



**HAL**  
open science

## L'inventaire forestier comme méthode de caractérisation spatiale de l'aléa chute de pierres

Robin Mainieri, Jérôme Lopez-Saez, Christophe Corona, Markus Stoffel, Eric Mermin, Franck Bourrier, Nicolas Eckert

### ► To cite this version:

Robin Mainieri, Jérôme Lopez-Saez, Christophe Corona, Markus Stoffel, Eric Mermin, et al.. L'inventaire forestier comme méthode de caractérisation spatiale de l'aléa chute de pierres. *Schweizerische Zeitschrift fuer Forstwesen*, 2019, 170 (2), pp.78-85. 10.3188/szf.2019.0078 . hal-02180301

**HAL Id: hal-02180301**

**<https://hal.science/hal-02180301>**

Submitted on 16 Jan 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.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

# L'inventaire forestier comme méthode de caractérisation spatiale de l'aléa chute de pierres

Robin Mainieri	Université Grenoble Alpes, Irstea (FR)*
Jérôme Lopez-Saez	Université de Genève, Institut des sciences de l'environnement (CH)
Christophe Corona	Centre national de la recherche scientifique (FR)
Markus Stoffel	Université de Genève, Institut des sciences de l'environnement (CH)
Eric Mermin	Université Grenoble Alpes, Irstea (FR)
Franck Bourrier	Université Grenoble Alpes, Irstea (FR)
Nicolas Eckert	Université Grenoble Alpes, Irstea (FR)

## L'inventaire forestier comme méthode de caractérisation spatiale de l'aléa chute de pierres

En région de montagne, les chutes de blocs représentent un aléa majeur qu'il convient de caractériser par le biais de sa fréquence, de son intensité (énergie) et de sa propagation (distance d'arrêt). Bien que particulièrement complexe, en raison du caractère diffus de cet aléa et des lacunes existant dans les archives historiques, cette caractérisation est essentielle pour la gestion du risque. Dans cette étude, nous démontrons que les arbres peuvent constituer des bio-indicateurs fiables pour reconstruire l'activité des chutes de blocs. Notre méthode repose sur le couplage d'une cartographie systématique des tiges, d'un inventaire des espèces forestières et d'un recensement exhaustif des blessures visibles. A cet effet, 793 arbres et 2333 cicatrices d'impacts liées aux chutes de blocs ont été systématiquement inventoriés et cartographiés sur une parcelle d'un hectare localisée dans le massif du Vercors (Alpes françaises) sur la commune de Saint-Guillaume. La distribution spatiale des espèces et des cicatrices d'impact a été utilisée pour 1) localiser précisément les zones de départ les plus actives, 2) les trajectoires préférentiellement empruntées par les blocs mais également 3) mettre en évidence un gradient amont/aval dans l'activité des chutes de blocs permettant de confirmer le rôle de la forêt en matière de protection vis à vis de l'aléa. Cette approche se révèle particulièrement précieuse dans des secteurs où les archives historiques sont absentes. Elle pourra être utilisée dans le futur pour 1) affiner le zonage de l'aléa mais également pour 2) calibrer des modèles trajectographiques de chutes de blocs. Grâce au géoréférencement des arbres et aux caractéristiques relevés, ces surfaces peuvent également être utilisées comme marteloscope pour exercer le martelage dans des forêts de protection contre les chutes de pierres.

**Keywords:** forest inventory, rockfalls, scar counting approach, French Alps

**doi:** 10.3188/szf.2019.0078

\* 2 rue de la Papeterie, BP 76, FR-38402 St-Martin-d'Hères, courriel robin.mainieri@irstea.fr

Les chutes de pierres font partie des aléas les plus fréquents en zone de montagne. Elles sont à l'origine de pertes économiques et humaines parfois importantes (Volkwein et al 2011). Le risque chute de pierres est défini comme la probabilité qu'un point sur un versant soit atteint par un bloc, généralement d'un volume de quelques m<sup>3</sup>, détaché d'un escarpement rocheux, qui se propage sous l'effet de la gravité par roulage et rebonds successifs (Varnes 1984, Berger et al 2002, Dorren et al 2005). La compréhension de la dynamique spatio-temporelle de cet aléa constitue un enjeu essentiel pour l'aménagement du territoire et la gestion des risques par les maîtres d'ouvrages.

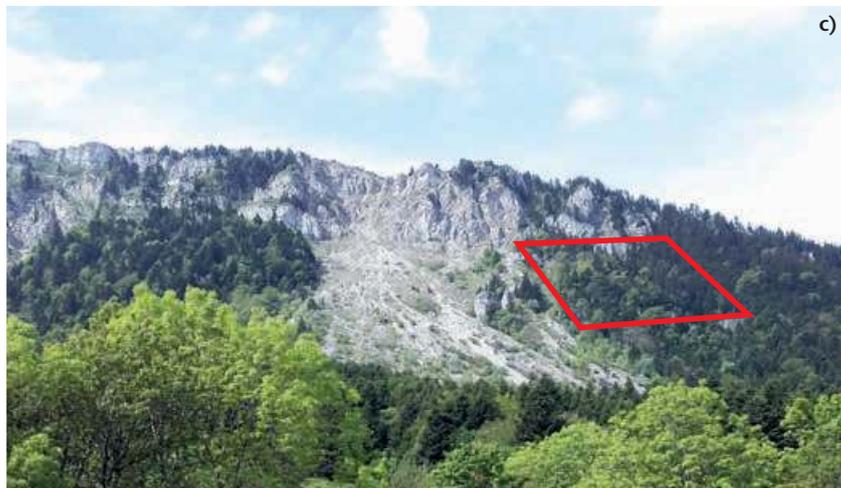
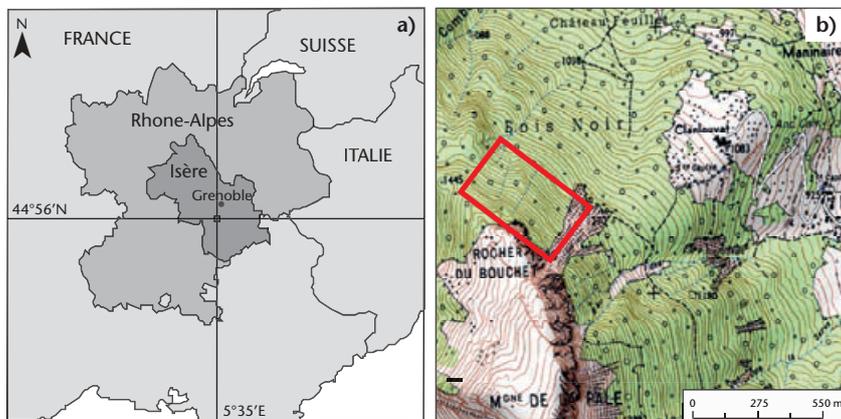
La fréquence d'un événement d'une intensité donnée (énergie) peut être évaluée par l'analyse sta-

tistique d'inventaires de chutes de pierres (Hungry et al 1999). Cependant, ces inventaires sont rares, lacunaires et hétérogènes, tant sur le plan temporel que d'un point de vue spatial (Sass & Oberlechner 2012). Leur utilisation à des fins de zonage est complexe. En effet, les données qui n'ont généralement pas été collectées à des fins scientifiques sont souvent difficiles à obtenir. Il en va de même de leur extraction et de leur analyse. A cela s'ajoutent notamment l'objectivité de l'observateur, les problèmes de retranscription et le caractère aléatoire des événements observés tant sur le plan spatial que temporel. Enfin, compte tenu du caractère sélectif de la transmission des sources orales, les événements récents ou catastrophiques sont souvent surreprésentés dans ces chroniques. Les reconstitutions de l'aléa

issues d'une approche géo-historique présentent ainsi systématiquement un caractère discontinu (Ibsen & Brunsden 1995).

Sur les versants forestiers, les arbres constituent un bio-indicateur de l'activité passée des chutes de blocs. L'approche dendrogéomorphologique – basée sur l'analyse des cicatrices d'impacts produites en réponse à l'endommagement du cambium par les blocs en chute – a ainsi permis de reconstituer la fréquence et l'extension spatiale des événements passés (Stoffel et al 2006, Trappmann et al 2014) et de pallier les biais des archives. Cependant, cette approche présente un ratio coûts/bénéfices élevé du

fait des temps de prélèvements et d'analyse des échantillons importants. L'objectif de cet article est de mettre en évidence les apports et les limites du couplage d'approches cartographique et dendrométrique pour la connaissance de l'aléa et la calibration/validation de modèles trajectographiques utilisés dans le cadre de procédures de zonage. Dans cette optique et dans un contexte de forte diversité spécifique (i), un inventaire forestier exhaustif a été couplé (ii) à un relevé systématique des espèces et (iii) des cicatrices d'impacts visibles sur les tiges des arbres sur un versant de la commune de Saint-Guillaume (Alpes françaises).



**Fig. 1** Le terrain étudié est situé dans les Alpes françaises (a), sur les contreforts du Vercors, à 40 km au sud-ouest de Grenoble (b). Le terrain d'étude – délimité par un polygone rouge (c) – a fait l'objet d'un inventaire forestier à l'aide d'un minithéodolite (d). Des blocs de 1 m<sup>3</sup> ont pu être observés sur le bas du versant ainsi que des traces de blessures sur les arbres (f). Photo d) : Sébastien De Danieli

## Site d'étude

Le site d'étude est localisé sur le versant nord de la Montagne de la Pale, en aval du Rocher du Bouchet (44°56'18 N, 5°35'11 E, 1350–1490 m) sur la commune de Saint-Guillaume (256 habitants) dans le massif du Vercors (Alpes françaises, figure 1a). Cette ligne de crête, orientée nord-sud, sépare la vallée de La Gresse, à l'ouest, de la dépression de Monestier-de-Clermont à l'est (figure 1b). L'escarpement rocheux principal est localisé au niveau du Rocher du Bouchet (1586 m d'altitude). Constitué de calcaires jurassiques (Tithonique, figure 1c), il alimente des éboulis constitués de blocs décimétriques dans la zone apico-proximale (tiers supérieur de l'éboulis), au contact de la corniche, dont le volume excède rarement 1 m<sup>3</sup> dans la partie distale (figure 1e). Ces éboulis présentent un granoclassement caractéristique et sont limités, à l'aval, par une zone d'arrêt, correspondant à une rupture de pente, située au niveau du replat de Clanlouvat (~1100 m). Le site d'étude s'étend ainsi sur une longueur de 110 m de long et sa pente varie entre 26° et 46° (moyenne ~38°).

La superficie de la parcelle forestière étudiée est d'environ 1 hectare (110 × 90 m). Sur cette parcelle, la forêt, à fonction de protection, présente une structure complexe. D'une densité moyenne de 800 arbres/ha, elle présente une diversité spécifique importante. Le peuplement est dominé par le sapin blanc (*Abies alba*), l'épicéa commun (*Picea abies*), l'orme de montagne (*Ulmus glabra*), l'érable sycomore (*Acer pseudoplatanus*), l'alisier blanc (*Sorbus aria*) et le hêtre (*Fagus sylvatica*). La moyenne annuelle des précipitations (1961–2013) au niveau de la station météorologique de Grenoble (45°09'58 N, 5°45'58 E, 220 m), située à 40 km du site d'étude, est de 934 mm pour la période 1961–2013. La température moyenne est de 12.5 °C. Les chutes de pierres sont le processus géomorphologique dominant sur ce site et sont probablement à l'origine d'une majorité des impacts observés sur les arbres. Les autres processus géomorphologiques, ne peuvent être totalement exclus, notamment dans la partie amont du versant où des

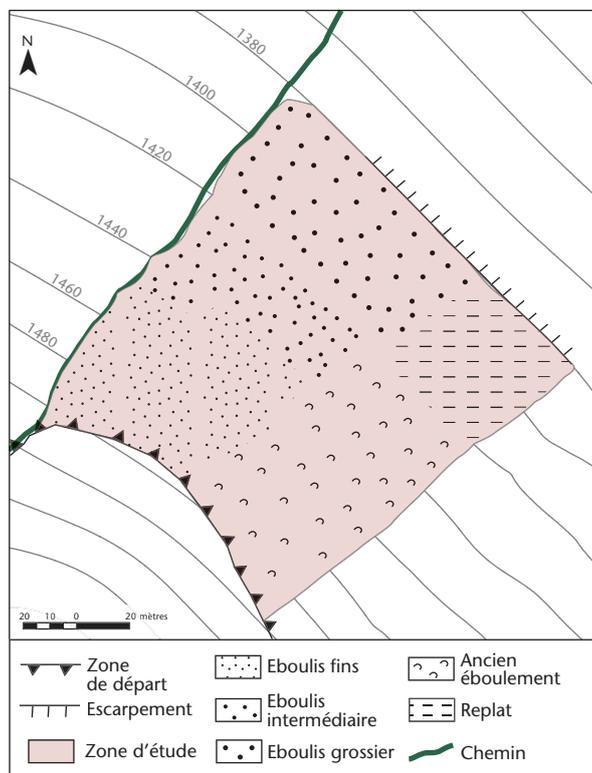


Fig. 2 Carte géomorphologique simplifiée du site d'étude.

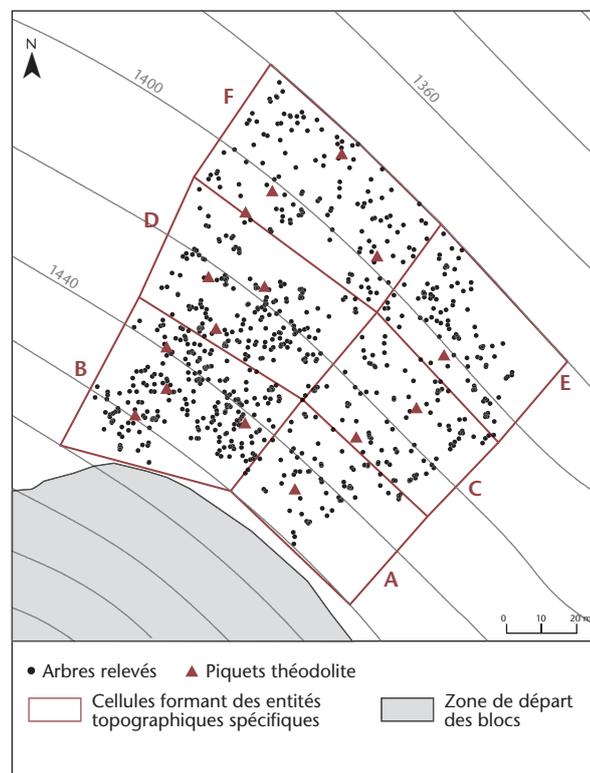


Fig. 3 Positionnement des arbres sur la parcelle étudiée.

coulées avalanches, d'extension limitée, sont possibles. La carte géomorphologique montre des secteurs différents au niveau de la topographie mais également de la granulométrie (figure 2). La partie nord-est du versant est couverte par un talus d'éboulis actif caractérisé par une granulométrie fine en amont, plus grossière en aval. Dans la partie sud-est, la partie supérieure du versant est occupée par un ancien éboulement aujourd'hui partiellement revégétalisé. Celui-ci est prolongé vers l'aval par un replat d'origine structurale. Les interventions sylvicoles ont probablement été très limitées, mais leur évaluation dans le passé reste complexe. La fréquence élevée des cicatrices d'impacts sur les arbres met en évidence une activité régulière des chutes de blocs (figure 1f) mais aucun événement historique n'est listé dans les archives communales du fait des enjeux limités à l'aval de la parcelle étudiée.

## Matériel et méthode

### Mise en place des relevés

La réalisation de relevés forestiers sur des terrains soumis à l'aléa chute de blocs est souvent complexe. Ceci est lié notamment à la difficulté d'accès, à des pentes fortes, à la mobilité du substrat et aux risques liés à l'occurrence de cet aléa. Dans le cadre de cette étude, un dispositif allégé et facilement transportable en terrain difficile a été utilisé comme alternative au théodolite classiquement employé pour la réalisation des inventaires. Ce dispositif est

composé d'un trépied sur lequel sont fixés un inclinomètre et une boussole (figure 1d). Ce minithéodolite est positionné au niveau d'une station de référence située sur la placette étudiée. Cette placette de référence est localisée précisément au moyen d'un système GPS différentiel (récepteur Trimble GéoXH). La position de chaque arbre est ensuite obtenue, sur la base de cette station de référence, en mesurant l'azimut (boussole), la distance (Vertex) et la pente (inclinomètre). Dans le cadre de cette étude, seuls les arbres d'un diamètre supérieur à 4 cm, susceptibles d'être endommagés par les blocs, ont été cartographiés. Lorsque la portée des instruments ou la visibilité depuis la station de référence deviennent insuffisantes, le minithéodolite est déplacé vers une autre station, géolocalisée par rapport à la station de référence selon un protocole identique à celui utilisé pour le positionnement des arbres. Nous devons souligner que ce protocole, particulièrement adapté à des topographies complexes, présente cependant des limites pouvant être liées (i) à une erreur de positionnement initial, engendrée par une réception GPS limitée sous couvert forestier et (ii) à des imprécisions dans la localisation des stations successives, imprécisions pouvant se cumuler de station en station.

### Relevés dendrométriques et intégration dans un SIG

Les relevés de la position des arbres ont été couplés à une série de relevés dendrométriques effectués de manière systématique sur l'ensemble des arbres de la parcelle. Ces relevés concernent l'espèce,

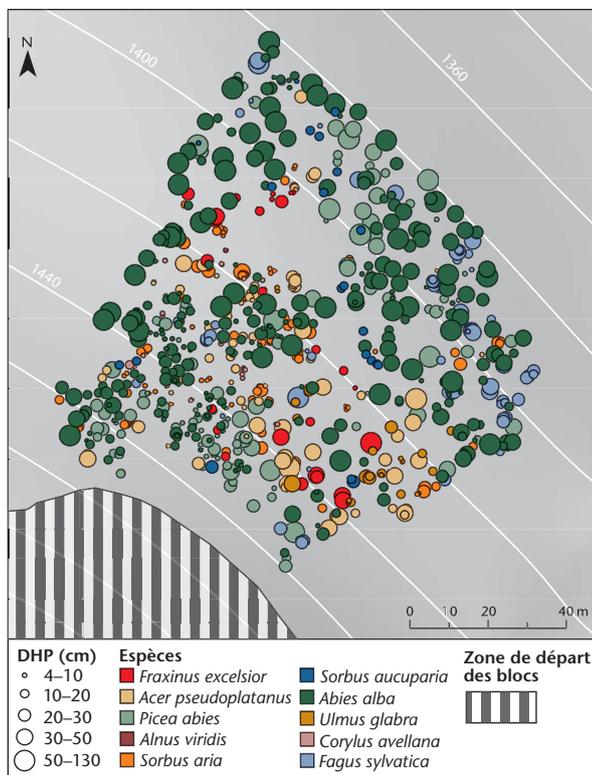


Fig. 4 Distribution spatiale des arbres et de leur diamètre à hauteur de poitrine (dhp en cm) sur la parcelle étudiée.

le diamètre à hauteur de poitrine (dhp) et les cicatrices d'impacts. Pour ce dernier paramètre, l'étude étant focalisée sur les interactions entre le peuplement forestier et l'aléa chute de pierres, la hauteur, la dimension et la position de chaque blessure sur la tige ont été relevées.

La position de chaque arbre et les informations associées, structurées en base de données, ont ensuite été intégrées dans le système d'information géographique (SIG) ARCGIS (ESRI 2009). Sur la base de ce SIG, la parcelle étudiée a été divisée en six cellules homogènes d'un point de vue topographique (figure 3) afin de faciliter l'interprétation des résultats.

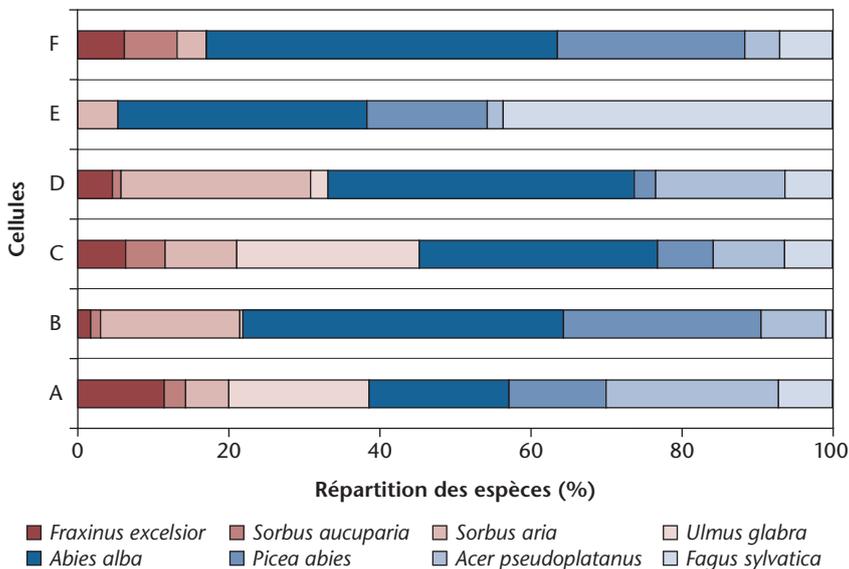


Fig. 5 Répartition des espèces (en %) sur chacune des cellules de la parcelle.

Chaque arbre cartographié a été affecté à une cellule en fonction de sa position.

## Résultats

### Diversité des espèces forestières

Au total, l'inventaire forestier compte 793 arbres (dhp moyen: 21 cm ± 15 cm). Il est dominé par *Abies alba* (n=304, 38.3%, dhp moyen: 25 cm ± 18 cm), *Picea abies* (n=129, 16.3%, dhp moyen: 22 cm ± 15 m), *Sorbus aria* (n=110, 13.8%, dhp moyen: 13 cm ± 5 cm), *Acer pseudoplatanus* (n=83, 10.7%, dhp moyen: 20 cm ± 13 cm), *Fagus sylvatica* (n=74, 9.3%, dhp moyen 21 cm ± 11 cm). *Ulmus glabra* (n=38, 4.8%, dhp moyen: 13 cm ± 8 cm), *Fraxinus excelsior* (n=34, 4.3%, dhp moyen: 19 cm ± 13 cm) et *Sorbus aucuparia* (n=21, 2.6%, dhp moyen: 14 cm ± 4 cm) sont plus faiblement représentés dans le spectre des espèces.

L'analyse de la répartition des espèces par cellule montre une répartition hétérogène sur la parcelle (figure 4). On observe ainsi une double structuration longitudinale et latérale des peuplements forestiers (figure 5): la partie sud-est de la parcelle (cellules A, C), à proximité de l'escarpement, est dominée par *Acer pseudoplatanus* et *Ulmus glabra*. Dans le tiers inférieur (cellule E), la présence de *Fagus sylvatica*, espèce à sciaphilie plus marquée (L=1 selon la classification de Landolt), traduit une maturité forestière plus avancée. Cette répartition semble cohérente avec la topographie, la cellule E étant située sur un replat topographique à plus de 100 m de l'escarpement, donc théoriquement plus stable.

Dans la partie nord-ouest de la parcelle, les résineux (*Abies alba* et *Picea abies*) sont dominants sur le transect (cellules B et F). La présence d'un éboulis grossier à mi-pente induit cependant une discontinuité édaphique qui permet l'installation de feuillus tels que *Sorbus aucuparia* (25.15%) ou *Acer pseudoplatanus* (17.14%).

### Cartographie de l'activité des chutes de pierres

L'analyse des impacts a permis de recenser 2333 cicatrices liées à l'endommagement du cambium par des blocs (figure 6). Le nombre moyen de blessures par arbre est de 3 ± 2.7 sur l'ensemble de la parcelle. Au total, seul 149 arbres (18.8%) ne présentent aucun signe visible d'impact. D'un point de vue spatial, on observe une décroissance marquée de l'amont vers l'aval du nombre de blessures visibles. Le nombre moyen de cicatrices par arbre passe ainsi de 3.5 ± 2.6 sur le tiers supérieur de la parcelle (cellules A et B), à 2.5 ± 2.7 dans la partie centrale (C et D), puis à 2.5 ± 2.4 sur le tiers inférieur du versant (E et F). La cellule E apparaît comme le secteur le moins actif avec un nombre moyen d'impacts par

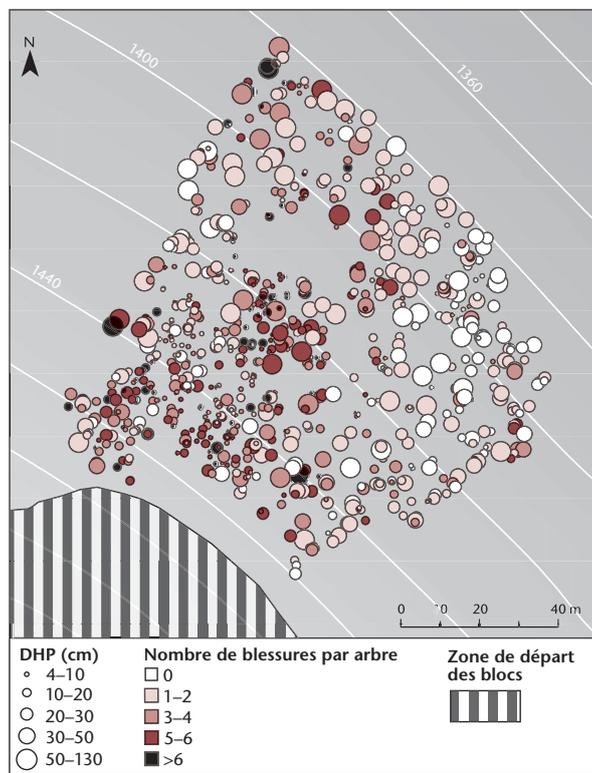


Fig. 6 Cartographie du nombre de blessures visibles par arbre sur la parcelle en fonction de son diamètre (en cm).

arbre de 0.9 ( $\pm 1.5$ ) et plus de 55% des arbres qui ne montrent aucune trace visible de perturbation.

A ce gradient amont-aval, s'ajoute une zonation latérale très marquée (figure 7). La partie nord-ouest de la parcelle, représentée par les cellules B et D, présente, en effet, des fréquences d'impacts par-

ticulièrement importantes. Le nombre moyen de blessures par arbre dans les cellules B et D est ainsi respectivement de 3.9 ( $\pm 2.7$ ) et 3.8 ( $\pm 3$ ). Au sein de ces deux cellules, seulement 8.2% et 9.1% des arbres ne présentent aucune blessure visible. On observe également, sur le terrain, de nombreux blocs frais, peu altérés, non recouverts de lichens, témoins d'une activité récente et importante des chutes de blocs. Par comparaison, les arbres des cellules A et C sont caractérisés par un nombre de blessures significativement plus faibles (2  $\pm$  2, resp. 1,5  $\pm$  1.6). Pour la cellule A, 10.2% des arbres ne possèdent aucun impact. Ce taux atteint 34.7% dans la cellule C.

On observe également une diminution du nombre de blessures visibles sur les troncs sur les arbres de plus grand diamètre (figure 8). Ainsi, les arbres sur lesquels on retrouve le plus de blessures visibles sont ceux avec un diamètre inférieur à 15cm (n=133) et compris entre 15 et 25cm (n=127). Les arbres avec un plus gros diamètre présentent quant à eux beaucoup moins de traces visibles dues à un impact de chute de pierres (n=24 pour les diamètres supérieurs à 60 cm).

## Discussion

### Apports et limites de l'approche pour la connaissance de l'aléa chutes de blocs

Les relevés dendrométriques réalisés sur le site de Saint-Guillaume permettent de mettre en évidence un gradient longitudinal de l'activité des

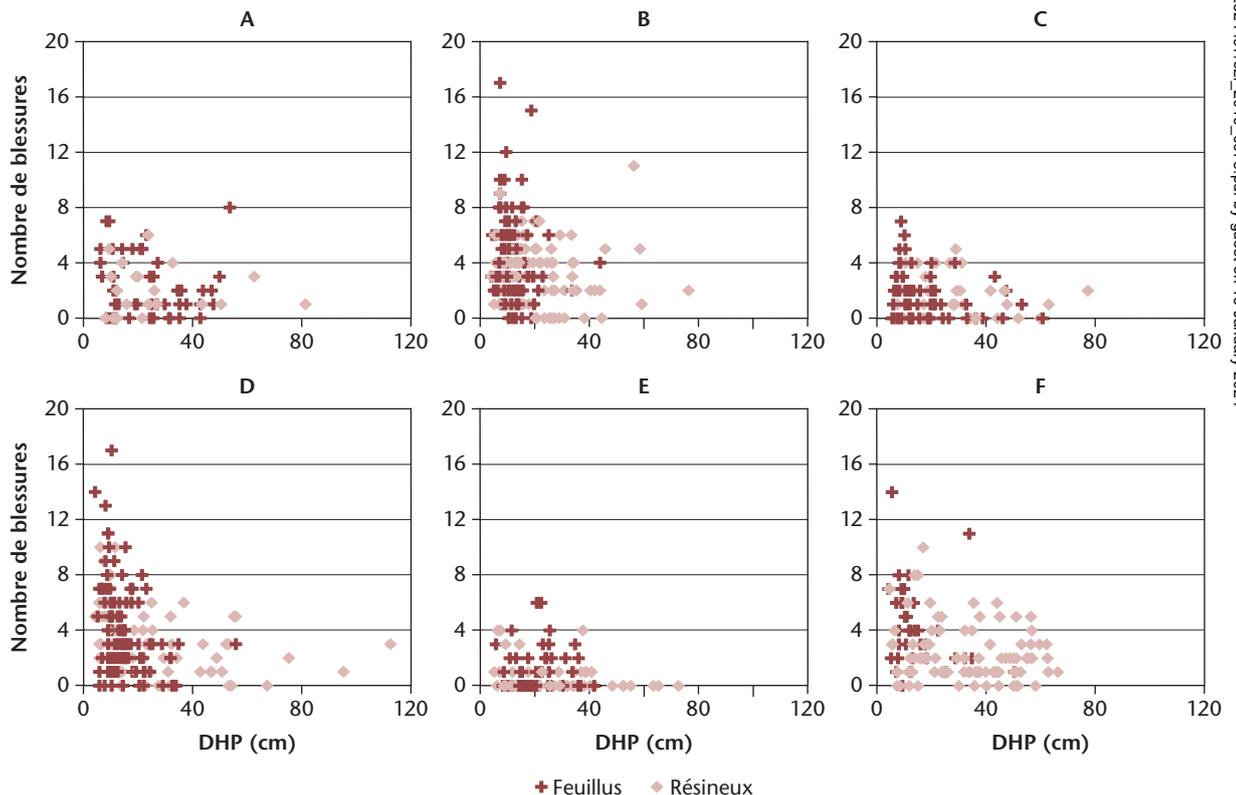


Fig. 7 Distribution du nombre de blessures visibles sur l'arbre en fonction de son diamètre (en cm) par cellule.

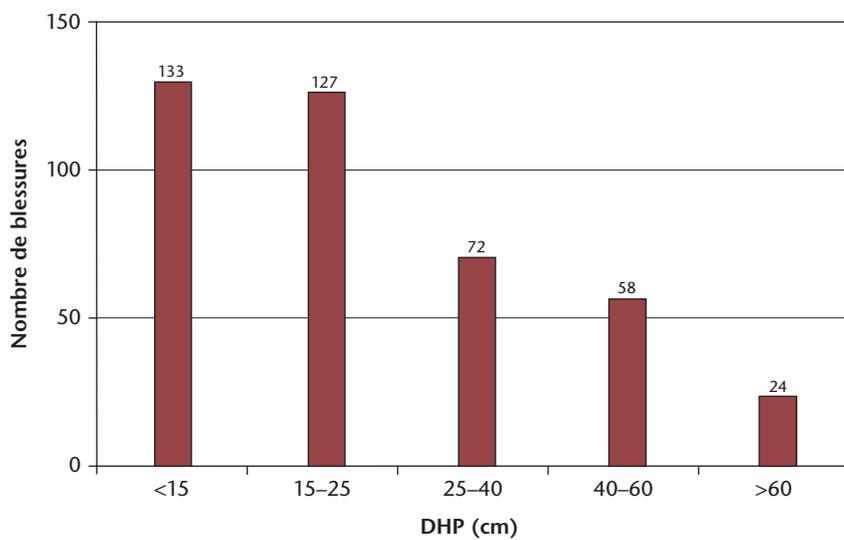


Fig. 8 Répartition du nombre de blessures visibles en fonction des classes de diamètre (dhp).

chutes de blocs. Ce gradient est révélé par la fréquence des impacts sur les arbres mais également par la diversité spécifique et notamment la présence accrue d'espèces feuillues, dans la partie sud-est, au contact de la corniche calcaire. Il s'explique notamment par la dissipation d'énergie lors de l'impact d'un bloc au sol ou contre des tiges (Gsteiger 1990, Dorren et al 2005, 2006). Ces observations confirment la fonction de protection de la forêt vis-à-vis des chutes de pierres. Elles mettent également en évidence le rôle de la topographie sur la propagation. Le profil concave et l'existence du replat topographique expliquent ainsi la rareté des impacts au niveau du tiers inférieur du versant.

A ce gradient longitudinal, s'ajoute un gradient latéral très marqué révélé par un nombre d'impacts moyen significativement plus important sur les tiges situées dans la partie nord-ouest de la parcelle. Cette récurrence supérieure est probablement liée à des discontinuités d'ordre géologique et/ou géomorphologique au niveau de l'escarpement. Ces discontinuités sont cependant difficiles à mettre en évidence du fait de l'accès complexe à l'escarpement. Ce dernier empêche la réalisation d'observations d'ordre lithologique (stratification, pendage, fracturation/diaclasage, débit des blocs, présence de patines) et limite l'acquisition d'images aériennes à haute résolution via l'utilisation d'un drone, par exemple (Buill et al 2016). Sur ce point, l'apport du couplage géoréférencement/mesures dendrométriques apparaît particulièrement précieux puisqu'il révèle une mosaïque complexe de l'activité des chutes de blocs, particulièrement difficile à mettre en évidence par le biais d'autres techniques de mesures. Finalement, ce couplage de relevés géoréférencés et de mesures dendrométriques avait déjà été utilisé en Valais pour valider un logiciel sur les chutes de pierres (Eichenberger et al 2017). Cette surface ainsi que la surface valaisanne disposeraient ainsi de toutes les

données nécessaires à l'installation d'un marteloscope dans une forêt de protection à aléa de chute de pierres afin de servir de terrain d'exercice aux sylviculteurs de montagne.

Les limites de cette approche doivent cependant être soulignées afin d'éviter toute interprétation erronée des cartographies obtenues. En effet, le nombre de cicatrices d'impacts observées doit être considéré comme un minimum puisque: (i) toutes les espèces, en fonction de l'épaisseur de leur écorce notamment, n'intègrent pas les chutes de blocs de manière identique. Ainsi, dans le canton du Valais (Alpes suisses), Trappmann et al (2014), ont démontré, sur un peuplement mixte, que les impacts dénombrés sur les hêtres étaient près de trois fois plus importants que ceux observés sur les mélèzes. De la même manière, Favillier et al (2015) montrent, dans le massif du Vercors (Alpes françaises), une récurrence des cicatrices plus fortes sur *Acer opalus* que sur *Quercus pubescens* (ii) ainsi qu'un nombre de chutes de blocs enregistrées très dépendant du diamètre. Les arbres les plus gros présentent une surface d'impact plus importante, mais ont également un potentiel de cicatrization plus fort (Silhan & Stoffel 2015); (iii) le processus de cicatrization, particulièrement rapide chez certaines espèces, entraîne la disparition de tout impact visible à la surface de la tige (Stoffel & Perret 2006) et (iv) de nombreux blocs n'ont pas une énergie suffisante pour endommager le cambium et laisser des traces visibles à la surface des arbres (Evans & Hungr 1993). Enfin, (v) le potentiel d'interception varie avec l'âge et la densité du peuplement forestier (Favillier et al 2017).

#### Utilisation en matière de zonage

Compte tenu de la complexité d'évaluation de l'aléa de départ, le zonage de l'aléa chute de blocs repose, depuis l'avènement des méthodes de simulation numérique, sur des outils de modélisation des trajectoires de blocs en chute. Ces modèles trajectographiques fournissent des informations sur les trajectoires les plus probables, les distances d'arrêt des blocs, mais également sur leur énergie (Bourrier & Hungr 2013). Ces simulations sont basées sur un ensemble de paramètres tels que la topographie (obtenue à partir de modèles numériques de terrain), l'emprise des zones de départ des blocs, les caractéristiques du sol (compacité, rugosité) ou des blocs (forme, volume) en chute et sont susceptibles d'intégrer l'influence des peuplements forestiers sur la propagation de l'aléa (Dorren et al 2007). Ces modèles sont souvent calibrés à dire d'expert.

Dans ce contexte, les inventaires forestiers exhaustifs couplés aux relevés dendrométriques constituent des sources d'information particulièrement précieuses pour la calibration et la validation des modèles trajectographiques. Ainsi, Corona et al (2013) ont démontré que la convergence entre simulations

et observations permettait d'affiner la détection des zones de départ. Corona et al (2017) ont également démontré que les modèles étaient très sensibles au paramétrage initial et que des modifications même très faibles de la rugosité pouvait entraîner des divergences importantes entre les fréquences de chutes de blocs observées et simulées. Enfin, la cartographie à haute résolution, couplée à des relevés d'impacts et à une estimation de l'âge des arbres basée sur des relations âge/diamètre, permet d'estimer précisément la période de retour de l'aléa au niveau de chaque arbre. Elle apparaît très complémentaire de l'approche numérique qui fournit des fréquences relatives directement proportionnelles au nombre de simulations réalisées (Favillier et al 2015, Lopez Saez et al 2016).

## Conclusion

Sur le site de Saint-Guillaume (massif du Vercors), un inventaire forestier systématique couplé à un relevé d'espèces et des impacts à la surface des tiges a été mis en œuvre afin de caractériser l'activité des chutes de pierres. Nos résultats montrent l'existence d'un gradient longitudinal conforme à la topographie concave du versant et à la dissipation d'énergie lors des impacts des blocs en chute avec le peuplement forestier. Une zonation transversale est/ouest, plus rarement décrite dans la littérature, a été également mise en évidence. Cette dernière est probablement liée à des discontinuités d'origines géologiques et/ou géomorphologiques des deux compartiments de l'escarpement particulièrement complexes à détecter au moyen des méthodes traditionnelles de suivi.

Cette étude illustre les apports d'un inventaire systématique pour la cartographie à haute résolution spatiale de l'aléa chute de blocs. Malgré les limites décrites précédemment, cette cartographie est particulièrement utile pour pallier les lacunes des archives historiques. Elle permet également d'améliorer la calibration et la validation des modèles trajectographiques traditionnellement utilisés pour le zonage et particulièrement sensibles au paramétrage initial. En outre, couplée à des courbes allométriques, elle fournit une estimation de la période de retour de l'aléa et s'avère alors complémentaire des simulations qui ne fournissent que des fréquences de passage relatives.

Ces surfaces bien documentées peuvent également servir de terrain d'exercice aux sylviculteurs de montagne, aux élus et le cas échéant au grand public. Ces marteloscopes, développés en France au début des années 1990, peuvent être utilisés comme données d'entrée pour analyser les conséquences du martelage selon différents critères (économie, protection, biodiversité). Enfin, les résultats obtenus, in-

tégrés dans un réseau, servent de base aux échanges et aux partages de retours d'expériences entre les différents participants. ■

*Soumis: 28 février 2018, accepté (avec comité de lecture): 20 décembre 2018*

## Remerciements

Ces travaux de recherche ont bénéficié de l'appui du projet national C2ROP (Chutes de Blocs, Risques Rocheux, Ouvrages de Protection) soutenu par le MEDDE, le Ministère français de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie (<http://www.c2rop.fr/>). Intégré dans le projet CDP-Trajectoires, ce travail a bénéficié d'une aide de l'Etat gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du programme «Investissements d'avenir» portant la référence ANR-15-IDEX-02.

## Références

- BERGER F, QUETEL C, DORREN LKA (2002) Forest: a natural protection mean against rockfalls, but with which efficiency? The objectives and methodology of the ROCKFOR project. Proc International Congress Interpret 2002 in the Pacific Rim, Matsumoto, Japan, 2: 815–826.
- BULL F, AMPARO NÚÑEZ-ANDRÉS M, LANTADA N, PRADES A (2016) Comparison of photogrammetric techniques for rockfalls monitoring. World Multidisciplinary Earth Sciences Symposium (WMESS 2016), 5–9 September 2016, Prague, Czech Republic. IOP Conf Series, Earth Environ Sci 44: 042023.
- BOURRIER F, HUNGR O (2013) Rockfall dynamics: a critical review of collision and rebound models. In: Lambert S, Nicot F, editors. Rockfall engineering. Hoboken: Wiley & Sons. pp. 175–209.
- BRÄKER OU (2002) Measuring and data processing in tree-ring research – a methodological introduction. Dendrochronologia 20: 203–216.
- CORONA C, TRAPPMANN D, STOFFEL M (2013) Parameterization of rockfall source areas and magnitudes with ecological recorders: when disturbances in trees serve the calibration and validation of simulation runs. Geomorphology 202: 33–42.
- CORONA C, LOPEZ-SAEZ J, FAVILLIER A, MAINIERI R, ECKERT N ET AL (2017) Modeling rockfall frequency and bounce height from three dimensional simulation process models and growth disturbance in submontane broadleaved trees. Geomorphology 281: 66–77.
- DORREN LKA, BERGER F, LE HIR C, MERMIN E, TARDIF P (2005) Mechanisms, effects and management implications of rockfall in forests. For Ecol Manage 215: 183–195.
- DORREN LKA, BERGER F, PUTTERS US (2006) Real-size experiments and 3-D simulation of rockfall on forested and non-forested slopes. Nat Hazards Earth Syst Sci 6: 145–153.
- DORREN L, BERGER F, JONSSON M, KRAUTBLATTER M, MÖLK M ET AL (2007) State of the art in rockfall – forest interactions. Schweiz Z Forstwes 158: 128–141. doi: 10.3188/szf.2007.0128
- EICHENBERGER V, MCARDILL B, CHRISTEN M, TRAPPMANN D, STOFFEL M (2017) Wenn Baumwunden dazu beitragen, Steinschlagmodelle weiterzuentwickeln. Schweiz Z Forstwes 168: 84–91. doi: 10.3188/szf.2017.0084
- EVANS SG ET HUNGR O (1993) The assessment of rockfall hazard at the base of talus slopes. Can Geotech J 30: 620–636.

- FAVILLIER A, LOPEZ-SAEZ J, CORONA C, TRAPPMANN D, TOE D (2015) Potential of two submontane broadleaved species (*Acer opalus*, *Quercus pubescens*) to reveal spatiotemporal patterns of rockfall activity. *Geomorphology* 246: 35–47.
- FAVILLIER A, MAINIERI R, LOPEZ-SAEZ J, BERGER F, STOFFEL M ET AL (2017) Dendrogeomorphic assessment of rockfall recurrence intervals at Saint-Paul-de-Varces, Western French Alps. *Géomorphologie relief processus environnement* 23 (2).
- GSTEIGER P (1990) Steinschlag, Wald, Relief: empirische Grundlagen zur Steinschlagmodellierung. Bern: Univ Bern, Geographisches Institut, Diplomarbeit. 111 p.
- HUNGR O, EVANS S.G, HAZZARD J (1999) Magnitude and frequency of rock falls and rock slides along the main transportation corridors of southwestern British Columbia. *Can Geotech J* 36: 224–238.
- IBSEN ML, BRUNSDEN D (1995) 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.
- LOPEZ SAEZ J, CORONA C, ECKERT N, STOFFEL M, BOURRIER F ET AL (2016) Impacts of land-use and land-cover changes on rockfall propagation: Insights from the Grenoble conurbation. *Sci Total Environ* 547: 345–355.
- SASS O, OBERLECHNER M (2012) Is climate change causing increased rockfall frequency in Austria? *Nat Hazards Earth Syst Sci* 12: 3209–3216.
- SILHAN K, STOFFEL M (2015) Impacts of age-dependent tree sensitivity and dating approaches on dendrogeomorphic time series of landslides. *Geomorphology* 236: 34–43.
- STOFFEL M, LIEVRE I, MONBARON M, PERRET S (2005A) Seasonal timing of rockfall activity on a forested slope at Täschgufer (Valais, Swiss Alps) – a dendrochronological approach. *Z Geomorphol* 49: 89–106.
- STOFFEL M, SCHNEUWLY D, BOLLSCHWEILER M, LIEVRE I, DELALOYE R ET AL (2005B) Analyzing rockfall activity (1600–2002) in a protection forest – a case study using dendrogeomorphology. *Geomorphology* 68: 224–241.
- STOFFEL M, PERRET S (2006) Reconstructing past rockfall activity with tree rings: some methodological considerations. *Dendrochronologia* 24: 1–15.
- 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. *Earth Surf Process Landf* 39: 1866–1875.
- VARNES DJ (1984) Slope movement types and processes. In: Schuster RL, Krizek RJ, editors. *Landslides: Analysis and control*. Washington: National Academy of Science. pp. 11–33.
- VOLKWEIN A, SCHELLENBERG K, LABIOUSE V, AGLIARDI F, BERGER F ET AL (2011) Rockfall characterisation and structural protection – a review. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 11: 2617–2651.

## Der Beitrag von Bauminventuren zur räumlichen Charakterisierung der Steinschlaggefahr

In Berggebieten stellt Steinschlag eine der häufigsten Naturgefahren dar. Die Charakterisierung der Steinschlagaktivität hinsichtlich Häufigkeit, Intensität (Energie) und Ausbreitung (Auslaufdistanz) ist für das Risikomanagement unerlässlich, aber wegen der diffusen Natur dieser Gefahr und der Lücken in den historischen Aufzeichnungen äusserst komplex. In dieser Studie zeigen wir, dass Bäume zuverlässige Bioindikatoren sein können, um die Steinschlagaktivität zu rekonstruieren. Unsere Methode basiert auf dem Zusammenführen einer systematischen Kartierung aller Bäume (Lage, Brusthöhen-durchmesser, Art) und der vollständigen Aufnahme aller sichtbaren Steinschlagwunden. Auf einer eine Hektare grossen Fläche in der Gemeinde Saint-Guillaume (Vercors-Massiv, französische Alpen) haben wir 793 Bäume und 2333 Steinschlagwunden erfasst. Die räumliche Verteilung der Baumarten und der Steinschlagwunden haben wir verwendet, um die aktivsten Quellgebiete sowie die wichtigsten Sturzbahnen zu lokalisieren und die mit zunehmender Distanz zum Quellgebiet abnehmende Steinschlagaktivität und damit auch die Schutzwirkung des Waldes aufzuzeigen. Der Ansatz ist besonders wertvoll in Gebieten, in denen historische Aufzeichnungen fehlen. Er kann in Zukunft verwendet werden, um 1) die Gefahrenzonierung zu verfeinern und 2) Steinschlagmodelle zu kalibrieren. Dank der aufgenommenen Baumdaten könnte die Fläche zudem auch als Marteloskop zum Üben von waldbaulichen Eingriffen im Steinschlag-schutzwald verwendet werden.

## The contribution of tree inventories to the spatial characterisation of the rockfall hazard

Rockfall is one of the most frequent natural hazards in mountain areas. The characterisation of rockfall activity in terms of frequency, intensity (energy) and dispersion (run-out distance) is essential for risk management, but is extremely complex due to the diffuse nature of this hazard and the gaps in historical records. In this study we show that trees can be reliable bioindicators to reconstruct rockfall activity. Our method is based on the combination of a systematic mapping of all trees (location, breast height diameter, species) and the complete recording of all visible scars. On an area of one hectare in the municipality of Saint-Guillaume (Vercors massif, French Alps) we recorded 793 trees and 2333 scars. The spatial distribution of the tree species and scars was used to locate the most active source areas and the most important rockfall trajectories and to show the decreasing rockfall activity with increasing distance to the source area and thus also the protective effect of the forest. The approach is particularly valuable in areas where historical records are lacking. It can be used in the future to 1) refine hazard zoning and 2) calibrate rockfall models. Thanks to the recorded tree data, the area could also be used as a marteloscope for practicing silvicultural interventions in the rockfall protection forest.