*: 295–316. Available from <https://hal.archives-ouvertes.fr/halsde-00751468>.
- Corona C, Saez JL, Stoffel M, Rovéra G, Edouard JL, Berger F. 2012. Seven centuries of avalanche activity at Echalp (Queyras massif, southern French Alps) as inferred from tree rings. *The Holocene* 23: 292–304. <https://doi.org/10.1177/0959683612460784>. Available from <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0959683612460784>.
- D'Amato J, Hantz D, Guerin A, Jaboyedoff M, Baillet L, Mariscal A. 2016. Influence of meteorological factors on rockfall occurrence in a middle mountain limestone cliff. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 16: 719–735. <https://doi.org/10.5194/nhess-16-719-2016>. Available from <https://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/16/719/2016/>.
- Deline P. 2009. Interactions between rock avalanches and glaciers in the Mont Blanc massif during the late Holocene. *Quat Sci Rev* 28: 1070–1083. <https://doi.org/10.1016/j.quasci.2008.09.025>. Available from <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S027737910800293X>.
- Delonca A, Gunzburger Y, Verdel T. 2014. Statistical correlation between meteorological and rockfall databases. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 14: 1953–1964. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-1953-2014>. Available from <https://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/14/1953/2014/>.
- Dorren L, Berger F, Jonsson M, et al. 2007. State of the art in rockfall – forest interactions. *Schweiz Z Forstwes* 158: 128–141. <https://doi.org/10.3188/szf.2007.0128>. Available from <http://szf-jfs.org/doi/abs/10.3188/szf.2007.0128>.
- Durand Y, Giraud G, Laternser M, Etchevers P, Mérindol L, Lesaffre B. 2009a. Reanalysis of 47 years of climate in the French Alps (1958–2005): climatology and trends for snow cover. *J Appl Meteorol Climatol* 48: 2487–2512. <https://doi.org/10.1175/2009JAMC1810.1>. Available from <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/2009JAMC1810.1>.
- Durand Y, Laternser M, Giraud G, Etchevers P, Lesaffre B, Mérindol L. 2009b. Reanalysis of 44 yr of climate in the French Alps (1958–2002): methodology, model validation, climatology, and trends for air temperature and precipitation. *J Appl Meteorol Climatol* 48: 429–449. <https://doi.org/10.1175/2008JAMC1808.1>. Available from <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/2008JAMC1808.1>.
- Dussauge-Peisser C. 2002. Évaluation de l'aléa éboulement rocheux : développements méthodologiques et approches expérimentales ; application aux falaises calcaires du Y grenoblois. Grenoble 1. Available from <http://www.theses.fr/2002GRE10052>.
- Eckert N, Deschates M, Bélanger L. 2010. Analyse des fluctuations spatio-temporelles des nombres d'avalanches dans les Alpes du Nord à partir de l'enquête permanente sur les avalanches (EPA). Irstea. <https://doi.org/10.14758/SET-REVUE.2010.2.03>. Available from http://www.set-revue.fr/sites/default/files/articles/pdf/SET_02_article_02_0.pdf.
- Efthymiadis D, Jones PD, Briffa KR, et al. 2006. Construction of a 10-min-gridded precipitation data set for the Greater Alpine Region for 1800–2003. *J Geophys Res* 111: D01105. <https://doi.org/10.1029/2005JD006120>. Available from <http://doi.wiley.com/10.1029/2005JD006120>.
- Erismann TH, Abele G. 2001. Dynamics of rockslides and rockfalls. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-04639-5>. Available from <http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-04639-5>.
- Favillier A, Mainieri R, Saez JL, Berger F, Stoffel M, Corona C. 2017. Dendrogeomorphic assessment of rockfall recurrence intervals at Saint Paul de Varnes, Western French Alps. *Geomorphol Relief Process Environ* 23. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.11681>. Available from <http://journals.openedition.org/geomorphologie/11681>.
- Franco B. 1987. L'éboulement en haute montagne : six contributions à l'étude du système corniche-éboulis en milieu périglaciaire. Thèse de doctorat. Paris 7. Available from <http://theses.fr/1987PA070131>.
- Frayssines M, Hantz D. 2006. Failure mechanisms and triggering factors in calcareous cliffs of the Subalpine Ranges (French Alps). *Eng Geol* 86: 256–270. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.05.009>. Available from <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0013795206001700>.
- Gardner J. 1970. Rockfall: a geomorphic process in high mountain terrain. *Alta Geogr* 6: 15–20.
- Gsteiger P. 1989. Steinschlag, Wald, Relief: empirische Grundlagen zur Steinschlagmodellierung. Google-Books-ID: 3cgESwAA-CAAJ.
- Gsteiger P. 1993. Steinschlagschutzwald. Ein Beitrag zur Abgrenzung, Beurteilung und Bewirtschaftung. *Schweiz Z Forstwes* 144: 115–132.
- Hantz D, Vengeon JM, Dussauge-Peisser C. 2003. An historical, geomechanical and probabilistic approach to rock-fall hazard assessment. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 3: 693–701. <https://doi.org/10.5194/nhess-3-693-2003>. Available from <http://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/3/693/2003/>.
- Ibsen ML, Brunsden D. 1996. The nature, use and problems of historical archives for the temporal occurrence of landslides, with specific reference to the south coast of Britain, Ventnor, Isle of Wight. *Geomorphology* 15: 241–258. [https://doi.org/10.1016/0169-555X\(95\)00073-E](https://doi.org/10.1016/0169-555X(95)00073-E). Available from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0169555x9500073E>.
- Silhán K, Brázdil R, Pánek T, et al. 2011. Evaluation of meteorological controls of reconstructed rockfall activity in the Czech Flysch Carpathians: evaluation of meteorological controls of rockfall activity. *Earth Surf Process Landf* 36: 1898–1909. <https://doi.org/10.1002/esp.2211>. Available from <http://doi.wiley.com/10.1002/esp.2211>.
- Silhán K, Pánek T, Hradecký J. 2013. Implications of spatial distribution of rockfall reconstructed by dendrogeomorphological methods. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 13: 1817–1826. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-1817-2013>. Available from <https://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/13/1817/2013/>.
- Silhán K, Stoffel M. 2015. Impacts of age-dependent tree sensitivity and dating approaches on dendrogeomorphic time series of landslides. *Geomorphology* 236: 34–43. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.02.003>. Available from <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169555x1500077X>.
- Jomelli V, Pavlova I, Eckert N, Grancher D, Brunstein D. 2015. A new hierarchical Bayesian approach to analyse environmental and climatic influences on debris flow occurrence. *Geomorphology* 250: 407–421. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.05.022>. Available from <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169555x15300064>.
- Jones PD, Lister DH, Osborn TJ, Harpham C, Salmon M, Morice CP. 2012. Hemispheric and large-scale land-surface air temperature variations: an extensive revision and an update to 2010: land-surface temperature variations. *J Geophys Res Atmos* 117. <https://doi.org/10.1029/2011JD017139>. Available from <http://doi.wiley.com/10.1029/2011JD017139>.
- Krautblatter M, Moser M. 2009. A nonlinear model coupling rockfall and rainfall intensity based on a four year measurement in a high Alpine rock wall (Reintal, German Alps). *Nat Hazards Earth Syst Sci* 9: 1425–1432. <https://doi.org/10.5194/nhess-9-1425-2009>.

- Available from <https://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/9/1425/2009/>.
- Larson PR. 1994. The vascular cambium: development and structure. Springer Science & Business Media. Google-Books-ID: 7mLwCAAQBAJ.
- Lautridou JP, Letavernier G, Ozouf JC. 1985. Progrès récents dans la connaissance de la gélifraction des roches calcaires. Manchester: T. Spencer.
- Lavigne A, Eckert N, Bel L, Parent E. 2015. Adding expert contributions to the spatiotemporal modelling of avalanche activity under different climatic influences. *J R Stat Soc C Appl Stat* 64: 651–671. <https://doi.org/10.1111/rssc.12095>. Available from <http://doi.wiley.com/10.1111/rssc.12095>.
- Lopez-Saez J. 2011. Reconstruction de l'activité des glissements de terrain au moyen d'une approche dendrogeomorphologique (Moyenne vallée de l'Ubaye, Alpes de Haute Provence). Available from <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00716338>.
- Mainieri R. 2020. La forêt : un intégrateur robuste de l'évolution de la dynamique des chutes de blocs dans un contexte de changements environnementaux ? Ph.D. thesis. Université Grenoble Alpes. Available from <http://www.theses.fr/s162573>.
- Mainieri R, Corona C, Chartoire J, et al. 2020. Dating of rockfall damage in trees yields insights into meteorological triggers of process activity in the French Alps. *Earth Surf Process Landf* esp.4876. <https://doi.org/10.1002/esp.4876>. Available from <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/esp.4876>.
- Mainieri R, Lopez-Saez J, Corona C, Stoffel M, Bourrier F, Eckert N. 2019a. Assessment of the recurrence intervals of rockfall through dendrogeomorphology and counting scar approach: a comparative study in a mixed forest stand from the Vercors massif (French Alps). *Geomorphology* 340: 160–171. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.05.005>. Available from <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169555x19302016>.
- Mainieri R, Lopez-Saez J, Corona C, et al. 2019b. L'inventaire forestier comme méthode de caractérisation spatiale de l'aléa chute de pierres. *Schweiz Z Forstwes* 170: 78–85. <https://doi.org/10.3188/szf.2019.0078>. Available from <http://szf-jfs.org/doi/10.3188/szf.2019.0078>.
- Matsuoka N. 2019. A multi-method monitoring of timing, magnitude and origin of rockfall activity in the Japanese Alps. *Geomorphology* 336: 65–76. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.03.023>. Available from <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169555x19301230>.
- Matsuoka N, Sakai H. 1999. Rockfall activity from an alpine cliff during thawing periods. *Geomorphology* 28: 309–328. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(98\)00116-0](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(98)00116-0). Available from <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169555x98001160>.
- Morel P, Trappmann D, Corona C, Stoffel M. 2015. Defining sample size and sampling strategy for dendrogeomorphic rockfall reconstructions. *Geomorphology* 236: 79–89. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.02.017>. Available from <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169555x15001002>.
- Moya J, Corominas J, Pérez Arcas J, Baeza C. 2010. Tree-ring based assessment of rockfall frequency on talus slopes at Solá d'Andorra, Eastern Pyrenees. *Geomorphology* 118: 393–408. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.02.007>. Available from <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169555x10000620>.
- Muller R, Rohde R, Jacobsen R, Muller E, Wickham C. 2013. A new estimate of the average earth surface land temperature spanning 1753 to 2011. *Geoinf Geostat Overv* 01. <https://doi.org/10.4172/2327-4581.1000101>. Available from <http://www.scitechnol.com/2327-4581/2327-4581-1-101.php>.
- Perret S, Stoffel M, Kienholz H. 2006. Spatial and temporal rockfall activity in a forest stand in the Swiss Prealps – A dendrogeomorphological case study. *Geomorphology* 74: 219–231. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.08.009>. Available from <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169555x05002710>.
- Ravello L, Allignol F, Deline P, Gruber S, Ravello M. 2010. Rock falls in the Mont Blanc Massif in 2007 and 2008. *Landslides* 7: 493–501. <https://doi.org/10.1007/s10346-010-0206-z>. Available from <http://link.springer.com/10.1007/s10346-010-0206-z>.
- Ravello L, Deline P. 2011. Climate influence on rockfalls in High-Alpine steep rockwalls: the north side of the Aiguilles de Chamonix (Mont Blanc massif) since the end of the 'Little Ice Age'. *The Holocene* 21: 357–365. <https://doi.org/10.1177/0959683610374887>. Available from <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0959683610374887>.
- Ravello L, Deline P, Lambiel C, Vincent C. 2013. Instability of a high alpine rock ridge: the lower arête des cosmiques, Mont Blanc massif, France. *Geogr Ann Ser A Phys Geogr* 95: 51–66. Available from <https://doi.org/10.1111/geoa.12000>.
- Rovéra G. 1990. Géomorphologie dynamique et aménagement des versants en Moyenne Tarentaise (Savoie, communes de Gravier, Aime, Mâcot-La Plagne et Champagny). Une contribution à l'étude de l'érosion naturelle et anthropique des Alpes. Thèse d'État. France: Université Joseph Fourier Grenoble 1.
- Sachs T. 1991. Pattern formation in plant tissues. Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511574535>. Available from <http://ebooks.cambridge.org/ref/id/CBO9780511574535>.
- Sass O, Oberlechner M. 2012. Is climate change causing increased rockfall frequency in Austria? *Nat Hazards Earth Syst Sci* 12: 3209–3216. <https://doi.org/10.5194/nhess-12-3209-2012>. Available from <https://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/12/3209/2012/>.
- Schneuwly D, Stoffel M. 2008a. Spatial analysis of rockfall activity, bounce heights and geomorphic changes over the last 50 years – A case study using dendrogeomorphology. *Geomorphology* 102: 522–531. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.05.043>. Available from <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169555x08002535>.
- Schneuwly DM, Stoffel M. 2008b. Tree-ring based reconstruction of the seasonal timing, major events and origin of rockfall on a case-study slope in the Swiss Alps. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 8. <https://doi.org/10.5194/nhess-8-203-2008>.
- Schweingruber FH. 1996. Tree rings and environment: dendroecology. In: Tree rings and environment: dendroecology. Available from <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19980602476>.
- Stahle DW, Fye FK, Therrell MD. 2003. Interannual to decadal climate and streamflow variability estimated from tree rings. In: Developments in quaternary sciences. Volume 1. Elsevier, pp. 491–504. [https://doi.org/10.1016/S1571-0866\(03\)01023-6](https://doi.org/10.1016/S1571-0866(03)01023-6). Available from <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1571086603010236>.
- Stoffel M. 2005. Assessing the vertical distribution and visibility of rockfall scars in trees (reviewed paper). *Schweiz Z Forstwes* 156: 195–199. <https://doi.org/10.3188/szf.2005.0195>. Available from <http://szf-jfs.org/doi/abs/10.3188/szf.2005.0195>.
- Stoffel M, Corona C. 2014. Dendroecological dating of geomorphic disturbance in trees. *Tree-Ring Res* 70: 3–20. <https://doi.org/10.3959/1536-1098-70.1.3>. Available from <http://www.bioone.org/doi/abs/10.3959/1536-1098-70.1.3>.
- Stoffel M, Lièvre I, Monbaron M, Perret S. 2005a. Seasonal timing of rockfall activity on a forested slope at Täschgufer (Swiss Alps) – a dendrochronological approach. *Z Geomorphol* 49.
- Stoffel M, Schneuwly D, Bollschweiler M, et al. 2005b. Analyzing rockfall activity (1600–2002) in a protection forest – a case study using dendrogeomorphology. *Geomorphology* 68: 224–241.

- <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.11.017>. Available from <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169555x04003125>.
- Stoffel M, Perret S. 2006. Reconstructing past rockfall activity with tree rings: some methodological considerations. *Dendrochronologia* 24: 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2006.04.001>. Available from <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1125786506000178>.
- Stoffel M, Wehrli A, Kühne R, Dorren LK, Perret S, Kienholz H. 2006. Assessing the protective effect of mountain forests against rockfall using a 3D simulation model. *For Ecol Manag* 225: 113–122. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.12.030>. Available from <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378112705007747>.
- Trappmann D, Corona C, Stoffel M. 2013. Rolling stones and tree rings: a state of research on dendrogeomorphic reconstructions of rockfall. *Prog Phys Geogr* 37: 701–716. <https://doi.org/10.1177/0309133313506451>. Available from <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0309133313506451>.
- Trappmann D, Stoffel M. 2015. Visual dating of rockfall scars in *Larix decidua* trees. *Geomorphology* 245: 62–72. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.04.030>. Available from <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169555x15002500>.
- Trappmann D, Stoffel M, Corona C. 2014. Achieving a more realistic assessment of rockfall hazards by coupling three-dimensional process models and field-based tree-ring data: assessment of rockfalls by coupling rockfall models and tree-ring data. *Earth Surf Process Landf* 39: 1866–1875. <https://doi.org/10.1002/esp.3580>. Available from <http://doi.wiley.com/10.1002/esp.3580>.
- Weber S, Beutel J, Forno RD, *et al.* 2019. A decade of detailed observations (2008–2018) in steep bedrock permafrost at the Matterhorn Hörnligrat (Zermatt, CH). *Earth Syst Sci Data* 11: 1203–1237. Available from <https://doi.org/10.5194/essd-11-1203-2019>, <https://www.earth-syst-sci-data.net/11/1203/2019/>.
- Zielonka A, Wronska-Walach D. 2019. Can we distinguish meteorological conditions associated with rockfall activity using dendrochronological analysis? – An example from the Tatra Mountains (Southern Poland). *Sci Total Environ* 662: 422–433. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.243>. Available from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969719302980>.

Citation de l'article : Robin Mainieri, Christophe Corona, Nicolas Eckert, Jérôme Lopez-Saez, Franck Bourrier. Apports de la dendrogeomorphologie pour la connaissance de l'évolution de l'aléa rocheux dans les Préalpes françaises calcaires. *Rev. Fr. Geotech.* 2020, 163, 5.