



HAL
open science

Potentiel dendrogéomorphologique de deux essences collinéennes de feuillus (*Acer opalus*, *Quercus pubescens*) pour l'évaluation de l'emprise spatio-temporelle des chutes de pierres. Le cas de la Croupe du Plantin (Saint-Paul de Varces, massif du Vercors, France)

Adrien Favillier

► **To cite this version:**

Adrien Favillier. Potentiel dendrogéomorphologique de deux essences collinéennes de feuillus (*Acer opalus*, *Quercus pubescens*) pour l'évaluation de l'emprise spatio-temporelle des chutes de pierres. Le cas de la Croupe du Plantin (Saint-Paul de Varces, massif du Vercors, France). Biodiversité et Ecologie. 2014. dumas-01110605

HAL Id: dumas-01110605

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01110605v1>

Submitted on 28 Jan 2015

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.

Jury :

ROVERA G., Maître de Conférences, IGA, UJF, en sa qualité de tuteur au Laboratoire PACTE.

LOPEZ-SAEZ J., Post-Doctorat, IRSTEA, UJF, en sa qualité d'encadrant IRSTEA.

GIAZZI F., Maître de Conférences, IGA, UJF, PACTE, en sa qualité de tuteur pédagogique.

Mémoire-article dirigé par :

LOPEZ-SAEZ J., Post-Doctorat, IRSTEA

CORONA C., Chargé de Recherche CNRS, Université Blaise Pascal, Géolab

BERGER F., Responsable équipe PIER, UR EMGR, IRSTEA

Potentiel dendrogéomorphologique de deux essences collinéennes de feuillus (*Acer opalus*, *Quercus pubescens*) pour l'évaluation de l'emprise spatio-temporelle des chutes de pierres. Le cas de la Croupe du Plantin (Saint-Paul-de-Varces, massif du Vercors, France)

Dendrogeomorphic potential of two submontane broadleaved species (*Acer opalus*, *Quercus pubescens*) to reveal spatio-temporal patterns of rockfall activity

FAVILLIER ADRIEN

**Master 2, mention Science du Territoire,
spécialité Systèmes Territoriaux, Aide à la
Décision, Environnement (STADE), parcours
Recherche**

Résumé

La mémoire du risque à long terme et l'inventaire des aléas, notamment géomorphologiques, apparaissent comme encore insuffisants dans les zones où la vulnérabilité s'accroît avec l'urbanisation. Les modèles numériques de chutes de pierres ont besoin d'être paramétrés et validés à partir d'événements connus. Sur les versants forestiers, la dendrogéomorphologie permet la reconstitution de l'activité passée des chutes de pierres à l'échelle annuelle. Néanmoins, la reconstitution des chronologies de chutes de pierres est limitée par le manque d'études qui utilisent des essences feuillues. Cette étude définit la sensibilité aux impacts de pierres en chute de deux espèces feuillues communes mais jamais étudiées : le chêne pubescent (*Quercus pubescens*) et l'érable à feuilles d'obier (*Acer opalus*). La méthodologie se base sur la cartographie systématique des arbres et le décompte des blessures visibles sur la surface des troncs de chaque espèce. Les données sont issues d'un site d'étude localisé dans le massif du Vercors (Alpes françaises), où les chutes de pierres proviennent d'un escarpement de calcaire marneux du Valanginien. Un total de 1230 blessures a été observé sur la surface de 847 *A. opalus* et *Q. pubescens*. Les deux essences présentent des distributions similaires de l'activité relative des chutes de pierres avec une décroissance amont-aval de l'intervalle de récurrence similaire. Par comparaison des cartes d'intervalles de récurrence, obtenues pour les deux essences et les deux types de structure spatiale des tiges (tiges uniques et cépées) et se basant sur le coefficient kappa de Cohen et sur l'erreur moyenne absolue, cette étude démontre que (i) les intervalles de récurrence varient significativement en fonction de l'essence et de la structure spatiale des tiges ; (ii) l'intervalle de récurrence observé sur *A. opalus* est inférieur de 20 ans à celui de *Q. pubescens* dans la partie inférieure de la parcelle d'étude ; et (iii) *A. opalus* en cépée ne révèle pas une empreinte spatiale immédiatement intelligible. Ces résultats peuvent être expliqués par l'épaisseur et la structure d'écorce de *Q. pubescens*, différentes de celles d'*A. opalus* et qui constituent une barrière mécanique atténuant les chutes de pierres de faible énergie évitant ainsi l'endommagement des tissus internes. Cette étude prouve la fiabilité de *Q. pubescens* et d'*A. opalus* pour la reconstitution de l'activité des chutes de pierres et ouvre des réflexions méthodologiques et pratiques sur l'usage des techniques de dendrogéomorphologie et de modélisation du processus pour le zonage réglementaire de l'aléa « chute de pierres ».

Mots clefs : Interactions Forêt – chute de pierres ; Cépées ; Dendrogéomorphologie ; Intervalle de récurrence ; Alpes françaises ; *Quercus pubescens* ; *Acer opalus*.

Abstract

Risk memory at long-term and inventories, especially geomorphologic, have proven to be limited in urbanized areas where the vulnerability associated increases in proportion to urbanization. Rockfall numerical models need to be parametrized and then validated by known events. Tree-ring analyses allow reconstructing past rockfall activity on forested slope at an annual scale. Yet, the reconstruction of rockfall chronologies has been hampered by the paucity of studies that include broadleaved species. This study is going to define the rockfall impacts sensibility of two common and unstudied broadleaved species: *Quercus pubescens* (Pubescent Oak) and *Acer opalus* (Italian Maple). The approach is based on the systematic mapping of trees and the counting of visible scars on the stem surface of both species. Data are presented from a site in the Vercors massif (French Alps), where rockfalls are frequently detached from Valanginian limestone marl cliff. A total of 1230 scars were observed on the stem surface of 847 *A. opalus* and *Q. pubescens*. Both species present similar spatial distribution of relative rockfall activity with similar downslope decreasing recurrence intervals. By comparing recurrence interval maps obtained from both species and two different tree structures (single trees vs coppice stools) maps based on the Cohen Kappa coefficient and the Mean Absolute Error, this study demonstrate that (i) recurrence intervals vary significantly according to tree species and tree structure; (ii) the recurrence interval observed on *Q. pubescens* exceeds that of *A. opalus* of > 20 year in the lower part of the studied plot; and (iii) *A. opalus* coppice stools do not exhibit a clear spatial pattern. These findings may be explained by the bark thickness and structure of *Q. pubescens* thougher than *A. opalus* which constituting a mechanical barrier buffering low energy rockfalls, and avoiding injury to underlying tissues. This master thesis prove the reliability of *Q. pubescens* and *A. opalus* for reconstructing rockfall activity and open methodological and practical reflexions on the use of tree-rings and modelling approach for regulatory hazard zoning.

Keywords: Forest-rockfall interactions; Coppice stools; Dendrogeomorphology; Recurrence intervals; French Alps; *Quercus pubescens* ; *Acer opalus*.

Remerciements

Cette partie est consacrée aux remerciements de toutes les personnes qui ont permis et soutenu la réalisation de ce mémoire et des recherches associées pendant toute la durée du stage.

Tout d'abord, je souhaite remercier Georges Rovéra, Maître de Conférences à l'Institut de Géographie Alpine et tuteur au sein de PACTE, pour m'avoir permis de réaliser ce stage avec le soutien financier du Labex OSUG@2020, investissement d'avenir – ANR10LABX56, et sans qui je n'aurais probablement jamais entendu parler de la dendrochronologie.

De même je souhaite remercier Franck Giazzi, Maître de Conférences à l'Institut de Géographie Alpine et tuteur pédagogique de ce stage, pour avoir accepté de présider le jury évaluant ce mémoire et la soutenance associée.

Ensuite, je remercie Jérôme Lopez-Saez, mon tuteur au sein de l'IRSTEA – Grenoble, et Christophe Corona, sans eux rien n'aurait été possible. Merci pour toutes les heures passées à cogiter, à relire, à corriger, à donner de précieux conseils et à m'aider à prendre du recul en posant me les bonnes questions. Vous m'avez motivé à aller plus loin dans mes raisonnements et définitivement convaincu à poursuivre ma carrière professionnelle dans la Recherche. J'espère pouvoir retravailler avec vous. Encore merci.

Je souhaite aussi remercier Eric Mermin et Pascal Tardif, techniciens à l'IRSTEA, pour m'avoir accompagné sur le terrain et pour leurs conseils sur l'utilisation du matériel.

De même, je remercie David Toe, Franck Bourrier et Sylvain Dupire pour leurs expertises, leurs conseils et leurs idées sur le traitement des données de terrain.

Je remercie aussi Frédéric Berger et toute l'équipe PIER ainsi que François Véron et toute l'unité Ecosystème Montagnard, pour m'avoir accueilli, suivi et s'être intéressés aux travaux de recherche menés dans le bureau 123. De même je remercie l'administration du Laboratoire PACTE et de l'IRSTEA pour m'avoir permis de faire mon stage dans les meilleures conditions possibles.

Ensuite, je souhaite remercier Erwan Roussel, ingénieur de recherche au laboratoire Géolab, et Daniel Trappmann, doctorant au laboratoire Dendrolab, pour leurs précieuses contributions à ces travaux.

En toute fin, je remercie aussi toutes les personnes que j'ai oublié de citer. Merci à tous.

Sommaire

Résumé	3
Abstract	4
Remerciements	5
Sommaire	6
Liste des abréviations	8
Introduction	9
Projet de recherche	11
1. Etat de l'Art	11
1.1. L'aléa « chute de pierres »	12
1.1.1. Définition	12
1.1.2. Typologie du processus.....	14
1.1.3. Stabilité du compartiment rocheux et mobilisation des matériaux.....	15
1.1.4. La phase de mouvement.....	16
1.1.5. Evaluation de l'aléa « chute de pierres »	17
1.2. Interactions peuplement forestier – chute de pierres	18
1.3. Modéliser le processus pour mieux cartographier l'aléa.....	19
1.4. La dendrogéomorphologie	21
1.4.1. De la dendrochronologie à la dendrogéomorphologie	21
1.4.2. Réactions des arbres aux processus géomorphologiques	23
1.4.3. Evolutions de la dendrogéomorphologie face aux problématiques des chutes de pierres	24
1.5. Positionnement de l'étude dans son champ scientifique	27
2. Potential of two submontane broadleaved species (<i>Acer opalus</i>, <i>Quercus pubescens</i>) to reveal spatio-temporal patterns of rockfall activity	28
2.1. Introduction	29
2.2. Study site	30
2.3. Material and methods	31
2.3.1. Tree plot and counting scar method.....	31
2.3.2. Development of age-diameter regression models.....	32
2.3.3. Calculation of rockfall recurrence intervals.....	32

2.3.4.	Comparison of Ao and Qp recurrence intervals	33
2.3.5.	Bark thickness analysis	33
2.4.	Results.....	34
2.4.1.	Structure of the forest plot: a mixed <i>Acer opalus</i> – <i>Quercus pubescens</i> forest stand	34
2.4.2.	Spatio-temporal patterns of rockfall activity.....	34
2.4.3.	Influence of tree species on the reconstructed patterns.....	35
2.4.4.	Influence of tree structure on the reconstructed patterns	35
2.4.5.	Bark thickness analysis	36
2.5.	Discussion.....	36
2.5.1.	Reliability of spatio-temporal patterns of rockfall activity derived from Ao and Qp...	36
2.5.2.	Differing recurrence intervals reconstructed from both species.....	37
2.5.3.	Influence of tree structure	38
2.6.	Conclusion.....	39
2.7.	Captions	39
3.	Perspectives.....	54
3.1.	Détermination d'essences indicatrices d'une relation fréquence-intensité des chutes de pierres	54
3.2.	Paramétrisation et validation des modèles de simulations trajectographiques par l'utilisation d'un diagnostic dendrogéomorphologique	55
3.2.1.	Identification des zones de départ des chutes de pierres pour la modélisation.....	55
3.2.2.	Calibration des paramètres de surface par convergence avec un diagnostic dendrogéomorphologique	58
3.3.	Mise en place de méthodes pour l'évaluation opérationnelle et le zonage réglementaire de l'aléa « chute de pierres »	58
	Conclusion	59
	Bibliographie.....	60
	Tables.....	66
	Tables des figures.....	66
	Table des tableaux	67

Liste des abréviations

<i>asl</i>	above sea level
<i>A. opalus / Ao</i>	<i>Acer opalus</i> , érable à feuilles d'obier
<i>e.g.</i>	<i>exempli gratia</i> , par exemple
<i>et al.</i>	<i>et alii</i> , et les autres
LiDAR	Light Detection And Ranging
MAE	Mean Absolute Error
MNT / DEM	Modèle Numérique de Terrain / Digital Elevation Model
psp	permanent sample plot
<i>Q. pubescens / Qp</i>	<i>Quercus pubescens</i> , chêne pubescent
Refmap	reference map
SIG / GIS	Système d'Information Géographique / Geographical Information System
yr	year

Introduction

Les chutes de pierres font partie des processus géomorphologiques les plus courants dans les environnements de fortes pentes. Ils sont à l'origine de la destruction de nombreuses infrastructures routières, de bâtiments et dans certains cas causent la perte de vies humaines (Gardner, 1970 ; Porter et Orombelli, 1981; Erismann et Abele, 2001; Dussauge-Peisser *et al.*, 2002; Stoffel *et al.*, 2006). Il est donc nécessaire d'améliorer la compréhension du fonctionnement de l'aléa d'un point de vue spatial et temporel. C'est un enjeu essentiel pour l'aménagement du territoire et la gestion des risques naturels. L'aléa « chute de pierres » concerne toutes les zones en aval d'un escarpement rocheux, bien qu'il soit majoritairement observé et étudié dans des environnements de montagne. Cet aléa est connu dans son processus mais reste difficile à prévoir à cause du caractère incertain de sa réalisation et de l'imprécision pour son emprise spatiale instantanée et de son intensité. Les enjeux de la définition de cet aléa sont d'autant plus importants lorsque son emprise chevauche une zone périurbaine, comme c'est le cas, par exemple, dans la commune de La Tronche (Isère, France) au pied du versant est du massif de la Chartreuse, et de Saint-Paul-de-Varces (Isère, France) au pied des contreforts est du massif du Vercors.

Pour palier ces défis d'évaluation de l'aléa, des modèles de simulations trajectographiques ont été développés permettant une cartographie de l'aléa selon un ensemble de scénarios prédéfinis. Initialement en deux dimensions, ces modèles, tels que *RockyFor3D*, utilisent aujourd'hui des modèles numériques de terrain pour se rapprocher au plus près de la réalité du terrain. Cependant, ils nécessitent d'être calibrés et validés à partir de données de terrain. Celles-ci peuvent être obtenues à partir des versants forestiers par l'étude des interactions entre les pierres en chute et la forêt.

Sur les versants forestiers exposés à cet aléa, la forêt joue à la fois un rôle protecteur, par effet de barrière et par l'atténuation de l'intensité des chutes de pierres, mais aussi un rôle « d'observateur silencieux » par l'endommagement des arbres présents sur les trajectoires de pierres. A travers l'exploitation des blessures laissées sur les arbres, les méthodes en dendrogéomorphologie, développées par Alestalo (1971), Schroder (1978, 1980) et Stoffel *et al.* (2005b), permettent une reconstitution précise de l'activité et de l'emprise spatiale des chutes de pierres. Toutefois, ces méthodes sont consommatrices de temps et de moyens et s'appuient sur un nombre limité d'échantillons. La plupart des travaux ne donne qu'un ordre d'idée de la fréquence réelle des chutes de pierres. Par le passé, l'approche dendrogéomorphologique a été utilisée pour calibrer des modèles de simulation trajectographique d'aléas comme les avalanches (Casteller *et al.*, 2008; Köse *et al.*, 2010; Schläppy *et al.*, 2014) et les crues rapides (Ballesteros Cánovas *et al.*, 2011; Ballesteros *et al.*, 2011). Récemment, des travaux de calibration ont été réalisés dans le domaine des chutes de pierres (Corona *et al.*, 2013; Trappmann *et al.*, 2014).

Basée sur la propriété des arbres à conserver les cicatrices des blessures sur la surface du tronc, l'approche par dénombrement de blessures admet un échantillonnage systématique des versants forestiers exposés à l'aléa. Cette méthode permet une reconstitution viable de l'emprise spatiale et la fréquence des chutes de pierres par l'interprétation de la disposition spatiale du nombre de cicatrices et de leur nombre par arbre (Trappmann et Stoffel, 2013). Cependant, la structure et l'épaisseur de l'écorce des arbres jouent à la fois un rôle dans la capacité de cicatrisation, jusqu'à masquer complètement la blessure (Schneuwly-Bollschweiler et Schneuwly, 2012), mais est aussi susceptible de protéger plus ou moins efficacement l'arbre aux impacts mécaniques en fonction de l'intensité de l'aléa. En conséquence, des questions se posent à propos du biais introduit par ces propriétés physiologiques et mécaniques dans l'évaluation de l'aléa par dénombrement de blessures.

L'objectif de ce mémoire est d'évaluer ces lacunes par l'étude de la sensibilité aux impacts mécaniques de deux essences feuillues : *Quercus pubescens* Willd. (Chêne pubescent ; ang. : Pubescent Oak) et *Acer opalus* Mill. (Erable à feuilles d'obier ; ang. : Italian Maple), au lieu-dit de La Croupe du Plantin, à Saint-Paul-de-Varces, commune périurbaine de Grenoble, en Isère.

Ce mémoire de fin d'étude de Master se décompose en trois parties :

- i. la première partie sous la forme d'un Etat de l'Art est consacrée à la définition de l'aléa « chutes de pierres », à sa modélisation et à l'arbre comme bioindicateur ;
- ii. la deuxième partie présente les méthodes et les différents résultats obtenus sous la forme d'un article scientifique ;
- iii. la troisième partie est consacrée aux perspectives de recherche engagées par cette étude et à la conclusion.

Projet de recherche

Ce mémoire de recherche fut mis en œuvre et supporté grâce au projet :

« **Risque d'éboulement, modélisation et diagnostic dendrogéomorphologique.**

Apport de la dendrogéomorphologie à l'analyse de l'intensité, la fréquence et à la représentation 4D des aléas rocheux gravitaires. »

Issu du financement Labex Osug@2020 (Investissement d'avenir – ANR10LABX56). Porté à la fois par le Laboratoire PACTE ¹ (Groupe de recherche RESo ², équipe RCC ³) et par l'IRSTEA ⁴, ce projet a pour objectif l'amélioration du modèle *RockyFor3D* par convergence avec une étude dendrogéomorphologique à travers l'ajustement des paramètres de simulation.

Les recherches ont été principalement menées au sein du centre d'IRSTEA – Grenoble, grâce à l'appui techniques de Messieurs Mermin Eric et Tardif Pascal, techniciens forestiers à l'IRSTEA, à l'appui scientifique de Messieurs Lopez-Saez Jérôme, Berger Frédéric et l'équipe PIER⁵ de l'IRSTEA, et de Corona Christophe, Chargé de Recherche CNRS au laboratoire GéoLab⁶, et à l'appui administratif conjoint du Laboratoire PACTE et de l'IRSTEA.

1. Etat de l'Art

Ce mémoire s'articule autour de l'évaluation de l'aléa « Chute de pierre » se déroulant sur une emprise limitrophe de l'espace périurbain et à l'aide d'essences forestières communes à l'étage collinéen.

Cet état de l'Art a pour objectif de définir : les principaux termes, les processus mis en exergue et de situer cette étude au sein de son champ scientifique : la dendrogéomorphologie appliquée aux problématiques de chutes de pierres. Pour cela, les paragraphes suivants définiront tout d'abord l'aléa « chutes de pierres » et son processus associé. Puis, se porteront à propos des interactions « Chute de

¹ Laboratoire Politique publiques, Action Politique, Territoire (PACTE) UMR 5194 du CNRS, Université Joseph Fourier, 14 bis avenue Marie Reynoard, 38100 Grenoble, France

² Risques, Environnement et Société

³ Risques, Crises et Catastrophes

⁴ Institut national de Recherches en Sciences et Techniques de l'Environnement et de l'Agriculture

⁵ Protection, Ingénierie Ecologique, Restauration

⁶ GEOLAB, UMR6042 du CNRS, Université Blaise Pascal, Maison des Sciences de l'Homme, 4, Rue Ledru, F63057 Clermont-Ferrand Cedex2.

pierres – Forêt » et des modèles de simulation trajectographiques. Et se termineront à propos des méthodes de dendrogéomorphologie associées à ce processus.

1.1. L'aléa « chute de pierres »

1.1.1. Définition

Les chutes de pierres sont un des processus morphogénétiques les plus courants dans les environnements à fortes pentes, menaçant et causant des dommages aux installations humaines en aval. C'est un processus générant un aléa continu dû à son caractère imprévisible mais régulier. Considéré comme un mouvement de masse gravitaire rapide impliquant une perte de contact avec le sol (Figure 1), les chutes de pierres sont définies par la littérature internationale de la manière suivante :

"A fragment of rock detached by sliding, toppling or falling from a vertical or subvertical cliff, before proceeding downslope by bouncing and flying along parabolic trajectories or by rolling on talus or debris slope" (Varnes, 1978)

"A relatively small landslide confined to the removal of individual and superficial rock fragment from cliff faces" (Selby, 1982)

"A displacement of a single fragment or several pieces [...] with an episode of free fall during the movement" (Evans et Hungr, 1993)

"A single mass that travels as a freely falling body with little or no interaction with other solids. Movement is normally through the air, although occasional bouncing or rolling may be considered as part of the motion" (Ritter et al., 2011)

"Rock/ice fall: Detachment, fall, rolling, and bouncing of rock or ice fragments. May occur singly or in clusters, but there is little dynamic interaction between the most mobile moving fragments, which interact mainly with the substrate (path). Fragment deformation is unimportant, although fragments can break during impacts. Usually of limited volume" (Hungr et al., 2014)

Le processus de chute de pierre se définit alors comme le détachement d'une pierre d'un volume généralement inférieur à 5m³ depuis une zone d'alimentation contenant des matériaux mobilisables, une paroi rocheuse par exemple, jusqu'à sa zone de dépôt en roulant, en bondissant ou en chutant librement dans sa zone dite de propagation (Varnes, 1978; Berger *et al.*, 2002) (Figure 2). Les chutes de pierres sont causées par la rupture physique d'une pierre de son compartiment rocheux, le volume et la forme de chaque pierre étant conditionnés par les différents plans de discontinuités du compartiment (Erismann et Abele, 2001; Frattini *et al.*, 2008; Santana *et al.*, 2012).

Material		ROCK	DEBRIS	EARTH
Movement type				
FALLS		<p>Scar Rock fall Rock Fall Debris</p>	<p>Scar Debris fall Scree Debris cone</p>	<p>Scar Earth fall Colluvium Debris cone</p>
	TOPPLES	<p>Rock topple</p>	<p>Debris topple Debris cone</p>	<p>Cracks Earth topple Debris cone</p>
SLIDES	Rotational	<p>Single rotational slide (slump) Failure surface</p>	<p>Crown Scarp Head Multiple rotational slide Minor Scarp Failure surface Ice</p>	<p>Successive rotational slides</p>
	Translational (Planar)	<p>Rock slide</p>	<p>Debris slide</p>	<p>Earth slide</p>
SPREADS	<p>Cap rock Normal sub-horizontal structure Gully Camber slope Dip and fault structure Valley bulge (planed off by erosion) Thinning of beds Plane of decollement Competent substratum</p> <p>e.g. cambering and valley bulging</p>			<p>Earth spread</p>
FLOWS	<p>Solifluction flows (Periglacial debris flows)</p>	<p>Debris flow</p>	<p>Earth flow (mud flow)</p>	
COMPLEX	<p>e.g. Slump-earthflow with rockfall debris</p>		<p>e.g. composite, non-circular part rotational/part translational slide grading to earthflow at toe</p>	

Figure 1 : Classification des mouvements de masse gravitaires selon leur mouvement et le type de matériel déplacé d'après Varnes, 1978, simplifié.

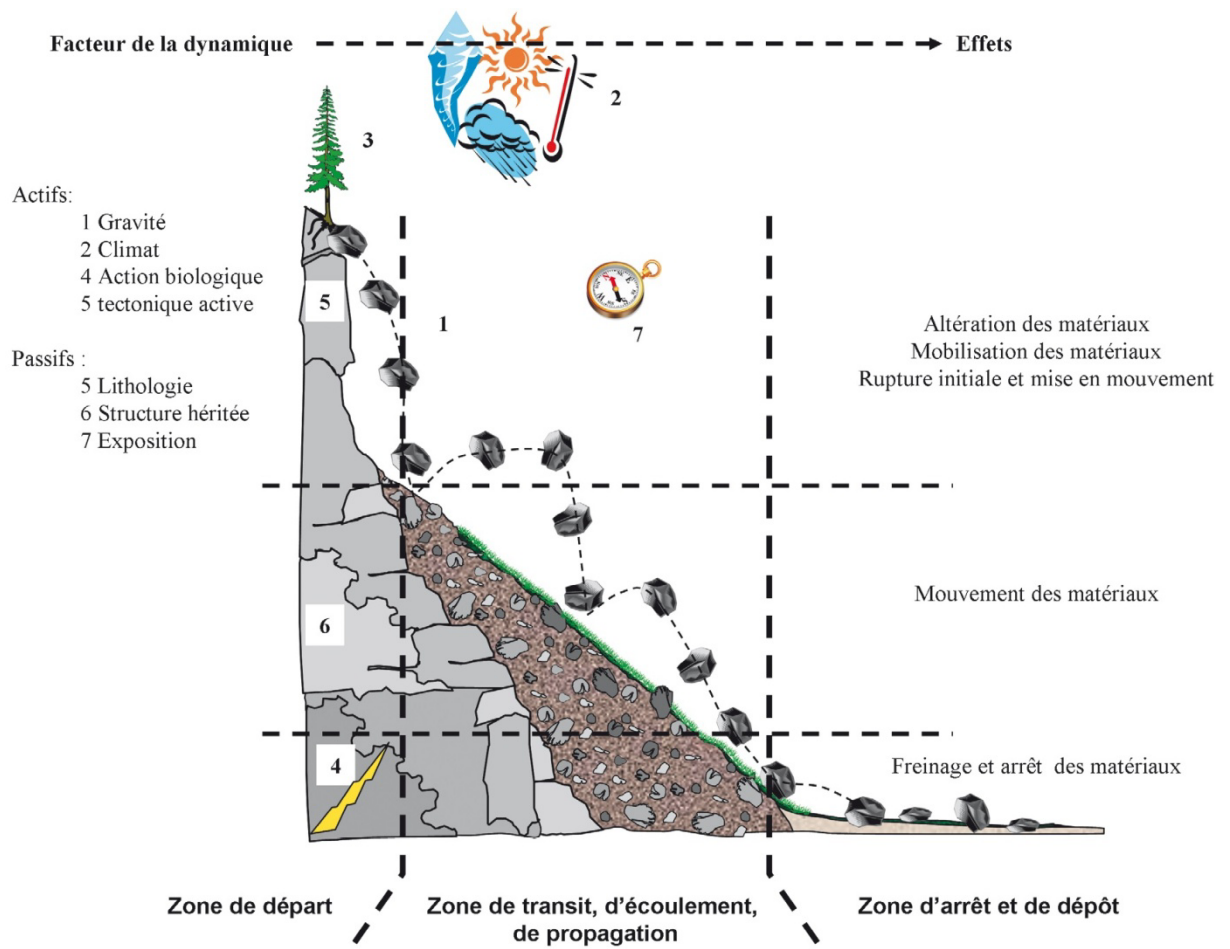


Figure 2 : Représentation schématique du processus et de son emprise spatiale, d'après ARPA et CEMAGREF (2008).

1.1.2. Typologie du processus

De nombreux systèmes de classification existent et s'établissent sur l'intensité de l'évènement. Cette dernière est définie essentiellement par le volume de chute. Ainsi la typologie suivante peut être établie (ARPA et CEMAGREF, 2008) :

- les chutes de pierres (« *rockfall* ») représentent les mouvements de masses impliquant la chute d'une unique pierre avec un volume de l'ordre du décimètre cube à la dizaine de mètres cubes ;
- les chutes de blocs, de rochers (« *rockfall / boulder fall* ») représentent les mouvements de masses impliquant la chute d'un unique bloc ou d'un petit nombre de blocs d'un volume total de l'ordre du mètre cube à la centaine de mètres cubes ;
- les éboulements (« *large rockfalls* ») impliquent la chute de un ou plusieurs blocs d'un volume total de chute de l'ordre de plusieurs centaines de mètres cubes à une centaine de milliers de mètres cubes ;

- au-delà de ce volume, le terme « écoulement » (« *very large rockfall* ») est utilisé et se caractérise comme un événement potentiellement catastrophique animé d'une vitesse élevée et d'une grande distance d'arrêt.

1.1.3. Stabilité du compartiment rocheux et mobilisation des matériaux

La chute d'une pierre est le résultat d'une instabilité du compartiment rocheux originel qui est due à la fois, à des facteurs passifs intrinsèques au compartiment, et à des facteurs actifs préparant et déclenchant la chute (Dorren, 2003; ARPA et CEMAGREF, 2008, p. 251) (Figure 2).

Les facteurs passifs (« *rockfall promoter* ») sont liés à l'état interne et externe du compartiment rocheux, à savoir : la nature du substrat, sa composition lithologique, les propriétés mécaniques de la roche, la densité de fracturation de la pierre et sa disposition structurale initiale (orientation, pendage du compartiment et de chacune de ses discontinuités) (Dorren, 2003; Stoffel, 2005a; Dorren *et al.*, 2007). Le seuil d'instabilité d'un compartiment rocheux se définit comme la pente d'équilibre au-dessus de laquelle une pierre peut être mise en mouvement par la gravité. La valeur d'angle seuil d'instabilité de la pierre étant considérée par la littérature comme étant de 30° (ARPA et CEMAGREF, 2008).

Les facteurs actifs (« *rockfall trigger* ») sont des agents extérieurs agissant mécaniquement sur le compartiment rocheux accélérant par leur action sa déstabilisation, voire à terme, menant au déclenchement d'une chute de pierre. Un des principaux facteurs actifs identifiés par la littérature est le cycle gel-dégel (Luckman, 1976; Douglas, 1980; Stoffel, 2005a; Stoffel et Perret, 2006; Matsuoka et Murton, 2008). Ce dernier provoque l'ouverture permanente des fissures par l'action mécanique du regel de l'eau de fonte durant le printemps (Matsuoka et Sakai, 1999; Matsuoka, 2001; Stoffel *et al.*, 2005). Ce processus de gel-dégel favorise les chutes de pierres « régulières » de faible intensité et de haute fréquence (Matsuoka et Sakai, 1999; Jomelli et Francou, 2000). Toutefois, celui-ci reste un processus très complexe qui dépend, d'une part, des conditions topoclimatiques du site : exposition du versant et conditions météorologiques, par exemple, et d'autre part de la disposition structurale du compartiment rocheux (Rovéra et Robert, 2005; Matsuoka, 2008).

D'autres facteurs actifs liés à l'eau participent et provoquent la chute de pierre (Schneuwly, 2009; Volkwein *et al.*, 2011) comme l'altération chimique et la dissolution de la roche (ARPA et CEMAGREF, 2008), l'érosion et les événements météorologiques majeurs (Sandersen *et al.*, 1997; Cardinali *et al.*, 2006) en particulier les précipitations importantes (Luckman, 1976; Rosser *et al.*, 2005). De même, les conséquences d'événements externes comme les séismes ont été étudiées (Bull et Brandon, 1998).

Des études ont montré que le réchauffement climatique (IPCC, 2014) causerait une recrudescence des chutes de pierres dans les milieux de haute montagne due à la fonte du pergélisol provoquant une perte de cohésion entre la pierre et sa zone source (parois/dépôts rocheux) par la fonte des joints de glace (Haeberli et Beniston, 1998; Schiermeier, 2003). Toutefois, les travaux de Sass et Oberlechner (2012) n'ont pas pu montrer que le réchauffement climatique provoque une modification dans la fréquence d'apparition des événements de chutes de pierres.

1.1.4. La phase de mouvement

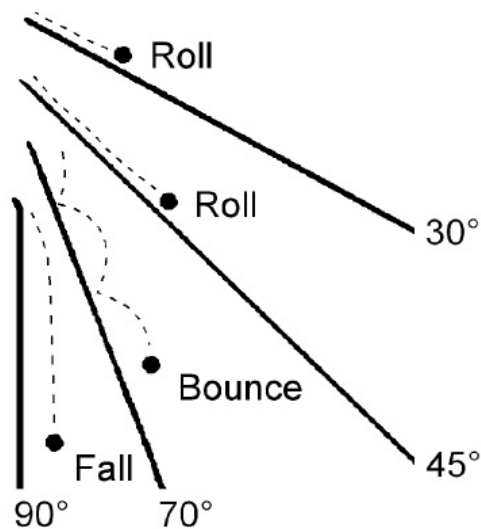


Figure 3 : Types de mouvements de la pierre pendant sa chute, d'après Dorren (2003).

Après le décrochement depuis sa zone source, la pierre va transiter jusqu'à épuisement de son énergie cinétique en aval dans sa zone de dépôt. La propagation de la pierre peut se réaliser selon quatre types de mouvements en fonction de l'angle de la pente (Figure 3) (Dorren, 2003) :

- La chute libre, quand l'angle de pente est supérieur à 70° ;
- Le rebond, quand l'angle de pente est compris entre 45° et 70° ;
- Le roulement, quand l'angle de pente est inférieur à 45° ;
- Le glissement, lors des dernières phases du mouvement, avant l'épuisement total de l'énergie cinétique et l'arrêt de la pierre.

Lors du premier contact au sol, la pierre perd 75 à 86% de son énergie cinétique initiale (Evans et Hungr, 1993; Dorren, 2003) et chaque impact au sol va progressivement faire décroître l'énergie cinétique le mettant en mouvement jusqu'à son arrêt complet. La structure du sol et la végétation présente sur la trajectoire de chute vont aussi influencer sur la dissipation de l'énergie cinétique et par conséquent sur la distance d'arrêt de la pierre. Toutefois, l'arrêt d'une pierre est brutal et ne correspond que rarement à une dissipation progressive de l'énergie (Stoffel, 2005a).

1.1.5. Evaluation de l'aléa « chute de pierres »

L'évaluation « classique » de l'aléa « chute de pierres » repose sur une approche multidisciplinaire qui allie l'analyse géologique et/ou géomorphologique de la zone source, ainsi qu'une analyse des dépôts, à des analyses historiques à partir des archives (Volkwein *et al.*, 2011).

En effet, l'analyse du compartiment rocheux, à travers une étude géologique classique ou avec l'utilisation de méthodes de modélisation multidimensionnelle de la paroi (Ferrero *et al.*, 2009; Santana *et al.*, 2012; Guerin *et al.*, 2013), permet la qualification d'un aléa de rupture déterminant pour la caractérisation de la fréquence et de l'intensité de l'aléa « chute de pierre » à venir (Dussauge-Peisser *et al.*, 2002; Frayssines et Hantz, 2006; Hantz *et al.*, 2014). Les résultats de cette analyse, couplés à un inventaire des chutes et des volumes associés, issu d'une blocométrie des dépôts (Hantz *et al.*, 2014), et/ou de l'utilisation des archives (Dussauge-Peisser *et al.*, 2002; Hantz *et al.*, 2003), ont permis la formulation d'une relation fréquence-intensité des chutes de pierres (Hantz *et al.*, 2003; Picarelli *et al.*, 2005; Hantz *et al.*, 2012).

Cependant, le caractère imprévisible du déclenchement de la rupture et à l'absence de marqueurs de rupture rend ces analyses incertaines (Volkwein *et al.*, 2011; Hantz, 2012). De même, très peu de données d'archives portent sur les chutes de pierres. Généralement, elles ne font état que d'événements marquant par leur grande intensité et par les importantes pertes et dommages provoqués (Ibsen et Brunsden, 1996). En conséquence, d'importantes lacunes existent et nécessitent d'être comblées dans l'évaluation des aléas de faibles et moyennes intensités et de hautes et de moyennes fréquences (Schneuwly, 2009).

Cette lacune historique des événements est d'autant plus marquée dans les zones urbaines et périurbaines exposées aux chutes de pierres où la mobilité des populations tend à rendre difficile la construction d'une mémoire collective du risque (Astrade *et al.*, 2007). Ce phénomène est renforcé par (i) la complexité du processus et par son caractère soudain et imprévisible, (ii) l'emprise spatiale restreinte des événements, (iii) un temps de retour supérieur à l'espérance de vie humaine (Dussauge-Peisser *et al.*, 2002). Cette complexité entraîne une lacune dans la prise en compte du danger par les pouvoirs publics et la population qui tendent à minimiser le risque en le considérant à l'échelle de l'individu (Leroi *et al.*, 2005 ; Hantz *et al.*, 2013).

D'autres méthodes d'analyses ont été utilisées pour évaluer la fréquence et l'emprise spatiale de l'aléa comme l'observation *in situ* des chutes de pierres (Luckman, 1976 ; Douglas, 1980 ; Gardner, 1983) ou l'utilisation de la lichénométrie (McCarroll *et al.*, 2001 ; Winchester et Chaujar, 2002). Cependant ces méthodes se révèlent trop coûteuses et complexes à mettre en place et à maintenir sur le long terme.

1.2. Interactions peuplement forestier – chute de pierres

Des interactions existent entre arbres et chutes de pierres. La nature de celles-ci dépend de la localisation du peuplement par rapport aux différentes zones d'action du processus.



Figure 4 : Une pierre arrêtée dans sa chute par une cèpée d'*Acer opalus* présente sur sa trajectoire au lieu-dit de la Croupe du Plantin, Saint-Paul-de-Varces, Erwan Roussel, 12.03.2014.

Dans les zones de départ, les peuplements forestiers, et la végétation dans son plus grand ensemble, tend à stabiliser certains secteurs par l'ancrage du système racinaire en agissant sur la cohésion des masses rocheuses déstabilisées (ARPA et CEMAGREF, 2008 ; Dorren *et al.*, 2007). Cependant, le système racinaire permet aussi l'infiltration d'eau dans le sol et agit mécaniquement sur les fissures par la pénétration des racines. Un effet de levier a aussi été observé lors de la prise au vent des houppiers. Ce dernier est susceptible de provoquer la chute d'une pierre si l'arbre est présent sur une corniche (ARPA et CEMAGREF, 2008).

Les arbres présents sur la trajectoire de chute d'une pierre sont un obstacle à sa chute (Figure 4). Par l'impact de la pierre sur leur tronc, les arbres participent à la dissipation de l'énergie cinétique de la pierre et tendent par cette interaction à réduire la distance d'arrêt de la pierre. Chaque arbre possède une capacité de dissipation d'énergie propre qui est fonction de son essence, de son diamètre et de la position de l'impact sur le tronc (Dorren et Berger, 2006a).

Par ces interactions, la forêt est un ouvrage naturel de protection passive aux chutes de pierres. Par sa gestion sylvicole raisonnée et sa capacité de régénération, les forêts de protection sont des ouvrages naturels résilients permettant le maintien sur le long terme d'un niveau de protection optimal (Figure 5). (Berger *et al.*, 2002 ; Dorren et Berger, 2006b ; Dorren *et al.*, 2007).

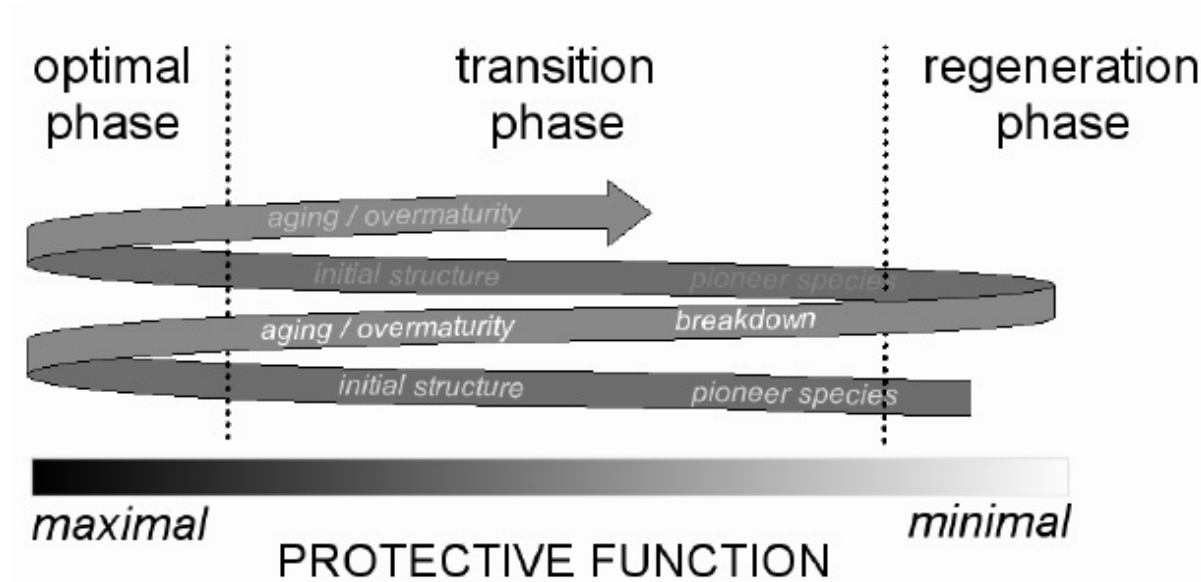


Figure 5 : Cycle d'évolution des peuplements forestiers de protection en relation avec leur niveau de protection d'après Dorren et Berger (2006b).

1.3. Modéliser le processus pour mieux cartographier l'aléa

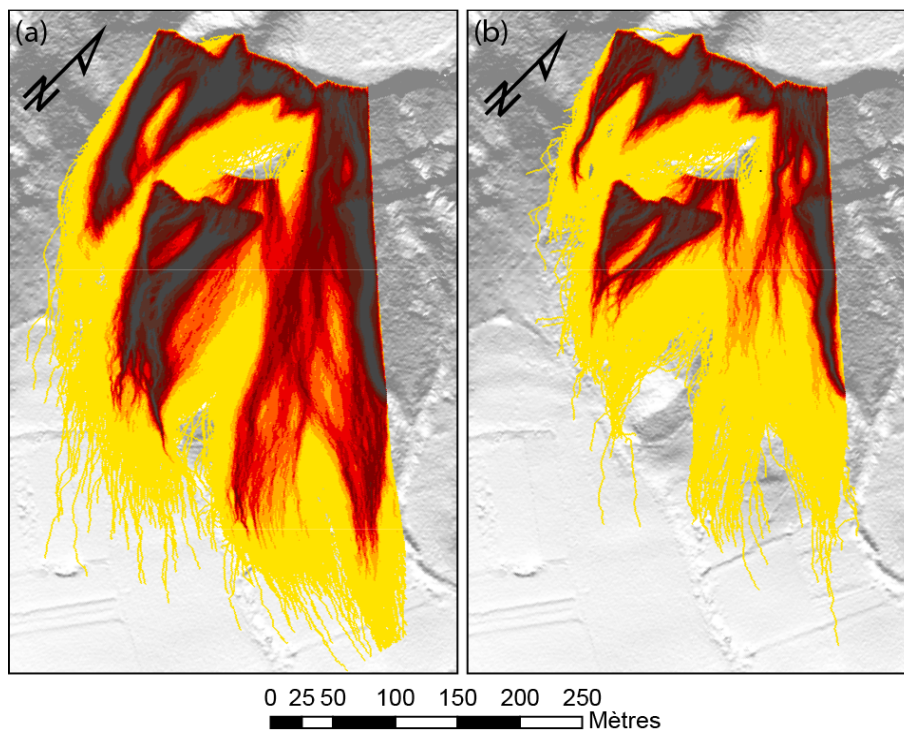
Des modèles de simulations trajectographiques ont été développés pour répondre aux besoins de cartographie de l'aléa malgré l'existence des incertitudes dues aux difficultés d'établir une relation fréquence-intensité fiable (Volkwein *et al.*, 2011). L'objectif de la modélisation du processus et de l'aléa afférent est de simuler la trajectoire des pierres, l'emprise spatiale des chutes par la distance d'arrêt des pierres et le comportement de la pierre en chute selon différents scénarios paramétrables pour permettre une cartographie des zones soumises à l'aléa.

Les modèles de simulations trajectographiques sont basés sur les lois mécaniques régissant le comportement trajectographique de la pierre et sont déterminés à partir de deux approches différentes : empirique et statistique, ou déterministe (Guzzetti *et al.*, 1999; Volkwein *et al.*, 2011). En conséquence, les modèles suivent une des deux approches possibles : déterministe, dite physique ou bien mécanique, ou probabiliste.

Les modèles déterministes reposent sur les lois mécaniques et physiques connues et permettent à tout instant de connaître l'état de chaque composant du système (Kirchsteiger, 1999). Toutefois, ce

type de modèle nécessite une connaissance de toutes les lois physiques qui régissent le processus et sa cinétique ainsi qu'une connaissance poussée du milieu dans lequel se déroule le phénomène. En conséquence, une connaissance accrue du terrain est nécessaire afin de bien paramétrer le modèle.

Les modèles probabilistes reposent sur des calculs stochastiques qui admettent que le phénomène est régi par une distribution probabiliste connue et reproductible (ARPA et CEMAGREF, 2008). Ce type de modèle permet d'introduire un degré d'incertitude dans la simulation et ainsi de s'affranchir de l'observation systématique imposée par l'approche déterministe. L'approche probabiliste est très sensible aux erreurs d'observations et particulièrement aux erreurs systématiques, d'autant plus que leurs influences sur le résultat n'est pas quantifiable. Il est alors nécessaire de réajuster les lois sur les observations de chaque nouveau site d'étude (Guzzetti *et al.*, 2002).



Légende

Classes du nombre de passage de blocs par cellule

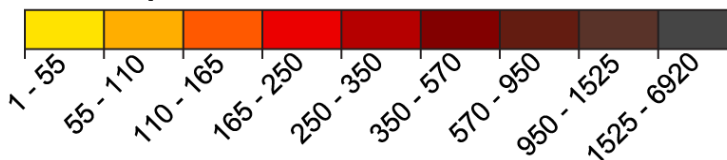


Figure 6 : Simulations trajectographiques de chutes de pierres d'un volume de $0,064\text{m}^3$, (a) sans et (b) avec prise en compte du couvert forestier, issues de *RockyFor3D*, appliquée à la zone d'étude, La Croupe de Plantin, à Saint-Paul-de-Vарces.

Les modèles de simulations se distinguent aussi par l'intégration du terrain dans la simulation : 2D ou 3D. Les modèles deux dimensions permettent une intégration facile du terrain dans les calculs à travers l'utilisation d'un profil de pente et sont en conséquence peu consommateurs de temps de calcul. En revanche, ils se privent de la dispersion latérale des pierres et des informations spatiales associées. Les modèles tridimensionnels intègrent une représentation du terrain plus fidèle à travers l'utilisation d'un modèle numérique de terrain et permettent l'identification de l'emprise spatiale du phénomène et des informations associées. Cependant, ils nécessitent des ressources plus importantes et un temps de calcul plus long (ARPA et CEMAGREF, 2008).

Le modèle *RockyFor3D*, au cœur du programme de recherche à l'origine de cette étude, est un modèle tridimensionnel hybride se basant à la fois sur les équations mécaniques (approche déterministe) et des équations stochastiques (approche probabiliste). C'est aussi le seul modèle prenant en compte l'influence du peuplement forestier sur la propagation des pierres (Dorren *et al.*, 2006; Dorren et Berger, 2012). Les simulations trajectographiques présentées dans la Figure 6 illustrent bien l'influence des forêts de protection sur la propagation des pierres en chute.

Un très grand nombre de modèles existent, ils sont pour partie inventoriés dans les productions scientifiques suivantes : Guzzetti *et al.* (2002), Dorren (2003) et Volkwein *et al.* (2011).

Ces modèles ne sont qu'une reproduction plus ou moins fidèles de la réalité et des processus simulés. Ils nécessitent d'être alimentés et calibrés par des données acquises sur le terrain. Dans le cas des chutes de pierres sur les versants forestiers, l'approche dendrogéomorphologique permet la récolte de données spatialement et temporellement denses nécessaires à l'alimentation et à la calibration des modèles à partir des arbres impactés par l'aléa (Corona *et al.*, 2013; Trappmann *et al.*, 2014).

1.4. La dendrogéomorphologie

La dendrogéomorphologie est une sous-discipline de la dendrochronologie. Elle se focalise sur l'analyse des processus géomorphologiques à travers l'étude des cernes des arbres.

1.4.1. De la dendrochronologie à la dendrogéomorphologie

La dendrochronologie est une méthode de datation absolue. Cette discipline s'appuie sur le fait que les arbres des régions à rythme saisonnier marqué produisent chaque année un cerne de croissance distinct qui se distingue par la variation de teinte, de taille des cellules et de l'épaisseur des parois cellulaires lors de la transition entre le bois final, produit en fin de saison, et le bois initial produit en début de saison (Schweingruber, 1993; Payette, 2010; Stoffel *et al.*, 2010a). Ces cernes sont considérés comme des enregistreurs des variations de croissance de l'arbre (Astrade *et al.*, 2012). Ce

principe est né de l'esprit de Théophraste, père fondateur de la botanique, en 300 av. J.C. La diffusion de ces savoirs a pu se réaliser à travers les travaux de Léonard De Vinci et de Michel De Montaigne durant le XV^{ème} et le XVI^{ème} siècle. Ce n'est qu'avec les travaux d'A.E Douglass, au XX^{ème} siècle que la dendrochronologie s'affirme comme une science et se diffuse largement. Puis ce n'est qu'avec les travaux "Dendrochronological interpretation of geomorphic processes" de Alestalo (1971), qu'apparaît pour la première fois le terme dendrogéomorphologie. Ce même auteur fait reposer cette dernière discipline sur :

- i. la capacité de la végétation ligneuse à réagir aux stress exogènes provoqués par des perturbations et/ou des changements affectant son milieu de croissance ;
- ii. l'enregistrement des réactions de ces végétaux perturbés dans les caractéristiques de leurs cernes annuels de bois et/ou dans des anomalies morphologiques visibles.

La dendrogéomorphologie permet en conséquence de dater les événements passés et de reconstituer leur activité, de reconstituer les changements environnementaux et de spatialiser les processus géomorphologiques (Alestalo, 1971; Astrade *et al.*, 2012; Trappmann *et al.*, 2013).

Schroder (1978, 1980) approfondit la méthode avec la formulation du concept « Process/Event/Reaction ». Ce dernier sera successivement amélioré par Astrade et Bégin (2003) puis par Astrade *et al.* (2012) en « Événement – Changement / Impact / Réponse » (Figure 7). Les arbres sont des témoins des événements passés, leur répartition dans l'espace et leur longévité permettent de reconstruire les événements spatialement, temporellement, ainsi que leur intensité.

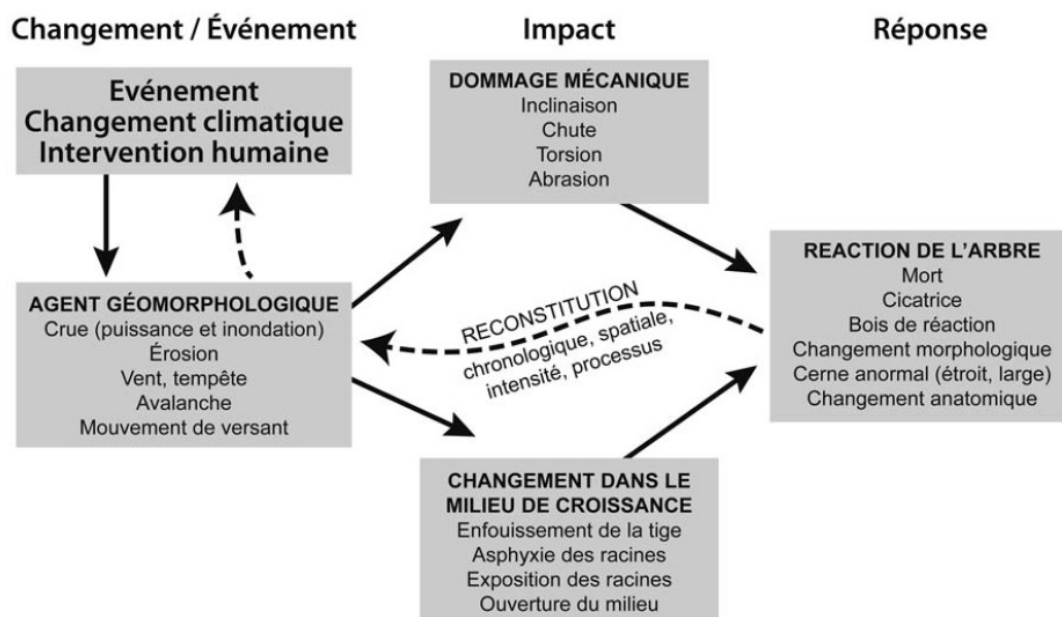


Figure 7 : Concept « Changement / Evènement – Impact – Réponse » de Schroder (1978, 1980) adapté par Astrade et Bégin (2003)

1.4.2. Réactions des arbres aux processus géomorphologiques

Après avoir subi un traumatisme dû à un processus géomorphologique, les arbres produisent une réaction anatomique en compensation (Figure 8). En fonction de la nature du traumatisme subi, quatre réactions anatomiques se distinguent (Stoffel *et al.*, 2010a; Astrade *et al.*, 2012) :

- En cas de décapitation, il y a une chute du rythme de croissance annuel de l'arbre qui concentre son énergie à la reprise de sa croissance apicale ;
- En cas d'impact sur le tronc, l'arbre produit un bourrelet cicatriciel qui se forme plus ou moins rapidement en fonction de l'essence ;
- En cas de déstabilisation de la base de l'arbre, il y a création d'un bois de compression chez les résineux ou d'un bois de tension chez les feuillus qui se caractérise par une dissymétrie de la croissance des cernes (excentricité) et des différences anatomiques au niveau cellulaire ;
- En cas d'élimination des arbres voisins, l'arbre connaît une forte augmentation de son rythme de croissance annuelle grâce à la suppression de la concurrence.

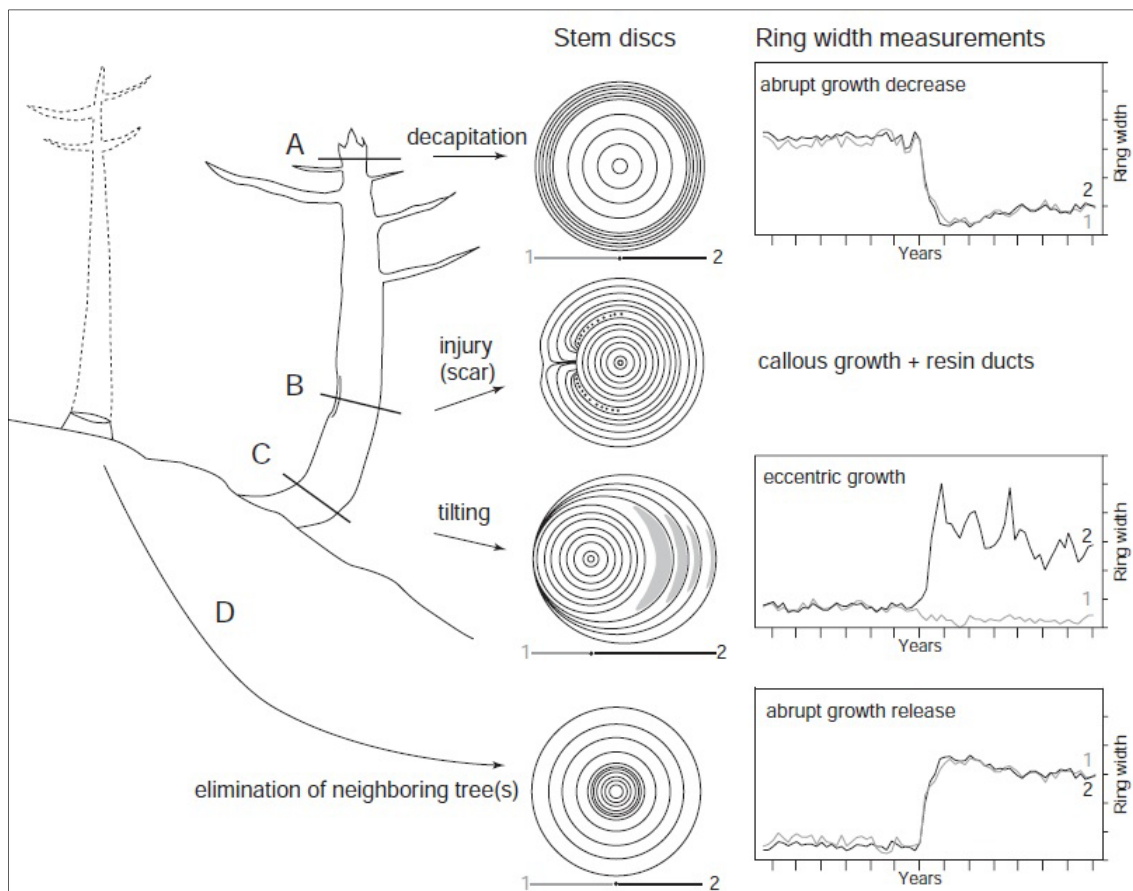


Figure 8 : Réactions morphologiques de la végétation ligneuse selon les perturbations provoquées par les processus géomorphologiques traumatisants, d'après Stoffel (2005a).

Les deux réactions anatomiques généralement provoquées par l'impact d'une pierre sur un arbre sont :

- la production de tissus calleux et cicatriciels couvrant les blessures ;
- la reprise de croissance apicale en réponse à une décapitation provoquée par la propagation sinusoïdale des ondes de choc dans le tronc induites par l'impact d'une pierre (Stoffel *et al.*, 2005a; Dorren et Berger, 2006a).

1.4.3. Evolutions de la dendrogéomorphologie face aux problématiques des chutes de pierres

De nombreuses études portant sur l'évaluation des processus géomorphologiques ont fait l'usage de la dendrogéomorphologie pour reconstruire l'activité passée et l'emprise spatiale des processus, comme les avalanches, les laves torrentielles ou encore les glissements de terrain. Mais seules quelques unes portent sur l'aléa « chute de pierres» (Tableau 1). Un court état de l'art, à l'échelle alpine, concernant ces travaux a été réalisé par Astrade *et al.* (2012).

Les chutes de pierres font l'objet d'étude uniquement depuis le début des années 1990 avec les travaux de Gsteiger (1989, 1993). Ces derniers reposent sur l'usage de 25 sections transversales (prélèvements destructifs) de *Fagus sylvatica* L. et de *Picea abies* (L.) Karst pour dater les chutes de pierres et évaluer l'effet du processus de cicatrisation sur la visibilité des blessures à la surface du tronc (Figure 9). Par la suite, Schweingruber (1996) utilise 30 sections transversales de *P. abies* pour reconstituer la chronologie des chutes de pierres. La thématique abordée par Gsteiger est reprise par les travaux de Stoffel (2005b) qui démontre, en utilisant 306 sections transversales d'*Abies alba* Mill., de *F. sylvatica* et de *P. abies*, que 70% des blessures restent visibles à la surface des troncs. Ensuite, Stoffel et Perret (2006) observent que les cicatrices restent plus longtemps visibles sur les essences avec une faible épaisseur d'écorce que sur les essences avec une écorce épaisse et structurée en écailles.

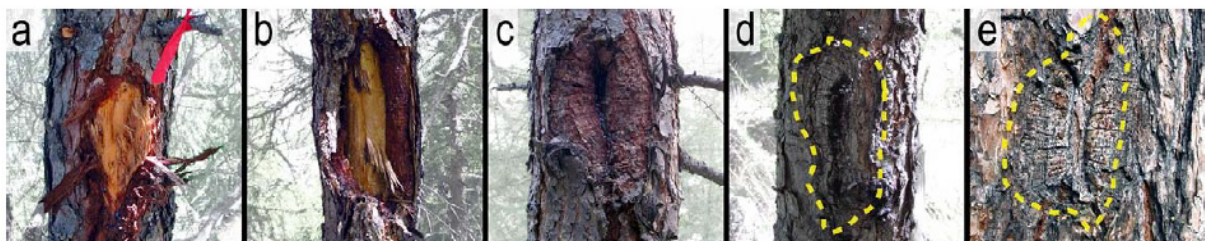


Figure 9 : Stades de cicatrisation du *Larix decidua* après l'impact d'une pierre à l'année n : (a) année n ; (b) $n+4$ ans ; (c) $n+9$ ans ; (d) $n+21$ ans ; (e) $n+91$ ans. Les pointillés indiquent les limites de la blessure initiale, d'après Trappmann *et al.* (2013).

Ce n'est qu'avec les travaux de Stoffel *et al.* (2005a, 2005b) que les premières évaluations de l'aléa « chute de pierres » par dendrogéomorphologie furent réalisées pour l'évaluation de leurs intensités, leurs fréquences et leurs emprises spatiales. Ces études reposent sur un échantillonnage exhaustif (270 sections transversales prélevées sur 18 arbres et utilisation de 564 carottes, prélèvements non-destructifs, issus de 135 *Larix decidua* Mill.). Ces derniers ont permis la reconstitution de l'activité passée des chutes de pierres sur le versant ouest du Täschgufer depuis les années 1600 par la détection et la datation de 741 événements. L'utilisation de l'approche par carottage a permis l'échantillonnage d'un plus grand nombre d'individus et a appelé le développement de nouvelles analyses prenant mieux en compte les réactions de l'arbre aux impacts dans l'anatomie de son bois. Stoffel *et al.* (2005a) puis Schneuwly et Stoffel (2008) ont démontré la précision de cette même approche en reconstituant l'activité saisonnière des chutes de pierres en milieux de montagne. Ces études reposent sur l'identification des canaux résinifères traumatiques issus de la réaction de certaines essences résineuses. Cependant, bien que plus facile d'emploi que l'extraction de section transversale, l'approche par carottage ne permet pas un échantillonnage systématique à cause de ses coûts temporel, technique et financier importants. La sélection des tiges les plus impactées lors de l'échantillonnage provoque dès lors un biais dans la reconstitution de l'activité de l'aléa. Les derniers développements méthodologiques portent sur l'approche par dénombrement de blessures. Cette dernière repose sur les travaux de Stoffel (2005b) et de Stoffel et Perret (2006) à propos de la persistance des cicatrices sur la surface des troncs. Cette méthode consiste en un simple décompte des blessures sur les arbres du site d'étude. Elle permet la reconstitution de la fréquence de chutes par croisement de l'âge et du nombre de cicatrices pour chacune des tiges échantillonnées. Trappmann et Stoffel (2013) ont démontré que cette approche reconstituait des fréquences similaires à l'approche classique par carottage en comparant les deux méthodes sur un même site d'étude.

Les études en dendrogéomorphologie ont rarement fait état de l'utilisation des essences feuillues comme bioindicateur pour la reconstruction de l'activité passée des chutes de pierres (Tableau 1). Ces essences sont plus difficiles à lire que les résineux à cause de leur configuration cellulaire différente. De même, le caractère montagnard et alpin des sites d'études ont donné peu d'occasions aux scientifiques d'utiliser les essences feuillues (Tableau 1). Les premières études utilisant les feuillus comme indicateur biologique principal ont été effectuées par Moya *et al.* (2010a) puis Šilhán *et al.* (2011, 2012) avec les genres *Quercus*, *Acer* et *Fagus*. De même, à cause du caractère montagnard et alpin des sites d'études, les recherches ont rarement été faites dans des espaces à forte vulnérabilité en aval.

Auteurs	Année	Pays	Essences	Nombre d'arbres utilisés	Nombre d'échantillons sélectionnés	Stratégie d'échillonnage	Nombre d'événements détectés	Altitude du site d'étude
Gsteiger	1989, 1993	Suisse	<i>Picea abies</i> , <i>Fagus sylvatica</i>	7	25	Sections transversales	56	n.c
Schweingruber	1996	Suisse	<i>P. abies</i>	30	30	Sections transversales	56	n.c
Stoffel <i>et al.</i>	2005a	Suisse	<i>Larix Deccidua</i>	18	270	Sections transversales	180	2100 - 2600 m
Stoffel <i>et al.</i>	2005b	Suisse	<i>L. Deccidua</i>	135	564	Carottages	741	1450 - 2100 m
Perret <i>et al.</i>	2006	Suisse	<i>P. abies</i>	33	33	Sections transversales	250	1240 m
Schneuwly and Stoffel	2008a	Suisse	<i>L. Deccidua</i> , <i>P. abies</i> , <i>Pinus Cembra</i>	191	937	Carottages, sections transversales	754	1390 - 1610 m
Schneuwly and Stoffel	2008b	Suisse	<i>L. Deccidua</i> , <i>P. abies</i> , <i>P. Cembra</i>	32	123	Sections transversales	149	1470 - 1610 m
Migon <i>et al.</i>	2010a	Pologne	<i>P. abies</i>	32	62	Coins, sections transversales	n.c	936 m
Moya <i>et al.</i>	2010b	Andorre	<i>Quercus robur</i> , <i>Quercus ilex</i>	276	375	Coins, sections transversales	73	980 - 2332 m
Šilhán <i>et al.</i>	2011	République Tchèque	<i>Acer pseudoplatanus</i> , <i>F. sylvatica</i> , <i>P. abies</i> , <i>Sorbus aucuparia</i> , <i>Ulmus glabra</i>	283	1132	Carottages	989	1276 m ; 1083 m ; 1323 m
Stoffel <i>et al.</i>	2011	Mexique	<i>Pinus hartwegii</i>	24	86	Carottages, sections transversales	53	> 4000 m
Šilhán <i>et al.</i>	2013	Ukraine	<i>Pinus nigra ssp. Pallasiana</i>	114	456	Carottages	703	430 - 1140 m
Trappmann and Stoffel	2013	Autriche	<i>P. abies</i> , <i>F. sylvatica</i>	83	194	Carottages, Dénombrement de blessures	1417	770 - 900 m
Corona <i>et al.</i>	2013	Suisse	<i>L. Deccidua</i> , <i>Betula penula</i> , <i>Corylus avellana</i> L., <i>Fraxinus sp.</i> , <i>Sorbus oria</i> (L.) Crantz	133	229	Carottages, Dénombrement de blessures	737	1140 - 1480 m
Trappmann <i>et al.</i>	2014	Suisse	<i>B. pendula</i> Roth, <i>L. deccidua</i> Mill., <i>Populus tremula</i> , <i>P. abies</i> Karst., <i>Fraxinus excelsior</i> , <i>Salix caprea</i> , <i>A. pseudoplatanus</i> , <i>Alnus incana</i> , <i>S. aucuparia</i> , <i>Corylus avellana</i> , <i>S. oria</i> Crantz, <i>Pinus ovulum</i>	1260	202	Carottages, Dénombrement de blessures	488	1350 - 1600 m
Favillier <i>et al.</i>	2014	France	<i>A. opalus</i> , <i>Q. pubescens</i>	848	0	Dénombrement de blessures, inventaire forestier	1230	470 - 630 m

n.c.: information non connue ou indisponible

Tableau 1 : Principales recherches en dendrogéomorphologie dans le domaine des chutes de pierres.

1.5. Positionnement de l'étude dans son champ scientifique

Cette étude propose un ensemble d'apports et de réflexions méthodologiques et pratiques pour la résolution des lacunes mises en avant dans cet état de l'Art. Les spécificités de l'étude sont mises en avant, en gras, dans le Tableau 1.

Tout d'abord, cette étude repose sur la cartographie systématique des arbres du site d'étude à travers l'utilisation d'un inventaire forestier exhaustif. Ce dernier est couplé avec une relation âge-diamètre établie par dendrochronologie et permet une datation relative des tiges étudiées du versant selon leur essence et la structure spatiale des tiges. Ces méthodes reposent sur deux essences de feuillus communs à l'étage collinéen : *Acer opalus* Mill. (Érable à feuilles d'obier) et *Quercus pubescens* Willd. (Chêne pubescent).

Ensuite, cette étude propose une réflexion sur la sensibilité des arbres aux impacts mécaniques. Celle-ci est alimentée par l'utilisation d'une analyse d'écorce comme piste de recherche. De même, cette étude propose une réflexion pratique sur l'évaluation des aléas à faible et moyenne intensité mais à forte et moyenne fréquence, dont l'emprise spatiale chevauche les espaces périurbains potentiellement vulnérables.

Enfin, c'est la première étude du genre à être réalisée dans les Alpes françaises.

2. Potential of two submontane broadleaved species (*Acer opalus*, *Quercus pubescens*) to reveal spatio-temporal patterns of rockfall activity

Adrien Favillier ^{a,*}, Jérôme Lopez-Saez ^b, Christophe Corona ^c, Daniel Trappmann ^d, David Toe ^b, Markus Stoffel ^{d,e}, Georges Rovéra ^a, Frédéric Berger ^b.

* Correspondence to: Adrien Favillier, Institut de Géographie Alpine, Laboratoire Politiques publiques, Action Politique, Territoire (PACTE) UMR 5194 du CNRS, Université Joseph Fourier, 14 bis avenue Marie Reynoard, 38100 Grenoble, France. E-mail: adrien.favillier@e.ujf-grenoble.fr

^a Institut de Géographie Alpine, Laboratoire Politiques publiques, Action Politique, Territoire (PACTE) UMR 5194 du CNRS, Université Joseph Fourier, 14 bis avenue Marie Reynoard, 38100 Grenoble, France

^b Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture (Irstea), UR EMGR, 38402 St-Martin-d'Hères cedex, France

^c UMR6042 Geolab, Université Blaise Pascal, 4 rue Ledru, F-63057 Clermont-Ferrand, France.

^d Dendrolab.ch, Institute of Geological Sciences, University of Berne, Baltzerstrasse 1+3, CH-3012 Berne, Switzerland.

^e Section of Earth and Environmental Sciences, University of Geneva, rue des Maraîchers 13, CH-1205 Geneva, Switzerland.

Abstract

Long-term records of rockfalls have proven to be limited, especially in urbanized areas where inventories are largely absent and the risk associated with rockfall events increases in proportion to urbanization. On forested slopes, tree-ring analyses may help, generally providing annual data on past rockfall activity over long periods. Yet, the reconstruction of rockfall chronologies has been hampered in the past by the paucity of studies that include broadleaved tree species, which are in fact quite common in rockfall-prone environments. In this study, we test the sensibility of two common, yet unstudied, broadleaved species - *Quercus pubescens* Willd. (*Qp*) and *Acer opalus* Mill. (*Ao*) - to rockfall impacts. The approach is based on the systematic mapping of trees and the counting of visible scars on the stem of both species. Data are presented from a site in the Vercors massif (French Alps), where rocks are frequently detached from Valanginian limestone marl cliff. We compare recurrence interval maps obtained from both species and two different tree structures (single trees vs. coppice stools) based on the Cohen Kappa coefficient and the Mean Absolute Error.

A total of 1230 scars were observed on the stem surface of 847 *A. opalus* and *Q. pubescens*. Both methods yield comparable data on the spatial distribution of relative rockfall activity with similar downslope decreasing recurrence intervals. Yet, recurrence intervals vary significantly according to tree species and tree structure. The recurrence interval observed on the stem surface of *A. opalus* exceeds that of *Q. pubescens* of > 20 year in the lower part of the studied plot. Similarly, recurrence interval map derived from *A. opalus* coppice stools, dominant at the stand scale, does not exhibit a clear spatial pattern. Differences between species may be explained by the bark thickness of *Q. pubescens* that was

demonstrated to rise at twice the rate of *A. opalus* though constituting a mechanical barrier buffering low energy rockfalls, and avoiding injury to underlying tissues. Reasons for difference between tree structure are related to the clustered coppice-specific spatial stem distribution in clumps that could result on one hand in bigger gaps between clumps decreasing the probability of tree impacts for travelling blocks. On the other hand, data indicate that several scars on the bark coppice stools stem from the same impact and thus may lead to an overestimation of rockfall activity.

Keywords

Forest–rockfall interactions; Coppice stools; Dendrogeomorphology; Recurrence intervals; French Alps; Submontane broadleaved species.

2.1. Introduction

Rockfall is defined as a free-falling, bouncing or rolling rock originating from cliff faces with a volume usually below 5m³ (Berger *et al.*, 2002; Dorren *et al.*, 2005). It is a common and dangerous natural process in steep environment which led to important economic losses and casualties (*e.g.* Hantz *et al.*, 2003). In principle, rockfall hazard can be defined as the probability that a specific location on a slope is reached by a rockfall of given magnitude (Volkwein *et al.*, 2011). The frequency of events of a given magnitude (volume) can be evaluated using a statistical analysis of inventories of rockfall events (*e.g.* Hungr *et al.*, 1999), taking into account the definition of suitable magnitude-frequency relationships (*e.g.* Dussauge-Peisser *et al.*, 2002). Although this approach is well established in the field of natural hazards (*e.g.*, for earthquakes), its application to rockfall hazards is limited by the lack of historical archives for most sites and the spatial and temporal heterogeneity of available inventories (*e.g.* Sass and Oberlechner, 2012).

If talus slopes or the runout fringe of boulders beyond the talus foot are covered with forests, individual rockfall fragments may damage or even destroy trees along their trajectory (Stoffel, 2006). Woody vegetation damaged by rockfalls or growing on talus provides a valuable means for dating and interpreting past rockfalls with high accuracy and over long periods of the past (Stoffel *et al.*, 2010b; Šilhán *et al.*, 2011). Dendrogeomorphic methods (Alestalo, 1971; Schroder, 1978) aim at inferring data on past processes from information preserved in tree rings. Previous tree-ring research primarily focused on conifers for the reconstruction of rockfall frequencies (Stoffel *et al.*, 2005b; Perret *et al.*, 2006b), the spatial distribution and magnitude of rockfalls (Stoffel *et al.*, 2005b), the triggering of rockfalls resulting from several climatic parameters (Schneuwly and Stoffel, 2008; Šilhán *et al.*, 2011) or on the comparison of observed rockfall data with activity predicted by three-dimensional, process-based models (Corona *et al.*, 2013). Occasionally but very rarely, rockfall research has included

broadleaved trees growing on talus slopes to document recent activity (Moya *et al.*, 2010a; Šilhán *et al.*, 2011) mainly owing to a complex wood structure of broadleaved species that rendered tree-ring analysis challenging in the absence of specific anatomical responses (Arbellay *et al.*, 2012) as well as the greater age and the dominance of conifers in mountain regions where rockfall occur.

This gap is regrettable for three different reasons: (i) the dominance of broadleaved species from colline and sub-montane altitudes where most of the rockfall events threatening infrastructure and structures occur (Sass and Oberlechner, 2012); (ii) the thin and smooth bark structure of broadleaved trees that facilitate the wounding and enhance the visibility of scars on the stem surface (Stoffel and Perret, 2006; Stoffel, 2005b); (iii) the suitability of broadleaved species with regard to the scar count method - which simplify tree-ring analysis as it enables estimating rockfall frequencies by simply counting visible scars on the stem surface - has, to date, only been demonstrated for beech (*Fagus sylvatica*) (Trappmann and Stoffel, 2013).

The primary objective of this study was to test the sensibility of two common, yet unstudied, broadleaved species - *Quercus pubescens* (*Qp*) and *Acer opalus* (*Ao*) - to rockfall impacts. Furthermore, this study explores the influence of bark thickness and structure on the recorded rockfall frequency by comparing results obtained with, a smooth- (*Ao*) and a thick- (*Qp*) bark species. Results were derived from the exhaustive mapping of 847 *Ao* and *Qp* trees from a 0.6 ha plot, the counting of 1230 visible scars on the tree stem surface and bark thickness measurements. We demonstrated that the rockfall patterns derived from both species vary considerably, especially in the lower part of the studied plot owing to differences in bark thickness.

2.2. Study site

The study site (45°05'02"N, 5°39'16"E) is located on the east slope of the Vercors massif (French Alps, Figures 1a and 1b) in the vicinity of Saint-Paul-de-Varces (2500 people) at the locality of the "Croupe du Plantin". The elevation of the studied slope ranges from 470 to 630 m *asl*. Rockfall source area is a ~30m high, south-east facing Valanginian limestone marl cliff with a narrow joint system leading to considerable fragmentation and small mean rock sizes, with volumes ranging from a few dm³ to one m³ (Hantz *et al.*, 2014). According to the high resolution DEM derived from airborne LiDAR data, quaternary rockfalls have formed a ~240m long debris talus (downslope gradient from 39° to 25°, Figure 2b) bordered by two interfluves (Figure 2a). At the apex, the slope morphology is characterized by a slight depression (depth ~ 2m), splits in two ~30m wide couloirs that channelize falling rock fragments downslope (Figures 2d and 2e).

The permanent plot has an area of 0.6 ha and is covered by a dense coppice forest stand (Figures 1c and 1d) (density: ~2000 trees.ha⁻¹) predominantly composed of *Ao* and *Qp* mixed with *Sorbus aria*

(L.) Crantz (Common whitebeam), *Acer campestre* L. (Field maple) and *Fraxinus excelsior* L. (Common ash). Frequent scars on the stem surface clearly evidence rockfall activity (Figures 1e and 1f). Mean annual precipitation (1961-2013) at the Grenoble (45°09'58"N 5°45'58"E, 220m) weather station located 10 km northeast of the study site is of 934 mm yr⁻¹. Mean annual temperature is 12.5°C with 64 d.yr⁻¹ of freezing. Rock fragments are dislodged from the cliff along pre-existing or new discontinuities and triggering mechanisms of rockfalls include freeze–thaw cycles of interstitial water (Matsuoka and Sakai, 1999) and intense rainfall (Cardinali *et al.*, 2006).

The municipality of Saint-Paul de Varcès is severely exposed to rockfall hazards - two major collapses at the beginning of the 17th century and in December 2008 are documented in historical archives – and vulnerability increased rapidly since the 1950's owing to rapid periurban expansion in the Grenoble region (Astrade *et al.*, 2007). As a consequence, rockfall hazard assessment is primarily of importance for local stakeholders and policy makers.

2.3. Material and methods

In this study, two different broadleaved species, *Acer opalus* and *Quercus pubescens* have been used to assess of past rockfall activity. The "Croupe du Plantin" permanent plot was selected such as (i) both species are present at the same site and evenly distributed, (ii) rockfalls left numerous visible impacts on tree stems (Figures 1e and 1f) and (iii) no other geomorphic processes caused injuries to trees. On this slope, the recorded rockfall frequency was evaluated through a five-step procedure including (i) the counting scar method on a permanent sample plot (psp) (ii) the assessment of tree age based on age-diameter regression models, (iii) the computation of individual recurrence intervals and (iv) the comparison of results for each species based on the Mean Absolute Error (MAE) and the Cohen Kappa coefficient. In a final step, (v) the influence of bark on the recurrence intervals computed from each species was investigated through bark thickness and structure analyses.

2.3.1. Tree plot and counting scar method

At the study site, virtually all trees show externally visible growth anomalies in the stem resulting from past rockfalls in the form of injuries. As scars represent the most accurate and reliable growth disturbance (GD) to date past rockfalls in tree-ring records (Stoffel, 2005b; Schneuwly and Stoffel, 2008), we actively searched for visible stem wounds. In order to precisely assess spatial and temporal patterns of past rockfall activity, trees with a diameter at breast height (DBH) >5 cm were systematically mapped in a 50*120 m tree plot orientated perpendicular to the line of maximum gradient (Figure 3). The position of each tree was determined (+/- 10 cm) using a sonic rangefinder, a compass, and an inclinometer. The tree species as well as information about the tree structure (single stem vs. coppice stools) likely to have an impact on the mechanical behaviour of the tree (Jancke,

2012) were also recorded. All trees and associated database were positioned in a geographical information system (*ArcGIS 10.1*, 2012; Kennedy, 2009) as geo-objects.

Trappmann and Stoffel (2013) demonstrated the reliability of the counting scar method to reconstruct spatial pattern of rockfall activity. In a second step, we though employed this method requiring less time and efforts to estimate individual rockfall frequency for each of the individuals from the tree plot. Recent scars were identified according to their fresh appearance, chipped bark, or injured wood. Wounds in the healing process are not yet closed and were identified based on the overgrowing callus tissue and overgrowing wood that is sealing the injuries from the border toward the center (Stoffel and Perret, 2006). Older completely healed injuries, more difficult to detect visually, were identified by swelling and blisters on the stem surface. Extremely long, vertical scars or scars <3 cm long were excluded to avoid misclassification with e.g. injuries caused by branch breakage (Perret *et al.*, 2006a).

2.3.2. Development of age-diameter regression models

In a second step, linear diameter-age regression models (Rozas, 2003) were built for *Ao* and *Qp*. For that purpose, a total of 90 undisturbed trees (41 *Qp*, 49 *Ao*) with a DBH ≥ 10 cm were cored using a Pressler increment borer. Trees were selected according to 5 diameter classes, representative of the tree plot, and discriminated between single trees and coppice stools. The samples were analysed and data processed following standard dendrochronological procedures (Bräker, 2002). In the laboratory, tree rings were counted using a digital LINTAB positioning table connected to a Leica stereomicroscope. Missing rings toward the pith were estimated from ring curvature (Villalba and Veblen, 1997). Data from linear regression models were used to estimate ages for trees of the plot where scars were counted on the stem surface and the DBH has been measured.

2.3.3. Calculation of rockfall recurrence intervals

Traditionally used for avalanche zoning (e.g. Schläppy *et al.*, 2014) and more recently in rockfall studies (Šilhán *et al.*, 2013; Trappmann *et al.*, 2013), the recurrence interval is defined as the average time period between two successive rockfall events. Individual recurrence intervals (R_i) were calculated for each tree *T* as (Šilhán *et al.*, 2013):

$$R_{iT} = A_T / S_{cT} \quad (1)$$

where A_T represents the age of tree *T* estimated from age-diameter models (Figure 4) and S_{cT} the number of scar counted on the stem of tree *T*.

In order to visualize spatial patterns of recurrence intervals and to remove potential outliers, trees were clustered into 10*10 m cells (n=54). At each cell C, average recurrence interval Ri_c was computed as the arithmetic mean of Ri_T of trees (N_T) located in C as:

$$Ri_c = Ri_T / N_T \quad (2)$$

At each cell, a total of five different Ri_c involving all trees, *Ao*, *Qp*, single stems and coppice stools were successively computed.

2.3.4. Comparison of *Ao* and *Qp* recurrence intervals

At the slope scale, the Cohen's Kappa coefficient (Smeeton, 1985) was computed in order to compare the similarity of maps derived from *Ao* and *Qp* trees. Cohen's kappa (k) measures the agreement between two raters (species in our case) which each classify N items (cells) into C mutually exclusive categories (classes of recurrence intervals) as:

$$k = \frac{Pr(a)/Pr(e)}{1-Pr(e)} \quad (3)$$

where $Pr(a)$ is the relative observed agreement among species, and $Pr(e)$ is the hypothetical probability of chance agreement, using the observed data to calculate the probabilities of each species distributed randomly in each class of recurrence interval. According to Landis and Koch, (1977), k values < 0 indicate no agreement, 0–0.20 slight, 0.21–0.40 fair, 0.41–0.60 moderate, 0.61–0.80 substantial, and 0.81–1 almost perfect agreement

At the cell scale, Mean Absolute Error (MAE) was computed for each cell c containing both species (Corona *et al.*, 2013; Trappmann and Stoffel, 2013,) for three pairs of maps (including all morphologies, single stem and coppice stool) as:

$$MAE_c = Ri_c(Qp) - Ri_c(Ao) \quad (4)$$

where $Ri_c(Qp)$ and $Ri_c(Ao)$ represent the mean recurrence interval of rockfalls computed from *Qp* and *Ao* in cell c. Results from Eq. (3) were accepted if MAE_c remained within the range of ±10 yr.

2.3.5. Bark thickness analysis

Trappmann and Stoffel (2013) suggested that bark structure and the genetic capability of trees to overgrow injuries could explain the variations in the mean number of impacts recorded by *Picea abies* and *Fagus sylvatica*. In a final step, in order to assess the influence of bark on reconstructed Ri , the bark thickness of 102 *Qp* and *Ao* selected according to 5 diameter classes, representative of the tree plot, was recorded using a Suunto bark gauge with a precision of 1 mm (West, 2009). At the same time, the DBH of each tree was recorded using a Zimmer diameter tape. Additionally, wedges were

extracted from 8 trees, 4 *Qp* (*Qp1* – *Qp4*) and 4 *Ao* (*Ao1* – *Ao4*) of different DBHs (7.5 – 39 cm). Wedges were scanned at a resolution of 1200dpi to characterize the main anatomical differences between both species (Quilhó *et al.*, 2013).

2.4. Results

2.4.1. Structure of the forest plot: a mixed *Acer opalus* – *Quercus pubescens* forest stand

At the plot scale, a total of 847 trees were mapped (mean DBH: 15.5±6.0 cm) amongst which 441 *Qp* (52.1%, mean DBH: 17.6±5.9 cm) and 406 *Ao* trees (47.9%, mean DBH: 13.2±6.1 cm)(see Table 1 for a complete description) heterogeneously distributed in the cells (Figures 4 and 5). On a morphological level, the plot is composed of 403 single stems (47.6%) mainly *Qp* trees (77%) and 444 coppice stools with a majority of *Ao* trees (70 %).

The regression models established for both species and tree structures are statistically significant (r^2 ranging between 0.63 and 0.7, $p < 0.05$) with comparable regression slopes (from 1.6 to 2.1 cm.yr⁻¹) though enabling to derive reliable tree ages from tree diameters (Figure 4). According to these models, the mean age of the forest stand, computed from 847 mapped trees, is 41±11.6 yr. The oldest tree reached breast height 86 years ago while the youngest one was only 23 yr old.

2.4.2. Spatio-temporal patterns of rockfall activity

Based on the counting scar method, a total of 1230 scars were recorded on stem surfaces (Table 1, Figure 5). The mean number of scars per tree is 1.5±2.0. A total of 309 trees (36%) present no visual evidence of past impact. On a spatial plan, the distribution of impacted trees exhibits a strong downward gradient (Figure 5). The mean number of scars revealed by the counting scar method though gradually decreases from 3±2.7 scars per tree in the upper third of slope (cells A-D) to 1.5±1.8 scars per tree in the central compartment of the plot (cells D-H), reaching 0.7±0.9 in the lower third of the plot (cells I-L). Similarly, most impacted trees (>9 scars) mainly located in the upper half of the plot (A-F, Figure 5) whereas the number of stem without impact steadily increases from 23 (13%) in the upper third of the plot to 178 (54%) in the lower third. According to the linear regression models established for both *Ao* and *Qp*, tree aged 46.4±11.7 yr, 47±11.6 yr and 47±11.7 yr in the upper, central and lower third of the plot, respectively. No clear trend was discernible in tree age.

Coupling the longitudinal gradient of impacts with the random distribution of tree ages result in a clear spatial downward trend of the recurrence intervals (R_i) ranging from < 20 years in the upper part of the plot (A-F, Figure 5, min <10 yr in cells B4 and B5) to >40 years in the lower cells (G-L, max > 60 yr in cell K2). Laterally, R_i reference map derived from 847 trees (Refmap, Figure 5) shows two

preferential rockfall paths from E1 to K1 and from E4 to L4 roughly corresponding to the topographic depressions. Several unwounded tree in cells H3 to L2 and L3 corresponds to the interfluvial separating these couloirs (Figures 2c-e).

2.4.3. Influence of tree species on the reconstructed patterns

Scars recorded on the stem surface are equally divided between *Qp* (601, Mean: 1.4 ± 1.8 scar.tree⁻¹) and *Ao* (629, Mean: 1.5 ± 2.1 scar.tree⁻¹) trees (Table 1) with maximum per sampled tree of 11 and 17 and comparable downslope gradients (3-0.65 scar per tree for *Qp*, 3.2-0.75 scar per tree for *Ao*, Table 2). On average, *Qp* trees are older (52 ± 9.4 yr) than *Ao* trees (42 ± 12.3 yr).

At the slope scale, $Ri(Qp)$ (41 yr) is higher than $Ri(Ao)$ (32 yr). $Ri(Qp)$ map (Figure 6a) is roughly organized into three parallel stripes (A-F, G-J, K-L) of increasing Ri , ranging from 10-20 years in the upper stripe to >60 years at the lower portion of the plot. A bimodal pattern is observed on $Ri(Ao)$ map (Figure 6b) with $Ri_c(Ao) < 20$ yr in 19 out of 23 cells at the half upper part of the slope (A-E) and $Ri_c(Ao) > 30$ yr in 90% of cells below 550 m asl (H-L). The kappa coefficient reaches 0.08 though revealing a slight agreement between maps obtained from both species.

The numbers of scars for individual trees can vary significantly within the same sector as a result of the small-scale variability of rockfall processes. Nevertheless, a comparison of both approaches on the basis of grid cells as presented in Figure 6c suggests that the variation between both species is acceptable in a 27 out of 53 of cells. Cells where *Qp* yields higher Ri_c are located in the upper third of the slope (D2, E4, F1) and mainly result from small (D2) or different interspecies sample sizes (E4). Conversely, cells where *Ao* yields higher Ri_c are scattered throughout the plot (23 cells out of 54) with maximal differences (>40 yr) observed in the lowest part (J, K, L).

2.4.4. Influence of tree structure on the reconstructed patterns

Distinction between single stems and coppice stools permits to investigate the influence of tree structure on Ri maps. Comparable statistical results are obtained for both species (Table 1) with respect to the mean number of scar per trees while *Qp* (single stem and coppice stools) tree age and Ri are 10 years higher than *Ao* trees. Interspecies comparison (table 3) reveals major differences ($k < 0$) in results between Ri maps derived from single stems (Figures 7a, 7b) mainly resulting from lower $Ri(Ao)$ especially in the lowest part of the slope (K-L, Figure 7c). Similarly, a slight agreement is observed between Ri maps computed from coppice stools (Figures 8a, 8b) resulting from cells where *Ao* yields higher Ri_c scattered throughout the plot (Figure 7c). Conversely, intra-species comparisons are characterized by higher degrees of similarity (k ranging between 0.31 and 0.7).

Finally, Cohen's Kappa indices reveal that Ri maps from *Qp* and single stem of *Ao* are in fair agreement ($k \sim 0.3$) with Refmap and should be preferred to *Ao* coppice stools that lead to a complete absence of agreement (Table 3).

2.4.5. Bark thickness analysis

In order to assess the influence of bark thickness on the reconstructed recurrence intervals from both species, a total of 102 trees selected according to 5 diameter classes, representative of the tree plot, (Table 4) were gauged. The mean bark thickness of sampled *Qp* was 14 ± 4.0 mm (min: 8 mm, max: 24 mm) for *Ao* and 4 ± 2.1 mm (min: 1 mm, max: 10 mm) for *Ao*. The regression models established for both species and tree morphologies are statistically significant ($r^2(Qp)=0.55$, $r^2(Ao)=0.77$, Figure 9a). Regression slopes (0.44 cm.yr^{-1} for *Qp*, 0.2 cm.yr^{-1} for *Ao*) reveals *Qp* bark rises at twice the rate of *Ao*. Similarly, the bark thickness of *Qp* is more than twice that of *Ao* in any class.

Additionally, anatomical analysis of the sampled wedges demonstrates that species are characterized by different bark structures: *Qp* has a rough and thick bark with a pyramidal outer bark (rhytidome) whereas *Ao* is characterized by thin outer bark. *Qp3* and *Ao1* clearly illustrated these differences: *Qp3* (Figure 9b, diam: 31.4 cm) has a 17.5 mm thick bark composed of a 4.7 mm thick phloem, a 1.9 mm thick periderm and a 10.8 mm thick rhytidome. Conversely, *Ao1* (Figure 9c, diam: 28.3 cm) has a 5.5 mm thick bark composed of three distinct layers: a 3.9 mm thick phloem, a 1 mm thick periderm and a 0.6 mm wide cork.

2.5. Discussion

2.5.1. Reliability of spatio-temporal patterns of rockfall activity derived from *Ao* and *Qp*

Long-term records of rapid mass movements, such as rockfalls have proven to be limited, especially in urbanized areas where inventories are largely absent (Volkwein *et al.*, 2011) and the number of events increases in proportion to urbanization (Baillifard *et al.*, 2004). In these areas, it is necessary to find ways that allow one to reconstruct precisely past rockfall activity. On forested slopes, dendrogeomorphology is a reliable alternative that allows one to reconstruct past rockfall activity in the absence of any inventory or clear morphological evidence, such as scree slopes or isolated blocks (Volkwein *et al.*, 2011). Yet, with a few exceptions (Moya *et al.*, 2010a; Šilhán *et al.*, 2011) broadleaved trees did not receive much attention in tree-ring reconstruction, especially at the submontane level corresponding to urbanized areas. In the study presented here, we tested the robustness of two broadleaved species, – *Quercus pubescens* (*Qp*) and *Acer opalus* (*Ao*) (Csaikl *et al.*, 2002; Tissier *et al.*, 2004) – widespread, on low-altitude (<900 m asl) south-facing slopes in the Alps with the aims of (i)

assessing the robustness of these species to reconstruct past rockfall activity for several decades and (ii) testing the influence of tree species and bark thickness and structure on the reconstructed spatial and temporal patterns of rockfalls.

Based on the exhaustive mapping of 847 *Ao* and *Qp* trees and the systematic counting (Trappmann *et al.*, 2013) of 1230 scars on tree stems in a 0.6 ha plot, our study demonstrates a marked downslope gradient of the number of scars per stem observed on both species. Increasing recurrence intervals (R_i) clearly demonstrate the protective effect of the forest. They are consistent with the concave profile of the slope and further highlight the energy absorption of rockfalls (a) at each impact points, especially the first ones (Evans and Hungr, 1993), that depends on a number of factors, including mass, shape, and velocity of the boulder (Jaboyedoff and Labiouse, 2011) and (b) through direct impact between a boulder and a trunk (*e.g.* Gsteiger, 1989; Dorren *et al.*, 2005, 2006). Additionally, lower recurrence intervals observed in the topographic depressions, that tend to channelize rockfalls, confirm the ability of *Ao* and *Qp* trees to integrate the morphologic constraints of the path (Nicoletti and Sorriso-Valvo, 1991; Corominas, 1996).

2.5.2. Differing recurrence intervals reconstructed from both species

In details, both species yield comparable downslope patterns of decreased rockfall activity, but differences exist in absolute numbers of events and return intervals obtained from *Ao* and *Qp* at the cell scale. As a result, while yielding the same mean number of scars (1.5 scar/stem), *Ao* produces recurrence intervals that are more than 10 years lower as compared to *Qp* in 40% of the cells resulting in a slight agreement between maps obtained from both species. We believe that part of the differences observed between *Ao* and *Qp* lies in bark structure and thickness of both species. Indeed, the wounding of trees by rockfalls processes occurs when the block abrades the bark and destroys part of the underlying cambium (Stoffel and Bollschweiler, 2008). Tree growth is locally disrupted, leading to the formation of an externally visible wound callus (Larson, 1994; Fink, 1999). Local penetration of the rock at the impact location, rotation and translation of the root system and deformation and oscillation of the tree stem (Foetzki *et al.*, 2004; Brauner *et al.*, 2005) absorb energy during a rock impact. As a consequence, only rockfall with sufficient energy are capable to mechanically damage cambium (Schneuwly, 2009). In this study, we demonstrated that *Qp* bark rose at twice the rate of *Ao* and that the bark thickness of *Qp* was more than twice that of *Ao* for a same class of diameter. These differences interpreted as adaptation strategies - heat protecting function of thick and fissured oak bark or energy saving to be competitive for pioneering thin bark species such as *Ao* (Nicolai, 1986) - may have led to different sensitivities of trees to be injured by mechanical impacts. Taking into account the reduced volume of blocks at the Croupe du Plantin (0.06 m^3 for the biggest blocks), we reasonably believe that thicker *Qp* outer bark could act as a mechanical barrier (Fritts, 1976), buffering low energy

rockfalls, and avoiding injury to underlying tissues. Moreover, the flexible pyramidal outer bark of *Qp* may be very able to comply with mechanical stress (Romero, 2006). On the other hands, impacts of similar energy may leave injury softer and coated xylem of *Ao* poorly protected by a thin bark. This hypothesis is consistent with increasing downslope differences and quasi-systematic overestimation of recurrence intervals by *Qp* in the third lower part of the slope where the energy of blocks is reduced due to multiple rebounds and interactions with stems.

A second reason for the interspecies differences is the effect of hidden scars. Indeed, after wounding, the exposed surface is slowly covered by the centripetal growth of the cambium, which results in production of new wood and bark to ideally seal the wound site (Fisher, 1981; Sachs, 1991). The extent of wound healing will depend on many factors, such as the annual increment rate, tree age, health state, scar size (Bollschweiler *et al.*, 2008; Schneuwly *et al.*, 2009) and bark thickness (Stoffel and Perret, 2006). Stoffel (2005b), for instance, could identify 75% of all scars by visual interpretation of bark structures on *F. sylvatica*, whereas only 51% of the injuries remained visible on the stem surface of *P. abies*. Similarly, on a mixed forest stand of the Austrian Alps, Trappmann and Stoffel (2013) observed a mean number of scars on the stem surface of *F. sylvatica* exceed that of *P. abies* by a factor of 2.7. Analogy with these results point to the possibility that almost all scars would remain visible on the stem surface of *Ao* with its thin and smooth bark while *Qp* blurs scars more efficiently owing to their thicker and rougher bark.

2.5.3. Influence of tree structure

Our results demonstrate that rockfall interval maps derived from coppice stools - especially from *Ao* stumps, dominant in the studied plot – showed no agreement with Refmap computed with all trees. Reason for such differences at the cell scale is related to the clustered coppice-specific spatial stem distribution in clumps. At the stand scale, this distribution results in bigger gaps between clumps. It decreases the probability of tree impacts for travelling rocks, prolong the trajectory between impacts where the rock can accelerate (Radtke *et al.*, 2013) and may partly explain the peculiarity of *Ri* maps derived from coppice stools. At the individual scale, the effect of an impact upon the group of stump shoots of a coppiced tree is not necessarily the same as that of a similar impact on a non-coppiced plant of equivalent section (Jancke *et al.*, 2009). As clumps consist of a dense bundle of stems with relatively small diameter, one single boulder passing through a cluster would be likely to hit several stems and might leave multiple scars (Ciabocco *et al.*, 2009). Yet this phenomenon depends on the block volume. If the boulder is small, it will have more opportunity than a large boulder to pass through the coppice shoots of the same stump. This phenomenon is further amplified when boulders bounce higher; so that they cross the coppice shoots at a greater height, where the distance between trunks naturally increases. Using the scar count approach, each injury on a clump is considered an

individual rockfall that might result in an overestimation of real frequencies (Trappmann and Stoffel, 2013). We therefore suggest for future studies that scars located very close to each other would not be considered as individual events or to include impact probability concepts (Moya *et al.*, 2010b; Trappmann *et al.* 2014) to reduce the bias introduced by multiple impacts.

2.6. Conclusion

Findings of this study indicate quite clearly that an assessment of rockfall activity based on visible damage on *A. opalus* and *Q. pubescens* trees will result at the slope scale in similar data on the spatial distribution of relative rockfall activity with similar downslope decreasing recurrence intervals. Yet the recurrence intervals observed on the stem surface of *Q. pubescens* exceed that of *A. opalus* of > 20 year in the lower part of the studied plot owing to the thicker bark of oak that constitutes an efficient mechanical barrier buffering low energy rockfalls. Similarly, recurrence interval map derived from *A. opalus* coppice stools, dominant at the stand scale, yields a low recurrence interval throughout the slope probably related to the clustered coppice-specific spatial stem distribution that leads to an overestimation of rockfall activity. The results suggest (i) that dendrogeomorphic reconstruction of past rockfalls is more accurate if analyses are performed through a sampling design that mixes both species and structure and (ii) confirm the reliability of the counting scar approach represent an efficient and effective method for the spatial assessment of rockfall activity on larger surfaces, as it can be realized with limited temporal and financial efforts. Despite these differences between tree species, *A. opalus* and *Q. pubescens* proved to be a valuable source of information on former events at Saint-Paul-de-Varces and should be more widely used in future tree-ring studies especially because they colonize low altitude slopes, closed to urbanized areas, from which conifers are generally absent.

Acknowledgments

This work has been supported by a grant LabEx Osug@2020 (Investissements d'avenir – ANR10LABX56). The authors are grateful to Eric Mermin, Pascal Tardif, Franck Bourrier, Rémi Rosamont, Jordan Fèvre and all the IRSTEA team Mountain Ecosystems for their scientific and technical supports and helpful comments.

2.7. Captions

Figure 1. (a) The study site is located in the French Alps, at the eastern face of the Vercors massif, 20 km southwest of Grenoble. (b) Hillshade map computed using the DEM derived from airborne LiDAR data with the study site delimited by white polygon. View of studied slope (c), the forest stand (d), injured *Acer opalus* (e) and *Quercus pubescens* stems (f).

Figure 2. (a) Hillshade map of the study site. (b) Longitudinal and (c, d, e) lateral profiles of the studied slope.

Figure 3. Spatial distribution and diameter at breast height (DBH) of *Quercus pubescens* and *Acer opalus* permanent tree plot.

Figure 4. Age-diameter regression models for *Quercus pubescens* and *Acer opalus*.

Figure 5. Reference recurrence interval map (Refmap) calculated for 847 single trees and coppice stools.

Figure 6. Recurrence interval map (Refmap) calculated for (a) *Quercus pubescens*, (b) *Acer opalus* trees and (c) variations of the recurrence interval between species.

Figure 7. Recurrence interval map calculated for *Quercus pubescens* (a), *Acer opalus* (b) single trees and (c) variations of the recurrence interval.

Figure 8. Recurrence interval map calculated for *Quercus pubescens* (a), *Acer opalus* (b) coppice stools and (c) variations of the recurrence interval.

Figure 9. Bark analysis for *Quercus pubescens* and *Acer opalus*. (a) bark thickness-diameter linear regression models. (b) Details of *Quercus pubescens* (wedge section Qp3) and (c) *Acer opalus* (wedge section Ao1). B: bark; W: wood; Xm: xylem; Cm: cambium; Phm: phloem; Pr: periderm; Rhy: rhytidome; Ck: cork. Qp3 has a DBH of 31.4 cm and a gauged bark thickness of 24 mm. Ao1 has a DBH of 28.3 cm and a gauged bark thickness of 6 mm.

Table 1. Overview of scars and calculated recurrence interval for *Quercus pubescens* and *Acer opalus* single trees and coppice stools.

Table 2. Age of trees and number of scars divided in three slope compartments. Downslope represent the lower third part, mid-slope the central part and upslope the upper third part of the slope.

Table 3. Cohen's kappa coefficient test computed between recurrence interval maps

Table 4. Overview of *Quercus pubescens* and *Acer opalus* bark thickness analyses.

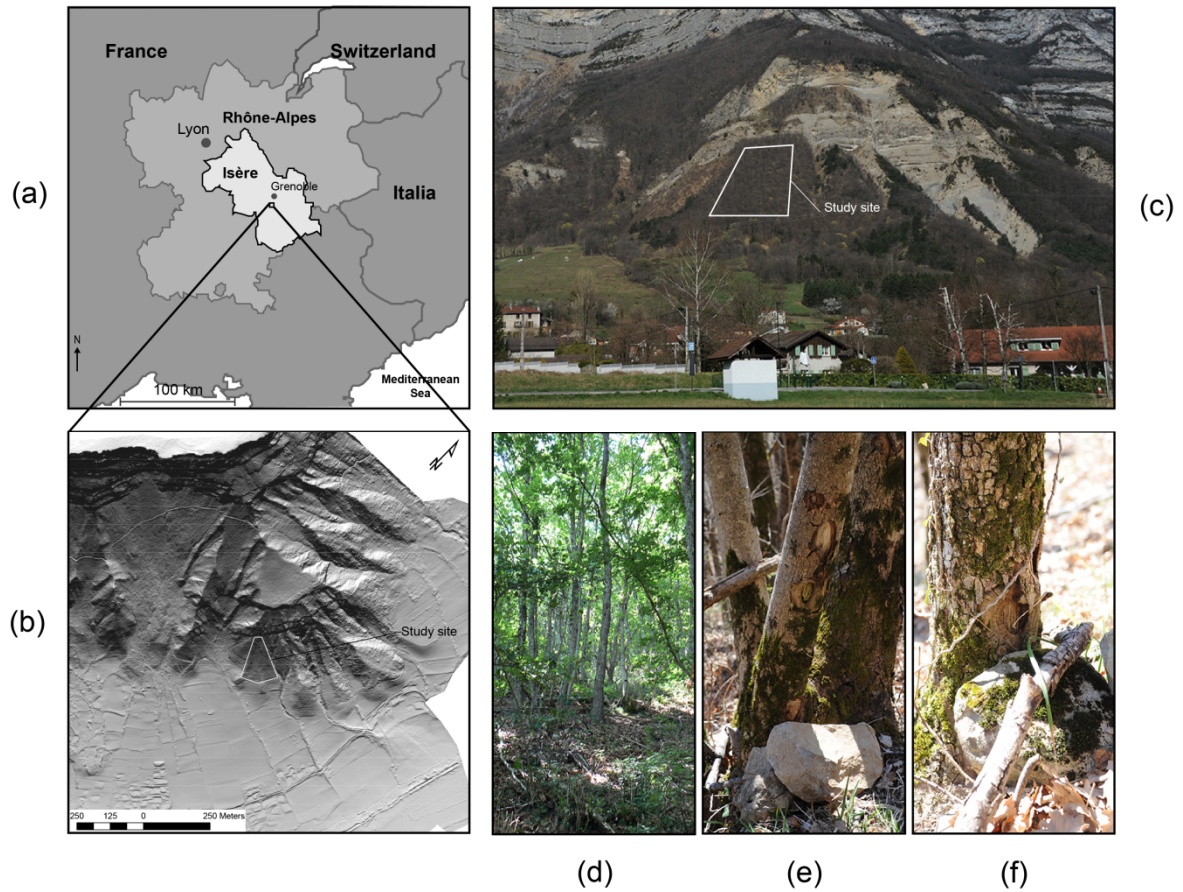


Figure 1. (a) The study site is located in the French Alps, at the eastern face of the Vercors massif, 20 km southwest of Grenoble. (b) Hillshade map computed using the DEM derived from airborne LiDAR data with the study site delimited by white polygon. View of studied slope (c), the forest stand (d), injured *Acer opalus* (e) and *Quercus pubescens* stems (f).

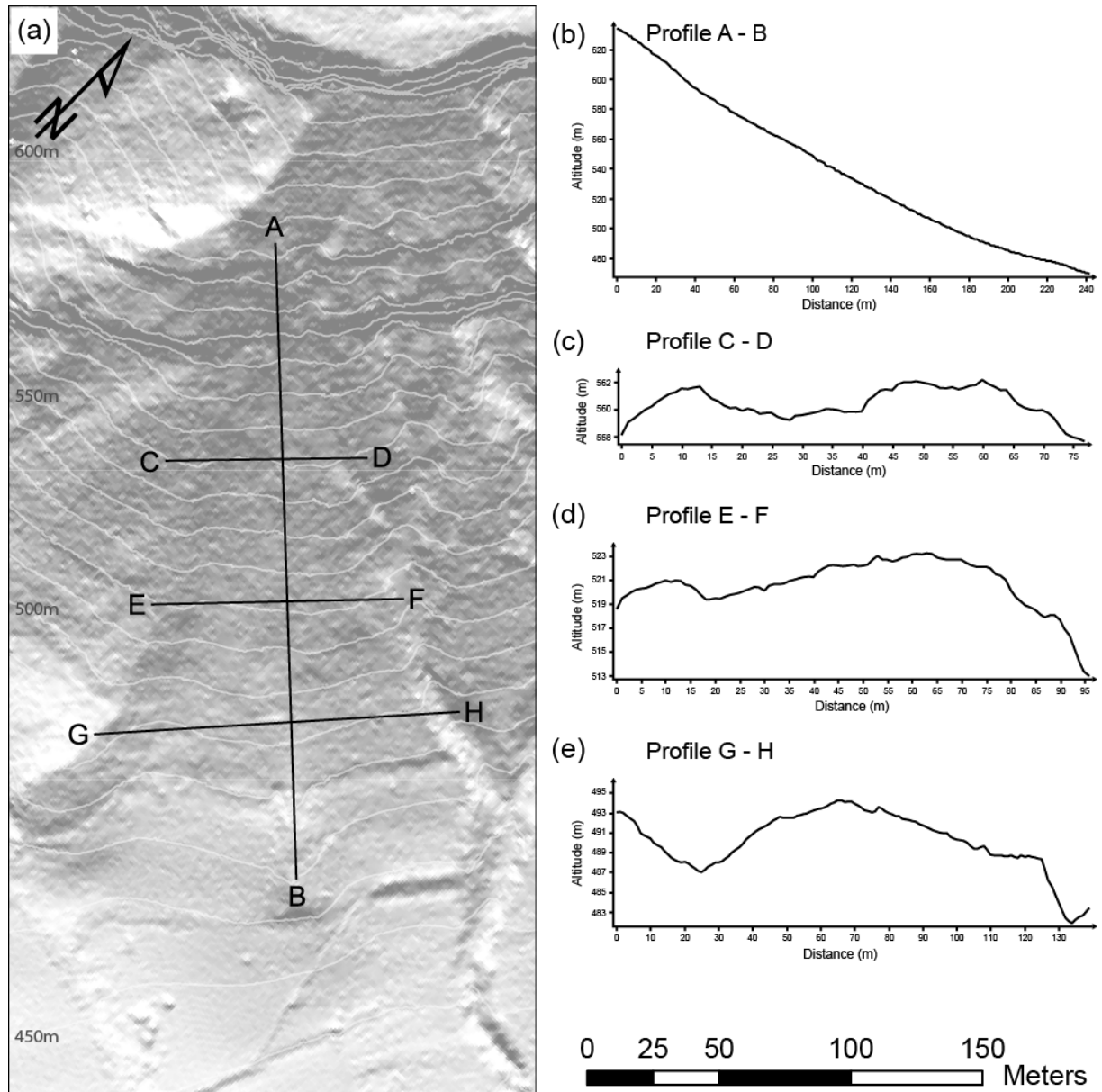
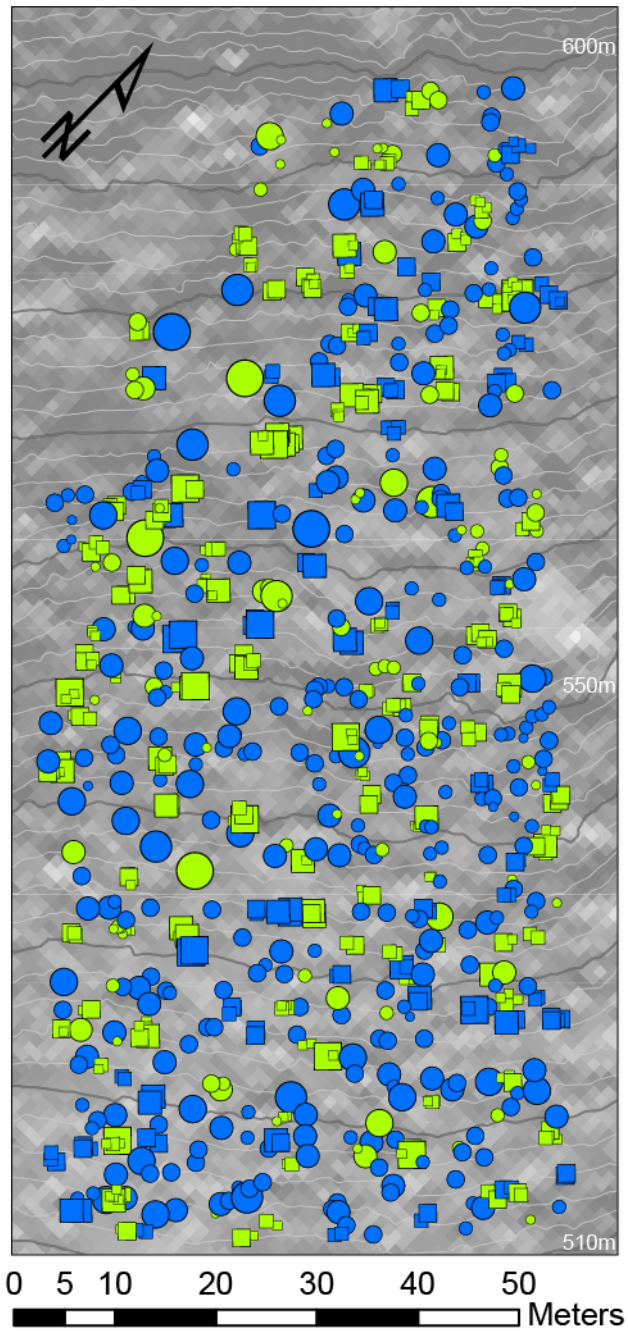


Figure 2. (a) Hillshade map of the study site. (b) Longitudinal and (c, d, e) lateral profiles of the studied slope.



Diameter at breast height (DBH)

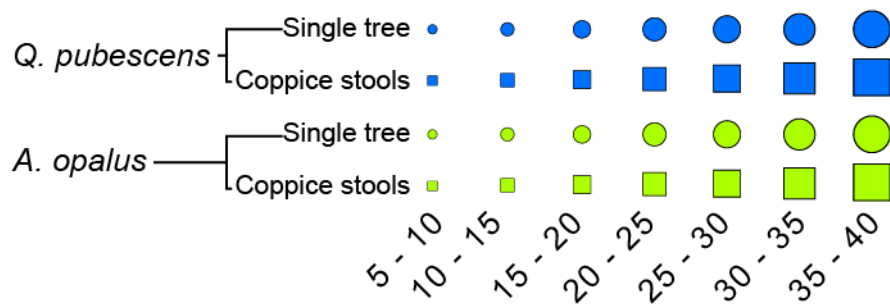


Figure 3. Spatial distribution and diameter at breast height (DBH) of *Quercus pubescens* and *Acer opalus* permanent tree plot.

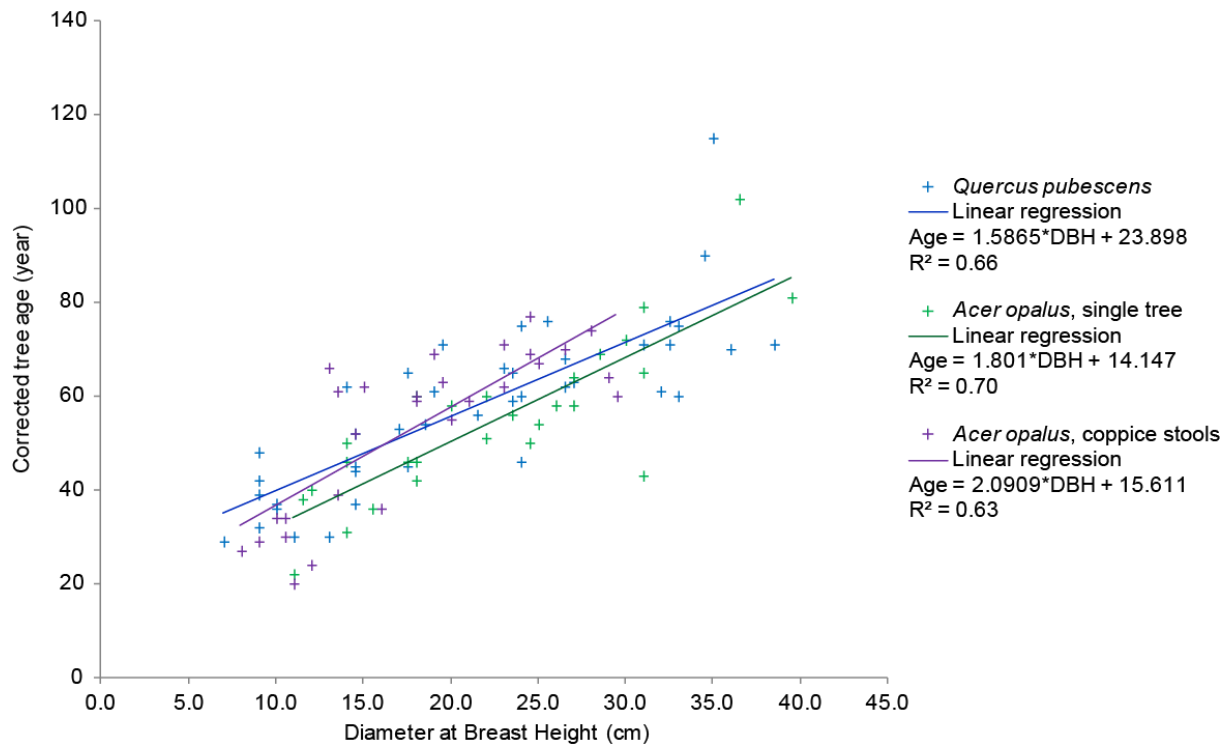


Figure 4. Age-diameter regression models for *Quercus pubescens* and *Acer opalus*.

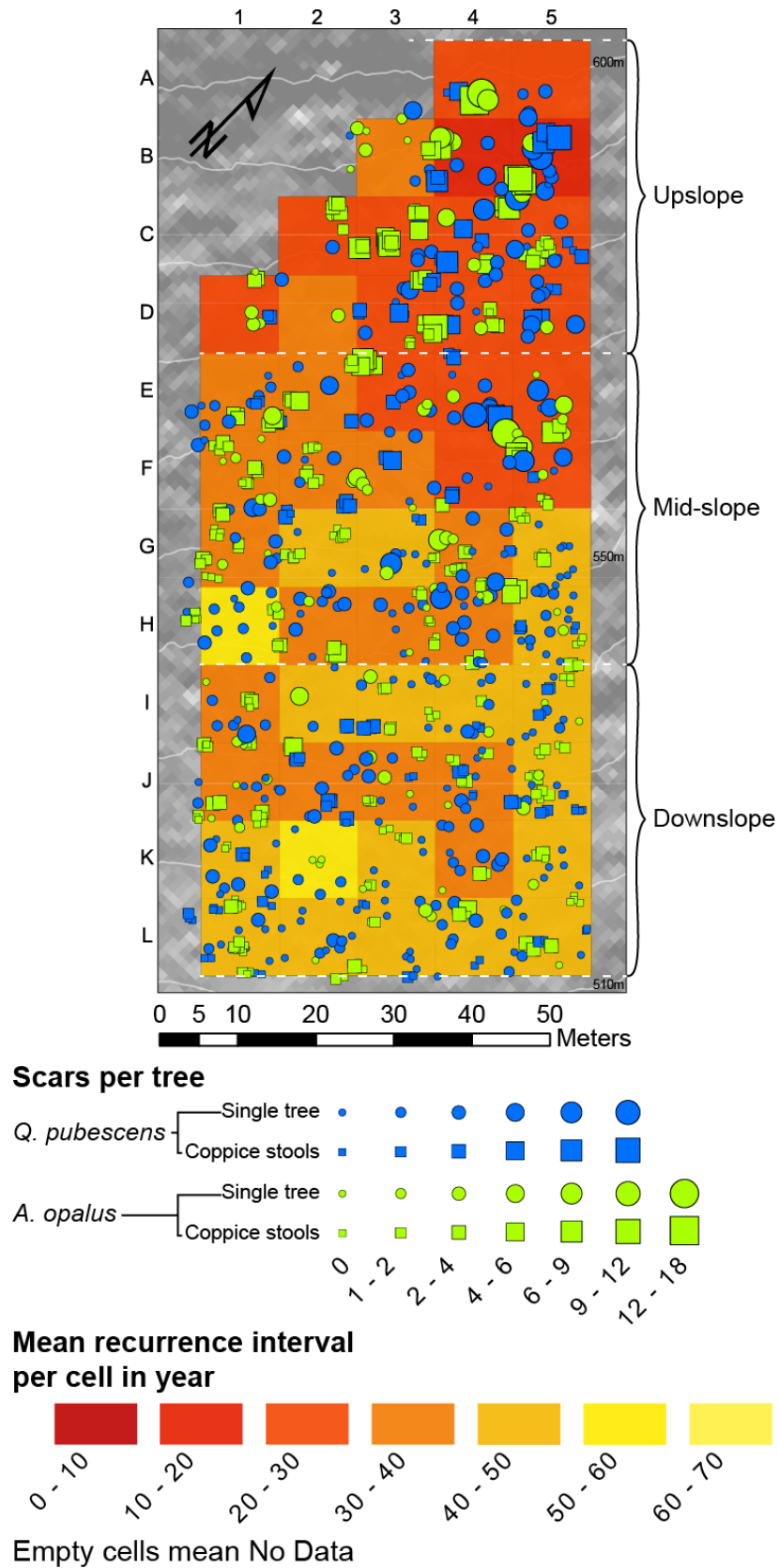


Figure 5. Reference recurrence interval map (Refmap) calculated for 847 single trees and coppice stools.

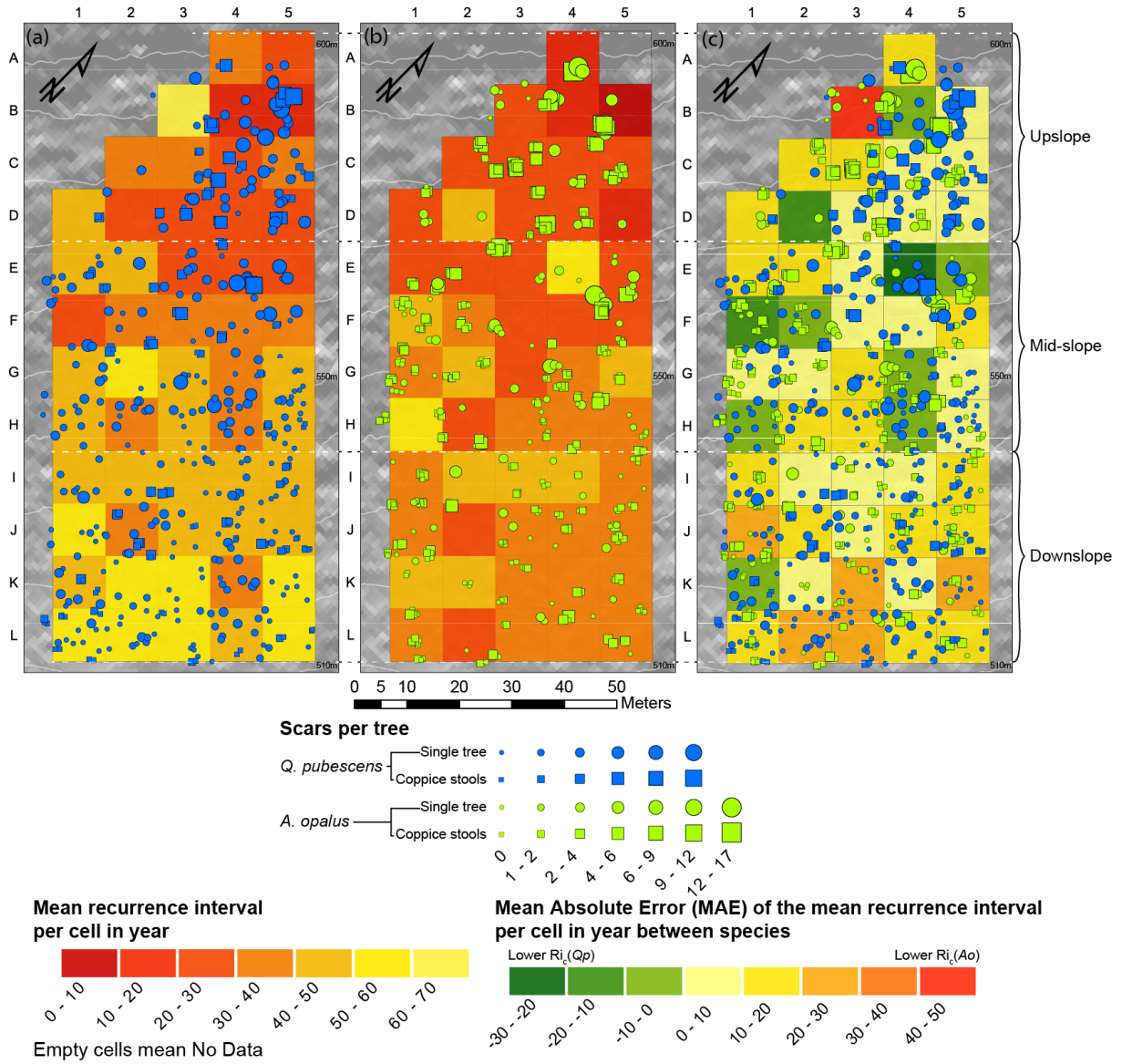


Figure 6. Recurrence interval map (Refmap) calculated for (a) *Quercus pubescens*, (b) *Acer opalus* trees and (c) variations of the recurrence interval between species.

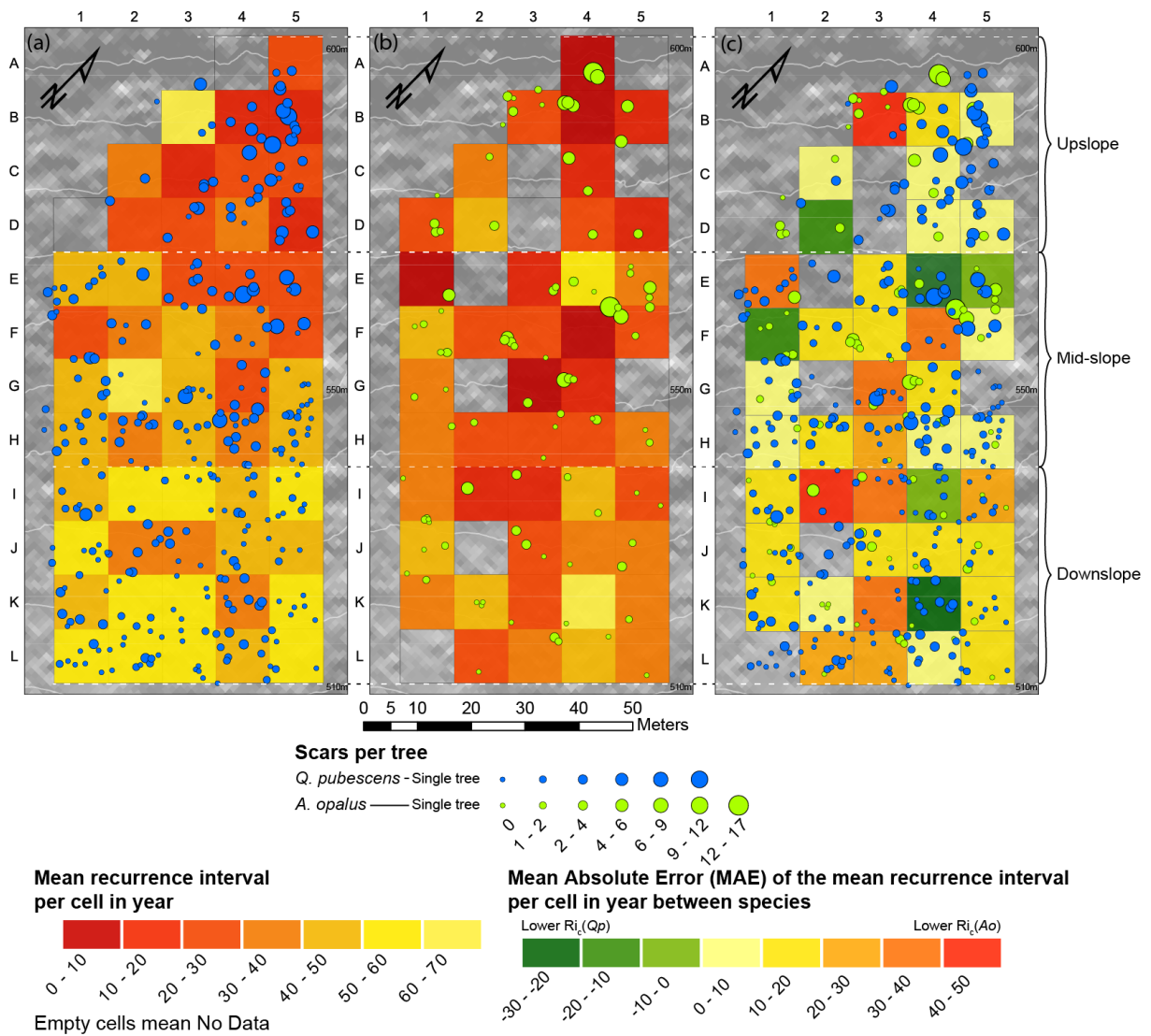


Figure 7. Recurrence interval map calculated for *Quercus pubescens* (a), *Acer opalus* (b) single trees and (c) variations of the recurrence interval.

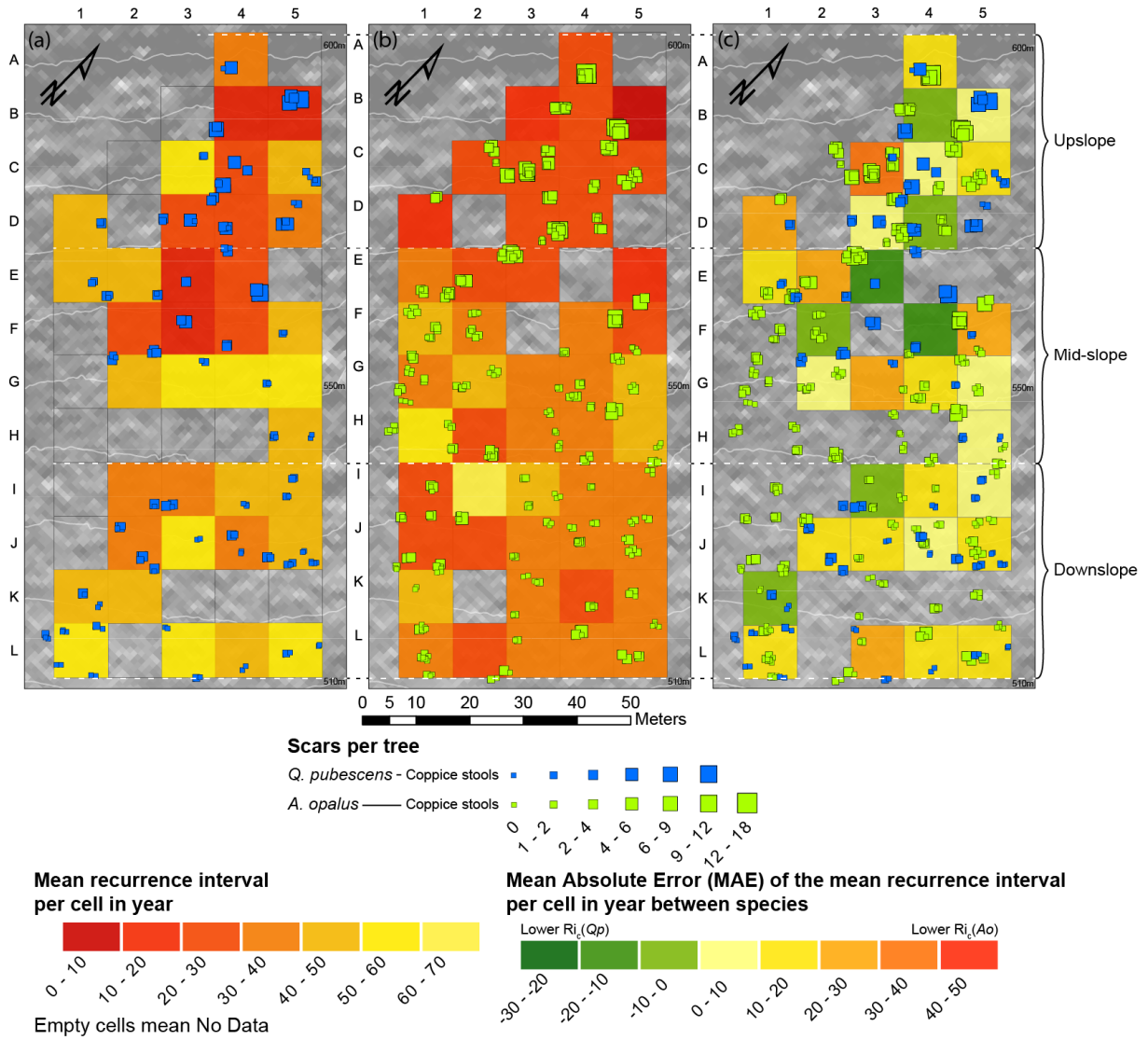


Figure 8. Recurrence interval map calculated for *Quercus pubescens* (a), *Acer opalus* (b) coppice stools and (c) variations of the recurrence interval.

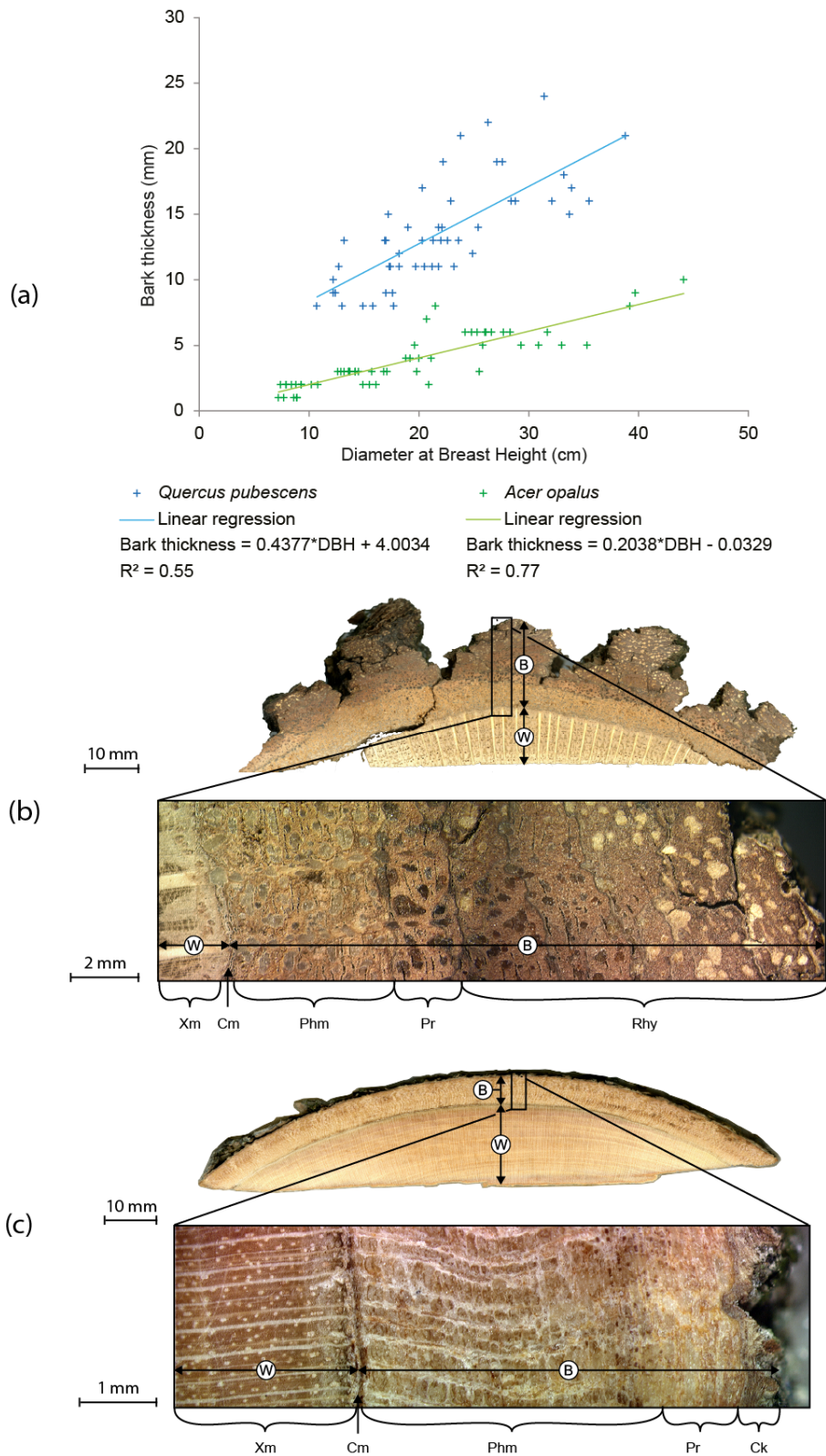


Figure 9. Bark analysis for *Quercus pubescens* and *Acer opalus*. (a) bark thickness-diameter linear regression models. (b) Details of *Quercus pubescens* (wedge section Qp3) and (c) *Acer opalus* (wedge section Ao1). B: bark; W: wood; Xm: xylem; Cm: cambium; Phm: phloem; Pr: periderm; Rhy: rhytidome; Ck: cork. Qp3 has a DBH of 31.4 cm and a gauged bark thickness of 24 mm. Ao1 has a DBH of 28.3 cm and a gauged bark thickness of 6 mm.

Species	No. of trees	Mean DBH in cm (SD)	Mean age in year (SD)	Sum of scars	Mean number of scars per tree (SD)	Mean recurrence interval in year
<i>Quercus pubescens</i>	441 (52.1%)	17.6 (5.9)	52 (9.4)	601	1.4 (1.8)	41
Single tree	309 (36.5%)	18.0 (6.1)	53 (9.7)	420	1.4 (1.7)	41
Coppice stools	132 (15.6%)	16.6 (5.5)	50 (8.8)	181	1.4 (1.9)	40
<i>Acer opalus</i>	406 (47.9%)	13.2 (6.1)	42 (12.3)	629	1.5 (2.1)	32
Single tree	94 (11.1%)	14.5 (6.8)	40 (12.2)	173	1.8 (2.6)	29
Coppice stools	312 (36.8%)	12.8 (5.9)	42 (12.3)	456	1.5 (2.0)	33
Total	847 (100%)	15.5 (6)	41 (11.6)	1230	1.5 (2.0)	37

Table 1. Overview of scars and calculated recurrence interval for *Quercus pubescens* and *Acer opalus* single trees and coppice stools.

Species	Area	Number of trees (Unimpacted trees in %)	Scars per tree				Age of tree		
			Min	Max	Mean (SD)	Sum	Min	Max	Mean (SD)
All trees	Downslope	329 (54.1%)	0	5	0.69 (0.9)	228	23.7	81.7	47.0 (11.7)
	Mid-slope	320 (33.8%)	0	14	1.48 (1.8)	472	23.1	79.9	47.4 (11.6)
	Upslope	170 (13.5%)	0	17	3.00 (2.7)	510	24.1	86.4	46.4 (11.6)
<i>Acer opalus</i>	Downslope	140 (52.8%)	0	5	0.75 (1.0)	105	23.7	81.7	39.7 (12.6)
	Mid-slope	163 (33.1%)	0	14	1.45 (1.8)	236	23.1	79.9	43.5 (12.8)
	Upslope	89 (13.5%)	0	17	3.17 (3.0)	282	24.1	80.8	42.0 (12.0)
Single tree	Downslope	32 (53.1%)	0	5	0.78 (1.1)	25	23.7	81.7	40.5 (13.9)
	Mid-slope	39 (25.6%)	0	14	1.95 (2.6)	76	23.1	79.8	38.7 (14.5)
	Upslope	20 (10%)	0	16	3.55 (3.3)	71	24.1	80.2	43.4 (13.6)
Coppice stools	Downslope	108 (52.8%)	0	4	0.74 (1.0)	80	26.1	74.6	39.4 (12.2)
	Mid-slope	124 (35.5%)	0	7	1.29 (1.5)	160	26.1	72.7	45.0 (11.8)
	Upslope	69 (14.5%)	0	17	3.06 (2.9)	211	26.5	80.8	41.7 (11.5)
<i>Quercus pubescens</i>	Downslope	189 (55.0%)	0	4	0.65 (0.9)	123	33.7	78.8	52.3 (7.3)
	Mid-slope	157 (34.9%)	0	11	1.50 (1.8)	236	35.8	79.5	51.3 (8.3)
	Upslope	81 (13.6%)	0	11	2.82 (2.3)	228	33.1	86.4	51.1 (9.1)
Single tree	Downslope	131 (51.1%)	0	4	0.69 (0.8)	90	33.7	78.8	53.1 (7.3)
	Mid-slope	122 (35.2%)	0	11	1.48 (1.8)	180	35.8	79.4	51.6 (8.6)
	Upslope	47 (10.6%)	0	11	2.94 (2.1)	138	40.2	86.4	52.7 (10.3)
Coppice stools	Downslope	58 (63.8%)	0	3	0.57 (0.9)	33	39.8	68.5	50.6 (6.8)
	Mid-slope	35 (31.4%)	0	11	1.60 (2.0)	56	40.1	69.9	51.3 (7.6)
	Upslope	34 (17.6%)	0	10	2.65 (2.4)	90	33.1	58.8	48.9 (6.3)

Table 2. Age of trees and number of scars divided in three slope compartments. Downslope represent the lower third part, mid-slope the central part and upslope the upper third part of the slope.

		Rater 1		Rater 2	
		<i>Ao</i>	<i>Qp</i>	<i>Ao</i>	<i>Qp</i>
All trees	<i>Ao</i>			0.306	
	<i>Qp</i>	0.0829			
		0.376	0.358	-0.0189	0.311
Single tree	<i>Ao</i>				
	<i>Qp</i>		0.704	-0.0284	
Coppice stool	<i>Ao</i>	0.577			
	<i>Qp</i>		0.393		0.0477

Table 3. Cohen's kappa coefficient test computed between recurrence interval maps

Species	No. of trees	Mean DBH in cm (SD)	Mean bark thickness in mm (SD)
<i>Quercus pubescens</i>	50	22.0 (6.7)	14 (4.0)
<i>Acer opalus</i>	52	19.0 (9.2)	4 (2.1)
Total	102	20.5 (8.3)	

Table 4. Overview of *Quercus pubescens* and *Acer opalus* bark thickness analyses.

3. Perspectives

Les résultats et les méthodes employées dans cette étude mettent en perspective plusieurs thématiques de recherche. Elles sont les suivantes :

- la détermination d'essences indicatrices d'une relation de fréquence-intensité des chutes de pierres ;
- l'identification des zones de départ des chutes de pierres pour la modélisation par dendrogéomorphologie couplée à une approche multi-scalaire et pluridisciplinaire ;
- la paramétrisation et la validation du modèle *RockyFor3D* à travers l'utilisation d'un diagnostic dendrogéomorphologique.
- l'utilisation des méthodes de dendrogéomorphologie et de modélisation pour l'évaluation opérationnelle et la zonation réglementaire de l'aléa « chute de pierres » ;

3.1. Détermination d'essences indicatrices d'une relation fréquence-intensité des chutes de pierres

Cette étude a montré que les essences *Quercus pubescens* et *Acer opalus* sont des bioindicateurs fiables pour la reconstruction de l'emprise spatio-temporelle des chutes de pierres. Cependant, lors de la comparaison des essences utilisées, l'intervalle moyen de récurrence des chutes de pierres diffère légèrement dans la partie aval du versant. Cette différence s'explique par une sensibilité et une stratégie de régénération aux impacts de chutes de pierres spécifique à chacune des essences. Il a été démontré que ces caractéristiques sont liées à la structure et à l'épaisseur de l'écorce de chaque espèce.

Ces résultats conduisent à penser qu'une essence forestière est indicatrice d'un seuil d'intensité et de fréquence du processus par sa sensibilité spécifique aux impacts mécaniques. Par exemple, seules les chutes de pierres déployant une forte énergie, donc intenses, pourront endommager les essences avec une écorce épaisse. Ainsi, les essences concernées seront uniquement représentatives des chutes de pierre déployant une énergie égale ou supérieure à la capacité de protection de l'écorce. Elles seront uniquement représentatives des chutes de pierres à haute intensité mais à faible fréquence. A l'opposé, les essences avec une écorce fine sont endommagées par toutes les pierres en chute les impactant quelque soit leur volume. Elles seront alors représentatives des chutes de pierres à faible intensité mais à haute fréquence.

Pour confirmer ou infirmer cette hypothèse, d'autres études similaires à celle-ci peuvent être menées sur des peuplements mixtes exposés à l'aléa et composés d'essences présentant de fortes

différences d'épaisseur et de structure de l'écorce, comme *Fagus sylvatica* et *Picea abies* utilisés par Trappmann et Stoffel (2013), en combinaison avec une approche par modélisation pour simuler les différentes intensités des chutes.

3.2. Paramétrisation et validation des modèles de simulations trajectographiques par l'utilisation d'un diagnostic dendrogéomorphologique

Les modèles de simulations trajectographiques ont été développés pour répondre aux besoins de cartographie de l'aléa malgré l'existence de lacunes dans les inventaires et d'incertitudes dans la relation de fréquence-intensité de l'aléa. Bien que basés sur les lois mécaniques et/ou sur des calculs stochastiques pour la propagation des pierres simulées, les modèles trajectographiques ne sont qu'une reproduction plus ou moins fiable de la réalité. Ils souffrent de trois lacunes majeures : la difficulté de déterminer les zones de départ, la difficulté de détermination des caractéristiques de la pierre à chuter, et la difficulté de calibrer les paramètres de surface (rugosité, type et structure du sol) du versant modélisé. En conséquence, ils nécessitent d'être calibrés et vérifiés à l'aide de données de terrain. Les deux sections suivantes portent sur :

- l'amélioration de la détermination des zones de départ de pierres et des caractéristiques de la pierre à chuter : volume et forme ;
- l'ajustement des paramètres de surface du versant modélisé par convergence avec un diagnostic dendrogéomorphologique.

Dans le cadre du projet Osug@2020 « Risques d'éboulement, modélisation et diagnostic dendrogéomorphologique » pour l'ajustement des paramètres de simulations du modèle trajectographique *RockyFor3D*, ces projets d'études sont la continuité de ce mémoire et de l'article associé.

3.2.1. Identification des zones de départ des chutes de pierres pour la modélisation

Les zones de départ des chutes de pierres sont généralement des barres et des escarpements rocheux. La localisation des zones d'alimentation en pierres nécessite une vision exhaustive des sites de chutes. Cependant, celle-ci est consommatrice de temps et ne peut pas toujours être effectuée à cause des difficultés d'accès aux sites en question. Pour la modélisation du phénomène, la définition précise de ces paramètres est essentielle pour permettre une simulation réaliste de l'emprise spatiale des chutes de pierres. Plusieurs approches ont été développées à des échelles différentes pour identifier les zones de chutes de pierres. L'évaluation de leur fiabilité, de leur rapport qualité-prix et

leur comparaison permettraient de définir quelle est l'approche la plus adaptée pour l'identification des zones d'alimentation en pierres pour la modélisation mais aussi pour la définition de l'aléa.

L'approche dite « par défaut » pour la modélisation repose sur la définition de la valeur minimale de pente discriminant les zones d'alimentation du reste du versant par l'utilisation d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) de qualité. Cette valeur, notée α , se calcule dans *RockyFor3D* en fonction de la résolution du MNT, notée RES, par l'équation suivante (ARPA et CEMAGREF, 2008) :

$$\alpha = 55^\circ \cdot RES^{-0,075}$$

Cette approche permet une détermination rapide des zones d'alimentation mais considère toutes les parois rocheuses au dessus du seuil comme fournissant des pierres sans qu'il y ait prise en compte de la structure géologique du versant. Il a été démontré que cette approche par défaut tend à surestimer le nombre de zones d'alimentation en pierres (Corona *et al.*, 2013).

Une approche alternative plus élaborée est la routine Histofit développée par Loye *et al.* (2009). Elle propose l'identification des zones sources à l'échelle régionale par la description et la décomposition statistique en gaussienne de la distribution des pentes. Les distributions sont calculées à l'aide d'un système d'information géographique (SIG) issu d'un MNT. L'identification du seuil d'instabilité des compartiments rocheux s'effectue par la lecture du croisement des courbes représentatives de la morphologie « Forte pente » (Steep Slopes) et de la morphologie « Escarpements » (Cliffs) (Figure 10). Cette approche permet un calcul plus fin du seuil de pente et en conséquence une meilleure cartographie des zones d'alimentation (Corona *et al.*, 2013).

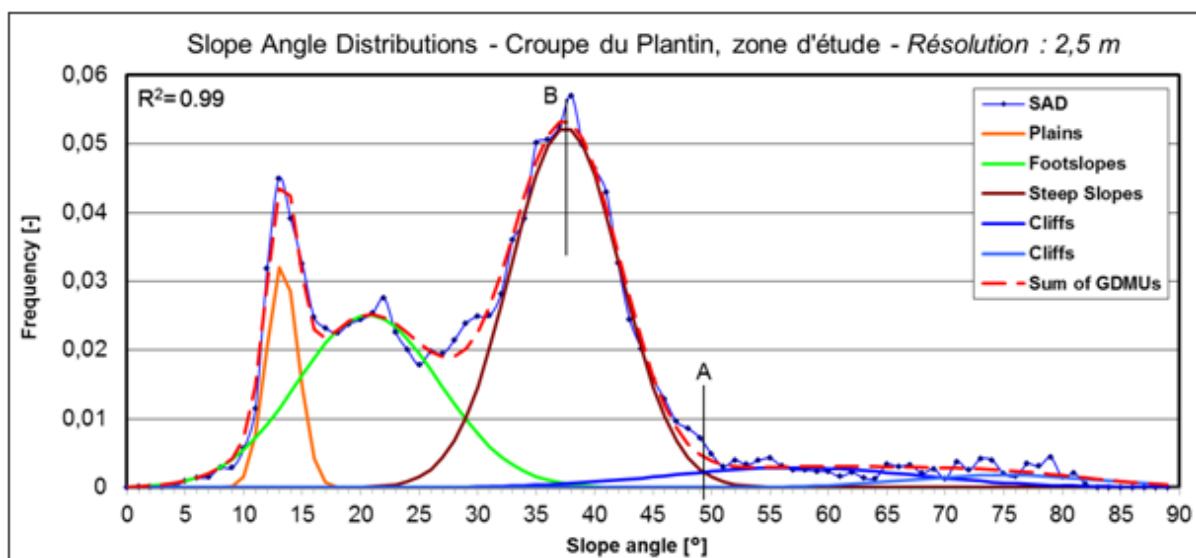


Figure 10 : Routine HistoFit appliquée à la Croupe du Plantin, issu d'un MNT d'une résolution de 2,5 m. « A » indique le seuil de pente (49°) ; « B » indique la classe morphologique modale.

Cependant ces deux méthodes de détermination sont dépendantes de la qualité du MNT et héritent des défauts principaux de représentation des objets verticaux. Ces derniers sont liés au mode d'acquisition par LiDAR aéroporté qui ne permet pas une acquisition précise des surfaces verticales. Enfin, pour permettre les simulations, les volumes de pierres à chuter sont définis par une blocométrie de pierres présentes sur le versant ou par le jugement de l'opérateur.

Les approches par modélisation tridimensionnelle permettent une représentation fidèle de la paroi étudiée et de sa structure. Elles autorisent une évaluation plus précise des zones d'alimentation en pierres mais aussi l'évaluation des volumes à tomber.

Guerin *et al.*, (2013) proposent la comparaison diachronique de nuages de points obtenus par LiDAR terrestre. Cette méthode permet la détection et l'estimation des volumes de pierres qui sont tombées entre les dates des nuages de points utilisés. Une relation entre la fréquence et l'intensité des chutes de pierres est alors établie à partir des événements détectés.

La *Close-range Photogrammetry* permet une représentation précise des parois rocheuses étudiées (Figure 11). Elle se base sur l'interprétation d'une représentation tridimensionnelle haute définition du terrain créée par le recouvrement stéréoscopique d'un ensemble de clichés (Haneberg, 2008 ; Ferrero *et al.*, 2009 ; Sturzenegger et Stead, 2009). A la différence de l'approche par LiDAR terrestre, cette méthode s'appuie à la fois sur l'analyse du nuage de points mais aussi des clichés initiaux qui sont intégrés dans le modèle 3D. La *Close-range Photogrammetry* permet la caractérisation structurale des volumes rocheux par la détection des plans de discontinuités et la détermination de leurs caractéristiques afférentes (pendage, orientation). Enfin, cette approche permet une récolte rapide et économique des données quelles que soient les conditions d'accès au terrain, sans sacrifier la précision, et sans mettre en danger les personnels.

Ces méthodes donnent une évaluation des caractéristiques structurales des parois et permettent d'identifier avec précisions les zones d'alimentation en pierres mais sont plus complexes à mettre en place. A terme, elles permettent de qualifier une susceptibilité de chutes de pierres et de procéder à une cartographie de l'aléa (Salvini *et al.*, 2013). A travers, l'interprétation tridimensionnelle des cicatrices de chutes sur la paroi, ces approches permettent aussi la reconstruction des volumes tombés (Santana *et al.*, 2012).

Une comparaison entre la cartographie réalisée par dendrogéomorphologie et les résultats des simulations réalisées à partir des zones d'alimentation détectées pour chacune des méthodes, permettrait d'établir l'approche permettant la meilleure représentation de l'emprise spatiale de l'aléa, et d'établir la méthode présentant le meilleur rapport qualité-investissement.

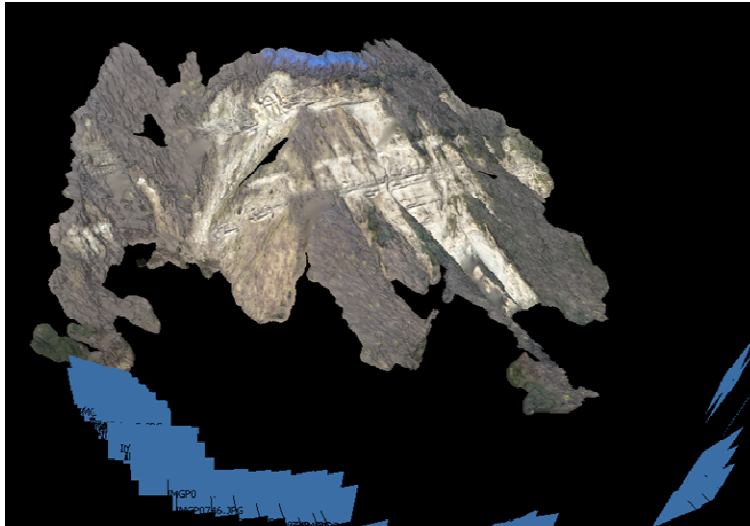


Figure 11 : Représentation tridimensionnelle de La Croupe du Plantin, Saint-Paul-de-Varces, Isère, par Close-range Photogrammetry, réalisée par Erwan Roussel à l'aide du logiciel AgiSoft© PhotoScan, 27.03.14.

Avec le même objectif, cette comparaison peut être poussée plus loin avec la mise en confrontation de modèles de simulation en 2,5D, comme *RockyFor3D*, qui font abstraction des objets en trois dimensions (e.g. abris sous roche) et de modèles de simulation en « vraie » 3D, comme RAMMS (Volkwein *et al.*, 2011).

3.2.2. Calibration des paramètres de surface par convergence avec un diagnostic dendrogéomorphologique

Le second défi dans la calibration des modèles de simulations trajectographiques est l'ajustement des paramètres de surface. Ces derniers régissent les comportements de la pierre en chute. Sous l'environnement *RockyFor3D*, ils sont : la rugosité du sol à 70%, 20% et 10%. Celle-ci se définit comme la hauteur des obstacles à 70%, 20% et 10% de la surface d'une zone homogène. Elle est établie selon l'expertise de l'opérateur. Ces valeurs varient d'un opérateur à l'autre. Les simulations effectuées produisent en conséquence des résultats différents selon l'opérateur. L'objectif est alors de faire converger le modèle avec les données de terrain en faisant varier les valeurs de rugosités du sol permettant en conséquence un étalonnage du modèle par rapport à une situation connue.

3.3. Mise en place de méthodes pour l'évaluation opérationnelle et le zonage réglementaire de l'aléa « chute de pierres »

L'objectif lointain de toutes ces propositions est de formuler une méthodologie opérationnelle peu consommatrice de moyens se basant sur les méthodes de dendrogéomorphologie et de modélisation pour l'évaluation de l'aléa. Cette proposition, couplée à une approche de la vulnérabilité par un modèle économique permettrait à terme un zonage réglementaire du risque « chute de pierres ».

Conclusion

En conclusion, ce mémoire-article a mis en évidence les besoins de compréhension et d'évaluation de l'emprise-spatio-temporelle de l'aléa « chute de pierres » dans les milieux périurbains. Ceux-ci sont formulés par un ensemble de lacunes qui portent sur l'imprévisibilité de l'aléa « chute de pierres », sur le caractère incomplet des archives et sur les difficultés de modélisation de l'aléa. Pour répondre à ces besoins, cette étude a mis en avant une réflexion sur le potentiel dendrogéomorphologique de deux essences collinéennes de feuillus (*Quercus pubescens*, *Acer opalus*) pour l'emprise spatio-temporelle des chutes de pierres au lieu-dit de La Croupe du Plantin, à Saint-Paul-de-Varces, en Isère, avec l'usage d'une cartographie systématique des arbres et par l'établissement d'une relation âge-diamètre par dendrochronologie. Les résultats ont montré que les deux essences testées permettaient une reconstitution spatio-temporelle des chutes de pierres. Cependant, bien que la structure de leur population et leur répartition spatiale soient similaires, *Quercus pubescens* et *Acer opalus* présentent un intervalle de récurrence légèrement différent à l'aval. *A. opalus* présente un intervalle de récurrence inférieur de vingt ans par rapport à *Q. pubescens*. Cette différence s'explique par l'épaisseur d'écorce spécifique de *Q. pubescens* qui est plus grande que celle de *A. opalus* et qui a la capacité d'absorber l'énergie d'un impact de pierre à faible énergie cinétique. Comme présenté dans l'article, ces résultats suggèrent :

- i. la reconstruction spatio-temporelle des chutes de pierres est plus précise en utilisant un peuplement mixte présentant des dispositions de tiges différentes ;
- ii. la viabilité de l'approche par dénombrement de blessures ;
- iii. la viabilité des *Quercus pubescens* et des *Acer opalus* pour la reconstitution spatio-temporelle des chutes de pierres.

Ce mémoire-article et son étude associée ouvrent de nombreuses perspectives de recherche pour améliorer la connaissance de l'aléa « chute de pierres » et sa modélisation numérique, mais aussi pour rendre opérationnelles les méthodes de dendrogéomorphologie associées à l'expertise du géographe pour l'évaluation et le zonage réglementaire des risques.

Bibliographie

- Adams, D.C., Jackson, J.F., 1995. Estimating the Allometry of Tree Bark. *Am. J. Bot.* 134, 99–106.
- Alestalo, J., 1971. Dendrochronological interpretation of geomorphic processes. *Fennia* 1–139.
- Arbellay, E., Fonti, P., Stoffel, M., 2012. Duration and extension of anatomical changes in wood structure after cambial injury. *J. Exp. Bot.* 1–7.
- ArcGIS 10.1, 2012. . ESRI, Redlands.
- ARPA, CEMAGREF, 2008. Projet n°165 PROVIALP: Protection de la Viabilité Alpine - Rapport Final (Rapport Final). ARPA, CEMAGREF, Torino (Ita).
- Astrade, L., Bégin, Y., 2003. Utilisation de la dendrochronologie comme outil de diagnostic et d'évaluation du fonctionnement des hydrosystèmes, in: Ruffinoni, C., Piégay, H., Pautou, G. (Eds.), *Les Ripisylves Dans Les Hydrosystèmes Fluviaux*. IDF-CNRS, Paris, pp. 204–216.
- Astrade, L., Lutoff, C., Nedjai, R., Philippe, C., Loison, D., Bottollier-Depois, S., 2007. Periurbanisation and natural hazards. *J. Alp. Res. Rev. Géographie Alp.* 19–28. doi:10.4000/rga.132
- Astrade, L., Stoffel, M., Corona, C., Lopez-Saez, J., 2012. L'utilisation des cernes de croissances des arbres pour l'étude des évènements et des changements morphologiques: intérêts, méthodes et apports des recherches alpines à la dendrogéomorphologie. *Géomorphologie Relief Process. Environ.* 295–316.
- Baillifard, F., Jaboyedoff, M., Rouiller, J.D., Robichaud, G.R., Locat, P., Locat, J., Couture, R., Hamel, G., 2004. Towards a GIS-based hazard assessment along the Quebec City Promontory, Quebec, Canada, in: Lacerda, W.A., Ehrlich, M., Fontoura, S.A.B., Sayao, A.S.F. (Eds.), *Landslides: Evaluation and Stabilization*. Taylor & Francis Group, London, pp. 207–214.
- Ballesteros Cánovas, J.A., Eguibar, M., Bodoque, J.M., Díez-Herrero, A., Stoffel, M., Gutiérrez-Pérez, I., 2011. Estimating flash flood discharge in an ungauged mountain catchment with 2D hydraulic models and dendrogeomorphic palaeostage indicators. *Hydrol. Process.* 25, 970–979. doi:10.1002/hyp.7888
- Ballesteros, J.A., Bodoque, J.M., Díez, A., Sanchez-Silva, M., Stoffel, M., 2011. Calibration of floodplain roughness and estimation of palaeoflood discharge based on tree-ring evidence and hydrolic modelling. *J. Hydrol.* 103–115.
- Berger, F., Quetel, C., Dorren, L.K.A., 2002. Forest: a natural protection mean against rockfalls, but with which efficiency. *Int. Congr. Interpraevent.*
- Bollschweiler, M., Stoffel, M., Schnewly, D.M., Bourqui, K., 2008. Traumatic resin ducts in *Larix decidua* stems impacted by debris flows. *Tree Physiol.* 28, 255–263. doi:10.1093/treephys/28.2.255
- Bräker, O.U., 2002. Measuring and data processing in tree-ring research – a methodological introduction. *Dendrochronologia* 20, 203–216.
- Brauner, M., Weinmeister, W., Agner, P., Vospernik, S., Hoesle, B., 2005. Forest management decision support for evaluating forest protection effects against rockfall. *For. Ecol. Manag., Decision Support in Multi Purpose Forestry Decision Support in Multi Purpose Forestry Selected papers from the symposium on "Development and Application of Decision Support Tools in Multiple Purpose Forest Management"* 207, 75–85. doi:10.1016/j.foreco.2004.10.018
- Bull, W.B., Brandon, M.T., 1998. Lichen dating of earthquake-generated regional rockfall events, Southern Alps, New Zealand. *Geol. Soc. Am. Bull.* 110, 60–84.
- Cardinali, M., Galli, M., Guzzetti, F., Ardizzone, F., Reichenbach, P., Bartoccini, P., 2006. Rainfall induced landslides in December 2004 in south-western Umbria, central Italy: types, extent, damage and risk assessment. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 6, 237–260.
- Casteller, A., Christen, M., Villalba, R., Martínez, H., Stöckli, V., Leiva, J.C., Bartelt, P., 2008. Validating numerical simulations of snow avalanches using dendrochronology: the Cerro Ventana event in Northern Patagonia, Argentina. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 8, 433–443. doi:10.5194/nhess-8-433-2008
- Ciabocco, G., Boccia, L., Ripa, M.N., 2009. Energy dissipation of rockfalls by coppice structures. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 9, 993–1001.

- Corominas, J., 1996. The angle of reach as a mobility index for small and large landslides. *Can. Geotech. J.* 33, 260–271.
- 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. doi:10.1016/j.geomorph.2013.02.001
- Csaikl, U.M., Burg, K., Fineschi, S., König, A.O., Mátyás, G., Petit, R.J., 2002. Chloroplast DNA variation of white oaks in the alpine region. *For. Ecol. Manag., Range wide distribution of chloroplast DNA diversity and pollen deposits in European white oaks: inferences about colonisation routes and management of oak genetic resources*. 156, 131–145.
- Dorren, L.K.A., 2003. A review of rockfall mechanics and modelling approaches. *Prog. Phys. Geogr.* 27, 69–87.
- Dorren, L.K.A., Berger, F., le Hir, C., Mermin, E., Tardif, P., 2005. Mechanisms, effects and management implications of rockfall in forests. *For. Ecol. Manag.* 215, 183–195.
- Dorren, L.K.A., Berger, F., 2006a. Stem breakage of trees and energy dissipation during rockfall impacts. *Tree Physiol.* 26, 63–71. doi:10.1093/treephys/26.1.63
- Dorren, L.K.A., Berger, F., 2006b. Panarchy and sustainable risk prevention by managing protection forests in mountain areas, in: Ammann, W., Dannenmann, S., Vulliet, L. (Eds.), *RISK21 - Coping with Risks due to Natural Hazards in the 21st Century*. Taylor & Francis Group, pp. 203–213.
- Dorren, L.K.A., Berger, F., Putters, U.S., 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.K.A., Berger, F., Jonsson, M., Krautblatter, M., Mölk, M., Stoffel, M., Wehrli, A., 2007. State of the art in rockfall – forest interactions. *Schweiz. Z. Forstwes.* 158, 128–141. doi:10.3188/szf.2007.0128
- Dorren, L.K.A., Berger, F., 2012. Rockyfor3D (v5.1) à coeur ouvert – Description complète du modèle 3D de chutes de blocs. *ecorisQ* 32.
- Douglas, G.R., 1980. Magnitude frequency study of rockfall in Co. Antrim, N. Ireland. *Earth Surf. Process.* 5, 123–129.
- Dussauge-Peisser, C., Helmstetter, A., Grasso, J.-R., Hantz, D., Desvarreux, P., Jeannin, M., Giraud, A., 2002. Probabilistic approach to rock fall hazard assessment: potential of historical data analysis. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 2, 15–26.
- Erismann, T.H., Abele, G., 2001. *Dynamics of Rockslides and Rockfalls*, Springer. ed.
- Evans, S.G., Hungr, O., 1993. The assessment of rockfall hazard at the base of talus slopes. *Can. Geotech. J.* 30, 620–636.
- Ferrero, A.M., Forlani, G., Roncella, R., Voyat, H.I., 2009. Advanced Geostructural Survey Methods Applied to Rock Mass Characterization. *Rock Mech. Rock Eng.* 42, 631–665. doi:10.1007/s00603-008-0010-4
- Fink, S., 1999. Pathological and regenerative plant anatomy, in: *Encyclopedia of Plant Anatomy*. Gebrüder Bornträger, Berlin ,Stuttgart.
- Fisher, J.B., 1981. Wound-healing by exposed secondary xylem in *Adansonia* (Bombacaceae). *IAWA Bull.* 2, 193–199.
- Foetzki, A., Jonsson, M.J., Kalberer, M., Simon, H., Lundström, T., 2004. Interaction between trees and natural hazards in subalpine spruce forests., in: "TRACE, Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology: Proceedings of the Dendrosymposium 2004, 22 April - 24 April, 2004". Swiss Federal Institute of Forest, Snow and Landscape Research (WSL), Birmensdorf, pp. 54–57.
- Frattini, P., Crosta, G., Carrara, A., Agliardi, F., 2008. Assessment of rockfall susceptibility by integrating statistical and physically-based approaches. *Geomorphology* 94, 419–437. doi:10.1016/j.geomorph.2006.10.037
- Frayssines, M., Hantz, D., 2006. Failure mechanisms and triggering factors in calcareous cliffs of the Subalpine Ranges (French Alps). *Eng. Geol.* 86, 256–270.
- Fritts, H.C., 1976. *Tree-rings and Climate*. Academic Press, London.
- Gardner, J., 1970. Rockfall: a geomorphic process in high mountain terrain. *Alta. Geogr.*

- Gardner, J.S., 1983. Rockfall frequency and distribution in the Highwood Pass area, Canadian Rocky Mountains. *Z. Für Geomorphol.* 27, 311–24.
- Gsteiger, P., 1989. Steinschlag, Wald, Relief. Empirische Grundlagen zur Steinschlagmodellierung. (Thèse non publiée). Université de Bern, Bern, Suisse.
- Gsteiger, P., 1993. Steinschlagschitzwald. Ein Beitrag zur Abgrenzung, Beurteilung und Bewirtschaftung. *Schweiz. Z. Für Forstwes.* 144, 115–132.
- Guerin, A., Rossetti, J.-P., Hantz, D., Jaboyedoff, M., 2013. Estimating rock fall frequency in a limestone cliff using LIDAR measurements, in: First International Conference on Landslides Risk. Presented at the First International Conference on Landslides Risk.
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., Reichenbach, P., 1999. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology* 31, 181–216.
- Guzzetti, F., Crosta, G., Detti, R., Agliardi, F., 2002. STONE: a computer program for the three-dimensional simulation of rock-falls. *Comput. Geosci.* 28, 1079–1093.
- Haeberli, W., Beniston, M., 1998. Climate change and its impacts on glaciers and permafrost in the Alps. *Ambio*.
- Haneberg, W.C., 2008. Using close range terrestrial digital photogrammetry for 3-D rock slope modeling and discontinuity mapping in the United States. *Bull. Eng. Geol. Environ.* 67, 457–469. doi:10.1007/s10064-008-0157-y
- Hantz, D., Vengeon, J.M., Dussauge-Peisser, C., 2003. An historical, geomechanical and probabilistic approach to rock-fall hazard assessment. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 3, 693–701.
- Hantz, D., 2012. Gestion de l'incertitude et de l'ignorance, dans l'évaluation de la probabilité de déclenchement des éboulements rocheux, in: *Fiabilité Des Matériaux et Des Structures 2012*. Presented at the *Fiabilité des matériaux et des structures 2012*.
- Hantz, D., Benedetti, L., Bourlès, D., Carcaillet, J., 2012. Un modèle de recul des falaises pour évaluer les fréquences d'éboulement, in: *Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur 2012*. Presented at the *Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur 2012*.
- Hantz, D., Jongmans, D., Baillet, L., 2013. Propositions pour le développement d'une méthodologie d'évaluation quantitative de l'aléa rocheux A new methodology for quantitative rock fall hazard assessment.
- Hantz, D., Rossetti, J., Servant, F., D'Amato, J., 2014. Etude de la distribution des blocs dans un éboulement pour l'évaluation de l'aléa. Presented at the *Rock Slope Stability, Marrakech, Maroc*, p. 10.
- 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.
- Hungr, O., Leroueil, S., Picarelli, L., 2014. The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides* 11, 167–194. doi:10.1007/s10346-013-0436-y
- Ibsen, M.-L., Brunnsden, 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, Landslides in the European Union* 15, 241–258.
- Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014. *Climate Change 2013 - The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Jaboyedoff, M., Labiouse, V., 2011. Technical Note: Preliminary estimation of rockfall runout zones. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 11, 819–828. doi:10.5194/nhess-11-819-2011
- Jancke, O., Dorren, L.K.A., Berger, F., Fuhr, M., Köhl, M., 2009. Implications of coppice stand characteristics on the rockfall protection function. *For. Ecol. Manag.* 259, 124–131. doi:10.1016/j.foreco.2009.10.003
- Jancke, O., 2012. Quantifying the mechanical resistance of coppice trees against rockfall (Thesis). University of Hamburg, Hamburg.

- Jomelli, V., Francou, B., 2000. Comparing the characteristics of rockfall talus and snow avalanche landforms in an Alpine environment using a new methodological approach: Massif des Ecrins, French Alps. *Geomorphology* 35, 181–192.
- Kennedy, M., 2009. *Introducing Geographic Information Systems with ArcGIS: A Workbook Approach to Learning GIS*. John Wiley & Sons.
- Kirchsteiger, C., 1999. On the use of probabilistic and deterministic methods in risk analysis. *J. Loss Prev. Process Ind.* 12, 399–419.
- Köse, N., Aydın, A., Akkemik, Ü., Yurtseven, H., Güner, T., 2010. Using tree-ring signals and numerical model to identify the snow avalanche tracks in Kastamonu, Turkey. *Nat. Hazards* 54, 435–449. doi:10.1007/s11069-009-9477-x
- Landis, J.R., Koch, G.G., 1977. The measurement of observer agreement for categorical data. *biometrics* 33, 159 – 174.
- Larson, P.R., 1994. *The Vascular Cambium - Development and Structure*. Springer, Berlin.
- Leroi, E., Bonnard, C., Mc Innes, R., 2005. Risk assessment and management, in: Hungr, O., Fell, R., Couture, R., Eberhardt, E. (Eds.), *Landslide Risk Management*. Taylor & Francis Group, London, p. 771.
- Loye, A., Jaboyedoff, M., Pedrazzini, A., 2009. Identification of potential rockfall source areas at a regional scale using a DEM-based geomorphometric analysis. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 9, 1643–1653. doi:10.5194/nhess-9-1643-2009
- Luckman, B.H., 1976. Rockfalls and rockfall inventory data: Some observations from surprise valley, Jasper National Park, Canada. *Earth Surf. Process.* 1, 287–298.
- Matsuoka, N., Sakai, H., 1999. Rockfall activity from an alpine cliff during thawing periods. *Geomorphology* 28, 309–328.
- Matsuoka, N., 2001. Direct observation of frost wedging in alpine bedrock. *Earth Surf. Process. Landf.* 26, 601–614.
- Matsuoka, N., 2008. Frost weathering and rockwall erosion in the southeastern Swiss Alps: Long-term (1994–2006) observations. *Geomorphology* 99, 353–368. doi:10.1016/j.geomorph.2007.11.013
- Matsuoka, N., Murton, J., 2008. Frost weathering: recent advances and future directions. *Permafr. Periglac. Process.* 19, 195–210. doi:10.1002/ppp.620
- McCarroll, D., Shakesby, R.A., Matthews, J.A., 2001. Enhanced rockfall activity during the Little Ice Age: further lichenometric evidence from a Norwegian talus. *Permafr. Periglac. Process.* 12, 157–164.
- Moya, J., Corominas, J., Pérez Arcas, J., Baeza, C., 2010a. Tree-ring based assessment of rockfall frequency on talus slopes at Solà d’Andorra, Eastern Pyrenees. *Geomorphology* 118, 393–408. doi:10.1016/j.geomorph.2010.02.007
- Moya J, Corominas J and Arcas JP, 2010b. Assessment of the Rockfall Frequency for Hazard Analysis at Solà d’Andorra (Eastern Pyrenees). In: Stoffel M, Bollschweiler M, Butler DR, et al. (eds), *Tree Rings and Natural Hazards*. Springer, Dordrecht, Netherlands, 161–175
- Nicolai, V., 1986. The bark of trees: thermal properties, microclimate and fauna. *Oecologia* 69, 148–160.
- Nicoletti, P.G., Sorriso-Valvo, M., 1991. Geomorphic controls of the shape and mobility of rock avalanches. *Geol. Soc. Am. Bull.* 103, 1365–1373.
- Payette, S., 2010. *La dendroécologie: principes, méthodes et applications*. Presses de l’Université Laval.
- Perret, S., Baumgartner, M., Kienholz, H., 2006a. Inventory and analysis of tree injuries in a rockfall-damaged forest stand. *Eur. J. For. Res.* 125, 101–110.
- Perret, S., Stoffel, M., Kienholz, H., 2006b. Spatial and temporal rockfall activity in a forest stand in the Swiss Prealps - A dendrogeomorphological case study. *Geomorphology* 219–231.
- Picarelli, L., Oboni, F., Evans, S.G., Mostyn, G., Fell, R., 2005. Hazard characterization and quantification, in: Hungr, O., Fell, R., Couture, R., Eberhardt, E. (Eds.), *Landslide Risk Management*. Taylor & Francis Group, London, p. 771.
- Porter, S.C., Orombelli, G., 1981. Alpine Rockfall Hazards: Recognition and dating of rockfall deposits in the western Italian Alps lead to an understanding of the potential hazards of giant rockfalls in mountainous regions. *Am. Sci.* 69, 67–75.

- Quilhó, T., Sousa, V., Tavares, F., Pereira, H., 2013. Bark anatomy and cell size variation in *Quercus faginea*. *Turk. J. Bot.* 37, 561–570.
- Radtke, A., Ambraß, S., Zerbe, S., Tonon, G., Fontana, V., Ammer, C., 2013. Traditional coppice forest management drives the invasion of *Ailanthus altissima* and *Robinia pseudoacacia* into deciduous forests. *For. Ecol. Manag.* 291, 308–317. doi:10.1016/j.foreco.2012.11.022
- Ritter, D.F., Kochel, R.C., Miller, J.R., 2011. *Process Geomorphology*. Waveland Press.
- Romero, C., 2006. *Tree responses to stem damage* (PhD). Florida.
- Rosser, N.J., Petley, D.N., Lim, M., Dunning, S.A., Allison, R.J., 2005. Terrestrial laser scanning for monitoring the process of hard rock coastal cliff erosion. *Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol.* 38, 363–375.
- Rovéra, G., Robert, Y., 2005. Conditions climatiques hivernales et processus d'érosion périglaciaires dans les bad-lands marneux de Draix (800 m, Alpes du Sud, France). *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 59, n°1, 31-48
- Rozas, V., 2003. Tree age estimates in *Fagus sylvatica* and *Quercus robur*: testing previous and improved methods. *Plant Ecol.* 167, 193–212.
- Sachs, T., 1991. *Pattern formation in plant tissue*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Salvini, R., Francioni, M., Riccucci, S., Bonciani, F., Callegari, I., 2013. Photogrammetry and laser scanning for analyzing slope stability and rock fall runout along the Domodossola–Iselle railway, the Italian Alps. *Geomorphology* 185, 110–122. doi:10.1016/j.geomorph.2012.12.020
- Sandersen, F., Bakkehøi, S., Hestnes, E., Lied, K., 1997. The influence of meteorological factors on the initiation of debris flows, rockfalls, rockslides and rockmass stability. *Publ. - Nor. Geotek. Inst.* 201, 97–114.
- Santana, D., Corominas, J., Mavrouli, O., Garcia-Sellés, D., 2012. Magnitude–frequency relation for rockfall scars using a Terrestrial Laser Scanner. *Eng. Geol.* 145–146, 50–64. doi:10.1016/j.enggeo.2012.07.001
- Sass, O., Oberlechner, M., 2012. Is climate change causing increased rockfall frequency in Austria? *Nat Hazards Earth Syst Sci* 12, 3209–3216. doi:10.5194/nhess-12-3209-2012
- Schiermeier, Q., 2003. Alpine thaw breaks ice over permafrost's role. *Nature* 424, 712–712.
- Schläppy, R., Eckert, N., Jomelli, V., Stoffel, M., Grancher, D., Brunstein, D., Naaim, M., Deschatres, M., 2014. Validation of extreme snow avalanches and related return periods derived from a statistical-dynamical model using tree-ring techniques. *Cold Reg. Sci. Technol.* 99, 12–26. doi:10.1016/j.coldregions.2013.12.001
- Schneuwly, D.M., Stoffel, M., 2008. Tree-ring based reconstruction of the seasonal timing, major events and origins of rockfall on a case study slope in the Swiss Alps. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 203–211.
- Schneuwly, D.M., 2009. *Tree rings and rockfall - Anatomic tree reactions and spatio-temporal rockfall analysis* (Geoscience). Fribourg, Fribourg, Suisse.
- Schneuwly, D.M., Stoffel, M., Dorren, L., Berger, F., 2009. Three-dimensional analysis of the anatomical growth response of European conifers to mechanical disturbance. *Tree Physiol.* doi:10.1093/treephys/tpp056
- Schneuwly-Bollschweiler, M., Schneuwly, D.M., 2012. How fast do European conifers overgrow wounds inflicted by rockfall? *Tree Physiol.* tps059. doi:10.1093/treephys/tps059
- Schroder, J.F., 1978. Dendrogeomorphological analysis of mass movement on Table Cliffs Plateau, Utah. *Quat. Res.* 9, 168–185.
- Schroder, J.F., 1980. Dendrogeomorphology: review and news technics of tree-rings dating. *Prog. Phys. Geogr.* 4, 161–188.
- Schweingruber, F.H., 1993. *Jahrringe und Umwelt - Dendroökologie*. Eidgenössische Forschungsanst. für Wald, Schnee und Landschaft.
- Schweingruber, F.H., 1996. *Tree Rings and Environment Dendroecology*. Paul Haupt Publishers.
- Selby, M.J., 1982. *Hillslope materials and processes*. 264 pp.

- Šilhán, K., Brázdil, R., Pánek, T., Dobrovolný, P., Kašičková, L., Tolasz, R., Turský, O., Václavek, M., 2011. Evaluation of meteorological controls of reconstructed rockfall activity in the Czech Flysch Carpathians. *Earth Surf. Process. Landf.* 36, 1898–1909. doi:10.1002/esp.2211
- Šilhán, K., Pánek, T., Hradecký, J., 2012. Tree-ring analysis in the reconstruction of slope instabilities associated with earthquakes and precipitation (the Crimean Mountains, Ukraine). *Geomorphology* 173–174, 174–184. doi:10.1016/j.geomorph.2012.06.010
- Šilhán, K., Pánek, T., Hradecký, J., 2013. Implications of spatial distribution of rockfall reconstructed by dendrogeomorphological methods. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 13, 1817–1826. doi:10.5194/nhess-13-1817-2013
- Smeeton, N.C., 1985. Early history of the kappa statistic. *Biometrics* 41, 795.
- Stoffel, M., 2005a. Spatio-temporal variations of rockfall activity into forest - results from tree-ring and tree analysis (Geoscience). Geographie Universität Freiburg, Fribourg, Suisse.
- Stoffel, M., 2005b. Assessing the vertical distribution and visibility of rockfall scars in trees. *Schweiz Z Forstwes* 195–199.
- 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. Für Geomorphol.* 49, 89–106.
- Stoffel, M., Schneuwly, D., Bollschweiler, M., Lièvre, I., Delaloye, R., Myint, M., Monbaron, M., 2005b. Analyzing rockfall activity (1600-2002) in a protection forest - a case study using dendrogeomorphology. *Geomorphology* 224–241.
- Stoffel, M., 2006. A Review of Studies Dealing with Tree Rings and Rockfall Activity: The Role of Dendrogeomorphology in Natural Hazard Research. *Nat. Hazards* 51–70.
- Stoffel, M., Perret, S., 2006. Reconstructing past rockfall activity with tree rings: Some methodological considerations. *Dendrochronologia* 1–15.
- Stoffel, M., Wehrli, A., Kühne, R., Dorren, L.K.A., 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.
- Stoffel, M., Bollschweiler, M., 2008. Tree-ring analysis in natural hazards research – an overview. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 187–202.
- Stoffel, M., Bollschweiler, M., Butler, D.R., Luckman, B.H., 2010a. *Tree rings and natural hazards*. Springer.
- Stoffel, M., Schneuwly, D.M., Bollschweiler, M., 2010b. Assessing Rockfall Activity in a Mountain Forest – Implications for Hazard Assessment, in: Stoffel, M., Bollschweiler, M., Butler, D.R., Luckman, B.H. (Eds.), *Tree Rings and Natural Hazards, Advances in Global Change Research*. Springer Netherlands, pp. 139–155.
- Sturzenegger, M., Stead, D., 2009. Close-range terrestrial digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity characterization on rock cuts. *Eng. Geol.* 106, 163–182. doi:10.1016/j.enggeo.2009.03.004
- Tissier, J., Lambs, L., Peltier, J.-P., Marigo, G., 2004. Relationships between hydraulic traits and habitat preference for six *Acer* species occurring in the French Alps. *Ann. For. Sci.* 61, 81–86.
- 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. doi:10.1177/0309133313506451
- Trappmann, D., Stoffel, M., 2013. Counting scars on tree stems to assess rockfall hazards: A low effort approach, but how reliable? *Geomorphology* 180–186.
- 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.* n/a–n/a. doi:10.1002/esp.3580
- Varnes, D.J., 1978. Slope movement types and processes. Schuster, RL & Krizek, RJ (eds.) *Landslides, Analysis and Control*, 11–33. Transp. Res. Board Spec. Rep.
- Villalba, R., Veblen, T.T., 1997. Improving estimates of total tree ages based on increment core samples. *Ecoscience* 4, 534–542.

- Volkwein, A., Schellenberg, K., Labiouse, V., Agliardi, F., Berger, F., Bourrier, F., Dorren, L.K.A., Gerber, W., Jaboyedoff, M., 2011. Rockfall characterisation and structural protection – a review. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 11, 2617–2651. doi:10.5194/nhess-11-2617-2011
- Wenger, K.F., 1984. *Forestry Handbook*. John Wiley & Sons.
- West, P.W., 2009. *Tree and Forest Measurement*. Springer Science & Business Media, Heidelberg.
- Winchester, V., Chaujar, R.K., 2002. Lichenometric dating of slope movements, Nant Ffrancon, North Wales. *Geomorphology* 47, 61–74.

Tables

Tables des figures

Figures des parties 1 à 3 et 5

Figure 1 : Classification des mouvements de masse gravitaires selon leur mouvement et le type de matériel déplacé d'après Varnes, 1978, simplifié	13
Figure 2 : Représentation schématique du processus et de son emprise spatiale, d'après ARPA et CEMAGREF (2008).....	14
Figure 3 : Types de mouvements de la pierre pendant sa chute, d'après Dorren (2003).....	16
Figure 4 : Une pierre arrêtée dans sa chute par une cèpée d' <i>Acer opalus</i> présente sur sa trajectoire au lieu-dit de la Croupe du Plantin, Saint-Paul-de-Varces, Erwan Roussel, 12.03.2014.....	18
Figure 5 : Cycle d'évolution des peuplements forestiers de protection en relation avec leur niveau de protection d'après Dorren et Berger (2006b).....	19
Figure 6 : Simulations trajectographiques de chutes de pierres d'un volume de 0,064m ³ , (a) sans et (b) avec prise en compte du couvert forestier, issues de <i>RockyFor3D</i> , appliquée à la zone d'étude, La Croupe de Plantin, à Saint-Paul-de-Varces.	20
Figure 7 : Concept « Changement / Evènement – Impact – Réponse » de Schroder (1978, 1980) adapté par Astrade et Bégin (2003).....	22
Figure 8 : Réactions morphologiques de la végétation ligneuse selon les perturbations provoquées par les processus géomorphologiques traumatisant, d'après Stoffel (2005a).....	23
Figure 9 : Stades de cicatrisation du <i>Larix decidua</i> après l'impact d'une pierre à l'année <i>n</i> : (a) année <i>n</i> ; (b) <i>n</i> +4 ans ; (c) <i>n</i> +9 ans ; (d) <i>n</i> +21 ans ; (e) <i>n</i> +91 ans. Les pointillés indiquent les limites de la blessure initiale, d'après Trappmann <i>et al.</i> (2013).....	24
Figure 10 : Routine HistoFit appliquée à la Croupe du Plantin, issu d'un MNT d'une résolution de 2,5 m. « A » indique le seuil de pente (49°) ; « B » indique la classe morphologique modale.....	56
Figure 11 : Représentation tridimensionnelle de La Croupe du Plantin, Saint-Paul-de-Varces, Isère, par <i>Close-range Photogrammetry</i> , réalisée par Erwan Roussel à l'aide du logiciel AgiSoft© PhotoScan, 27.03.14.....	58

Figures de l'article, partie 4

Figure 1. (a) The study site is located in the French Alps, at the eastern face of the Vercors massif, 20 km southwest of Grenoble. (b) Hillshade map computed using the DEM derived from airborne LiDAR data with the study site delimited by white polygon. View of studied slope (c), the forest stand (d), injured <i>Acer opalus</i> (e) and <i>Quercus pubescens</i> stems (f)	41
Figure 2. (a) Hillshade map of the study site. (b) Longitudinal and (c, d, e) lateral profiles of the studied slope	42
Figure 3. Spatial distribution and diameter at breast height (DBH) of <i>Quercus pubescens</i> and <i>Acer opalus</i> permanent tree plot	43
Figure 4. Age-diameter regression models for <i>Quercus pubescens</i> and <i>Acer opalus</i>	44
Figure 5. Reference recurrence interval map (Refmap) calculated for 847 single trees and coppice stools.....	45
Figure 6. Recurrence interval map (Refmap) calculated for (a) <i>Quercus pubescens</i> , (b) <i>Acer opalus</i> trees and (c) variations of the recurrence interval between species	46
Figure 7. Recurrence interval map calculated for <i>Quercus pubescens</i> (a), <i>Acer opalus</i> (b) single trees and (c) variations of the recurrence interval	47
Figure 8. Recurrence interval map calculated for <i>Quercus pubescens</i> (a), <i>Acer opalus</i> (b) coppice stools and (c) variations of the recurrence interval	48
Figure 9. Bark analysis for <i>Quercus pubescens</i> and <i>Acer opalus</i> . (a) bark thickness-diameter linear regression models. (b) Details of <i>Quercus pubescens</i> (wedge section Qp3) and (c) <i>Acer opalus</i> (wedge section Ao1). B: bark; W: wood; Xm: xylem; Cm: cambium; Phm: phloem; Pr: periderm; Rhy: rhytidome; Ck: cork. Qp3 has a DBH of 31.4 cm and a gauged bark thickness of 24 mm. Ao1 has a DBH of 28.3 cm and a gauged bark thickness of 6 mm.....	49

Table des tableaux

Tableaux des parties 1 à 3 et 5

Tableau 1 : Principales recherches en dendrogéomorphologie dans le domaine des chutes de pierres.....	26
---	----

Tableaux de l'article, partie 4

Table 1. Overview of scars and calculated recurrence interval for <i>Quercus pubescens</i> and <i>Acer opalus</i> single trees and coppice stools.....	50
--	----

Table 2. Age of trees and number of scars divided in three slope compartments. Downslope represent the lower third part, mid-slope the central part and upslope the upper third part of the slope.....	51
Table 3. Cohen kappa coefficient test computed between recurrence interval maps.....	52
Table 4. Overview of <i>Quercus pubescens</i> and <i>Acer opalus</i> bark thickness analyses.....	53