



HAL
open science

Apport de l'approche dendrogéomorphologique pour la reconstruction pluriséculaire de l'activité spatiotemporelle des avalanches : le cas du couloir de Souliers (Massif du Queyras, Alpes du sud)

Robin Mainieri

► **To cite this version:**

Robin Mainieri. Apport de l'approche dendrogéomorphologique pour la reconstruction pluriséculaire de l'activité spatiotemporelle des avalanches : le cas du couloir de Souliers (Massif du Queyras, Alpes du sud). Biodiversité et Ecologie. 2015. dumas-01282389

HAL Id: dumas-01282389

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01282389>

Submitted on 3 Mar 2016

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.

Master 2

*Domaine: Sciences Humaines et Sociales
Mention: "Sciences Du Territoire"*

**Spécialité Recherche:
Systèmes Territoriaux, Aide à la Décision, Environnement**

en réseau sur Rhône-Alpes

Mémoire - Article:

Apport de l'approche dendrogéomorphologique pour la reconstruction pluriséculaire de l'activité spatio-temporelle des avalanches : le cas du couloir de Souliers (Massif du Queyras, Alpes du sud).

Réalisé au Laboratoire : Institut de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture (IRSTEA) - Centre de Grenoble.

Mémoire soutenu le 17 juin 2015 à Grenoble.

devant un jury constitué de :

Responsable : Mr George ROVERA (Maître de conférences, PACTE)
Mr Jérôme LOPEZ-SAEZ (Chercheur contractuel, IRSTEA)
Mr Nicolas ECKERT (Ingénieur-Chercheur, IRSTEA)
Examineur : Mr Franck GIAZZI (Maître de conférences, PACTE)

MAINIERI Robin
M2 STADE
Année 2014-2015

Etablissements partenaires:

Résumé

Dans les Alpes, les avalanches sont à l'origine de la destruction de nombreux enjeux socio-économiques et causent également la perte de dizaines de vies humaines chaque année. Il est donc nécessaire de comprendre le fonctionnement de cet aléa d'un point de vue spatial mais aussi temporel. Les reconstitutions d'évènements issues d'approches géo-historiques sont souvent lacunaires. C'est pourquoi il est important de les compléter avec des approches à hautes-résolutions spatio-temporelles. L'approche dendrogéomorphologique, fondée sur l'utilisation des arbres en tant que témoins silencieux des évènements naturels passés, offre cette opportunité. L'objectif de ce mémoire est de proposer une reconstruction pluriséculaire de l'activité d'un couloir avalancheux boisé, localisé dans le Massif du Queyras (couloir avalancheux de Souliers, au sud-est des Alpes Françaises). L'analyse dendrogéomorphologique repose sur l'étude de 201 mélèzes (*Larix decidua*) présentant des signes traumatiques caractéristiques d'une activité avalancheuse. L'analyse des échantillons a permis de dater 527 perturbations anatomiques et de reconstituer 23 avalanches depuis 1381. La comparaison avec le couloir d'avalanches du hameau de l'Echalp, localisé également dans le massif du Queyras et déjà étudié (Corona *et al.*, 2013), montre des périodes communes de fréquences plus élevées en 1660-1690, 1802-1820, et 1846-1887 et quatre évènements communs en 1587, 1642, 1740 et 1800. Ces évènements coïncident avec des températures hivernales inférieures à la moyenne, et à des périodes d'avancées des glaciers. L'analyse de l'évolution du peuplement forestier depuis 1889, montre, qu'au cours du 20^{ième} siècle, le versant a subi un processus d'afforestation, notamment dans sa partie supérieure. L'absence d'avalanche depuis 1933 et la remontée du mélézin au niveau des zones de départ sont en partie expliquées par le réchauffement climatique récent.

Mots clefs : avalanche, dendrogéomorphologie, fluctuations climatiques, périodes de retour, Queyras, *Larix decidua*.

Abstract

In the Alps, avalanches are responsible for the destruction of many socio-economic issues and also cause the loss of tens of lives each year. It is therefore necessary to understand how this hazard in space and time. The reconstructions of events from geo-historical approaches are often inadequate. This is why it is important to supplement with approaches to high-spatial-temporal resolutions. The dendrogeomorphological approach based on the use of trees as silent witnesses of past natural events, offers this opportunity. The study presents a reconstruction of the centuries-old avalanche events from a wooded avalanche path in the Massif du Queyras (Souliers avalanche path, southeast of the French Alps). Analysis of past events was based on tree-rings series from 201 heavily affected multicentennial larch trees (*Larix Decidua* Mill.) growing near or next to the avalanche path. Analysis of samples allowed to date 527 anatomical disturbances and reconstruct 23 destructive snow avalanches between 1381 and 2011. The comparison with the Echalp avalanche path, also located in Queyras massif and already studied (Corona *et al.*, 2013), displayed common periods of high magnitude in 1660-1690, 1802-1820, et 1846-1887 and 4 common events in 1587, 1642, 1740 and 1810 correlating with below-average winter temperatures and glacier advances. The analysis of the forest stand evolution since 1889, shows that during the 20th century, the catchment has undergone a process of afforestation, especially in its upper part. The absence of avalanche since 1933 and the elevation of the larch forest at the starting areas are partly explained by the recent global warming.

keywords: snow avalanche, dendrogeomorphology, climatic fluctuations, return periods, *Larix Decidua* Mill., Alps, Queyras.

Remerciements

Ce mémoire de recherche a été le fruit d'une production menée sur plusieurs mois et je tiens à remercier les personnes qui m'ont aidé à le concrétiser.

Je tiens à remercier tout particulièrement Jérôme Lopez-Saez, encadrant du stage, pour sa disponibilité, son aide et ses précieux conseils lors de mes sollicitations, ainsi que pour le suivi de mes travaux. Je souhaite remercier Christophe Corona, dendrogéomorphologue à Géolab (Clermont Ferrand), qui, malgré un emploi du temps très chargé a veillé au bon déroulement de mon travail, en m'orientant dans ma méthode de travail et en exprimant des critiques constructives. Encore merci à tous les deux pour m'avoir permis de découvrir cette passionnante aventure qu'est la dendrogéomorphologie.

De même, je remercie Nicolas Eckert, pour la confiance accordée tout au long du stage et pour son investissement dans le projet DENDROAVAL, qui me permettra de continuer à travailler avec vous encore quelques mois.

Merci à mon tuteur universitaire, Georges Rovéra, enseignant-chercheur à l'Institut de Géographie Alpine pour son accompagnement tout au long du stage et pour ses réponses vis-à-vis de mes différentes sollicitations.

J'exprime mes considérations à tous ceux qui, de près ou de loin ont participé au bon déroulement du stage. Merci à toute l'équipe PIER dirigé par Frédéric Berger pour sa bonne humeur ainsi qu'à l'ensemble du personnel d'IRSTEA Grenoble.

Enfin, j'ai une pensée pour ma famille et mes proches qui m'ont toujours soutenu dans mes travaux et dans ma vie de tous les jours. Merci à tous.

Ce mémoire est dédié à mon oncle et à ma grand-mère,

Sommaire

REMERCIEMENTS	5
1. INTRODUCTION	8
2. PROJET DE RECHERCHE	10
3. CONTEXTE SCIENTIFIQUE DE L'ETUDE	10
3.1 L'ALEA "AVALANCHE"	10
3.2 RISQUE ET EXPOSITION DES ENJEUX	13
3.3 L'ETUDE DES FREQUENCES ET DES PERIODES DE RETOUR	16
3.4 L'APPORT DES DONNEES PALEO-ENVIRONNEMENTALES.....	17
3.5 SPECIFICITE DE L'ETUDE DANS SON CHAMP SCIENTIFIQUE	24
4. EVOLUTION OF AVALANCHE ACTIVITY AND FOREST LAND COVER ON SOULIERS AVALANCHE PATH DURING THE LAST CENTURIES, QUEYRAS MASSIF, SOUTH ALPS.	27
ABSTRACT	27
4.1 INTRODUCTION.....	28
4.2 STUDY SITE	29
4.3 MATERIAL AND METHODS.....	30
4.4 RESULTS	33
4.5DISCUSSION.....	35
4.6 CONCLUSION.....	37
4.7 CAPTIONS	38
REFERENCES	48
5. PERSPECTIVES.....	54
5.1 IMPACT DES FLUCTUATIONS CLIMATIQUES SUR LA FREQUENCE ET/OU L'INTENSITE DES AVALANCHES	54
5.2 COULOIRS AVALANCHEUX DU QUEYRAS A POTENTIEL DENDROGEOMORPHOLOGIQUE	55
5.3 INTEGRATION DES DONNEES DANS LES MODELES	61
5.4 LE PROJET "DENDROAVAL"	64
6. CONCLUSION	66
7. BIBLIOGRAPHIE.....	67
TABLES DES FIGURES	73
TABLE DES TABLEAUX.....	74
TABLE DES MATIERES	76

Liste des abréviations

AD	<i>Anno Domini</i> , après Jésus Christ
asl	above sea level
CW/BC	compression wood / bois de compression
et al.	et <i>alii</i> , et les autres
GR/RC	growth reduction / réduction de croissance
TRD	traumatic resin ducts / canaux résinifères traumatiques
IRSTEA	institut de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture
PAG	petit âge glaciaire
RCR	réchauffement climatique récent
EPA	enquête permanente sur les avalanches
CLPA	carte de localisation des phénomènes avalancheux
DSRE	direction de la stratégie, de la recherche et de l'évaluation
EMGR	unité de recherche écosystèmes montagnards
PIER	équipe protection, ingénierie écologique, restauration
SEDYVIN	systèmes écologiques terrestres : dynamiques, vulnérabilités et ingénierie
ETNA	unité de recherche érosion torrentielle, neige et avalanche.

1. Introduction

Les avalanches font partie des aléas les plus courants en milieu de montagne (Strunk, 1997). Elles sont à l'origine de la destruction de nombreux enjeux socio-économiques mais causent également la mort de dizaines de personnes chaque année (Ancey, 1998). Il est donc nécessaire de comprendre le fonctionnement de cet aléa d'un point de vue spatial mais aussi temporel.

Actuellement, la connaissance des aléas repose sur des études géo-historiques (Leone, 2006; Le Gallou et Guignard, 2011). L'évolution spatio-temporelle des mouvements de versant est reconstituée sur des périodes courtes, de l'ordre de quelques décennies voire du siècle grâce à des séries d'observations systématiques (Enquête Permanente sur les Avalanches, fiches événements de services RTM, par exemple). Le recours à des archives historiques d'origines (archives privées, religieuses ou administratives...) et de formats (iconographie, photographies, écrits, récits oraux...) variés permet de rallonger les reconstitutions. Cependant, celles-ci ne sont généralement pas récoltées à des fins scientifiques. L'objectivité de l'observateur dans la récolte de l'information est un élément dont il faut tenir également compte (Ibsen et Brunsden, 1995). Ces archives, souvent lacunaires, ont tendance à se limiter aux événements majeurs. Les événements récents ou catastrophiques sont aussi souvent surreprésentés. Les reconstitutions de l'aléa issues d'une approche géo-historique présentent ainsi systématiquement un caractère discontinu. C'est pourquoi il est important de les compléter avec des approches à haute-résolutions spatio-temporelles (Jakob, 2005).

Sur les versants boisés à fortes pentes - propices aux avalanches (30 à 40°), la forêt joue un rôle central dans la compréhension et la prévention des risques naturels. Premièrement, la forêt joue un rôle d'ouvrage de protection biologique actif, par stabilisation du manteau neigeux, mais également passif par effet de "freinage" (Margreth, 2004). Elle peut également être utilisée comme un bio-indicateur des avalanches passées à travers l'étude des perturbations de croissance des arbres dans les couloirs avalancheux. Les méthodes récentes, développées par Stoffel et *al.* (2008), Casteller et *al.* (2008) ou Corona et *al.* (2010, 2012), permettent de reconstruire l'activité avalancheuse à très haute résolution spatio-temporelle. Les études menées actuellement à l'Institut de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture (Irstea) du centre de Grenoble, au sein de l'équipe Protection, Ingénierie Ecologique et Restauration (équipe PIER; responsable : Frédéric Berger) vont également dans ce sens. Ces travaux permettent notamment le développement d'outils et de méthodologies qui viennent en appui aux politiques de prévention des risques dans le contexte des changements globaux, afin d'assurer la durabilité du développement des territoires.

Il s'agit, dans ce mémoire, de proposer une reconstitution pluriséculaire (>500 ans) de l'activité avalancheuse d'un couloir localisé dans le Massif du Queyras (couloir avalancheux de Souliers, sud-est des Alpes Françaises) au moyen d'une approche dendrogéomorphologique. Les résultats obtenus pourront ensuite être comparés à un autre couloir d'avalanches déjà étudié dans cette région (couloir avalancheux de l'Echalp; Corona *et al.*, 2013).

Ce mémoire se décompose en trois parties : (i) la première partie est consacrée à un état de l'art sur l'aléa avalanche et sur l'intérêt de la dendrogéomorphologie comme méthode paléo-environnementale pour la reconstruction de l'activité passée des avalanches. Cette première partie permet également de mieux appréhender le contexte scientifique dans lequel s'inscrivent mes travaux actuels; (ii) La seconde partie contient l'article scientifique, qui fera l'objet d'une soumission dans la revue *The Holocene* (IF : 3,57); cet article reprend l'ensemble des méthodes utilisées pour l'analyse dendrogéomorphologique et des résultats, ainsi qu'une discussion centrée sur les effets des fluctuations climatiques sur l'activité avalancheuse au cours des 500 dernières années et sur le rôle du réchauffement climatique récent vis-à-vis de la diminution de l'activité avalancheuse, d'une part, et la mise en évidence d'un processus d'afforestation des zones de départ, d'autre part; enfin, (iii) la dernière partie de ce mémoire-article sera consacré à une discussion centrée sur l'impact des fluctuations climatiques sur l'activité avalancheuse et proposera, dans le cadre d'une perspective de recherche, une cartographie régionale des couloirs avalancheux qui présentent un potentiel dendrogéomorphologique.

2. Projet de Recherche

Les travaux de recherche présents dans ce mémoire ont été mis en œuvre et supportés grâce au projet **ECANA** (Etude Climatologique de l'Activité Avalancheuse Naturelle).

Ce projet est financé par la Direction Générale de la Prévention des Risques (DGPR) du Ministère de l'Environnement depuis 2009. Les travaux sont effectués en collaboration entre l'unité de recherche Erosion Torrentielle Neige et Avalanches (ETNA) d'Irstea¹ Grenoble et le Centre d'Etude de la Neige (CEN) de Météo France.

Il a pour objectif principal l'étude de la climatologie de l'activité avalancheuse naturelle dans les Alpes Françaises.

Les recherches pour ce mémoire article ont été menées au sein du centre Irstea de Grenoble en collaboration avec l'UR ETNA et l'équipe PIER² (UR EMGR³) grâce à l'appui scientifique de Messieurs Nicolas Eckert, Ingénieur Chercheur, Jérôme Lopez, Post-Doctorant, et Christophe Corona, Chargé de Recherche CNRS au laboratoire Géolab⁴.

3. Contexte scientifique de l'étude

3.1 L'aléa "avalanche"

3.1.1 Définition

Les notions concernant les avalanches dans les paragraphes suivants ont été directement tirées de l'ouvrage de C. Ancey (1998) et de la thèse de J. Vallet (2002). Toute autre référence sera explicitement citée.

Il est difficile de donner une définition générale de " l'avalanche " qui puisse convenir et être acceptée par tous. Si l'on se réfère au sens commun, l'avalanche est " *la chute d'une masse de neige qui se détache de la montagne et dévale sur un versant en direction de la vallée*" (Dic. Larousse). De nombreux ouvrages généraux (McClung et Schearer, 1993; Ancey, 1998; Ancey, 2006) ainsi que des sites internet (<http://www.anena.org/>) en exposent les principaux fondements. D'une manière plus scientifique, l'avalanche est considérée comme un écoulement gravitaire de neige plus ou moins rapide qui va être classé en plusieurs catégories entraînant parfois une certaine confusion

¹ Institut de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture

² Protection, Ingénierie Ecologique, Restauration

³ Unité de Recherche Ecosystèmes Montagnards

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

(avalanches de poudreuses, avalanches sèches, humides, de plaques...). Une classification basée sur la notion de zone (critères spatiaux) et de phase (critères temporels) est préférable selon Vallet (2002), bien que d'autres soient possibles en fonction de la géodynamique, de la géomorphologie, depuis les avalanches les moins érosives au plus érosives, tout en intégrant la morphologie du chenal et du cône.

3.1.2 Zonage et phases de l'avalanche

Un site avalancheux peut-être subdivisé en trois zones (Figure 1);

- I. *La zone d'accumulation ou zone de départ* : secteur où l'avalanche va mobiliser l'essentiel de sa masse de neige;
- II. *La zone de transit* : chenal d'écoulement de l'avalanche. Cette zone est déterminée par les conditions topographiques du site;
- III. *La zone de dépôt*: la zone où l'avalanche s'arrête et dépose toute la neige transportée. C'est la pente qui va généralement conditionner cette partie du versant. La zone de dépôt peut remonter plus ou moins en amont dans le chenal, c'est ce qui distingue, entre autre, un cône avalancheux d'un cône torrentiel ou d'un cône d'éboulis.

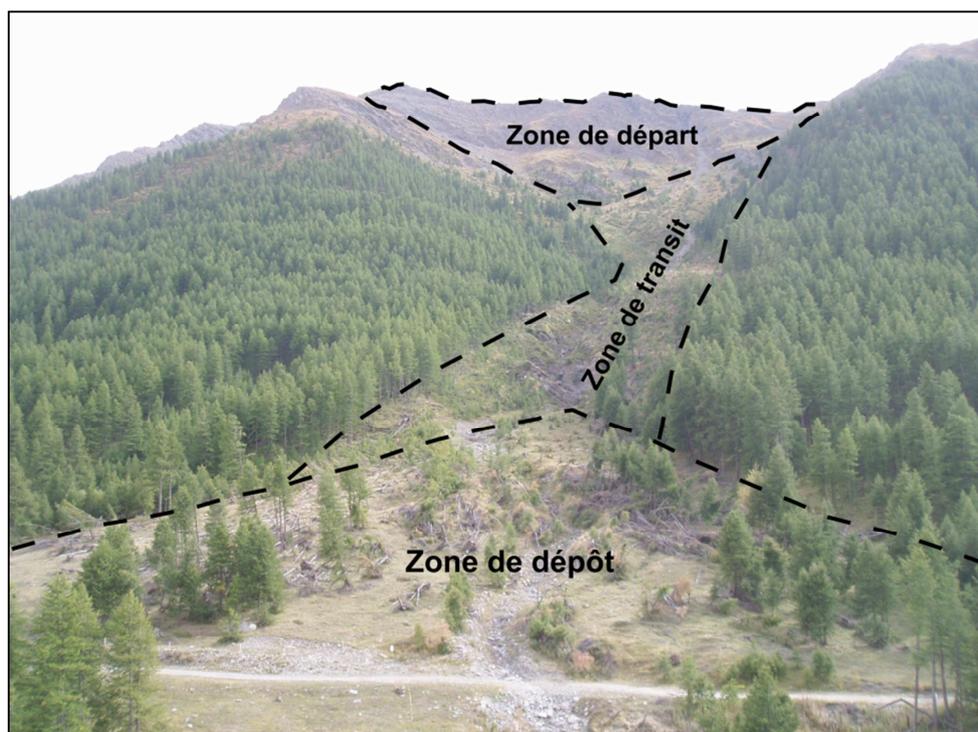


Figure 1. Zonage du couloir avalancheux de Maloqueste, Massif du Queyras (Hautes-Alpes, France, source : Jérôme Lopez-Saez, 2011).

Vient ensuite la définition des différentes phases d'écoulement de l'avalanche;

- I. *La phase de départ*: mise en mouvement de la neige dans la zone d'accumulation. Lorsque la composante tangentielle du poids devient supérieure à la somme des frottements et de la cohésion, l'équilibre est rompu, et l'avalanche se déclenche (Eckert, 2007b). Il existe deux types de départ;
 - *départ en plaque* (Figure 2a) : la fracture du manteau neigeux se fait de manière linéaire (forte cohésion),
 - *départ ponctuel* (Figure 2b) : la cassure se fait en forme de poire partant d'un point donné (faible cohésion);
- II. *La phase d'écoulement* : déplacement de la masse neigeuse le long de la zone de transit;
- III. *La phase d'arrêt* : La surface occupée par la neige de l'avalanche est l'aire d'arrêt.



Figure 2. Différentes phases d'écoulement d'une avalanche sous la forme d'un départ en plaque (a) et d'un départ ponctuel (b) (source WSL).

Enfin, les avalanches sont le plus souvent classées selon leur mode d'écoulement, ce qui reflète leur type de dynamique (Figure 3);

- *l'avalanche en aérosol* (Figure 3a) : constituée d'un mélange d'air et de neige, elle se caractérise par son écoulement très rapide pouvant atteindre 300-400 km/h et par sa morphologie en forme de nuage. Leur trajectoire n'est pas déterminée précisément par la

topographie locale mais suit approximativement la ligne de plus grande pente (Le Gallou et Guignard, 2011);

- *l'avalanche coulante* (Figure 3b) : l'écoulement se fait le long du sol en suivant la topographie. Généralement, elle est constituée d'un volume de neige assez dense et peu aéré. La vitesse dépasse rarement les 100 km/h;
- *l'avalanche mixte* : combinaison des deux modes précédents. Ces avalanches sont généralement les plus fréquentes.

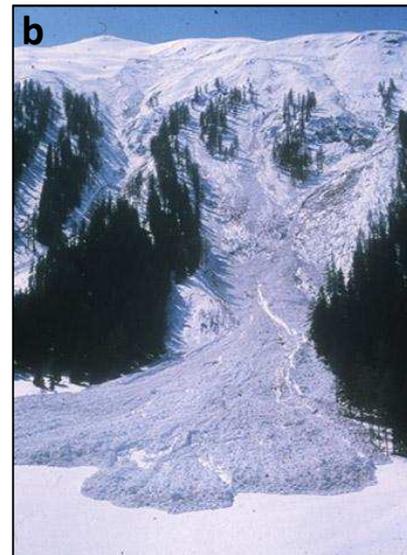


Figure 3. Exemple d'une avalanche en aérosol (a) et d'une avalanche coulante (b) (source : www.avalanches1eres6.com)

3.1.3 Facteurs à l'origine des avalanches

Les causes générales à l'origine du déclenchement d'une avalanche dépendent, en général, de l'interaction entre (i) les facteurs fixes, comme la topographie (pente entre 25° et 45°; Munter, 1997), l'exposition (vent et soleil) ou la végétation et (ii) les facteurs variables comme les chutes de neiges récentes ou les conditions météorologiques stationnelles (pluie, températures et vent). Lorsque ces différents facteurs sont réunis, on assiste à une rupture du manteau neigeux. En conclusion, il est important de rappeler que la recherche des causes d'un déclenchement d'une avalanche passe, avant tout, par la capacité de la stabilité du manteau neigeux.

3.2 Risque et exposition des enjeux

En territoire montagnard, le développement des loisirs de montagnes, de l'urbanisation et de l'industrialisation, est soumise de plus en plus à l'aléa avalancheux (Vallet, 2002). En France, on estime que les avalanches causent la mort d'une trentaine de personnes chaque année (Cartier et Mettoux, 2005). Les avalanches ne menacent pas uniquement le domaine skiable comme nous le

rappellent les catastrophes de Val d'Isère (1970, 39 morts; Figure 4a) ou encore de Montroc (1999, 20 morts; Figure 4b).

Il est important de s'interroger sur la notion du "risque naturel avalanche" et le replacer dans le questionnement de notre sujet de recherche. Les définitions les plus courantes du risque prennent en compte l'association d'un aléa et d'une vulnérabilité. Ici l'aléa est représenté par l'avalanche, et la vulnérabilité par des enjeux "exposés" à cet aléa. Ce que nous souhaitons montrer, c'est que la compréhension du risque lié à l'aléa avalanche et le rôle que peuvent jouer les milieux forestiers, doivent être appréhendés comme un ensemble d'éléments en interaction partielle. Bien que nos travaux s'inscrivent plus particulièrement dans la compréhension de l'aléa, ils ont pour finalité d'être intégrés dans d'autres travaux qui auront pour objet de définir des modalités de prévention et de gestion du risque.



Figure 4. Destruction des locaux de l'Union Nationale des Centres sportifs de Plein Air par l'avalanche de Val d'Isère en 1970 (a) (source : <http://lvb.avalanche.free.fr/>) et Chalets détruits après l'avalanche de Montroc en 1999 (source : Dauphiné Libéré).

Il s'agit donc dans un premier temps de définir précisément ce que nous entendons par la notion de risque.

Quelques définitions issues de la Géographie :

- Aléa : "*Phénomène naturel qui engendre un danger potentiel pour les personnes et les biens dans une zone et une période définie*" (Thouret, 2002). Dans le cas d'une avalanche, il s'agit d'un aléa d'origine naturelle dit hydro-météorologique. A noter que les facteurs humains constituent un aspect important dans l'étude du déclenchement des avalanches (Mc Cammon, 2010). Les avalanches, souvent provoquées par des activités anthropiques (surcharge accidentelle, déclenchement

préventif), montre bien qu'il est difficile d'opposer l'aléa et la vulnérabilité, et que la notion de risque est bien plus complexe.

- Vulnérabilité : "*Propension d'un élément donné (ou d'un ensemble d'éléments) à subir des atteintes ou dommages, en cas de manifestation d'un phénomène naturel, anthropique ou mixte*" (D'Ercole, 1998). La vulnérabilité principale dans le risque que peut constituer une avalanche est la présence d'enjeux humains.
- Risque : "*La possibilité ou la probabilité d'atteinte aux enjeux humains. Il résulte fondamentalement de la conjonction territoriale entre un ou plusieurs dangers ou aléas et la vulnérabilité*" (Pigeon & D'Ercole, 1999). Donc, dans le cadre de notre étude, il s'agit d'une conjonction entre le déclenchement d'une avalanche et la présence d'enjeux (biens, personnes, infrastructures).

Il semble intéressant d'inclure la notion de "capacité" développé par Davis *et al.* (2004). La capacité "*inclue les ressources (économiques, politiques, culturelles, sociales) dont disposent les communautés pour faire face aux menaces d'origines naturelles et anthropique et à leurs impacts*". Cette notion s'apparente à celle de résilience physique définie par Mathieu (1991) mais s'adapte aux sociétés humaines. La capacité des sociétés à faire face à ces menaces va avoir un effet direct sur la vulnérabilité. En d'autres termes, plus la capacité augmente, plus la vulnérabilité diminue, et inversement. On remarque ici toute la distinction qui existe entre les notions de vulnérabilité et d'enjeu, bien trop souvent associées comme étant une seule et même entité. Par exemple, un village se situant au pied d'un versant soumis aux avalanches, constitue un enjeu important (biens, personnes, infrastructures). En revanche, sa vulnérabilité est différente en fonction de sa capacité à faire face à l'avalanche. Celle-ci peut varier en fonction des décisions de prévention mises en place, comme par exemple, l'implantation d'ouvrages paravalanches.

Vincent Boudières (2013) résume assez bien cette réflexion sur le concept de risque avec le raisonnement suivant :

$$\text{Risque} = \text{Aléa} \times ((\text{Vulnérabilité/Capacités}) \times \text{Enjeu})$$

Pour conclure sur le concept de risque naturel, dans le cas de notre étude réalisée dans le Massif du Queyras, les populations locales "vivent" avec l'aléa avalancheux. D'ailleurs, beaucoup d'avalanches ont été médiatisées parce qu'elles se sont révélées meurtrières ou très destructrices. Mais certaines n'ont pas eu d'impact sur la mémoire collective car sans conséquence humaines. Ces faits nous ramènent donc à l'essence même du risque qui n'est, en réalité, qu'une représentation et le produit

d'un individu, d'un groupe ou d'une société. En ce sens, le risque (représentation de la catastrophe) est différent de la catastrophe (vécu).

3.3 L'étude des fréquences et des périodes de retour

L'urbanisation croissante dans des secteurs exposés constitue un des enjeux majeurs. Les territoires de montagne sont des espaces très fréquentés durant la saison hivernale. Les routes empruntées par les touristes nécessitent une sécurisation des voies de communication mais également des réseaux de transport (énergie, personnes, marchandises). Pour cela, la question des temps de retour est fondamentale car elle fonde les zonages des plans de prévention des risques en France (Le Gallou et Guignard, 2011). Cette notion est particulièrement utilisée pour les avalanches (Figure 5). Elle désigne alors, à travers une hypothèse de répétabilité du phénomène et une indépendance d'occurrence, un intervalle de temps moyen (2007b). En d'autres termes, la période de retour désigne l'intervalle de temps moyen qui sépare deux évènements avalancheux (Mc Lung et Schaerer, 1993; Corona *et al.* 2010).

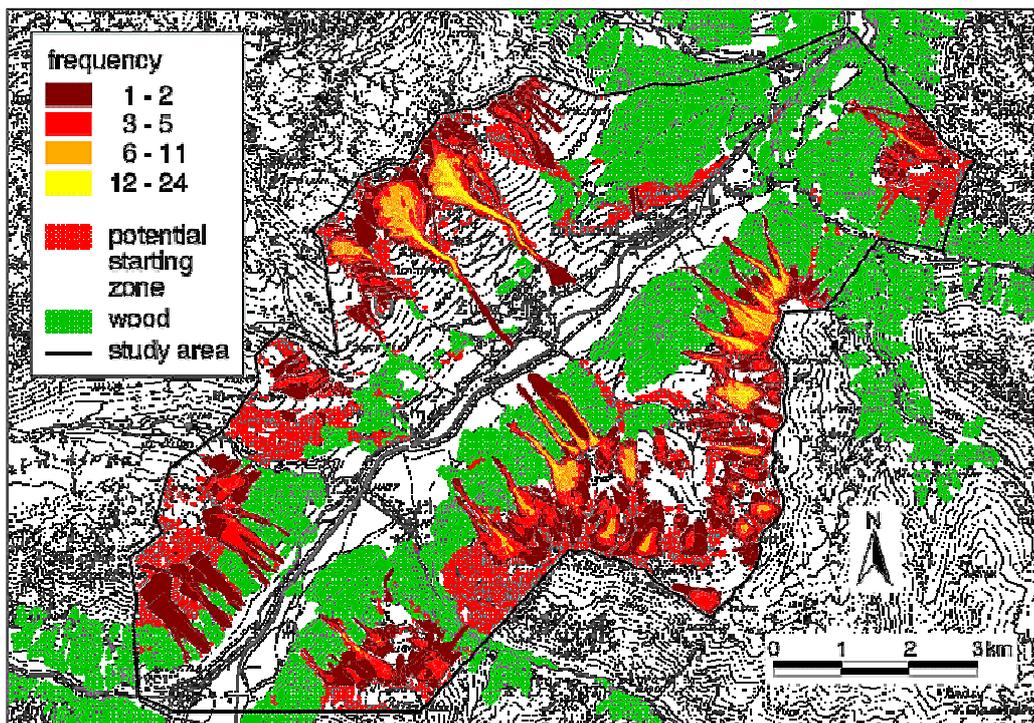


Figure 5. Répartition spatiale de la fréquence d'occurrence d'avalanche à partir d'une période d'observation de 14 ans sur la commune de Zuoz (Suisse) (source : Swiss Federal Office of Topography)

Cependant, la reconstitution de la fréquence et de l'intensité des évènements peut également s'appliquer à d'autres aléas comme les laves torrentielles (Strunk, 1997), les glissements de terrain (Lopez-Saez, 2011) ou les chutes de blocs (Stoffel, 2006). Ces périodes de retour corrélées avec d'autres proxies (climatiques, topographiques, etc) permettent de valider des modèles de dynamiques statistiques (Schlappy *et al.*, 2014). A noter que l'on différencie généralement le terme

de fréquence qui a une connotation plutôt temporelle, de la période de retour qui caractérise généralement l'information spatiale. Une fois cartographiées, les périodes de retour sont utilisées pour l'analyse de l'étendue spatiale et de l'emprise des aléas. Cela permet également de définir des seuils d'aléas unificateurs pour la mise en place d'ouvrages de protection. En ce qui concerne les avalanches, les cartographies obtenues dans la vallée de Chamonix (Corona *et al.*, 2012; Figure 6) ont été comparées avec des archives historiques détaillées d'évènements majeurs d'ampleur exceptionnelle. Ces comparaisons ont permis de démontrer que l'approche dendrogéomorphologique permettait d'affiner l'emprise latérale des évènements cartographiés sur les documents règlementaires (Carte de localisation des phénomènes avalancheux - CLPA).

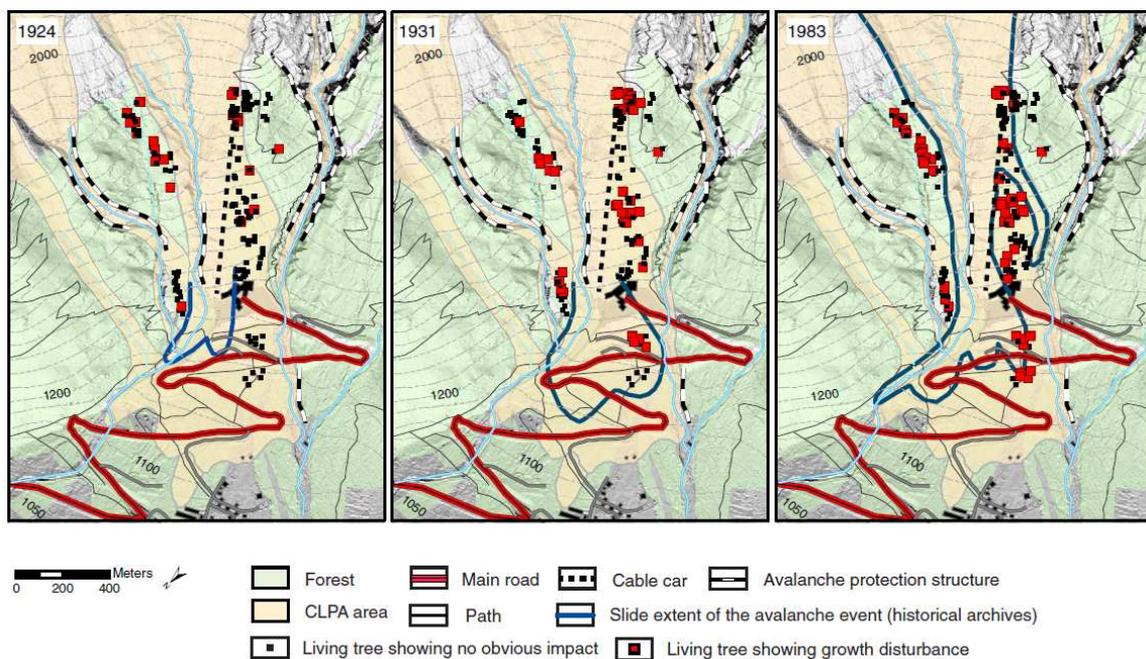


Figure 6. Reconstitution de l'extension spatiale des avalanches du couloir des Pèlerins (1924, 1931 et 1983) à partir d'une approche dendrogéomorphologique et comparaison avec les distances d'arrêt obtenues à partir des archives historiques (d'après Corona *et al.*, 2012)

3.4 L'apport des données paléo-environnementales

3.4.1 Les limites des données géo-historiques

Une chronique des événements passés à haute résolution spatio-temporelle constitue un pré-requis indispensable pour l'élaboration de scénarios prospectifs de la dynamique de l'aléa. Actuellement, la connaissance des aléas repose sur des études géo-historiques et des observations systématiques. L'évolution spatio-temporelle des mouvements de versant est reconstituée sur des périodes courtes, de l'ordre de quelques décennies voire du siècle grâce à des séries d'observations systématiques (Enquête Permanente sur les Avalanches, fiches événements de services RTM, par exemple). Les archives historiques d'origines (religieuses, administratives...) et de formats

(iconographie, photographies, écrits, récits oraux...) variés permettent de d'apporter des indications sur la présence ou non d'un aléa à une année donnée. Par exemple, Corona *et al.* (2012) ont compilé, à partir d'une approche géo-historique, les évènements avalancheux documentés sur le couloir des Pèlerins (Chamonix, France, Figure 7) Cette étude reprend les types d'avalanches (a), les dates d'occurrence (b, c), ainsi que l'altitude de la zone d'arrêt (d) d'un des dépôts avalancheux les plus documentés des Alpes. Il est important de noter, qu'à partir de 1900 et la mise en place de l'EPA (Enquête Permanente des Avalanches), la chronique des avalanches du couloir des Pèlerins est très précise. Par contre, avant le début du 20^{ème} siècle, celle-ci est beaucoup plus lacunaire et incomplète.

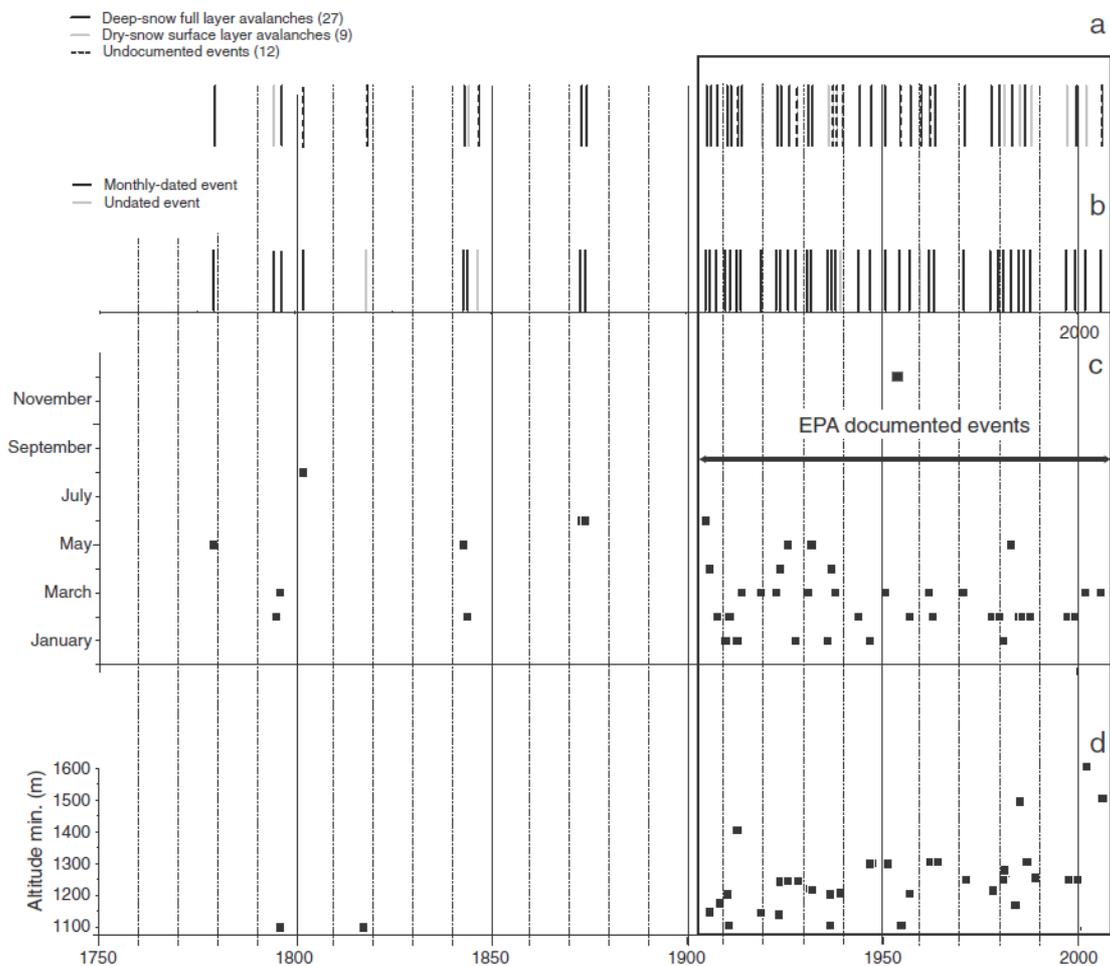


Figure 7. Exemple de reconstitution des avalanches à partir d'une approche géo-historique sur le couloir des Pèlerins (Chamonix), selon le type (a), les dates d'occurrence (b, c) et l'altitude des zones d'arrêts (d); d'après Corona *et al.*(2012).

De la même manière, l'utilisation des sources historiques entraîne de nombreuses difficultés, notamment dans l'accessibilité, l'extraction, l'organisation et l'analyse des données qui n'ont généralement pas été collectées à des fins scientifiques (Ibsen et Brunsden, 1995). Ainsi, de nombreux biais impliquent notamment l'objectivité de l'observateur, les problèmes de retranscription et le caractère aléatoire des évènements observés tant sur le plan spatial que

temporel. Un biais additionnel, d'origine anthropocentrique, est également lié au caractère sélectif de la transmission pour les sources orales. Les événements récents ou catastrophiques sont ainsi souvent surreprésentés. Les reconstitutions de l'aléa issues d'une approche géo-historique présentent ainsi systématiquement un caractère discontinu. Pour cette raison, la continuité entre les documents d'archives et les données paléo-environnementales à haute résolution est fondamentale pour déterminer ou non l'existence de tendances évolutives et plus largement, évaluer l'impact des changements environnementaux (Casteller *et al.*, 2011).

3.4.2 La dendrogéomorphologie comme approche paléo-environnementale

A l'heure actuelle, les approches paléo-environnementales à haute résolution spatio-temporelle permettant de reconstruire l'évolution d'un aléa sur plusieurs siècles sont rares dans les Alpes. L'approche dendrogéomorphologique, basée sur l'utilisation des arbres en tant que témoins silencieux des événements naturels passés, offre cette opportunité (Lopez-Saez, 2011; Corona *et al.*, 2012).

La dendrogéomorphologie est une discipline issue de la dendroécologie, elle-même issue de la dendrochronologie. La dendrochronologie est une méthode de datation absolue basée sur l'analyse des cernes de croissance des arbres. En d'autres termes, elle permet de dater à l'année t la création d'un cerne de croissance. Elle repose sur le fait que, chaque année, en région tempérée, les arbres forment un cerne de croissance distinct par la création de bois produit par le cambium durant la période végétative (Astrade *et al.*, 2012). Par exemple, dans le cas des conifères, on distingue le bois initial, de couleur claire, du bois final plus sombre. Le bois initial se forme au cours du printemps (à partir de mai-juin en milieu montagnard) dans le but de faciliter le transport de l'eau et des nutriments et le bois final durant la période estivale (de juillet à septembre en fonction des espèces et des conditions stationnelles) afin de stabiliser de manière mécanique l'arbre (Lopez-Saez, 2011). Des travaux développés récemment permettent de reconstruire l'activité des aléas à une résolution intra-annuelle (Lopez-Saez, 2011).

La dendrogéomorphologie est une méthode de reconstruction des aléas naturels basée sur l'étude des perturbations de croissance. Ce terme est apparu pour la première fois dans les travaux de Alestalo (1971) qui considère que cette discipline repose sur;

- la capacité de la végétation ligneuse à réagir aux stress exogènes provoqués par des événements perturbateurs ou des changements affectant son milieu de croissance;
- l'enregistrement dans les cernes annuels de bois des ligneux des réactions aux perturbations et des anomalies morphologiques visibles.

Cette discipline permet donc de dater un évènement avec une résolution chronologique annuelle à saisonnière (Stoffel *et al.*, 2010; Lopez-Saez, 2011), de reconstituer les changements environnementaux, mais également de spatialiser les processus géomorphologiques (Astrade *et al.*, 2012). Schroder (1978, 1980). Il a, par la suite, approfondi cette définition en proposant le concept de "Processus-Evènement-Réponse" (Figure 8).

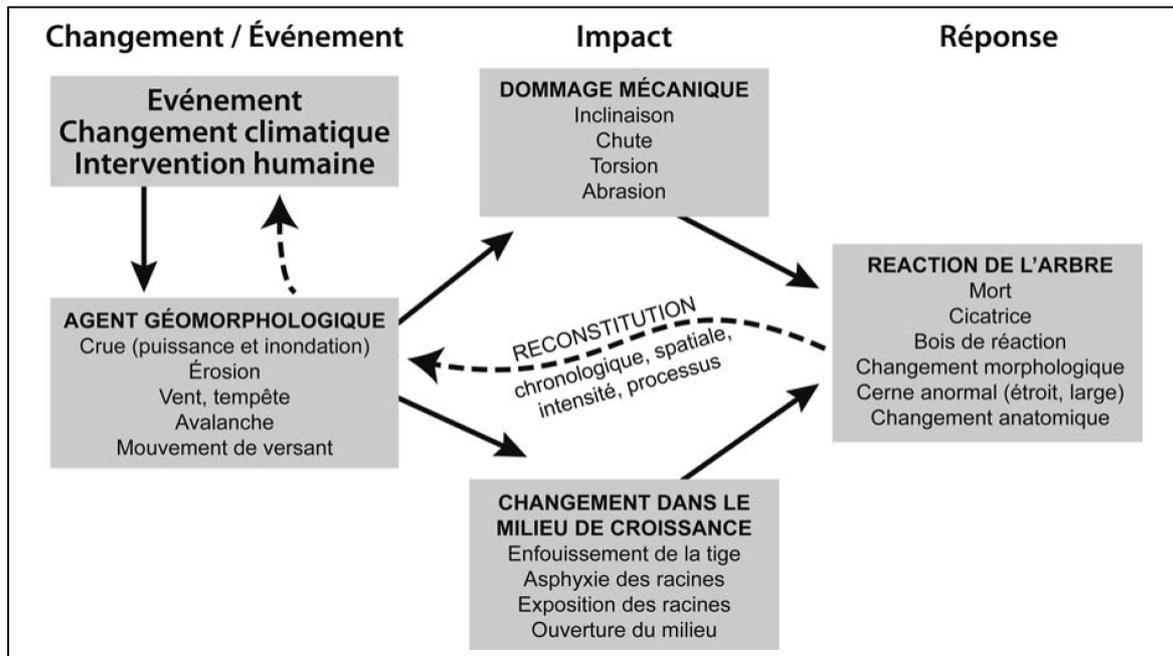


Figure 8. Concept "Changement/Évènement - Impact - Réponse" de Schoder (1978, 1980) adapté par Astrade et Bégin (2003)

Celui-ci sera repris et amélioré par Astrade et Bégin (2003) puis par Astrade *et al.* (2012). L'évènement regroupe les aléas. L'impact correspond aux perturbations subies par l'arbre au moment où le processus ou le changement l'affecte. Il peut induire des dommages mécaniques directs (basculement, chute, torsion, abrasion, étêtage) et/ou une perturbation physique de l'habitat (ouverture du milieu). Le stress subi par l'arbre entraîne, à partir d'un certain seuil, une réponse de l'arbre : soit la mort, soit, pour ceux qui survivent, des réponses de croissance visibles dans leur morphologie (cicatrice, reprise de croissance apicale, changement d'axe, courbure, racines adventives), dans des anomalies de leurs cernes (bois de compression pour les résineux, série de cernes anormalement étroits ou larges, canaux résinifères traumatiques) ou encore dans le développement et la modification des racines ou de leurs tissus.

3.4.3 La dendrogéomorphologie appliquée à l'aléa "avalanche"

Dans le cas d'une avalanche, les principales perturbations observées sont les réductions de croissance (GR), les cicatrices ou canaux résinifères traumatiques (TRD) et le bois de compression (CW) engendré par un basculement de l'arbre (Figure 9).

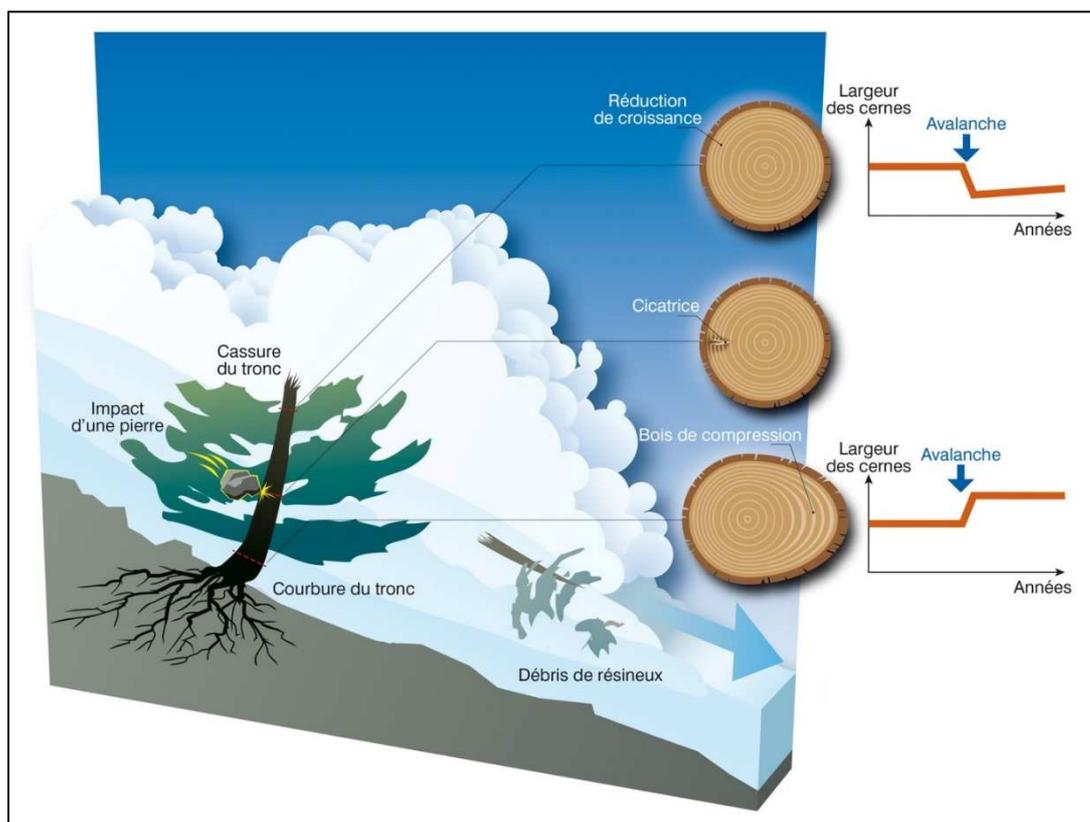


Figure 9. Diversité des perturbations de croissance engendrées par des avalanches (Lopez-Saez et Corona, 2015)

Les premières études dendrogéomorphologiques appliquées aux avalanches ont été réalisées à la fin des années 1960. Cette approche a été utilisée progressivement aux Etats-Unis (Potter, 1969; Carrara, 1979; Butler et Malanson, 1985; Rayback, 1998; Reardon *et al.*, 2004), puis au Canada (Scaerer, 1972; Frazer, 1985; Dubé *et al.*, 2004). En Europe, les études sont plus récentes et tendent à se développer depuis les années 2000 (Stoffel *et al.*, 2006; Casteller *et al.*, 2007; Muntan *et al.*, 2009; Corona *et al.*, 2010, 2012, 2013; Schläppy *et al.*, 2014; Chiroiu *et al.*, 2014). Une synthèse bibliographique de ces différentes études a été réalisée par Corona *et al.* (2013) et complétée dans le cadre de ce mémoire (Tableau 1).

Ces études ont permis d'apporter des informations sur l'intensité et les fréquences d'avalanches, peu ou pas documentées. Cependant, la comparaison des données historiques et des reconstructions issues des cernes de croissance reste le moyen le plus efficace de déterminer les activités avalancheuses passées. Récemment, une étude réalisée dans la vallée de Chamonix sur un couloir d'avalanches précisément documenté (Corona *et al.* 2012) a permis de démontrer que 43% des avalanches qui étaient listées dans les archives avaient été reconstituées à partir d'une approche dendrogéomorphologique. Ce chiffre rappelle que la dendrogéomorphologie présente elle aussi des limites. Cette méthode est dépendante de l'intensité des évènements qui se produisent. Si ces

derniers sont de trop forte intensité, les arbres disparaissent et ne peuvent plus être utilisés comme bio-indicateur. A l'inverse, si l'avalanche est de trop faible intensité, l'arbre ne présentera pas de perturbation de croissance. Pour conclure, l'approche dendrogéomorphologique reconstruit majoritairement des évènements de moyenne intensité tandis que l'approche géo-historique fait référence plutôt à des évènements de forte intensité. Il est donc indispensable, dans la mesure du possible, de proposer des reconstructions composites, au moyen d'approches géo-historiques et dendrogéomorphologiques.

Tableau 1. Synthèse bibliographique des études dendrogéomorphologiques appliquées aux avalanches, d'après Corona *et al.* (2013) mise à jour par Mainieri (2015).

Authors	Year	Country	Localisation	Number of paths	Species	Sample depth	Period	Number of growth disturbances	Minimal Index Value	Number of avalanche events
Potter	1969	USA	Wyoming			17				
Schaerer	1972	Canada	British Columbia	Unknown	Unknown	Unknown	Unknown	Unknown	Unknown	Unknown
Smith	1973	USA	Washington	13	Unknown	Unknown	Unknown	Unknown	Unknown	Unknown
Ives et al.	1976	USA	Colorado	Unknown	<i>Populus tremuloides, Picea engelmannii</i>	Unknown	1860-1974	56	Unknown	6
Carrara	1979	USA	Colorado	1	<i>Populus tremuloides, Picea engelmannii, Abies lasiocarpa</i>	50	1880-1976	Unknown	Unknown	4
Butler	1979	USA	Montana	5		30				
Butler and Malanson	1985	USA	Montana	2	<i>Picea engelmannii, Abies lasiocarpa, Pseudotsuga menziesii, Larix occidentalis, Pinus contorta</i>	30 + 48	1924-1979 1934-1981	Unknown	40%	10 + 15
Frazer	1985	Canada	Alberta							
Johnson et al.	1985	Canada	Alberta							
Bryant et al.	1989	USA	Colorado	3	<i>Populus tremuloides, Picea engelmannii</i>	60 + 60 + 60	Unknown	Unknown	Unknown	Unknown
Patten and Knight	1994	USA	Wyoming							
Rayback	1998	USA	Colorado	2						
Larocque et al.	2001	Canada	Québec	1	<i>Picea glauca, Picea mariana, Abies balsamea, Larix laricina</i>	111	1885-2000	Unknown	10%	3
Hebertson and Jenkins	2003	USA	Utah	16	<i>Picea engelmannii, Abies lasiocarpa</i>	297 (8-26)	1928-1996	Unknown	Unknown	14
Boucher et al.	2003	Canada	Québec	1	<i>Abies balsamea, Picea mariana</i>	62	1895-1996	Unknown	10%	35
Jenkins and Hebertson	2004	USA	Utah	1	<i>Picea engelmannii, Abies concolor, Populus tremuloides</i>	78	1891-1995	Unknown	Unknown	13
Dubé et al.	2004	Canada	Québec	3	<i>Thuja occidentalis, Abies balsamea, Betula papyrifera</i>	62 + 20 + 28	1871-1996	Unknown	10%	7
Muntan et al.	2004	Spain	Pyrenees	1	<i>Pinus uncinata</i>	230	1750-2000	Unknown	Unknown	3
Kajimoto et al.	2004	Japan		1	<i>Abies mariesii</i>	34	Unknown	Unknown	Not computed	Not computed
Germain et al.	2005	Canada	Québec	2	Unknown	78 + 52	1941-2004	420	Unknown	11
Pederson et al.	2006	USA	Montana	1	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	109	1910-2003	Unknown	10%	27
Stoffel et al.	2006	Switzerland	Alps	1	<i>Larix decidua</i>	251	-	561	Unknown	9
Casteller et al.	2007	Switzerland	Alps	2	<i>Larix decidua, Picea abies</i>	66 + 79	Unknown	Unknown	Not computed	Not computed
Mundo et al.	2007	Argentina	Andes	1	<i>Nothofagus pumilio</i>	20	Unknown	Unknown	Not computed	Not computed
Butler and Sawyer	2008	USA	Colorado	2	<i>Abies lasiocarpa, Pseudotsuga menziesii, Pinus contorta</i>	10 + 12	1945-2008 1963-2008	Unknown	20%, 40%	15 + 9
Reardon et al.	2008	USA	Montana	1	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	109	1910-2003	Unknown	10%	27
Germain et al.	2008	Canada	Québec	12	Unknown	10-243	1895-1999	51-799	10%	19
Laxton and Smith	2008	India	Himalaya	1	<i>Cedrus deodara</i>	36	1972-2006	Unknown	Unknown	4
Casteller et al.	2008	Argentina	Andes	1	<i>Nothofagus pumilio</i>	50	Unknown	Unknown	Unknown	6
Muntan et al.	2009	Spain	Pyrenees	6	<i>Pinus uncinata</i>	26-131	1870-2000	Unknown	16-40%	3
Corona et al.	2010	France	Alps	1	<i>Larix decidua</i>	232	1919-1994	901	10%	20
Köse et al.	2010	Turkey	Kayaarka	2	<i>Abies bornmuelleriana</i>	61	Unknown	Unknown	Not computed	Not computed
Casteller et al.	2011	Argentina	Andes	9	<i>Nothofagus pumilio</i>	6-15	1820-2005	Unknown	Unknown	6
Decaulne et al.	2011	Iceland	Nothern Iceland	1	<i>Betula pubescens</i>	39	1905-2010	302	10%	52
Garavaglia and Pelfini	2011	Italy	Alps	1	<i>Picea abies, Larix decidua, pinus silvestris</i>	854	1867-2007	854	Unknown	Unknown
Corona et al.	2012	France	Alps	1	<i>Larix decidua, Picea abies</i>	209	1771-2010	645	5-15%	34
Corona et al.	2013	France	Alps	1	<i>Larix decidua</i>	163	1338-2010	514	5%	38
Schläppy et al.	2014	France	Alps	2	<i>Larix decidua, Picea abies</i>	210 + 87	1799-2010 1963-2011	491 + 232	Not computed	25
Voiculescu and Onaca	2014	Romania	Carpathians	2	<i>Picea abies, Larix decidua</i>	114	1963-2011 1963-2012	171	Not computed	32+27
Chiroiu et al.	2014	Romania	Carpathians	1	<i>Picea abies</i>	105	1852-2013	534	Wit	23
Tumajer and Tremli	2015	Czech Republic	Sudetes	4	<i>Picea abies</i>	99	1904-2012	1378	Wit	20-29
Mainieri et al.	2015	France	Alps	1	<i>Larix decidua</i>	201	1380-2012	527	Wit	23

3.5 Spécificité de l'étude dans son champ scientifique

D'un point de vue temporel, la majorité des études à ce jour, a permis de reconstruire des activités avalanches sur les 200 dernières années (Carrara *et al.*, 1979; Butler and Malanson, 1985; Dubé *et al.*, 2004). Ces études se concentrent dans la période récente du réchauffement climatique et ne couvrent donc pas les grandes fluctuations climatiques qui se sont produites lors du dernier millénaire (phases successives des minima solaires ou le PAG, par exemple) (Figure 10).

La particularité des travaux de recherche effectués dans le cadre de ce mémoire, réside dans le fait que les arbres échantillonnés (*Larix decidua* Mill.) ont permis de reconstruire des évènements avalancheux sur une période beaucoup plus étendue (1381-2011; Figure 10) incluant donc, en plus du réchauffement climatique récent, le Petit Age Glaciaire. A l'heure actuelle, seul Corona *et al.* (2013) proposent une reconstitution légèrement plus ancienne (1338-2010). Ces longues reconstitutions sont donc une véritable opportunité pour étudier les effets des fluctuations sur l'activité spatio-temporelle des avalanches. A noter également, que les plus longues reconstitutions dendrogéomorphologiques ont été réalisées en Europe, et plus particulièrement dans les Alpes.

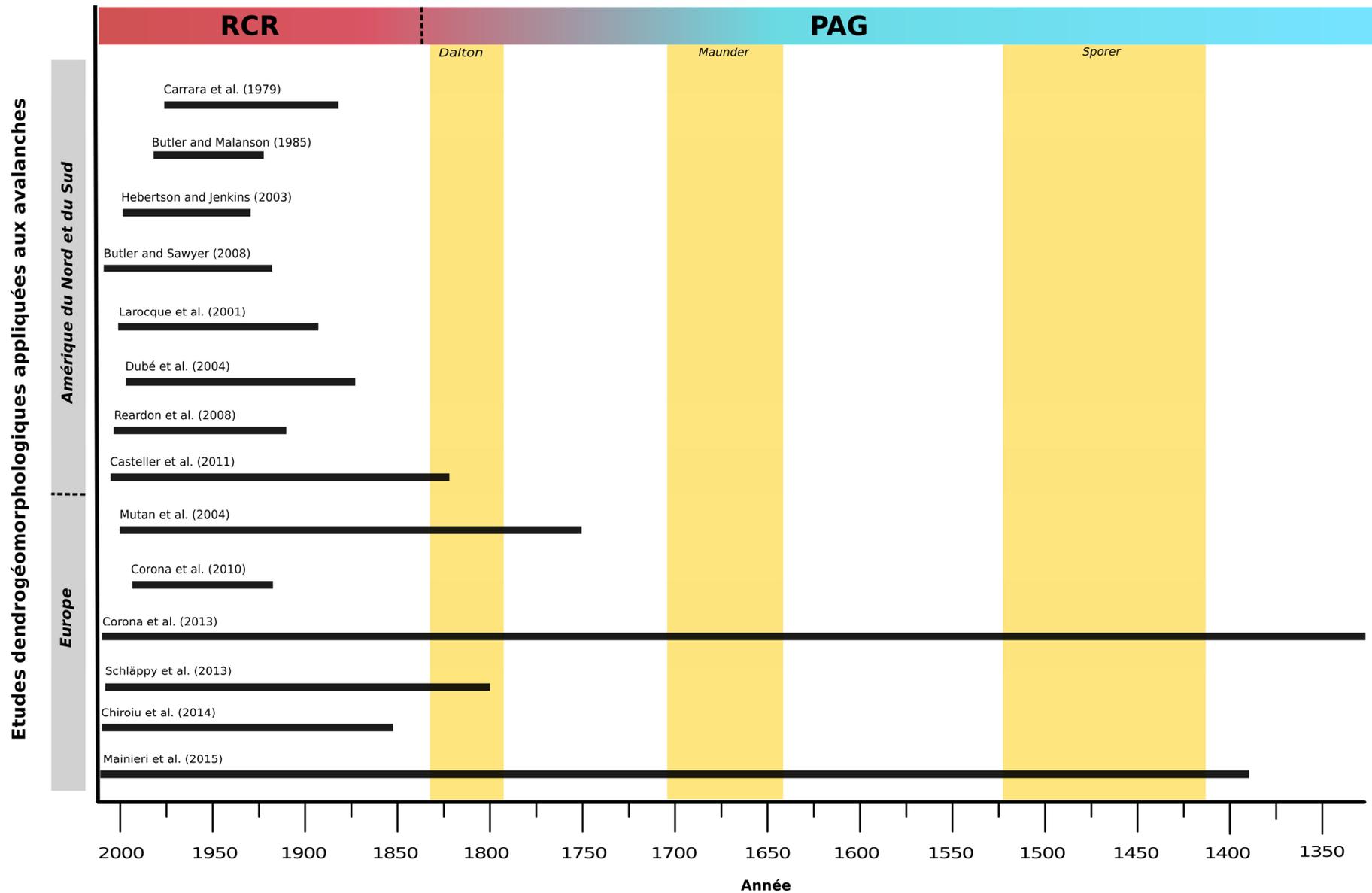


Figure 10. Période de reconstitution des principales études dendrogeomorphologiques appliquées aux avalanches. Les barres jaunes représentent les minima solaires de Maunder, Dalton et Sporer. RCR : réchauffement climatique récent; PAG : Petit Age Glaciaire. (Mainieri, 2015)

D'un point de vue méthodologique, la majorité des études reposent sur un échantillonnage relativement faible, en générale inférieur à 100 arbres (Figure 11). Une étude dendrogéomorphologique récente, réalisée sur le couloir des Pèlerins (Corona *et al.*, 2012), préconise un échantillonnage dense et homogène, supérieur à 100 arbres dans le but d'obtenir le meilleur compromis entre la reconstitution dendrogéomorphologiques et les archives historiques, tout en réduisant le risque d'inclure des évènements non lié à l'activités avalancheuse. Dans le cadre de notre étude, l'analyse dendrogéomorphologique repose sur un échantillonnage exhaustif de plus de 200 arbres sur l'ensemble du dépôt avalancheux de Souliers.

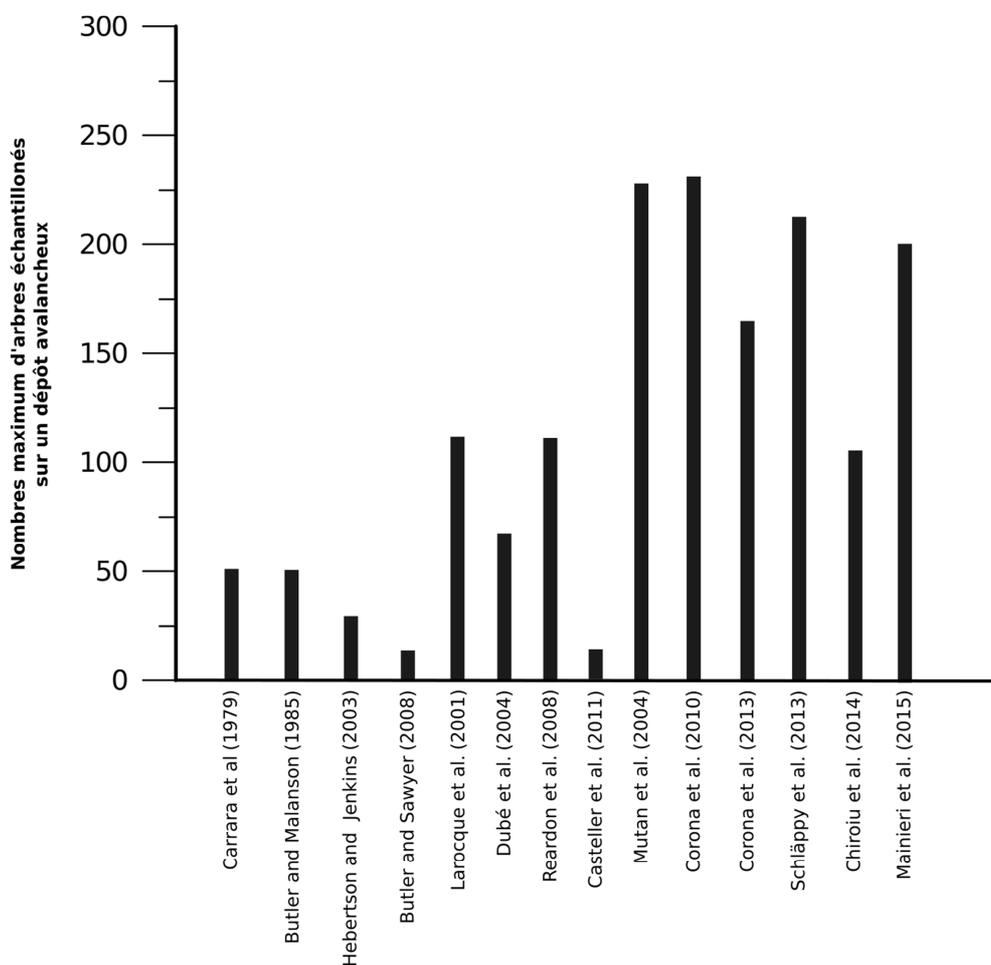


Figure 11. Nombre maximal d'arbres échantillonnés sur un dépôt avalancheux pour les principales études de dendrogéomorphologie appliquée aux avalanches (Mainieri, 2015)

4. Evolution of avalanche activity and forest land cover on Souliers avalanche path during the last centuries, Queyras Massif, South Alps.

Robin Mainieri¹, Jérôme Lopez-Saez^{1,2}, Christophe Corona², Nicolas Eckert¹, Markus Stoffel^{3,4}, Jean-Louis Edouard⁵ and Frédéric Berger¹

¹ *Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture (IRSTEA) - UR EMGR - 38402 St-Martin-d'Hères cedex - France*

² *Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) - UMR 6042 - GEOLAB - 63057 Clermont-Ferrand cedex - France*

³ *University of Berne - Institute of Geological Sciences - CH3012 Berne, Switzerland*

⁴ *University of Geneva - Institute for Environmental Sciences, Climatic Change and Climat Impacts - CH1227 Carouge, Geneva, Switzerland*

⁵ *Université Aix Marseille - Ministère de la Culture et de la Communication - UMR 7299 (CNRS) - 13094 Aix en Provence - France*

Abstract

The purpose of the study was to couple a tree-ring and geo-historical analysis in order to reconstruct (i) multicentennial avalanche activity (600 years) and (ii) forest land evolution (131 years) on a forested avalanche path of the Queyras Massif during the last centuries (southeast French Alps). We also (iii) examine the coincidence between fluctuations in avalanche frequency and historic climate data including temperature and precipitation. The applied methods include analysis of historical, topographic maps and orthophotographs in order to determine spatio-temporal trend in forest land changes since 1882. Analysis of 600 years past avalanche events was based on tree-ring series from 201 heavily affected multicentennial larch trees (*Larix decidua* Mill.) growing near or next to the avalanche path. A total of 527 growth disturbances, such as tangential rows of traumatic resin ducts, the onset of compression wood as well as abrupt growth suppression or release, were identified in the samples indicating 23 destructive snow avalanches between AD 1380 and 2011. The mean return period of snow avalanches was 21 years with periods of high frequencies in 1641-1684, 1731-1810, 1833-1862, and no major events since 1933. A geo-historical analysis of historical maps (1882, 1930), topographic maps (1968, 1982 and 1992) and aerial photographs (1945, 1956, 1980 and 2009) shows that during the end of 20th century, an unprecedented afforestation process is underway, especially in the upper part of the slope (> 2300 m a.s.l.). This local settlement reflects a

decrease of avalanche activity linked to changes (i) in human activities and (ii) recent global warming. On the contrary, at Echalp avalanche path, in the light of keeping of pastoralism on the starting zone, avalanche activity was only support by climate fluctuations.

4.1 Introduction

Snow avalanches are among the most common hazards in mountain areas (Strunk, 1997). They are responsible for the destruction of many socio-economic issues, but also case the death of dozens of people each year (Ancey, 1998). The knowledge of natural avalanche activity is essential from a spatial point of view but also temporal to improve the planning. In the french Alps, historical databases on snow avalanches, prior to the 1950s are scare. Specific efforts have been made to collate systematically past historical documents in avalanche prone areas such as the Chamonix or Vallorcine areas (Leone, 2006), or in particular active paths of the Queyras massif (Le Gallou and Guignard, 2011). Futhermore, one should keep in mind that these records are usually related to catastrophic events that had a direct impact on either property or human lives. As a consequence, they represent a partial avalanche history and they can difficulty be used to assess changes in natural activity (Casteller et al., 2011).

On forested paths, dendrogeomorphology (Alestalo, 1971; Stoffel et al., 2010), has been demonstrated to represent a powerful tool to overcome the lacunary character of the database as it enables reconstruction of past avalanche activity with annual resolution and for periods covering past decades to centuries (Butler and Sawyer, 2008). The term dendrogeomorphology appeared first time in the investigations of Alestalo (1971) considers that this discipline is based on: (1) The capacity of woody vegetation to respond to exogenous stress caused by disruptive events or changes in the growth medium; (2) Recorded in the tree-rings the reactions to disturbances and visible morphological anomalies. First, there is initiate in North America (Potter, 1969; Carrara, 1979; Butler, 1979; Bryant et al., 1989), and more recently in Europe (Stoffel et al., 2006; Casteller et al., 2007; Muntan et al., 2009; Corona et al., 2010, 2012, 2013; Schläppy et al., 2014; Chiroiu et al., 2014). However, most studies reconstruct the events of the last 200 years and do not include the period from the little Ice Age, which do not allow a comparison with climate fluctuations over a long period.

In the valleys of the Inner Alps, such as the Queyras Valley (southeast French Alps), vegetation is primarily limited by temperature and the short duration of growth, with growth periods less than approximately 150 days in length (Tranquillini, 1976; Korner, 1994, 1998; Mayr et al., 2003). Recently, the impact of global warming on the growth of forest species and it expansion has been demonstrated by previous studies using biological, ecological, and paleoecological methods

(Oberhuber, 2004; Carrer et al., 2007; Saulnier et al., 2010a, 2010b, 2015). In the same time, on these areas, the land-use changes which started around 1850 have resulted in a complete abandonment of any agro-pastoral activity by 1950 for the benefit of invasion of trees (Didier, 2001). The expansion of forest stands can affect the likelihood of avalanche release and can, in some cases, protect human settlements and infrastructure (Viglietti et al., 2010). In forested avalanche path, the snow depth is lower than in open areas (Storck et al., 1999) and contribute to reduce snow avalanche activity (Viglietti et al., 2010).

In this study, we (i) provide 600 years dendrogeomorphic reconstruction of avalanche events and (ii) analyse forest land evolution during the last 130 years in the forested avalanche path of the Queyras Massif (French Alps). We finally examine how (i) a recent global warming and (ii) a complete abandonment of agro-pastoral activity contributes to reducing avalanche frequency.

4.2 Study site

The Souliers avalanche path (44° 47'N, 6° 46'E) is located on the western slope of the Guil valley in the Queyras Regional Park, southeastern Briançonnais (Hautes Alpes, France). This path is upstream of the Souliers hamlet (village of Chateau-Queyras, Chateau-Ville-Vieille) above the halt of le Grand Rochebrune and the forest which recovered it is named "Le Grand Bois". From the bottom of the crest (Crête de Crépaud, 2520m asl) to the base of the slope, the difference in elevation is about 470 m (2050-2520 m asl; Figure 1). Snow avalanches are commonly naturally triggered from multiple starting zones located between 2400 and 2550 m asl with a mean angle slope of 34°. They pass through a central track (mean slope: 24°, path length: 900 m) before reaching the runout zone (mean slope 8°) where the Souliers torrent flowing. The intense avalanche cycle occurred in the eastern part of the southern Alps in 2008 was observed on this track with many trees were uprooted. This year, the heavy snowfalls caused an important proportion of destructive powder snow avalanches (Eckert et al., 2010). Can be observed even today, remains of trees destroyed by this event.

On the field investigated, geology is dominated by the "schistes lustrés" belt of the inner Alps (Lemoine and Tricart, 1986). Schists have the form of impervious, tectonised, frostsensitive. According data from the nearby meteorological station of Ristolas (1054 m asl), annual temperature is 6.1 °C for the 1928–2014 period and annual precipitation amounts to 900 mm for the 1928–2014 period. For the same periods, mean air temperature for the winter (DJF) is –3 °C. Between October and May, precipitation falls primarily as snow. Average annual snowfall reaches 110 cm for the period 1780–2003.

A characteristic transverse vegetation pattern (Malanson and Butler, 1984) can be observed across the track: the inner zone is colonized by shrubs and shade-intolerant pioneer tree species such as European rowan (*Sorbus aucuparia* L.), silver birch (*Betula pendula* Roth.) and juniper (*Juniperus sibirica* Burgsd). In the outer zone, the forest vegetation is comprised mainly of European larch (*Larix decidua* Mill), situated at altitudes between 2050 and 2400 m a.s.l. (Touflan et al., 2010,). The understorey is dominated by herbaceous species and shrubs, namely *Rhododendron ferrugineum* L. (rhododendron) and *Vaccinium myrtillus* L. (bilberry). The exploitation of this forest is based primarily on longstanding pastoral practice (Saulnier et al., 2015). Among which both the abandonment of human land-use practices since 1950s and climate change are especially important, the current conditions at mid-high altitudes might potentially allow the establishment of larch forests for a long period (Saulnier et al., 2015).

4.3 Material and Methods

4.3.1 Dendrogeomorphic analysis

The reactions of trees to snow avalanches are driven by the forces of the avalanche and the mechanical impact of debris (i.e. rocks and boulder or broken trees) transported by the snow as well as by the size and flexibility of the tree itself (Bebi *et al.*, 2009). Typical morphologies of avalanche trees include wounding as well as trunk, tilting, branch and apex breakage (Bartelt and Stöckli, 2001; Luckman, 2010; Corona et al., 2012). These reactions considered as external anomalies can be detected and dated in tree ring series using dendrogeomorphic techniques (e.g., Stoffel and Bollschweiler, 2008). On the study site, no other geomorphological process can create growth disturbances (GD) out of snow avalanches (Voiculescu *et al.*, 2014). Anomalous anatomical features most commonly observed in tree rings following avalanche activity (Corona *et al.* 2012) are (1) a distinct growth suppression (Butler and Malanson, 1985) following apex loss or the break off of branches (Johnson, 1987), (2) the formation of compression wood (Timell, 1986) with thicker (rounder) and slightly darker tracheids (Stoffel and Bollschweiler, 2008) after tilting, and (3) the production of chaotic callus tissue (Stoffel *et al.*, 2010) and tangential rows of traumatic resin ducts (referred hereafter as to TRD) at the edges of the injury after wound infliction and/or cambium damage (Schneuwly *et al.*, 2008; Stoffel and Hitz, 2008). For this investigation, we used the appearance of callus tissue and TRD, the initiation of compression wood and abrupt growth reductions to determine the occurrence of avalanches.

A total of 220 *L. decidua* Mill trees have been selected in the field based on their location and visible anomalies in tree morphology (Stoffel and Bollschweiler, 2008, Chiroiu *et al.* 2014). Injured or

tilted trees were sampled at height of the disturbance. Cross-sections and cores from decapitated trees were, in contrast, extracted next to the stem base so as to preserve as much tree-ring information as possible (Stoffel and Bollschweiler, 2008). A minimum of two cores were extracted per tree, one perpendicular to the slope and one in the downslope direction. GPS coordinates were recorded for each tree with 1 m accuracy using a Trimble GeoExplorer (Corona *et al.*, 2013)

The samples obtained in the field were analyzed and data processed following standard dendrochronological procedures (Bräker, 2002; Stoffel and Bollschweiler, 2008). Single steps of surface analysis included sample mounting on a slotted mount, sample drying, and surface preparation by finely sanding the upper core surface up to grit size 600 (Lopez-Saez *et al.*, 2012). Then, tree rings were counted and ring widths measured to the nearest 0.01 mm using a digital LINTAB positioning table connected to a Leica stereomicroscope and TSAP-Win Scientific software (Rinntech, 2009). In addition to the disturbed trees sampled in the path, two tree ring reference chronologies were used in order to (1) to correct faulty tree-ring series derived from disturbed samples (e.g. false or missing rings; Schweingruber, 1996); (2) to separate climatically driven fluctuations in tree growth from growth disturbances caused by avalanches (Cook and Kairiukstis, 1990), and (3) to highlight local insect outbreaks affecting tree growth, especially larch budmoth years (*Zeiraphera diniana Gr.*)(Figure 2). The first tree-ring reference was developed from Souliers area (1448-2009) and the second identified on the Echalp slope (1338-1995; Corona *et al.*, 2012). As no significant correlation was found between reference chronologies and 38 cores from 19 affected trees, we rejected these samples for further analysis. For samples heavily impacted by multiple avalanches, “marker years” recorded in neighboring trees were used to ensure accurate calendar dating (Reardon *et al.*, 2008).

4.3.2 Tree rings reconstruction of avalanches events

The next step is to assigned scores to each avalanche-related GD using approach used previously by Dubé *et al.* (2004), Reardon *et al.* (2008) or Corona *et al.* (2010, 2012):

- Intensity 1: Abrupt change in radial growth associated with stem breakage; or clear impact scar associated with obvious TRD or growth suppression but no compression wood.
- Intensity 2: Obvious compression wood during years successive growth years following the disturbance; TRD discontinued and growth reduction from 5-10 years
- Intensity 3: Compression wood and growth reduction but not well defined, TRD present but in the latewood (summer season).

After dating and classifying GD following their intensity, we used the weighted index factor W_{it} of Kogelnig-Mayer *et al.* (2011) to taking into account the assessment of number of trees and the

intensity of reactions. A major avalanche was thought considered as an event with $W_{it} > 1,2\%$ and the minor event with $0,8 < W_{it} < 1,2\%$. This threshold minimizes the risk that growth anomalies caused by other processes could mistakenly be attributed to avalanches.

$$W_{it} = \left(\left(\sum_{i=1}^n I_1 * 5 \right) + \left(\sum_{i=1}^n I_2 * 3 \right) + \left(\sum_{i=1}^n I_3 * 1 \right) \right) * \frac{\sum_{i=1}^n Rt}{\sum_{i=1}^n At}$$

where I = GD assigned to the intensity n Class ($n= 1-3$); R_t = responding trees showing a GD to snow avalanche in year t , and A_t the total number of trees alive in year t .

4.3.3 Analysis of forest land evolution

A complementary approach for estimating forest land evolution is to use a time series of aerial photographs data to estimate the spatio-temporal dynamics of change. The aerial photographs available for the study area cover the years 1945, 1957, 1981 and 2009. Aerial photo interpretation was carried out using standard photographic keys (tone, texture, pattern, shape and size). Visual interpretation and digitalization of aerial photos were conducted to generate a thematic map of forest land evolution (Maanan and Robin, 2010). We used both ERDAS Imagine 9.0 and ArcGIS 10.2 to integrate the data, by using standard GIS features. We calculated the total forest surface area (in hectares) between 1945 and 2009. Visual analysis of historical maps (1882, 1930, 1968, 1982 and 1992) was also conducted in order (i) to confirm presence of old growth forest before 1945's and (ii) to estimate forest stand evolution since 1882.

The age structure of the stand was approximated by counting the number of tree rings of selected trees ($n = 201$, 91% of the sampled population). However, since trees were not sampled at their stem base and the piths or innermost rings of several trees were rotten, the age structure might be biased; the map thus only reflects age at sampling height, but neither inception nor germination dates. Nonetheless, it provides valuable insights into forest evolution with reasonable precision.

4.3.4 Climate influence on avalanche frequency

Avalanche activity is related to atmospheric conditions including precipitation rate, duration and type as well as to wind, air temperature and radiation (Schweizer et al., 2003). We have thus hypothesized that avalanche regimes may be a good indicator of recent and past winter climatic conditions. To test this hypothesis, the newly developed reconstruction of past avalanche events was compared with: (1) historical indices from Pfister (1993) and (2) meteorological gridded data from Böhm et al. (2010)

The Pfister93 graduated indices of winter temperatures and precipitations (1525–1990) cover central Europe and are related to biological indicators and historical archives. Monthly graduated indices (GI) range from –3 to +3 (from extremely cold to extremely warm anomalies), with 0 being ‘average’ months (according to the 1901–1960 period) or unavailable data. On a seasonal level the GI is defined as the average of the monthly GI, which yields gradations of 0.3 between –3 and +3.

The meteorological gridded data from Böhm et al. (2010) was extracted from the HISTALP data base. This data set, resulting from a dense network of 134 meteorological stations, covers the Greater Alpine Region (GAR: 4–19°E, 43–49°N, 0–3500 m a.s.l.). It consists of station data gridded at 1° × 1° (0.1° × 0.1°), latitude × longitude, representing absolute temperature and precipitation. It extends back to 1780 for temperature and 1800 for precipitations. Here, for the purpose of comparison with the avalanche reconstruction, a December–February winter temperature, snowfall and precipitation solid parts series was calculated from four HISTALP point values enclosing the study site. Finally, each climate series were fitted after smoothing by 10-yr lowpass filter.

4.4 Results

4.4.1 Age structure and evolution of the forest stand

After cross-dating using Souliers and Echalp multicentennial tree ring chronologies extent back to AD 1338 (Figure 3), data on the pith age from 201 *Larix decidua* trees growing on the Souliers avalanche path suggest an average age of the sample of 291 ± 119 yr. The oldest tree selected for analysis shows 631 rings at sampling height (AD 1381), while 79 growth rings (AD 1933) were counted in the youngest tree. As can be seen in Figure 3, the distribution of disturbed multicentennial larches on the slope is homogeneous. This distribution of oldest trees suggests that no catastrophic avalanche event destroyed large parts of the stand during the past 600 years.

The comparison of the five historical maps between 1882 and 1992 (1882, 1930, 1968, 1982 and 1992) demonstrates that forest land cover underwent no major changes during this period and confirmed the presence of old growth larch forest named “Le Grand Bois” (Figure 4). Areas occupied by forest were limited below 2362 m a.s.l in 1882 and increased moderately and rated of up to 20 meters in 1992.

The small changes in forest extent observed previously are confirmed by aerial photographs interpretation (Figure 5). In 1945, forest increased from 18.8 hectares to 25.1 in 1981. This increase (+ 33%) was mainly due to a process of forest closure observed in the downstream and central part of the slope with the annual gain in forest was 0.17 hectares/year (1945 to 1981). Up to 2300 m a.s.l.,

the surface of forest observed a moderate increase with 0.46 hectares in 1945 to 1.36 hectares in 1981 but not exceed 2350 m a.s.l.

Over the past thirty years, forest drastically increased from 25.1 in 1981 to 41.1 hectares in 2009. For this period the global annual gain in forest was 0.57 hectares.year (1981 to 2009) particularly up to 2300 m a.s.l. Furthermore, during this period, forest cover increased from 1.36 to 8.16 hectares (+500 %) and rated of up to 2400 m a.s.l.

4.4.2 Reconstruction of avalanche events

A total of 527 GD related to past avalanche event was identified in the 201 *L. Decidua* trees. Their type and intensity reactions are summarized in Table 1. Intensity 1 (I_1) was the most frequently identified in the samples (267, 51%). followed by I_2 (155, 29%) and I_3 (105, 20%). Concerning the types of GD, the most reaction to avalanche activity was the growth reductions (339, 64%) followed by tangential rows of traumatic resin ducts (1973, 33%). In contrast, the compression wood after tilting was by far less abundant (15, 3%). The oldest GD observed in tree rings series dates back 1382. However, this year not considered an avalanche event as only one tree showed GD. The events presented the most of GD was dated in 1933 with 24 GD identified on 196 sampled trees living.

In total, 23 avalanche events were reconstructed with the dendrogeomorphic approach. 19 years exceeded the 1,2% threshold for W_{it} (Figure 6) and were considered as years with major avalanche events, namely in: 1519, 1587, 1641, 1668, 1679, 1684, 1742, 1756, 1772, 1786, 1790, 1804, 1808, 1810, 1833, 1854, 1862, 1908 and 1933. Four years with a W_{it} between 0,8 and 1,2% reveal minor events respectively in 1642, 1731, 1740 and 1837. The years with the most GD content in trees were in 1933 ($n=18$), 1908 ($n=24$), 1808 ($n= 21$), 1810 ($n= 20$) and 1790 ($n=10$). In a similar way, the largest frequency of appearance of trees with GD was measured in 1641(15%), 1808 (14%), 1810 (13%), 1908 (12%) and 1933 (9%) (Figure 4).

Conversely, no event was reconstructed for the periods 1519-1586, 1588-1640, 1684-1730, 1863-1907, and since 1933.. The 23 avalanches events reconstructed within the samples area showed a mean return period for the avalanche path of Souliers was 21 years for the period 1519-2011. Maximum decadal frequencies are observed in 1641-1684 (5 events), 1731-1810 (10 events) and 1833-1862 (4 events). The return period increases from 20 years for the period 1519-1799 to 24 years for the period 1800-2011.

4.4.3 Snow avalanches–climate relationships

Periods of high avalanche activity reconstructed between 1641 and 1862 (19 out of the 23 events) are in concert with low *Pfister* winter temperature historical indice (Figure 7). This period coincided

with an almost uninterrupted sequence of cold winters. A comparison with the *Böhm* data set confirmed the influence of negative winter temperature and a high percentage of precipitation solid part for the period 1780-1862. At the annual scale, and when comparing our data with Pfister, for the period 1525–1933, 19 out of the 23 reconstructed events occurred during winters with temperature indices ≤ 0 ; eight years were characterized by low winter temperatures with indices ≤ -1 . 4 out of 8 events occurred during 'extremely cold winters', with indices ≤ -2 (i.e. 1587, 1684, 1731, 1810).

Conversely, since the early 20th century, period with low avalanche activity (2 events), matched with a unprecedented positive *Pfister* winter and temperature historical indices. This trend is being accentuated since the second half of the twentieth century. As can be seen with *Böhm* data set, the winter temperature warming leads to an inversely proportional decrease of percentage of precipitation solid part.

4.5 Discussion

4.5.1 Snow avalanche and Climate Comparison with Echalp path

In order to see if there is a regionalization effect in snow avalanche activity in the Queyras massif, it was interesting to compare the results obtained on Souliers snow avalanche path with other study sites. Corona et al. (2013) used a dendrogeomorphological approach similar to ours to reconstruct the snow avalanche activity at Echalp hamlet (Queyras massif). These investigations may therefore be a basis for comparison with our study site. The two sites have the following characteristics : avalanche starting zones are at similar altitudes (2100-2550 m asl), the average annual precipitation is about 900mm and the two paths are mostly populated by larches (*Larix decidua*). However, the Echalp path, located further east, is more exposed to the abnormally cold conditions, encouraging the avalanche cycle triggering (Corona et al., 2013; Eckert et al., 2010). These abnormally cold conditions are due to a large depression formed over the Mediterranean Sea and maintained by a southerly flow of cold air that evolves into a southeasterly flow in eastern France (Corona et al., 2013).

The Echalp avalanche path reconstructions showed common periods of high avalanche activity. First, the avalanche activity seems more frequent at the Echalp path with a return period of 15 years (between AD 1447 and 2010) compared to 21 years for the Souliers path (between AD 1519 and 2011). The reconstruction indicated that the two paths had 4 common events (A.D. 1587, 1642, 1740 and 1810). These years were characterized by low winter temperatures with *Pfister* indices ≤ -1 (Corona et al., 2013). Two events occurred during 'extremely cold winters' with indices ≤ -2 (1587 and

1810) and two others were characterized by 'very cold' winters with indices ranging between -2 and -1 (1642 and 1740).

At the decadal scale, common periods appeared. It was interesting to see that these common periods coincide with the periods of highest avalanche activity reconstructed at the Souliers avalanche path (1641-1684, 1731-1810 and 1833-1862). The hypothesis that the climatic fluctuations (Pfister *et al.*, 1993 ; Bohm *et al.*, 2010 ; Chimani *et al.* 2011) have an influence on avalanche activity in the Queyras massif seem to be confirmed.

4.5.2 Causes and Impacts of land cover change

The Souliers avalanche path study demonstrated that there was an evolution of the forest stand during the 20th century, particularly since 1981 (+33%). This afforestation has intensified since 1981 from 25.1 to 41.1 hectares in 2009. To see if there was a similar process on the Echalp path, we performed the same aerial photographs interpretation as with the Souliers path. In 1945, the forest surface decreased from 41 hectares to 29 in 1981 (Figure 8). This decrease was mainly due to the snow avalanche of 1946 which generated a forest opening. In contrast, forest increased from 29 to 51 hectares between 1981 and 2009. This is the result of the reforestation of areas with avalanche events in 1946 but also in 1971 and 1974. Unlike the Souliers snow avalanche path, the Echalp path have not been particularly colonized by vegetation in its upper part.

The landscaped change seems different in the two cases. However, we can observe a decrease of avalanche activity on the two sites, since the 1930's at Souliers hamlet and 1970's at Echalp. Different explanations can explain this decrease. At the Echalp path, the maintain of human activities such as pastoralism and the higher avalanche frequencies prevented the recolonisation of starting zones. The higher frequency can be explained by the stational conditions. The Echalp avalanche path is exposed to the south-esterly flow with abnormally cold conditions. The heavy snowfalls causes long runouts and an important proportion of destructive powder avalanche (Eckert *et al.*, 2010). Reductions of avalanche activities would be due to climatic changes.

At the contrary, we observed a decrease of human activity since 1950's at Souliers snow avalanche path. According to Saulnier *et al.* (2015), the decrease of the agro-sylvo-pastoral activity was able to participate in the difference between past vegetation and the current composition of the forest. Indeed, in the past, larch forests were used by humans such as cattle grazing and summer farming (Touflan, 2010; Maurer *et al.*, 2006; Talon *et al.*, 1998). These practices become rarer in the 20th century with agricultural abandonment and rural depopulation (Brun *et al.*, 1989; Barbero, 1992; Delcros, 1994). We assume that the cessation of grazing can be one cause of the densification of the forest stand. This densification causing widespread changes for extensive areas of sparsely

wooded "larch meadow" vegetation types (Garbarino et al., 2009; Piuksi, 2000). We observed an elevation of the forest pattern, associated with a lower avalanche frequency since 1933. While growing at higher altitudes, trees have colonized the potential avalanche starting zones and became an active biological protection by stabilization of the snowpack (Margreth, 2004). Despite being close geographically, it would seem that stational conditions and antropogenic practices have an impact on avalanche activity across an avalanche path.

4.6 Conclusion

In mountain areas, the increase in human activities requires a better understanding of avalanche hazards to prevent. The dendrogeomorphic approach provides information about the past history of forested avalanche paths. The approach presented in this study allowed the reconstruction of 23 snow avalanche events, on the Souliers avalanche path, between 1381 and 2011. At the decadal scales, periods of high frequencies appeared (1641-1689, 1731-1810 and 1833-1862). An analysis of land cover during the twentieth century has demonstrated an afforestation process on the Souliers avalanche path, which takes place mainly on the upper side.

The comparison with the avalanche path of Echalp has clearly shown years and decades with common events. Furthermore, these periods of high frequency avalanches are correlated with negative winter temperatures and a high percentage of precipitation solid part. This confirms a relationship between the climate and the fluctuations of avalanche activities. In contrast, while the Souliers avalanche path has been marked by a strong afforestation process, the Echalp path has a less important stand forest cover evolution. In the two cases, we observed a decrease of avalanche activities during the twentieth century. These reductions in avalanche activities might be linked to climatic changes and to the decrease of human activities.

Nonetheless, to confirm these results, it is necessary to (i) replicate studies for a larger number of snow avalanche paths in the Queyras region and (ii) use weather station instrumentation at remote sites, calibrated against long meteorological times series, to obtain more relevant data for modeling.

4.7 Captions

Figure 1. (a) The Souliers hamlet is located in Queyras massif (Southern Alps). Souliers and Echalp avalanche path are delimited by black polygons. (b) The Souliers avalanche path where trees are sampled is an interfluve area with presence of forest called "Le Grand Bois"	39
Figure 2. Tree ring chronologies of multicentennial European larch trees (<i>Larix decidua</i> Mill.) for two sites of Massif Queyras (Souliers and Echalp) dating back to AD 1338. Individual series are detrended with (1) a negative exponential curve or a linear regression	40
Figure 3. Mean age of the 201 <i>Larix decidua</i> Mill. sampled at the Souliers avalanche path.	41
Figure 4. Topographic maps showing the stand forest evolution from 1882 to 1992 (1882, 1930, 1968, 1982 and 1992) at Souliers avalanche path. Source: IGN.	42
Figure 5. Diachronic map showing the stand forest evolution from 1945 to 2009 on the study site ..	43
Figure 6. Event response histogram showing avalanche-induced growth disturbance (GD) from sampled trees. Values of Wit between 1381 and 2011. Green and Red horizontal dotted lines demarcates the 1,2% and 0,8% thresholds used to the determination of a major (Red bar chart) and minor (Green bar chart) avalanche event. The black line shows the sample depth (i.e., the total number of trees alive in each year).	45
Figure 7. Comparison of reconstructed snow avalanches with (a) Precipitation solid part (Chimani <i>et al.</i> , 2011), (b) snowfall of Böhm <i>et al.</i> (2010), (c) the historical indices of winter precipitation (Pfister, 1993), (d and e) the winter temperature (Böhm <i>et al.</i> , 2010; Pfister, 1993). Series were smoothed using a 10 year average filter.	46
Figure 8. Diachronic map showing the stand forest evolution between 1945 and 2009 at Echalp avalanche path.	47
Table 1. Intensity reactions and types of growth disturbances (GD) assessed in the 201 trees selected for analysis.	44

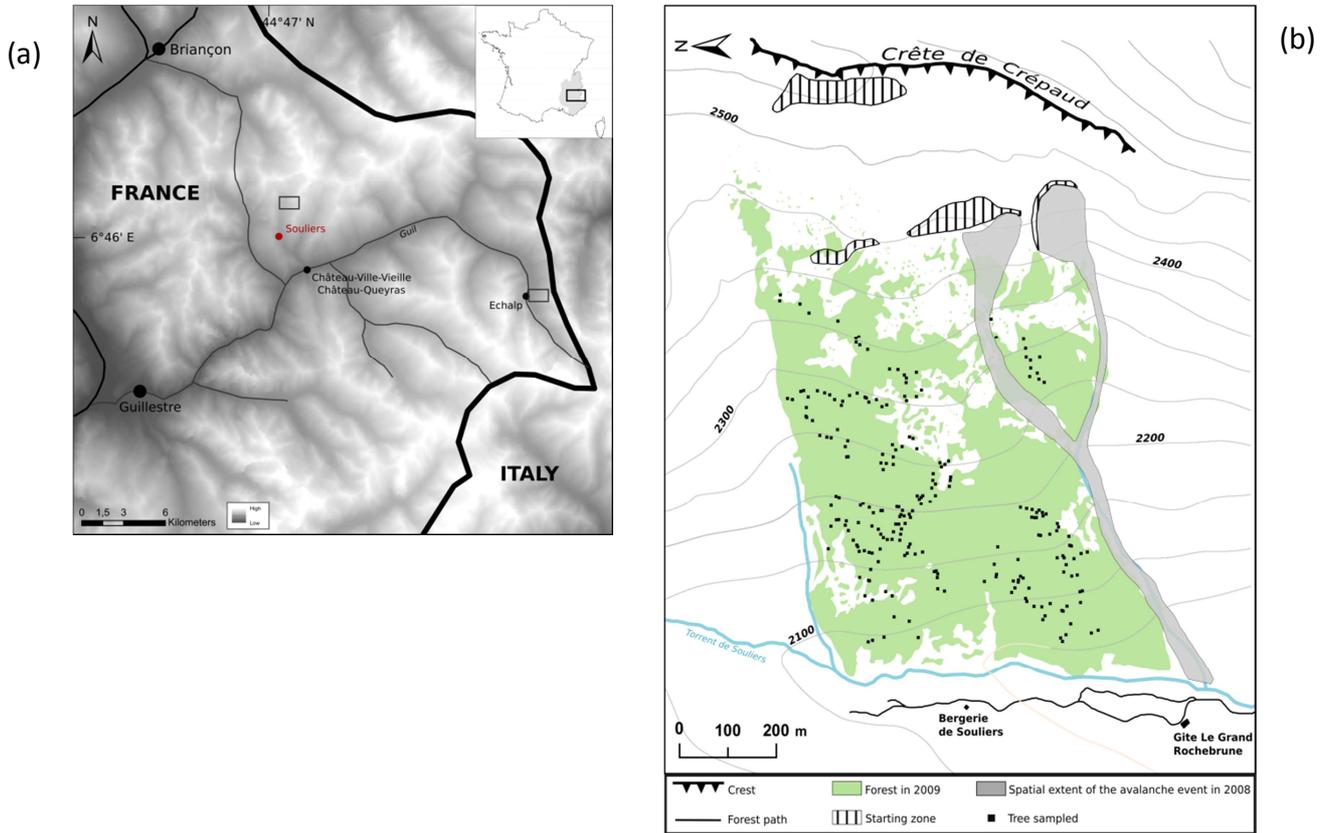


Figure 12. (a) The Souliers hamlet is located in Queyras massif (Southern Alps). Souliers and Echalp avalanche path are delimited by black polygons. (b) The Souliers avalanche path where trees are sampled is an interfluvial area with presence of a forest called "Le Grand Bois".

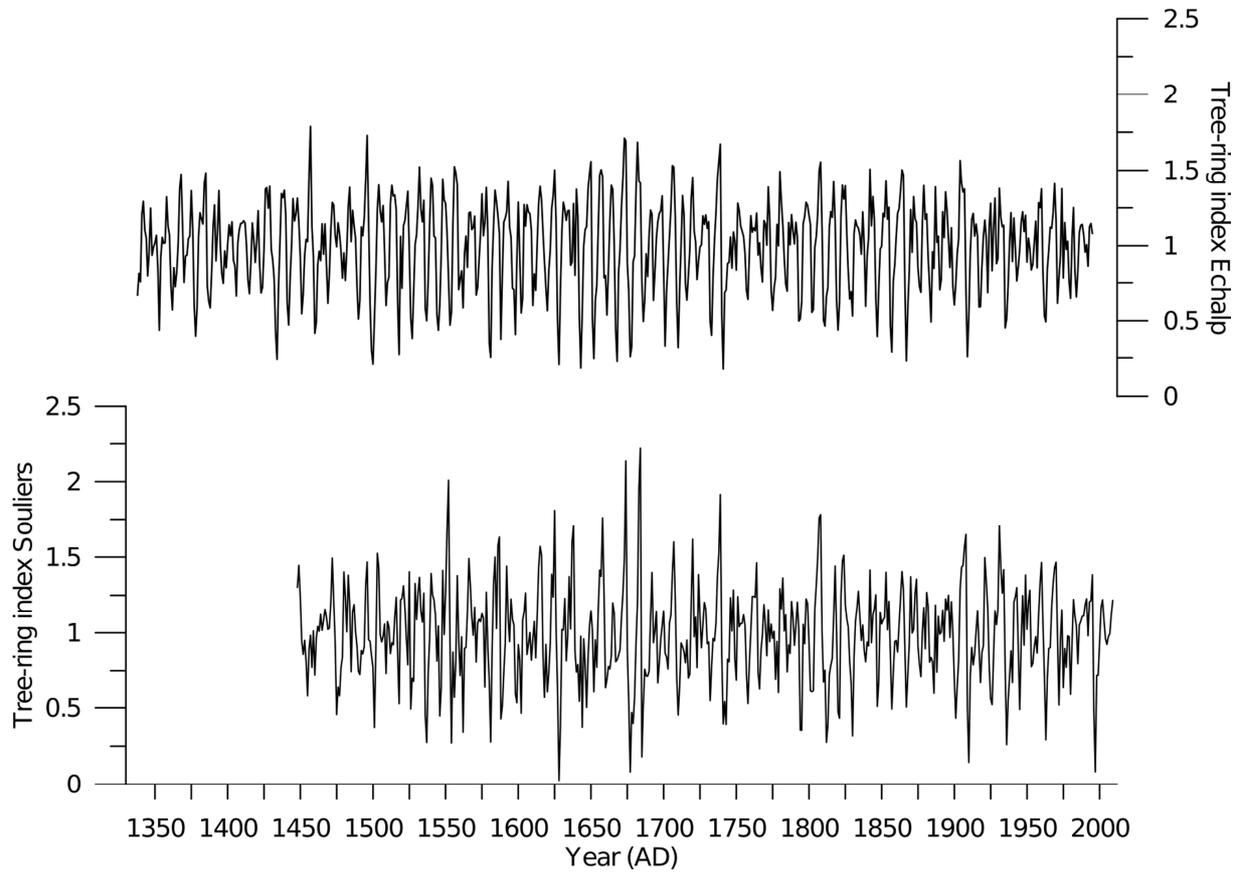


Figure 2. Tree ring chronologies of multicentennial European larch trees (*Larix decidua* Mill.) for two sites of Massif Queyras (Souliers and Echalp) dating back to AD 1338. Individual series are detrended with (1) a negative exponential curve or a linear regression and (2) by a cubic smoothing spline function.

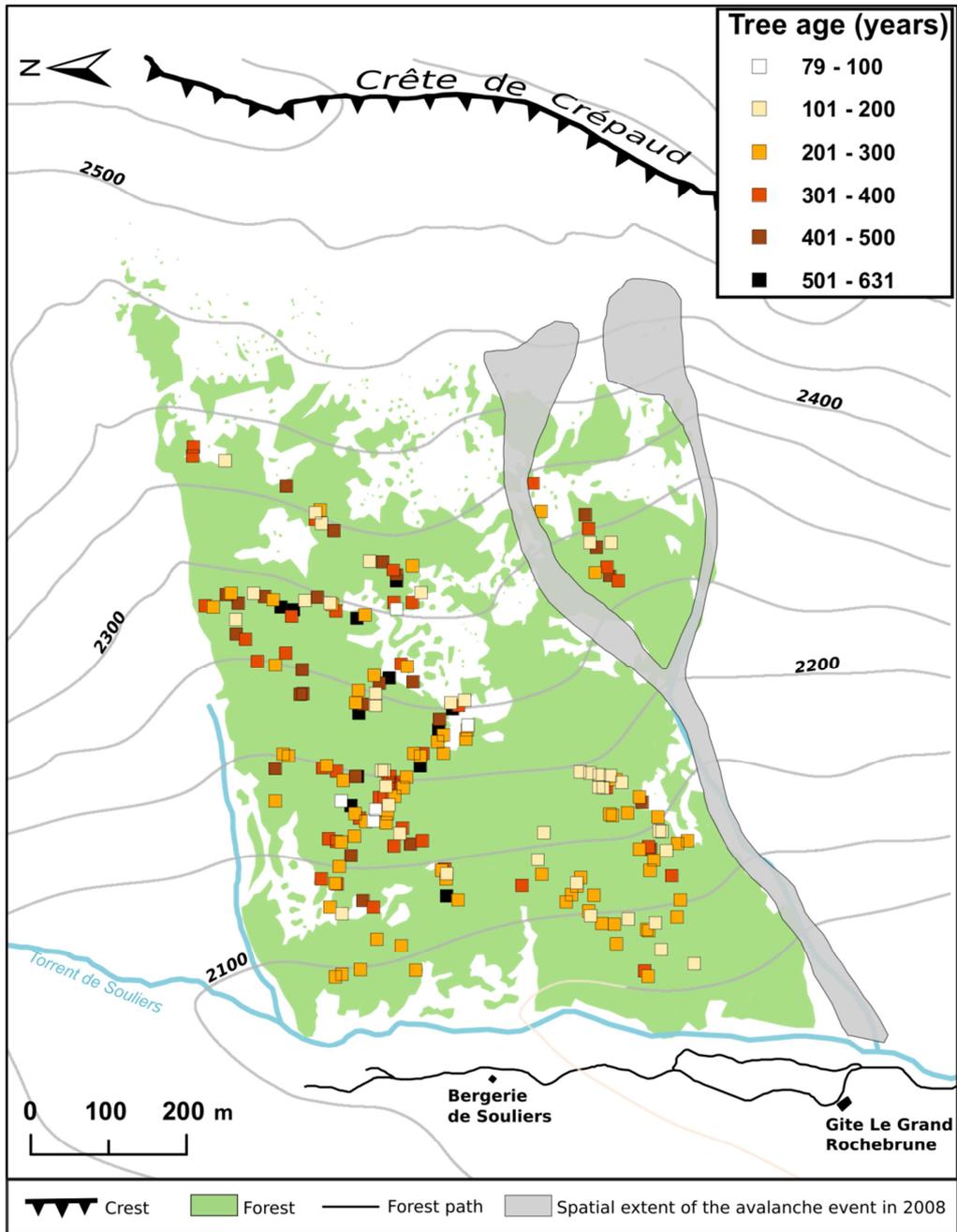


Figure 3. Mean age of the 201 *Larix decidua* Mill. sampled at the Souliers avalanche path.

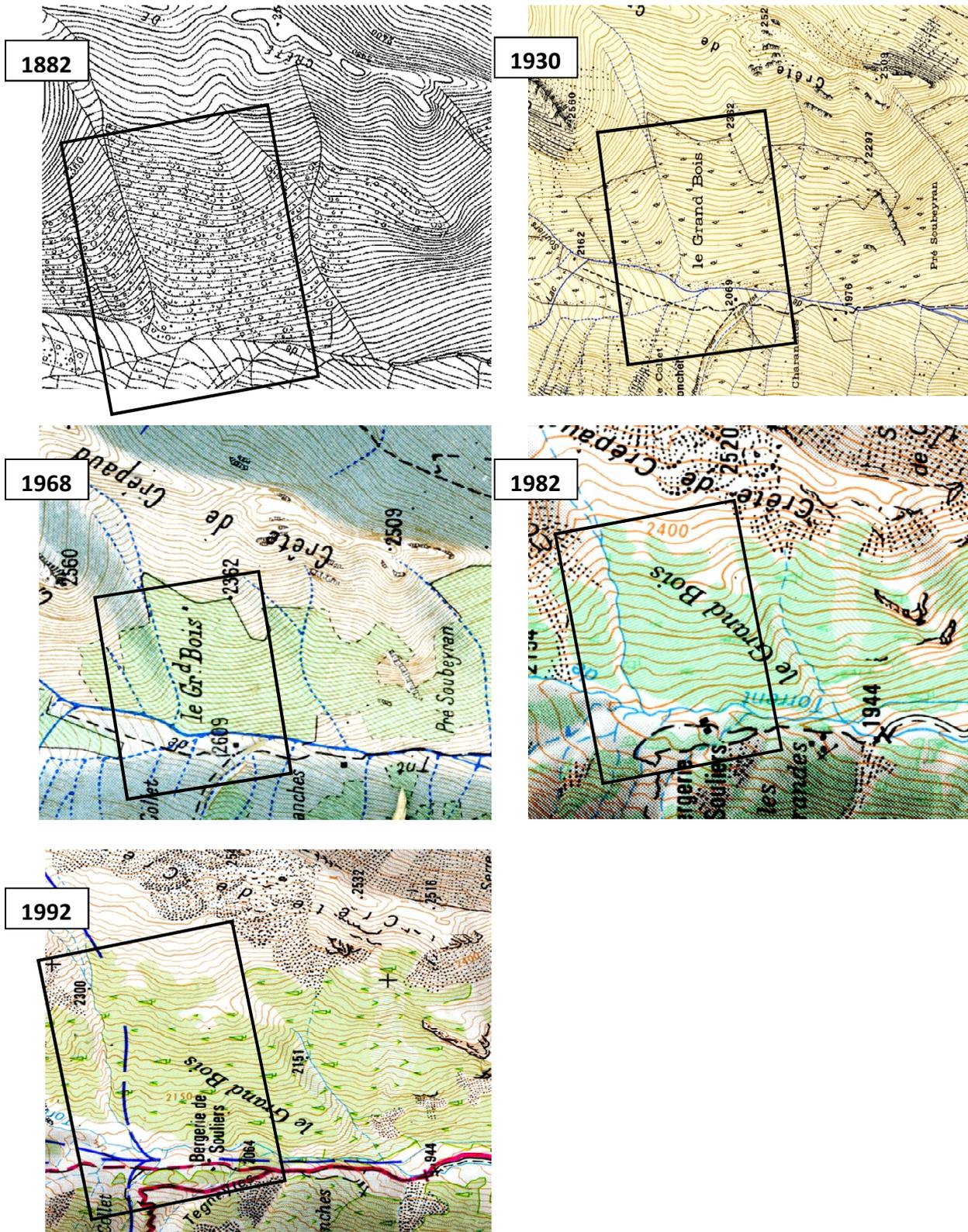


Figure 4. Topographic maps showing the stand forest evolution from 1882 to 1992 (1882, 1930, 1968, 1982 and 1992) at Souliers avalanche path. Source: IGN



Figure 5. Diachronic map showing the stand forest evolution from 1945 to 2009 on the study site

Intensity	Number	%	Type	Number	%
1	267	51	Tangential rows of traumatic resin ducts	173	33
2	155	29	Growth reduction	339	64
3	105	20	Compression wood	15	3
Total	527	100		527	100

Table 1. Intensity reactions and types of growth disturbances (GD) assessed in the 201 trees selected for analysis.

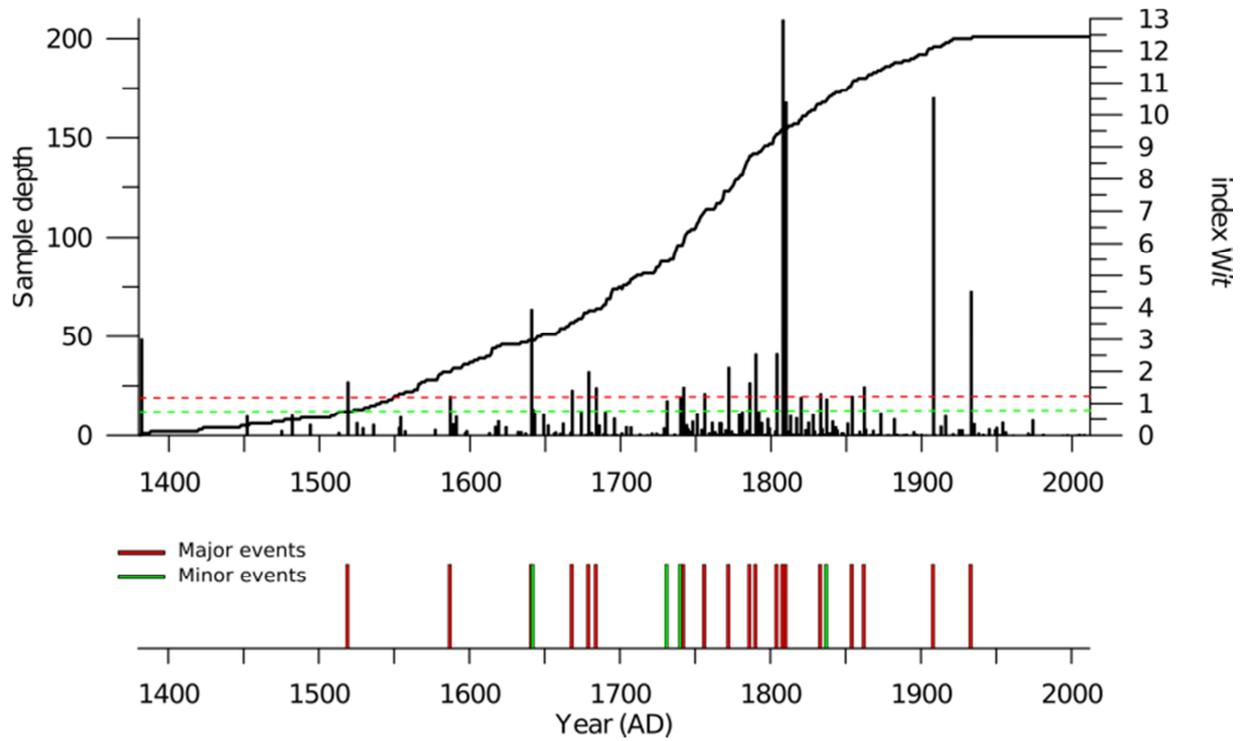


Figure 6. Event response histogram showing avalanche-induced growth disturbance (GD) from sampled trees. Values of Wit between 1381 and 2011. Green and Red horizontal dotted lines demarcates the 1,2% and 0,8% thresholds used to the determination of an major (Red bar chart) and minor (Green bar chart) avalanche event. The black line shows the sample depth (i.e., the total number of trees alive in each year).

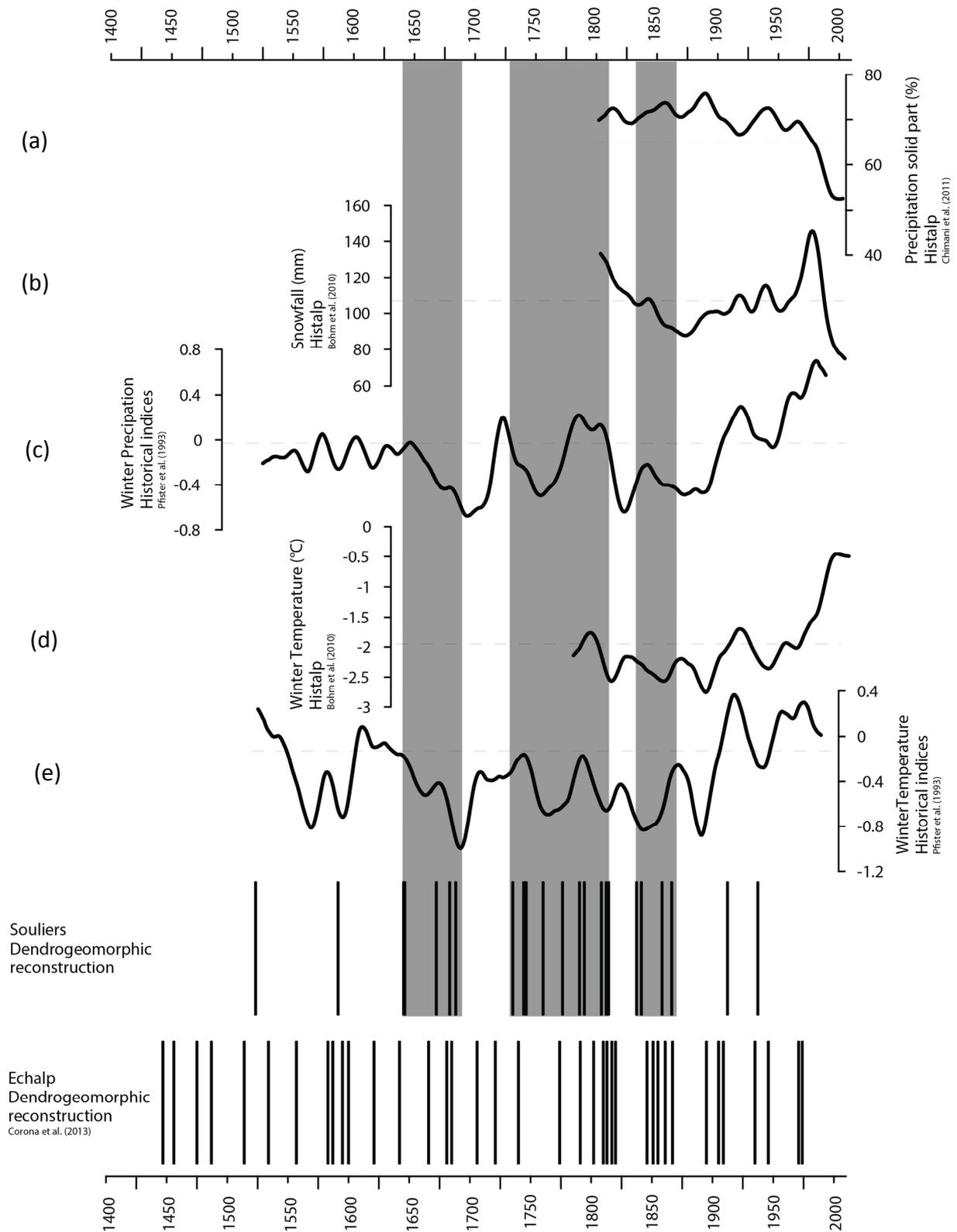


Figure 7. Comparison of reconstructed snow avalanches with (a) Precipitation solid part (Chimani *et al.*, 2011), (b) snowfall of Böhm *et al.* (2010), (c) the historical indices of winter precipitation (Pfister, 1993), (d and e) the winter temperature (Böhm *et al.*, 2010; Pfister, 1993). Series were smoothed using a 10 year average filter.

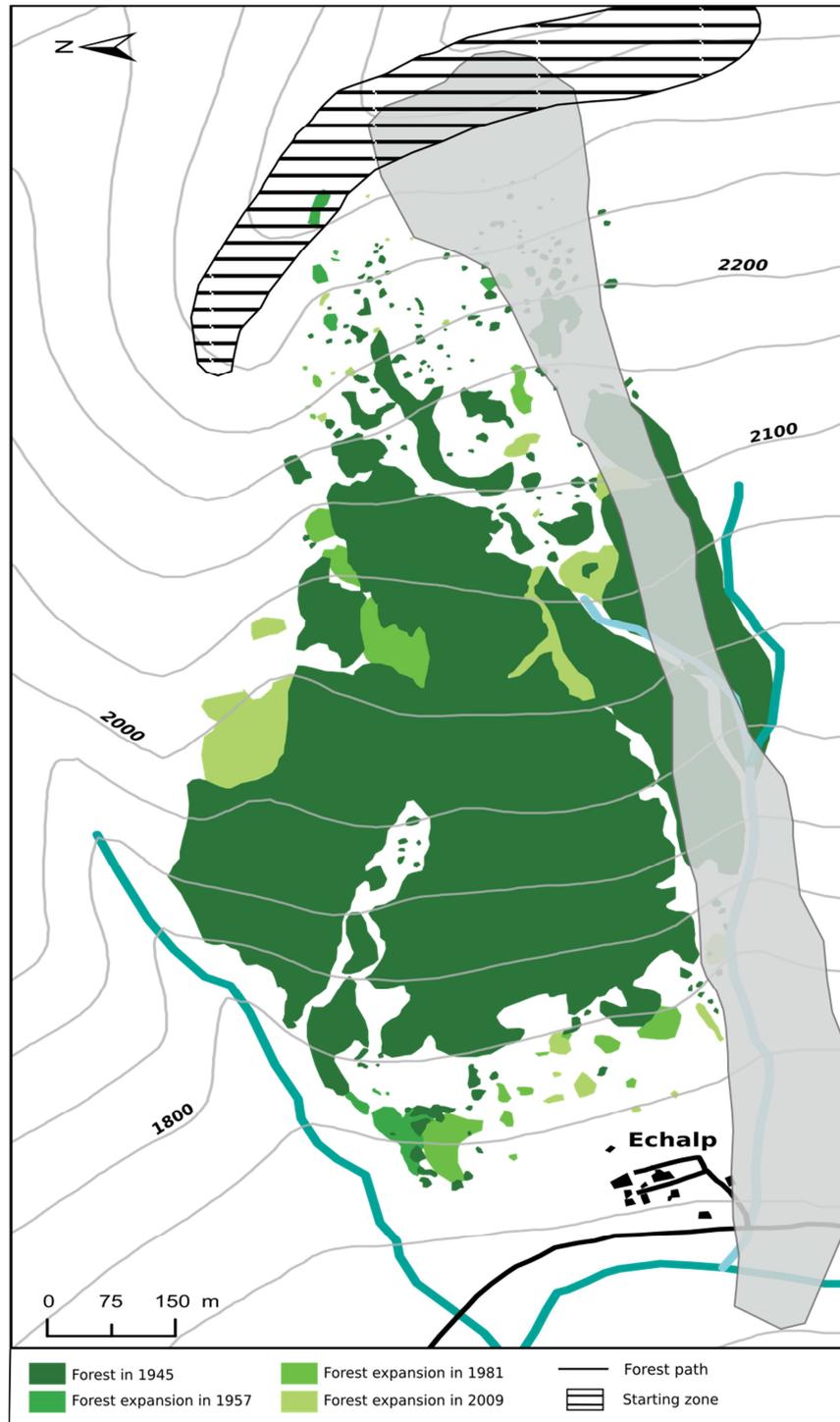


Figure 8. Diachronic map showing the stand forest evolution between 1945 and 2009 at Echalp avalanche path.

References

- Alestalo J (1971) Dendrochronological interpretation of geomorphic processes. *Fennia* 105: 1–139.
- Ancey C (1998) Guide neige et avalanches - Connaissances, pratiques, sécurité. France, *Edisud*.
- Barbero M (1992) Evolution de la végétation et des paysages dans les Alpes du Sud; Quelle gestion pour les espaces ? *Bulletin mensuel de l'INC* 176: 6-12.
- Bartelt P, Stöckli V (2001) The influence of tree and branch fracture, overturning and debris entrainment on snow avalanche flow. *Annals of Glaciology* 32: 209-216.
- Bebi P, Kulakowski D, Rixen C (2009) Snow avalanche disturbances in forest ecosystems - state of research and implications for management. *Forest Ecology and Management* 257: 1883-1892.
- Böhm R, Jones PD, Hiebl J, Frank D, Brunetti M, Maugeri M (2010) The early instrumental warm-bias: a solution for long central european temperature series 1760-2007. *Climatic Change* 101: 41-67.
- Bräker O (2002) Measuring and data processing in tree-ring research ? A methodological introduction. *Dendrochronologia* 20: 203-216.
- Brun JJ, Véron F, Roy L, Bozon N (1989) Connaissance et gestion des espaces montagnards en friches (cas de la Moyenne Maurienne): cadrage méthodologique et premiers résultats, colloque national "l'écologie en France", Lyon 23-25, pp 317-326.
- Bryant CL, Butler DR, Vitek JD (1989) A statistical analysis of tree-ring dating in conjunction with snow avalanches: comparison of on-path versus off-path responses. *Environmental Geological Water Science* 14: 53-59.
- Butler DR (1979) Snow avalanche path terrain and vegetation, Glacier National Park, Montana. *Arctic and Alpine Research* 11: 17-32.
- Butler DR, Malanson GP (1985) A history of high-magnitude snow avalanches, Southern glacier national park, Montana, U.S.A. *Mountain Research and Development* 5: 175-182.
- Butler DR and Sawyer CF (2008) Dendrogeomorphology and high-magnitude snow avalanches: A review and case study. *Natural Hazards and Earth System Science* 8: 303–309.
- Carrara PE (1979) The determination of snow avalanche frequency through tree-ring analysis and historical records at Ophir, Colorado. *Geological Society of America Bulletin* 90: 773-780.

- Carrer M, Nola P, Edouard JL, Motta R, Urbinati C (2007) Regional variability of climate-growth relationships in *Pinus cembra* high elevation forests in the Alps. *Journal of Ecology* 95: 1072-1083.
- Casteller A, Stöckli V, Villalba R, Mayer AC (2007) An evaluation of dendroecological indicators of snow avalanches in the Swiss Alps. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 39: 218–228.
- Casteller A, Villalba R, Araneo D et al. (2011) Reconstructing temporal patterns of snow avalanches at Lago del Desierto, Southern Patagonian Andes. *Cold Regions Science and Technology* 67: 68-78.
- Chimani B, Matulla C, Böhm R and Hofstätter M (2011) A new high resolution absolute temperature Grid for the Greater Alpine Region back to 1780, *Int. J. Climatol.* 33: 2129-2141.
- Chiroiu P, Sotffel M, Onaca A, Urdea P (2014) Testing dendrogeomorphic approaches and thresholds to reconstruct snow avalanche activity in the Fagaras Mountains (Romanian Carpathians). *Quaternary Geochronology* 27: 1-10.
- Cook ER, Kairiukstis L (1990) *Methods of Dendrochronology*. Kluwer, Dordrecht.
- Corona C, Rovéra G, Lopez Saez J, Stoffel M, Perfettini P (2010) Spatio-temporal reconstruction of snow avalanche activity using tree rings: Pierres Jean Jeanne avalanche talus, Massif de l'Oisans, France. *Catena* 83: 107-118.
- Corona C, Lopez Saez J, Stoffel M, Bonnefoy M, Richard D, Astrade L, Berger F (2012) How much of the real avalanche activity can be captured with tree rings? An evaluation of classic dendrogeomorphic approaches and comparison with historical archives. *Cold Science Region and Technology* 74-75: 31-42.
- Corona C, Lopez-Saez L, Stoffel M, Rovéra G, Edouard J-L., Berger F (2013) Seven centuries of avalanche activity at Echalp (Queyras massif, southern French Alps) as inferred from tree rings. *The Holocene* 23 (2) : 292-304.
- Delcros P (1994) *Ecologie du paysage et dynamique post-culturelle en zone de montagne*, Etudes du CEMAGREF, série Gestion des Territoires, Grenoble, 13, pp 134.
- Didier L (2001) Invasion pattern of European larch and Swiss stone pine in subalpine pastures in the French Alps. *Forest Ecology and Management* 145: 67-77.
- Dubé S, Filion L, Héту B (2004) Tree-ring reconstruction of high-magnitude snow avalanches in the Northern Gaspé Peninsula, Québec, Canada. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 36: 555-564.

- Eckert N, Coleou C, Casterbrunet H, Deschatres M, Giraud G and Gaume J (2010) Cross-comparison of meteorological and avalanche data for characterising avalanche cycles: The example of December 2008 in the eastern part of the French Alps. *Cold Regions Science and Technology* 64: 119-136.
- Garbarino M, Weisberg P, Motta R (2009) Interacting effects of physical environment and anthropogenic disturbances on the structure of European larch (*Larix decidua* Mill.) forests. *Forest Ecology and Management* 257: 1794-1802.
- Johnson EA (1987) The relative importance of snow avalanche disturbance and thinning on canopy plant populations. *Ecology* 68 : 43-53.
- Korner C (1994) Impact of atmospheric changes on high mountain vegetation. In: Beniston M (Ed.), *Mountain Environment in Changing Climates*. Routledge, London, England, pp. 155-166.
- Kogelnig Mayer B, Stoffel M, Schneuwly Bollschweiler M, Hülb J and Miklau FR (2011) Possibilities and limitations of dendrogeomorphic time-series reconstructions on sites influenced by debris flows and frequent snow avalanche activity. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 43 (4): 649-658.
- Korner C (1998) A re-assessment of high elevation of tree line positions and their explanation. *Oecologia* 115: 445-459.
- Le Gallou JY and Guignard P (2011) Modalité de prise en compte des avalanches exceptionnelles pour améliorer la prévention des risques et renforcer la sécurité des personnes. Rapport no.007395-01, Conseil Général de l'Environnement et du Développement durable, pp. 86.
- Lemoine M and Tricart P (1986) Les schistes lustrés piémontais des Alpes occidentales: approche stratigraphique, structurale et sédimentologique. *Eclogae geologicae Helvetiae* 79: 271-294.
- Leone S (2006) Les populations de haute montagne face aux contraintes naturelles. Les vallées de Chamonix et Vallorcine (1730-1914). Ph.D thesis, Université Pierre Mendès France. Grenoble. France.
- Lopez-Saez J, Corona C, Stoffel M, Schoeneich P, Berger F (2012) Probability maps of landslide reactivation derived from tree-ring records: Pra Bellon landslide, southern French Alps. *Geomorphology* 138: 189-202.
- Luckman BH (2010) Dendrogeomorphology and snow avalanche research. In: Stoffel, M., Bollschweiler, M., Butler, D.R., Luckman, B.H. (Eds.), *Tree rings and natural hazards. A state-of-the-art*. Dordrecht, Heidelberg, London, New York. *Springer*: 27-34.

- Maanan M, Robin M. (2010) Geomatic solutions for coastal environment. Nova Science Publishers. 400p.
- Malanson P and Butler DR (1984) Transverse pattern of vegetation on avalanche paths in the northern Rocky Mountains, Montana. *Western North American Naturalist* 44: 453-458.
- Margreth S (2004) Die Wirkung des Waldes bei Lawinen. - Schutzwald und Naturgefahren. Forum für Wissen 2004, pp. 21-26.
- Maurer K, Weyand A, Fischer M, Stöcklin J (2006) Old cultural traditions, in addition to land use and topography, are shaping plant diversity of grassland in the Alps. *Biological Conservation* 130: 438-446.
- Mayr S, Schwienbacher F, Bauer H (2003) Winter at the alpine timberline. Why does embolism occurs in Norway Spruce but not in stone pine? *Plant Physiology* 131: 780-792.
- Muntan E, Garcia C, Oller P, Martí A, Garcia A, Gutiérrez E, (2009) Reconstructing snow avalanches in the Southeastern Pyrenees. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 9: 1599-1612.
- Oberhuber W (2004) Influence of climate on radial growth *Pinus cembra* within the alpine timberline ecotone. *Tree Physiol* 24: 291-301.
- Pfister C (1993) Historical weather Indices from Switzerland. IGBP PAGES/World Data Center-A for Paleoclimatology Data Contribution Series # 93-027. NOAA/NGDC Paleoclimatology Program, Boulder CO, USA.
- Piussi P (2000) Expansion of European mountain forests. In: Price MF, Butt N (Eds), Forest in Sustainable Mountain Development: A state of Knowledge Report for 2000. *CABI Publishing, Wallingford*: 19-25.
- Potter N (1969) Tree-ring dating of snow avalanche tracks and the geomorphic activity of avalanches, northern Absaroka Mountains, Wyoming, Boulder, CO. *Geological Society of America, Special Paper* 123: 141-165.
- Reardon B.A., Pederson G.T., Caruso C.J., Fagre D.B., (2008) Spatial reconstructions and comparisons of historic snow avalanche frequency and extent using tree rings in Glacier National Park, Montana, U.S.A. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 40: 148-160.
- Rinntech (2009) <http://www.rinntech.com/content/blogcategory/2/28/lang,english/>
- Saulnier M, Edouard JL, Corona C, Guibal F (2010a) Climate/growth relationships in a *Pinus cembra* high-elevation network in the Southern French Alps. *Annals of Forest Science* 68 (1): 189-200.

- Saulnier M, Corona C, Edouard JL, Guibal F, Thomas A (2010b) Cernes caractéristiques et anomalies extremes du climat dans les Alpes françaises entre 1500 et 2000. In: Final Proceedings, Panorama de la dendrochronologie en France. Collection EDYTEM, Digne les bains, Cahiers de Géographie, 11, pp. 77-86.
- Saulnier M, Talon B, Edouard JL (2015) New pedoanthracological data for the long-term history of forest species at mid-high altitudes in the Queyras Valley (Inner Alps), *Quaternary International*: 1-10.
- 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 Regions Science and Technology* 99: 12-26.
- Schneuwly DM and Stoffel M (2008) Tree-ring based reconstruction of the seasonal timing, major events and origin of rockfall on a case-study slope in the Swiss Alps. *Natural Hazards and Earth System Science* 8 (2): 203-211.
- Schweingruber FH (1996) Tree Rings and Environment. Paul Haupt, Bern, Stuttgart, Wien. *Dendroecology*.
- Schweizer J, Jamieson JB and Schneebeli M (2003) Snow avalanche formation. *Rev Geophys* 41, DOI: 10.1029/2002RG000123
- Stoffel M, Bollschweiler M, Hassler GR (2006) Differentiating past events on a cone influenced by debris-flow and snow avalanche activity, a dendrogeomorphological approach. *Earth Surface Processes and Landforms* 31: 1424–1437.
- Stoffel M and Hitz OM (2008) Snow avalanche and rockfall impacts leave different anatomical signatures in tree rings of *Larix decidua*. *Tree Physiology* 28 (11): 1713-1720.
- Stoffel M, Bollschweiler M (2008) Tree-ring analysis in natural hazards research – an overview. *Natural Hazards and Earth System Science* 8: 187-202.
- Stoffel M, Bollschweiler M, Butler DR, Luckman B (2010) Tree rings and natural hazards: A state-of-the-art. Dordrecht; New York, *Springer*: 505 p.
- Storck P, Kern T, Bolton S (1999) Measurement of differences in snow accumulation, melt, and micrometeorology due to forest harvesting. *Northwest Science* 73: 87-101.
- Strunk H (1997) Dating of geomorphological processes using dendrogeomorphological methods, *Catena* 31: 137-151.

- Talon B, Carcaillet C and Thinion M (1998) Etudes pédoanthracologiques des variations de la limite supérieure des arbres au cours de l'Holocène dans les Alpes françaises. *Géographie physique et Quaternaire* 52: 193-206.
- Timell T (1986) Compression wood in gymnosperms. Berlin, *Springer*. 2210 p.
- Tranquillini W (1979) Physiological Ecology of the Alpine Timberline. Springer, Berlin, 137pp.
- Touflan P, Talon B and Walsh K (2010) Soil charcoal analysis: A reliable tool for spatially precise studies of past forest dynamics: A case study in the French southern Alps. *The Holocene* 20: 44-52.
- Viglietti, D, Letey S, Motta R, Maggioni M and Freppaz M (2010) Snow avalanche release in forest ecosystems: A case study in the Aosta Valley Region (NW-Italy). *Cold Regions Science and Technology* 64(2): 167-173.
- Voiculescu M, Onaca A (2014) Spatio-temporal reconstruction of snow avalanche activity using dendrogeomorphological approach in Bucegi Mountains Romanian Carpathians. *Cold Regions Science and Technology* 104-105: 63-75.

5. Perspectives

5.1 Impact des fluctuations climatiques sur la fréquence et/ou l'intensité des avalanches

Pour les sociétés montagnardes, le tourisme d'hiver constitue une source de revenu économique vitale. Elles sont les principales concernées par les modifications du risque avalancheux lié au changement climatique en cours. Les apports de la dendrogéomorphologie dans les modèles de prévision du risque sont une des conditions préalables pour le développement de stratégies d'adaptation efficaces.

Les températures dans les Alpes européennes, par exemple, ont augmenté deux fois plus vite que la moyenne mondiale depuis la fin du XIX^{ème} siècle, et les précipitations ainsi que d'autres variables ont également augmenté de façon non-linéaire, avec des différences régionales et saisonnières importantes (Auer *et al.*, 2007; Haeberli *et al.*, 2007; Gobiet *et al.* 2014). Or, l'activité avalancheuse est fortement liée aux conditions atmosphériques, comprenant les moyennes de précipitations, la température de l'air, le vent et le rayonnement solaire (Schweizer *et al.*, 2003).

Des études paléo-environnementales utilisant des échelles de temps plus longues comme les séries chronologiques tirées de la lichénométrie (McCarroll, 1993), des sédiments lacustres (Nesje *et al.*, 2007) ou de la palynologie (Blikra et Selvik, 1998) ont montré une augmentation de la fréquence des avalanches dans l'Hémisphère Nord et en Europe occidentale au cours du "Petit Age Glaciaire".

La dendrogéomorphologie a donc un véritable rôle à jouer dans ces reconstructions à hautes résolutions spatio-temporelles, d'autant plus sur les sites où les séquences sédimentaires n'ont pas été conservées. Les peuplements de mélèzes pluri-centenaires offrent des perspectives intéressantes pour la reconstitution de la fréquence avalancheuse fini-Holocène. Les chroniques temporelles issues de ces peuplements peuvent permettre d'étudier plus précisément les effets des fluctuations climatiques sur l'activité des avalanches. Couplées avec des enregistrements systématiques comme les archives historiques, il est possible de mettre en évidence des tendances temporelles liant fluctuations climatiques et activités avalancheuses (Corona *et al.* 2013). Cependant, très peu d'études ont abordé cette question en détail pourtant cruciale en termes d'adaptation pour les politiques de gestion des risques. On pourra noter les travaux de Jamard et Bélanger (2002) qui ont exploré de manière statistique les similarités de fonctionnement de différents couloirs, notamment en ce qui concerne des dates de déclenchement (Eckert, 2007b).

Le travail réalisé par l'étude de Mainieri *et al.* (2015) a permis de mettre en regard certaines corrélations entre les activités avalancheuses et les fluctuations climatiques à l'échelle d'un massif

(Queyras, Hautes-Alpes). Pour cela, cette étude compare des reconstitutions par l'approche dendrogéomorphologique (Corona *et al.*, 2013; Mainieri *et al.* 2015) sur deux couloirs différents. Les deux sites sont situés dans le massif du Queyras et sont éloignés de 18 km. Il s'agit du couloir d'avalanches de l'Echalp (Corona *et al.*, 2013) et de celui de Souliers (Mainieri *et al.*, 2015). Rappelons que les deux sites, dont la comparaison a été évoquée dans l'article ci-dessus ont les caractéristiques suivantes; les zones de départ d'avalanches se situent à des altitudes similaires (2100-2550 m asl), les précipitations moyennes annuelles sont d'environ 900mm et les deux couloirs sont peuplés majoritairement par des mélèzes (*Larix decidua*). Les résultats obtenus indiquent que les deux couloirs ont quatre évènements communs (AD 1587, 1642, 1740 et 1810) qui coïncident avec des périodes de fortes inondations observées en Europe liées à des fontes brutales du manteau neigeux (Glaser *et al.*, 2010). D'après les données historiques de Pfister (1993), ces années se caractérisent des températures hivernales anormales (indices ≤ -1 ; Corona *et al.*, 2013). Deux évènements se sont produits au cours "d'hivers extrêmement froids" avec des indices ≤ -2 (1587 et 1810) et deux autres ont été caractérisés par "des hivers très froids" avec des indices variant entre -2 et -1 (1642 et 1740).

À l'échelle décennale, des périodes communes sont apparues : 1660-1690, 1802-1820, et 1846-1887. En les comparant, par exemple, avec les dynamiques glaciaires, les périodes coïncident avec l'avancée des glaciers alpins en 1640-1700, 1790-1840 et 1846-1867 (Glaser *et al.*, 2010; Büntgen *et al.*, 2006)

Les périodes de forte activité avalancheuse observées dans le Queyras (1641-1684 et 1731-1810) coïncident également avec les période de faible fréquence de l'activité solaire de Maunder et de Dalton (Büntgen *et al.*, 2006). Cependant, pour confirmer ces tendances à l'échelle régionale, il est nécessaire de répliquer ces études sur d'autres couloirs avalancheux.

5.2 Couloirs avalancheux du Queyras à potentiel dendrogéomorphologique

Aujourd'hui, seulement deux couloirs avalancheux du massif du Queyras ont fait l'objet d'une étude dendrogéomorphologique (Echalp et Souliers). Comme nous l'avons dit précédemment, si l'on souhaite obtenir une reconstruction des activités avalancheuses à l'échelle régionale qui puisse être utilisée de manière précise, il est indispensable de mener d'autres travaux sur de nouveaux couloirs du Queyras.

Ainsi, un nouvel objectif est de trouver des sites sujets aux avalanches et qui ont un potentiel dendrogéomorphologique. Pour cela, les données de CLPA présentent un grand intérêt car elles permettent de donner un bon aperçu de l'activité avalancheuse, suffisantes pour l'analyse spatio-temporelle. Ces données proposent un fond cartographique des potentiels risques avalancheux sur l'ensemble du territoire français dans un souci d'aménagement du territoire. Le centre Irstea de Grenoble ainsi que l'ONF ont la responsabilité d'établir ces cartes depuis 1972. Comme pour l'EPA,

l'ensemble de ces données cartographiques est exploitable à l'aide d'un logiciel SIG. Ici, nous distinguons deux types de réalisation de ces cartes; (i) les phénomènes avalancheux délimités par recueil de témoignages (Figure 12), (ii) et ceux délimités par photo-interprétation et analyse de terrain (Figure 13).

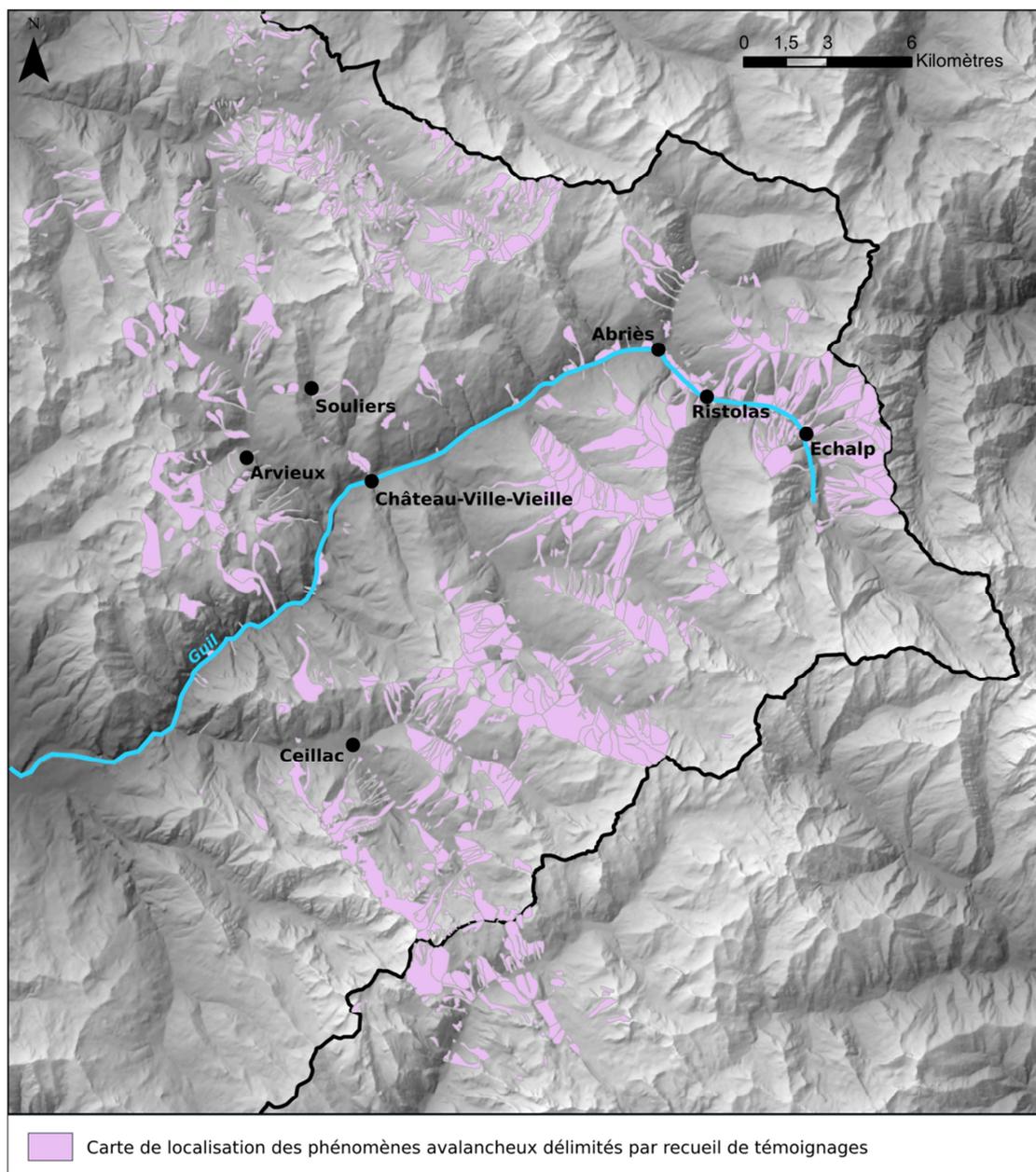


Figure 12. Carte des phénomènes avalancheux recueillis par témoignages dans le massif du Queyras. Source : Irstea. Réalisation R. Mainieri, 2015.

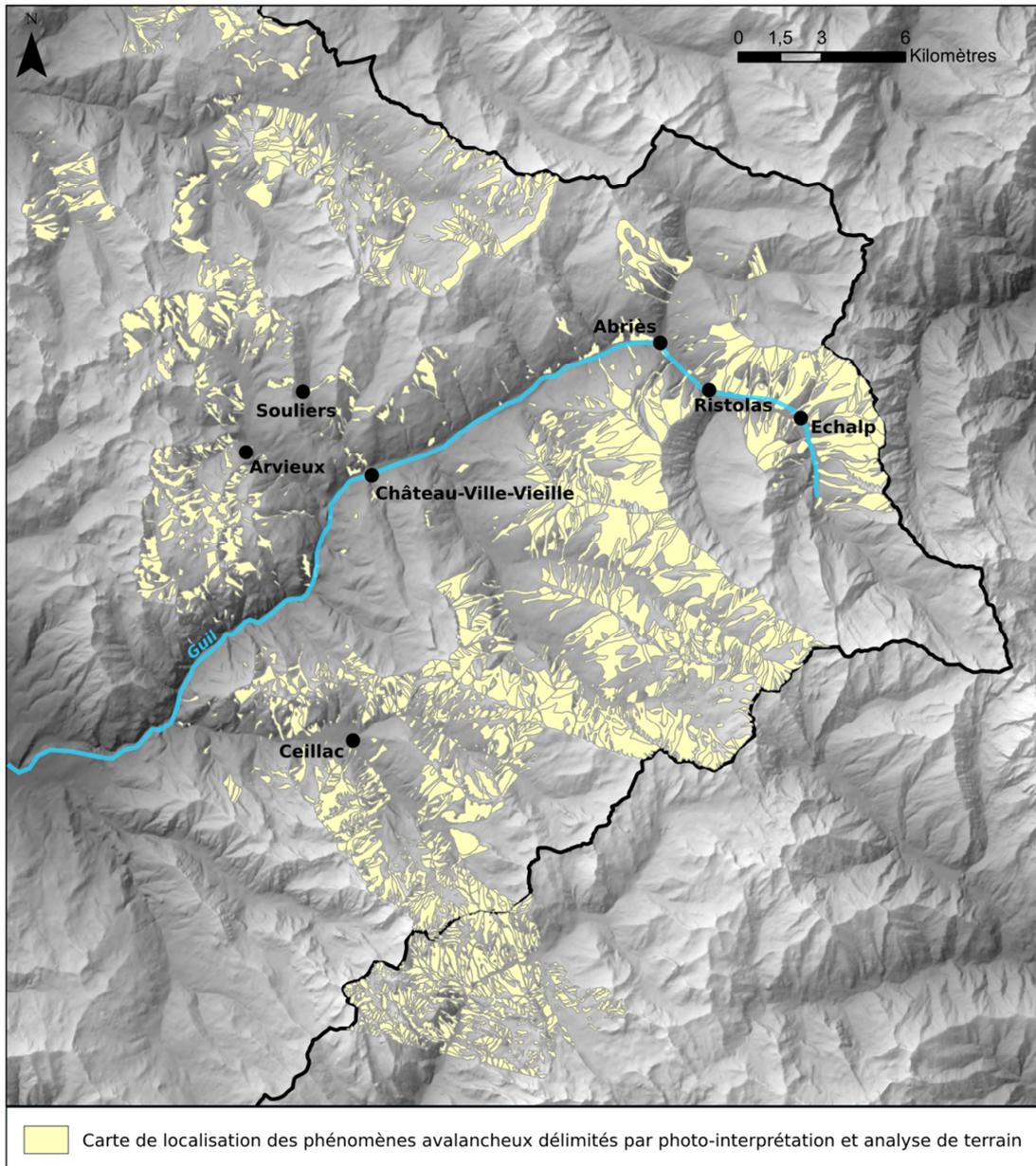


Figure 13. Carte des phénomènes avalancheux délimités par photo-interprétation dans le massif du Queyras.
 Source : Irstea. Réalisation R. Mainieri, 2015.

L'autre élément indispensable à une analyse dendrogéomorphologique est, bien entendu, la présence de peuplements forestiers. Pour cela, nous avons utilisé les données IFN (BD_Foret_V1) parmi lesquelles nous avons décidé de ne retenir que les peuplements de mélézins (Figure 14). Ce choix repose sur le fait que le massif du Queyras est peuplé principalement de mélèzes et que sa durée de vie est pluriséculaire. Si l'on souhaite avoir des éléments de comparaison avec les deux études déjà réalisées dans cette région (Corona *et al.*, 2013; Mainieri *et al.*, 2015), ce facteur est primordial.

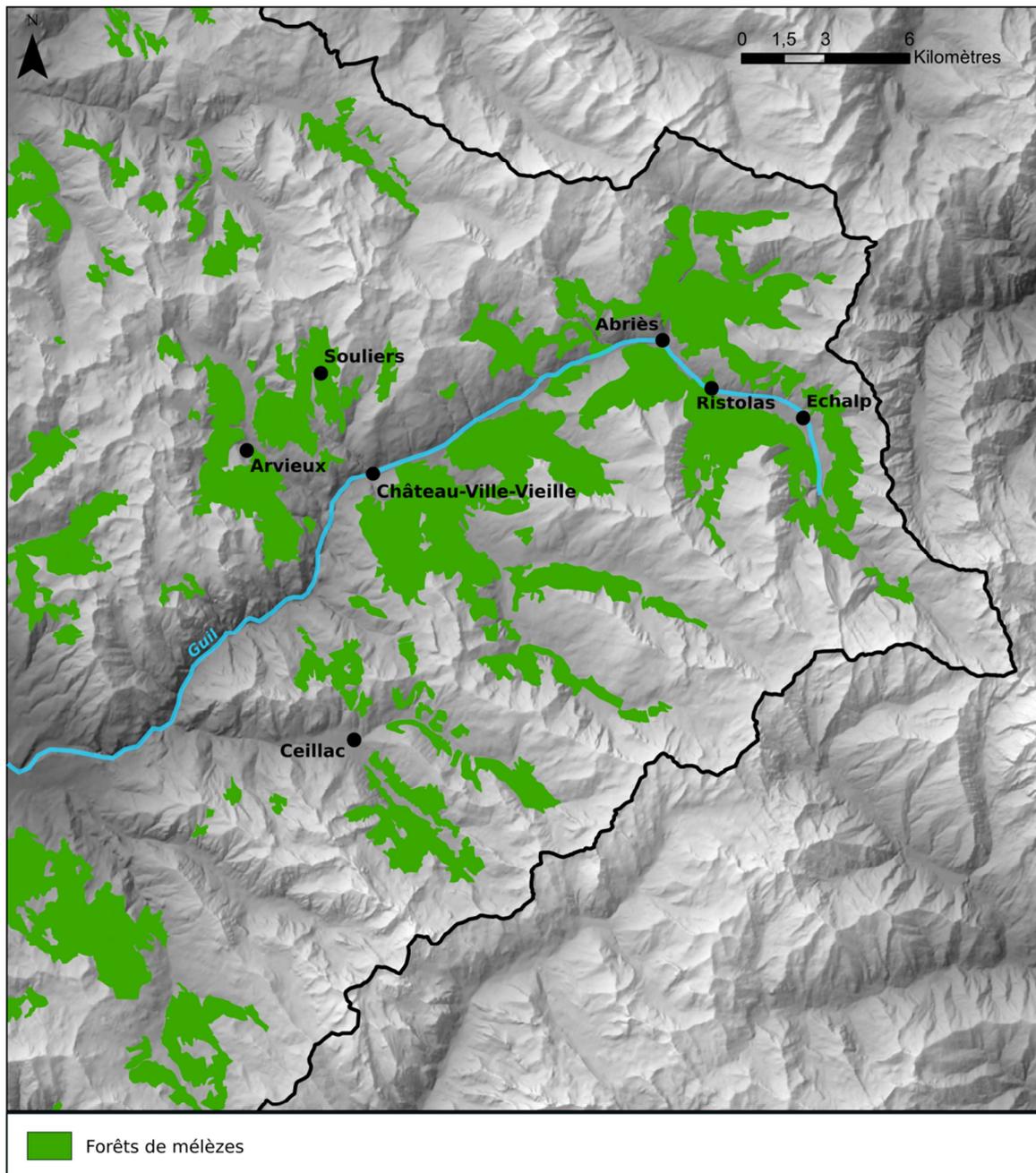


Figure 14. Peuplement de mélèzes dans le massif du Queyras. Données issues de l'IFN. Réalisation R. Mainieri, 2015.

Une fois après avoir croisé les couches représentant la forêt et les phénomènes avalancheux, nous obtenons une première carte des couloirs à potentiel dendrogéomorphologique. Cependant, un autre élément va intervenir, celui de l'ancienneté des peuplements. En effet, malgré la présence de mélèzes qui ont tendance à être pluri-centenaires, il faut s'assurer que ceux-ci sont bien présents depuis au moins 50 ans. Pour cela, les photographies aériennes de l'Institut Géographique National constituent un outil de travail efficace. En se basant sur la campagne de 1945, qui recouvre totalement le territoire étudié, nous avons pu ainsi mettre en avant des couloirs plus intéressants que d'autres car plus anciens (Figure 15 et 16).

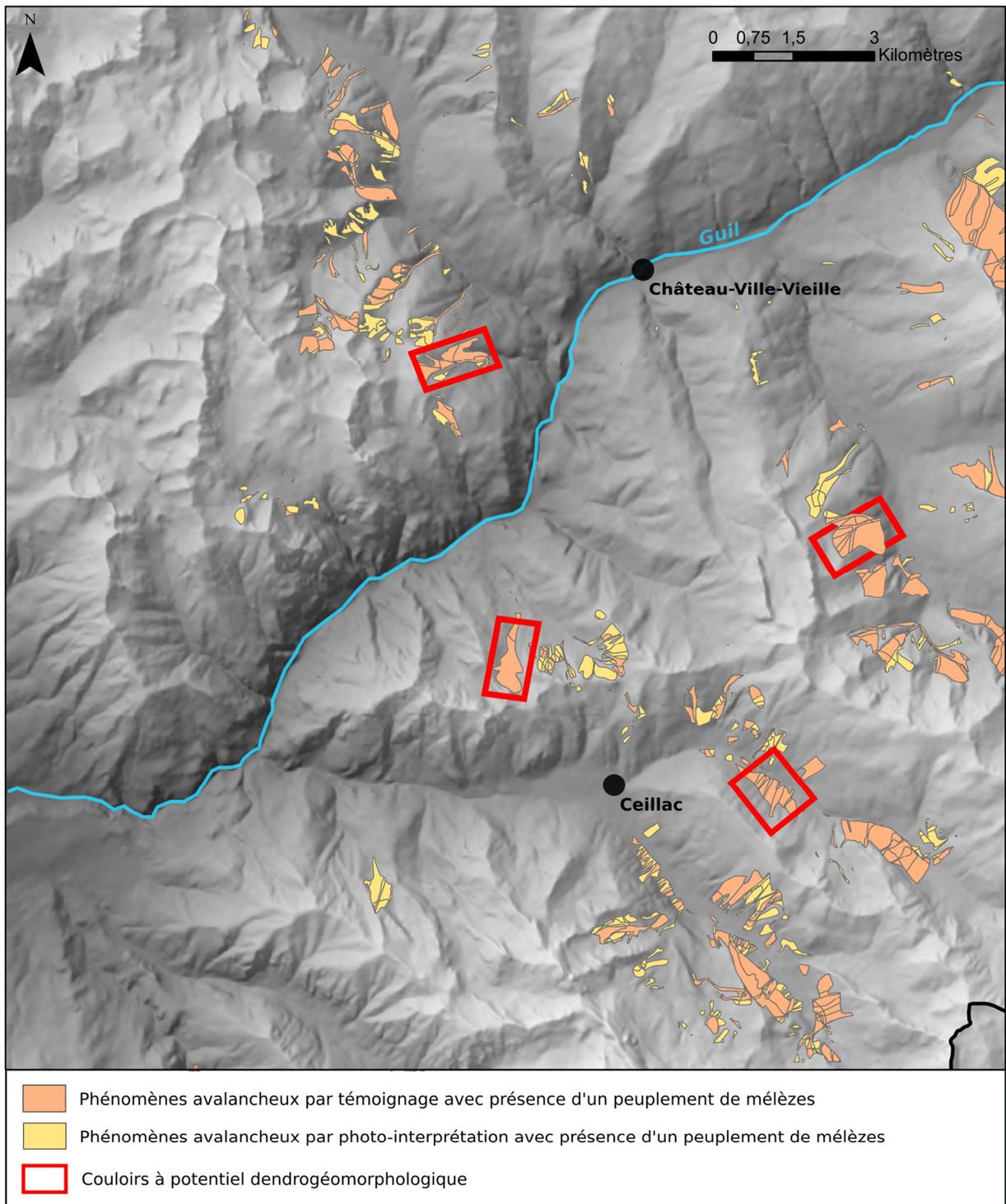


Figure 15. Carte des couloirs avalancheux ayant un potentiel dendrogéomorphologique dans la vallée du Haut Guil. Source : Irstea, IFN. Réalisation R. Mainieri, 2015.

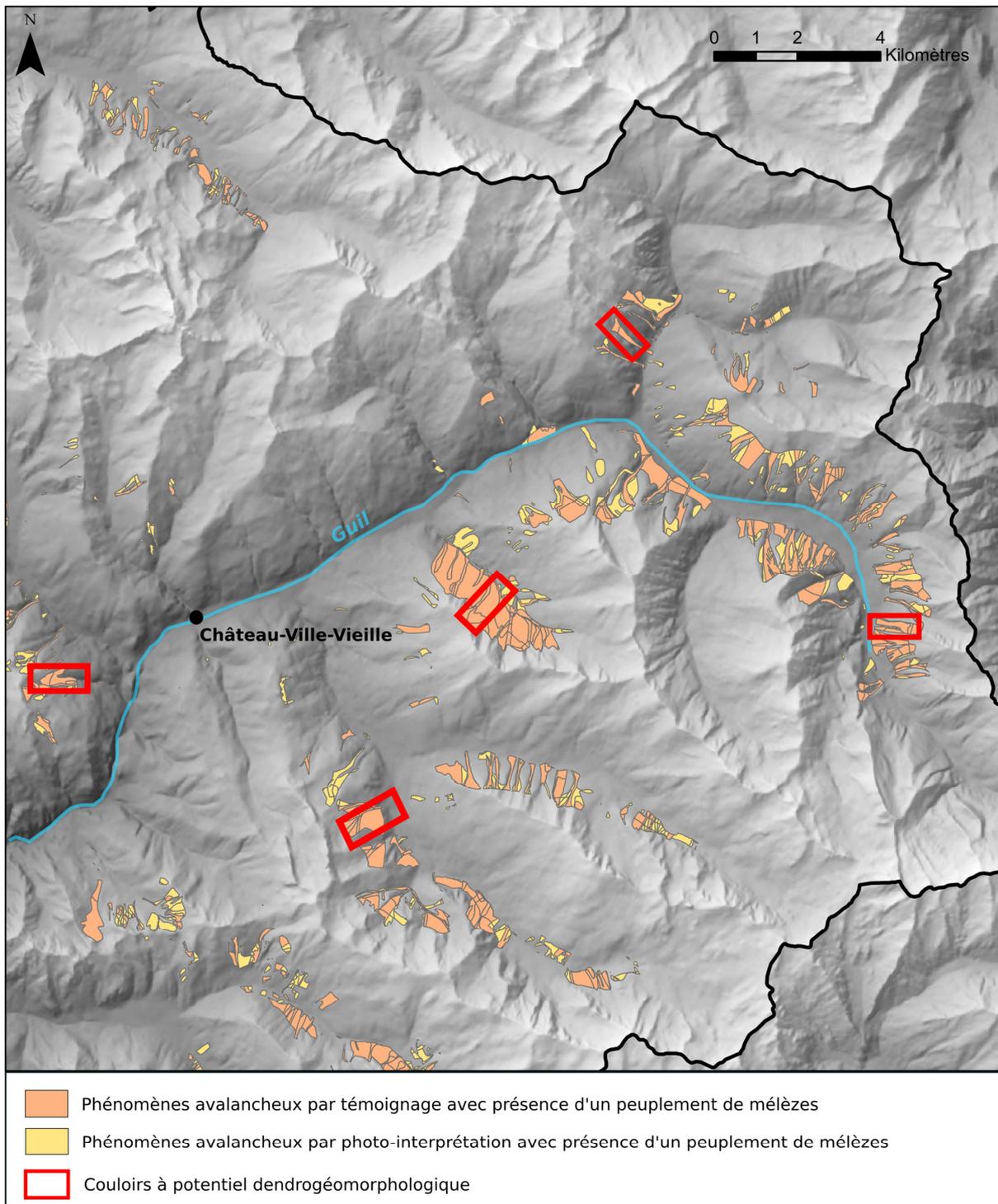


Figure 16. Carte des couloirs avalancheux ayant un potentiel dendrogéomorphologique dans la vallée du Bas Guil. Source : Irstea, IFN. Réalisation R. Mainieri, 2015.

Enfin, il est important de noter que mis à part les facteurs vus précédemment (forestiers et avalancheux), d'autres facteurs comme l'exposition ou la topographie peuvent aussi intervenir et ne sont pas négligeables. Au contraire, ces différences peuvent mettre en avant des particularités stationnelles intéressantes.

5.3 Intégration des données dans les modèles

5.3.1 La modélisation des avalanches

Dans les territoires montagnards alpins, l'accroissement démographique s'est considérablement accentué depuis le milieu du 20^{ème} siècle du fait du développement des activités touristiques (Eckert, 2007b). Il est donc nécessaire de comprendre les mécanismes à l'origine des avalanches dans une finalité de prévention et de prévision. C'est pourquoi des modèles reposant sur des prédictions mathématiques et physiques sont mis en place. Ils n'ont pas pour objet de reconstituer parfaitement la probabilité d'un écoulement neigeux mais s'inscrivent plutôt dans un processus de représentation de la réalité. En France, la caractérisation du risque d'avalanche s'appuie sur l'Enquête Permanente sur les Avalanches (EPA) qui à l'origine, fut initiée par le corps d'Etat de l'Office National des Forêts (ONF). Cependant cette base de données reste lacunaire et ne renseigne pas véritablement sur les grandeurs quantitatives (Eckert *et al.*, 2006). C'est pourquoi l'étude des avalanches a besoin d'être estimée à partir de modèles fondés sur la topographie ou les statistiques (Bovis et Mears, 1976; Eckert *et al.*, 2007a; Schläppy *et al.*, 2014). Néanmoins, la multiplicité des variables (pente, obstacles rencontrés, qualité de la neige, etc...) rend la modélisation du phénomène avalancheux très complexe. De ce fait, il existe plusieurs modèles d'écoulements neigeux fondés sur des hypothèses et des méthodologies différentes.

De manière générale, il est admis, par la communauté scientifique, qu'un modèle d'écoulement neigeux repose sur deux axes, qui sont (i) la conservation de la masse et (ii) la conservation du mouvement. Les modèles actuels permettent de résoudre assez bien ces lois de conservation. Les recherches récentes sur lesquelles les chercheurs se questionnent portent sur la nature du matériau, en l'occurrence de la neige, qui va intervenir entre ces deux lois de conservation. En effet, la méconnaissance du lien entre la contrainte et la déformation de la neige au cours de l'écoulement reste le principal obstacle à la compréhension de la dynamique des avalanches (Dent et Lang, 1980; Eckert, 2007b). Bien souvent, la connaissance de ce facteur repose sur l'empirisme et les observations de terrain. Les observations d'avalanches réelles en haute montagne étant difficile, il a été nécessaire de développer des expériences sur modèles réduits (Bouchet, 2003) ou à l'aide de matériaux analogiques granulaires (Hutter *et al.*, 1995). Enfin, la méconnaissance de certains processus élémentaires rend la part d'empirisme indispensable dans la modélisation.

Pour conclure, il est important de rappeler que le but de toute modélisation avalancheuse consiste, à partir de données "d'entrée" comme la quantité de la neige mobilisable ou la topographie, de déterminer des données "de sortie" comme la répartition spatiale et les paramètres dynamiques liés à l'écoulement comme la vitesse, les forces ou encore les pressions (Vallet, 2002).

5.3.2 L'apport de la dendrogéomorphologie dans les modèles

Comme nous l'avons expliqué précédemment, la méconnaissance de certaines variables clés dans la représentation des écoulements neigeux rend la part d'empirisme indispensable. Il s'agit alors de proposer une méthodologie pouvant faire le lien entre l'approche modélisatrice et les observations de terrain. La dendrogéomorphologie apparaît comme étant un des outils pouvant effectuer ce lien, bien qu'elle présente, à l'heure actuelle, certaines limites auxquelles nous ferons référence plus tard. L'apport de la dendrogéomorphologie à la modélisation peut se faire de deux manières complémentaires;

I. Validation des modèles;

Le premier apport que peut constituer l'étude des cernes de croissance des arbres est la vérification de l'imperfection d'un modèle. En d'autres termes, les résultats de l'étude dendrogéomorphologique vont permettre d'observer ce qui fonctionne et ce qui ne fonctionne pas dans un modèle. A ce titre, la dendrogéomorphologie peut être utilisée comme un outil comparatif entre les modèles purement mathématiques et physiques, et les données d'observation. Les travaux réalisés par Schläppy *et al.* (2014) s'inscrivent dans cette démarche. Ils ont permis de démontrer que le croisement entre les modèles statistiques et les données dendrogéomorphologiques pouvaient déterminer des distances d'écoulement et des périodes de retour. Ce croisement a permis de valider la calibration du modèle statistiques (Figure 17).

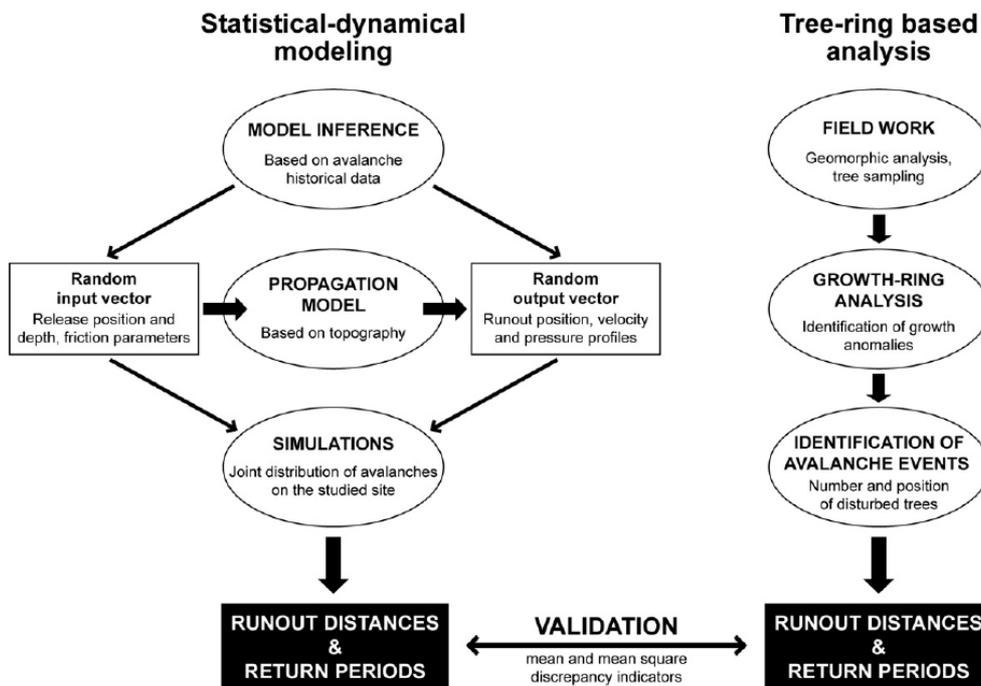


Figure 17. Schéma des principales étapes menant à la validation croisée de la distance d'écoulement et de la période de retour en comparant la modélisation statistique et l'analyse dendrogéomorphologique, d'après Schläppy *et al.* (2014).

II. Amélioration des modèles :

Il est possible d'utiliser l'approche dendrogéomorphologique comme source pour améliorer la modélisation à travers les données "de sortie" : hauteur de l'avalanche, emprise spatiale, zone d'arrêt, etc... Une étude réalisée actuellement dans le massif des Vosges, sur plus de 700 arbres cartographiés a, par exemple, permis d'estimer l'emprise spatiale et la hauteur d'une avalanche survenue en 2010.

Les résultats des reconstitutions dendrogéomorphologiques peuvent être utilisés également comme données "d'entrée", pour la simulation notamment dans le module d'avalanche du RAMMS (RAPid Mass Movement System). Ce croisement permet d'estimer plus précisément, les volumes de neige de départ nécessaire, le comportement et l'enveloppe spatiale des évènements passés (Figure 18).

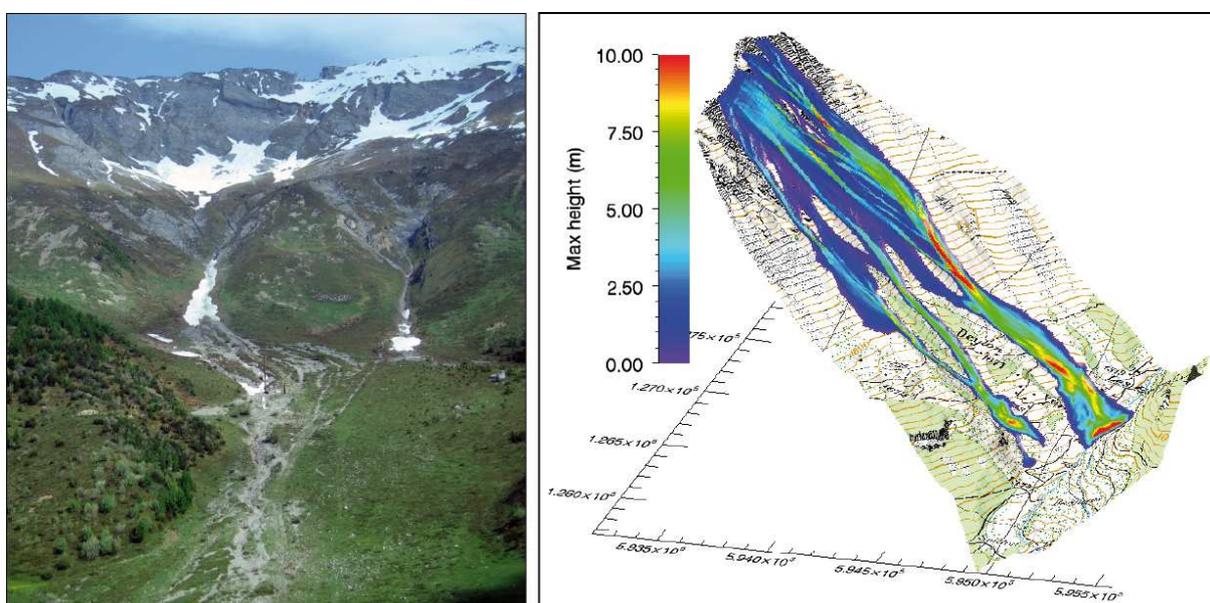


Figure 18. Exemple d'application du logiciel de modélisation RAMMS dans Vallée de la Sionne, VS, Suisse (source : WSL).

5.3.3 Limites et perspectives de l'approche dendrogéomorphologique

Les perturbations observées dans les cernes de croissance sont le plus souvent dues à des avalanches de moyenne intensité. Les avalanches de forte intensité ne peuvent souvent pas être caractérisées par cette approche car les arbres ont été emportés par l'écoulement. De même que les avalanches de faible intensité, peuvent ne pas causer de traumatisme anatomique de l'arbre. D'autres limites pourraient être citées, comme le fait que la dendrogéomorphologie ne permet pas la détection d'évènements ayant une période de retour infra-annuelle ou encore que cette approche se base sur l'utilisation de seuils fixés arbitrairement. La dendrogéomorphologie apparaît alors comme une des solutions utiles mais présente nécessairement des limites.

Concernant les perspectives, il serait intéressant de mener une réflexion sur la relation entre la typologie des avalanches, leur intensité et, les blessures observées à partir de l'approche dendrogéomorphologique. Les travaux que nous avons réalisés sur le couloir de Souliers ont, par exemple, permis de déterminer trois types d'intensité d'avalanches en fonction des différents événements. On peut ainsi facilement déterminer des trajectoires préférentielles en fonction de l'intensité de l'avalanche. De même qu'il est possible de déterminer la typologie de l'avalanche en fonction de la perturbation observée sur l'arbre. Par exemple, les avalanches en aérosol ont tendance à briser l'apex des arbres et ainsi entraîner des réductions de croissance. Les avalanches coulantes, quant à elles, viennent impacter la tige de l'arbre et entraînent la formation de canaux résinifères traumatiques. Ces nouvelles données pourraient être intégrées dans des modèles.

Pour conclure, on peut se questionner sur l'impact des débris transportés par l'avalanche (trunks d'arbres, etc...) sur la dynamique d'écoulement et sur sa modélisation. Ces matériaux ont forcément un impact sur les lois de conservation sur lesquelles reposent les modèles actuels puisqu'ils modifient la pression à l'intérieur de l'avalanche. Or, cette variable de pression est une "sortie" très peu utilisée dans les modèles de propagation et son calcul à partir des autres variables dynamiques est difficile à prendre en compte (Eckert, 2007b). L'approche dendrogéomorphologique, associée à une analyse spatiale (détermination du volume de bois avant et après l'avalanche à partir des données LiDAR), pourrait permettre, par exemple, de déterminer le volume de bois transporté par l'avalanche et d'en estimer son impact sur la pression subie par les structures comme les ouvrages de protection.

5.4 Le projet "Dendroaval"

Suite aux premiers résultats obtenus, les encadrants de stage m'ont proposé de soumettre à la Direction de la Stratégie, de la Recherche et de l'Evaluation (DSRE) d'Irstea un projet à l'AO Premex 2015. Ce type de projet est mis en place pour permettre au stagiaire de l'Irstea porteur d'un sujet faisant l'objet d'une publication scientifique, de prolonger leur stage de deux mois supplémentaires par un contrat à durée déterminée (CDD). En plus de la participation de Nicolas Eckert (ETNA) comme porteur du projet "DENDROAVAL", des membres de l'UMR EMGR (TR SEDYVIN) participent également au projet. Il s'agit de Frédéric Berger, Ingénieur forestier, chef de l'équipe PIER et Jérôme Lopez-Saez, chercheur contractuel, spécialiste en dendrogéomorphologie.

En dehors des chercheurs IRSTEA mentionnés précédemment, ce travail fait l'objet de collaborations nationales et internationales. A l'échelle nationale, participe à la rédaction de l'article, Christophe Corona, chargé de recherche première classe au CNRS, basé à l'UMR 6042 GEOLAB Clermont-Ferrand, spécialiste en dendrogéomorphologie notamment dans la reconstruction pluriséculaire de la dynamique des avalanches et de l'impact des fluctuations climatiques sur la dynamique des aléas naturels. Participe également comme co-auteur de l'article, Jean-Louis

Edouard, chargé de recherche première classe au CNRS, dendro-archéologue, basé au Centre Camille Jullian, laboratoire d'archéologie méditerranéenne et africaine de l'Université d'Aix-Marseille. Enfin, Georges Rovéra, maître de conférences à l'Université de Grenoble, membre du laboratoire PACTE au CNRS, est le tuteur pédagogique du stage portant sur l'étude dendrogéomorphologique.

A l'échelle internationale, le Prof. Markus Stoffel, directeur du laboratoire DENDROLAB, basé à l'Université de Berne (Suisse), est le spécialiste européen dans le domaine de la dendrogéomorphologie.

Après soumission, la DSRE a examiné et retenu en liste principale le projet DENDROAVAL intitulé "*700 ans de reconstruction de la dynamique des avalanches à partir d'une approche dendrogéomorphologique, massif du Queyras, France*". Cette prolongation qui débutera le 1 septembre 2015 permettra notamment de finaliser et soumettre l'article présent dans ce mémoire mais également d'effectuer une campagne d'échantillonnage sur un nouveau dépôt avalancheux du massif du Queyras.

6. Conclusion

En conclusion, le mémoire-article a permis de mettre en évidence le grand intérêt de la dendrogéomorphologie pour la reconstruction et la connaissance des avalanches. Les travaux menés sur le hameau de Souliers, dans le massif du Queyras, ont permis de reconstruire 23 évènements avalancheux à partir de l'information contenue dans 201 mélèzes (*Larix decidua* Mill.). L'étude propose une reconstruction très ancienne (1381-2011), ce qui constitue une véritable opportunité pour étudier les effets des changements environnementaux sur l'activité spatio-temporelle des avalanches. Elle intègre notamment la péjoration climatique du Petit Age Glaciaire ainsi que les principaux minima solaires des 700 dernières années.

Afin de savoir s'il existe un effet de régionalisation de l'activité des avalanches, l'article a proposé une comparaison avec un autre couloir du massif du Queyras (Hameau de l'Echalp). Des périodes communes ont pu être observées (1660-1690, 1802-1820, et 1846-1887). Elles correspondent à des périodes avec des températures hivernales inférieures à la moyenne et à un pourcentage élevé de précipitations neigeuses.

Ce mémoire ouvre de multiples perspectives de recherche. Parmi elles, l'apport de la dendrogéomorphologie comme méthode à haute-résolution spatio-temporelle pour étudier la relation entre les fluctuations climatiques et les activités avalancheuses. Autre perspective, la validation et l'amélioration des modèles numériques de propagation de l'aléa, permettant ainsi une meilleure compréhension de la dynamique des avalanches. Enfin, les reconstructions, à échelle régionale, sont nécessaires si l'on souhaite éliminer le bruit lié à des spécificités stationnelles. C'est pourquoi le mémoire propose également une cartographie des autres couloirs avalancheux du Queyras ayant un potentiel dendrogéomorphologique.

Ce mémoire-article montre que la dendrogéomorphologie, bien que présentant certaines limites, constitue une véritable opportunité pour la compréhension des aléas et l'appui aux politiques de prévention des risques.

7. Bibliographie

- Alestalo J. (1971) Dendrochronological interpretation of geomorphic processes. *Fennia* 105: 1-139.
- Ancey C. (1998) Guide neige et avalanches - Connaissances, pratiques, sécurité. France, Edisud.
- Ancey C., Gervasoni C., Meunier M. (2004) Computing extreme avalanches. *Cold Region Sci Technol* 39: 161-184.
- Ancey C. (2006) Dynamique des avalanches. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 334p.
- 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. Editions IDF-CNRS, Paris, 204-216.
- Astrade L., Stoffel M., Corona C., Lopez-Saez J. (2012) L'utilisation des cernes de croissance des arbres pour l'étude des événements et des changements morphologiques : intérêts, méthodes et apports des recherches alpines à la dendrogéomorphologie. *Géomorphologie Relief Process. Environ*: 295–316.
- Auer I., Böhm R., Jurkovic A., Lipa W., Orlik A., Potzmann R., Schöner W., Ungersböck M., Matulla C., Briffa K., Jones P., Efthymiadis D., Brunetti M., Nanni T., Maugeri M., Mercalli L., Mestre O., Moisselin JM., Berget M. (2007) HISTALP - historical instrumental climatological surface time series of the Greater Alpine Region. *Int J Climatol* 27: 17–46.
- Blikra LH., Selvik SF. (1998) Climatic signals recorded in snow-avalanche dominated colluvium in western Norway: Depositional facies successions and pollen records. *The Holocene* 8: 631–658.
- Bouchet A. (2003) Etude expérimentale des avalanches denses de neige sèche. Thèse de doctorat. Université Joseph Fourier, Grenoble, France. 132 p.
- Boudières V. (2013) Les risques et catastrophes : notion et concept. Intervention dans le cadre du cours: Risques, Environnement et Société de Licence 2; Institut de Géographie Alpine de Grenoble, UJF, Grenoble I.
- Bovis MJ., Mears AI. (1976) Statistical prediction of snow avalanche runout from terrain variables in Colorado. *Arct. Alp. Res.* 8: 115–120.
- Büntgen ULF., David C. Franck, Nievergelt D., Esper J. (2006) Summer Temperature Variations in the European Alps, A.D. 755-2004, Birmensdorf, Switzerland. *Journal of Climate* 19: 5606-5623.

- Butler DR., Malanson GP. (1985) A history of high-magnitude snow avalanches, Southern glacier national park, Montana, U.S.A. *Mountain Research and Development* 5: 175-182.
- Carrara PE. (1979) The determination of snow avalanche frequency through tree-ring analysis and historical records at Ophir, Colorado. *Geological Society of America Bulletin* 90: 773-780.
- Cartier M. et Mettoux AP. (2005) La montagne une et indivisible ? Maitriser les avalanches malgré la segmentation territoriale des massifs et des hommes. *Revue de géographie alpine* Tome 93 N°3: 31-42
- Casteller A., Stöckli V., Villalba R., Mayer AC. (2007) An evaluation of dendroecological indicators of snow avalanches in the Swiss Alps. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 39: 218–228.
- Casteller A., Christen M., Villalba R., Martinez H., Stöckli V., Leiva JC., Bartelt P. (2008) Validating numerical simulations of snow avalanches using dendrochronology: the Cerro Ventana event in Northern Patagonia, Argentina. *Nat Haz Earth Syst Sci* 8: 433-443.
- Casteller A., Villalba R., Araneo D. (2011). Reconstructing temporal patterns of snow avalanches at Lago del Desierto, Southern Patagonian Andes. *Cold Reg Sci Technol* 67, 68–78.
- Chiroiu P., Stoffel M., Onaca A., Urdea P. (2014) Testing dendrogeomorphic approaches and thresholds to reconstruct snow avalanche activity in the Fagaras Mountains (Romanian Carpathians). *Quaternary Geochronology* 27: 1-10.
- Corona C., Rovéra G., Lopez Saez J., Stoffel M., Perfettini P. (2010) Spatio-temporal reconstruction of snow avalanche activity using tree rings: Pierres Jean Jeanne avalanche talus, Massif de l'Oisans, France. *Catena* 83: 107-118.
- Corona C., Lopez Saez J., Stoffel M., Bonnefoy M., Richard D., Astrade L., Berger F. (2012) How much of the real avalanche activity can be captured with tree rings? An evaluation of classic dendrogeomorphic approaches and comparison with historical archives. *Cold Science Region and Technology* 74-75: 31-42.
- Corona C., Lopez-Saez L., Stoffel M., Rovéra G., Edouard JL., Berger F. (2013) Seven centuries of avalanche activity at Echalp (Queyras massif, southern French Alps) as inferred from tree rings. *The Holocene* 23 (2) : 292-304.
- Davis I., Haghebeart B. and Peppiatt D. (2004): Social vulnerability and capacity analysis. Discussion paper and workshop report. Geneva: ProVention Consortium.
- Dent JD. and Lang TE. (1980) Modelling of snow flow. *Journal of Glaciology*, 26-94: 131-140.

- D'Ercole R. (1998) Approches de la vulnérabilité et perspectives pour une meilleure logique de réduction des risques. *Pangea* n°29-30: pp.20-28.
- Dubé S., Filion L., Hétu B. (2004) Tree-ring reconstruction of high-magnitude snow avalanches in the Northern Gaspé Peninsula, Québec, Canada. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 36: 555-564.
- Eckert N., Parent E., Richard D. (2006) Une méthode statistique-topographique de prédétermination des distances d'arrêt des avalanches. *Hydrologie, glaciologie et nivologie. La Houille Blanche* 2: 120-127.
- Eckert N., Parent E., Richard D. (2007a) Revisiting statistical-topographical methods for avalanche predetermination: Bayesian modelling for runout distance predictive distribution. *Cold Region Sciences and Technologies* 49: 88-107.
- Eckert N. (2007b) Couplage données historiques - modélisation numérique pour la prédétermination des avalanches : une approche bayésienne. *Mathematics. AgroParisTech*, 283 p.
- Frazer GW. (1985) Dendrogeomorphic Evaluation of Snow Avalanche History at Two Sites in Banff National Park, Unpublished M.Sc. thesis, Department of Geography, University of Western Ontario, London, ON, Canada.
- Glaser R., Riemann D., Schönbein J. (2010) The variability of European floods since AD 1500. *Climate Change* 101: 235-256.
- Gobiet A., Kotlarski S., Beniston M., Heinrich G., Rajczak J., Stoffel M. (2014) 21st century climate change in the European Alps - A review. *Sci Total Environ.* doi:10.1016/j.scitotenv.2013.07.050
- Haeberli W., Hoelzle M., Paul F., Zemp M. (2007) Integrated Monitoring of Mountain Glaciers as Key Indicators of Global Climate Change. *The European Alps. Ann Glaciol* 46: 150-160.
- Hutter K., Koch T., Plüss C. and Savage S. (1995) The dynamics of avalanches of granular materials from initiation to runout, part 1I : Laboratory Experiments. *Acta Mechanica* 109: 127-165.
- Ibsen ML. and Brunnsden D. (1995) The nature, use and problems of historical archives for the temporal occurrence of landslides, with specific reference to the south coast of Britan, Ventnor, Isle of Wight. *Geomorphology* 15(3/4): 241-258.
- Jakob M. (2005) Debris-flow analysis. In *Debris-Flow Hazards and Related Phenomena*. Berlin, Heidelberg. Springer: 411-443.
- Jamard AL., Bélanger L. (2002) Etude de la similarité de fonctionnement des sites avalancheux. DESS Ingénierie Mathématique option Statistique. Université Joseph Fourier. Grenoble. France. 29 p.

- Le Gallou JY. et Guignard P. (2011) Modalité de prise en compte des avalanches exceptionnelles pour améliorer la prévention des risques et renforcer la sécurité des personnes. Rapport no.007395-01, Conseil Général de l'Environnement et du Développement durable, 86 pp.
- Leone S. (2006) Les Populations de haute montagne face aux contraintes naturelles. Les vallées de Chamonix et Vallorcine (1730-1914). Ph.D. thesis. Université Pierre Mendès France. Grenoble, France.
- Lopez Saez J., Corona C., Berger F., Stoffel M. (2010) L'utilisation de la resistographie en dendrogeomorphologie - Retour d'expérience. *Collection Edytem* 11: 189-196.
- Lopez-Saez J. (2011) Reconstruction de l'activité des glissements de terrain au moyen d'une approche dendrogeomorphologique (Moyenne vallée de l'Ubaye, Alpes de Haute Provence, France). Thèse de doctorat, Université Grenoble, 374p. Thèse en libre accès : <http://cemadoc.cemagref.fr/cemoa/PUB00035172>
- Lopez-Saez J. et Corona C. (2015) La dendrogeomorphologie: principes, Méthodes et Applications. Irstea Editions, 45 p.
- Margreth S. (2004) Die Wirkung des Waldes bei Lawinen. - Schutzwald und Naturgefahren. Forum für Wissen 2004, pp. 21-26.
- Mathieu JP. (1991) Dictionnaire de physique, Paris, Masson, 567 p.
- Mc Cammon I. (2010) Les facteurs humains dans les accidents d'avalanche : évolution et intervention. *Neige Avalanches* 129: 9-13.
- McCarroll D. (1993) Modelling late-Holocene snow-avalanche activity: incorporating a new approach to lichenometry. *Earth Surface Processes and Landforms* 18: 527-539.
- McClung D., Schaerer P. (1993) The Avalanche Handbook. The Mountaineers, Seattle, 271 pp.
- Muntan E., Garcia C., Oller P., Martí A., Garcia A., Gutiérrez E. (2009) Reconstructing snow avalanches in the Southeastern Pyrenees. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 9: 1599-1612.
- Munter W. (1997) 3x3 Lawinen - Entscheiden in kritischen Situationen. Pohl and Schellhammer, Garmisch Partenkirchen, Germany, 220 pp
- Nesje A., Dahl SO., Linge H., Ballantyne C., McCarroll D., Brook EJ., Raisbeck GM. and Yiou F. (2007) The surface geometry of the Last Glacial Maximum ice sheet in Andoya/Skanland region, northern Norway, constrained by surface exposure dating and clay mineralogy. *Boreas* 36: 227-239.

- Pfister C. (1993) Historical weather Indices from Switzerland. IGBP PAGES/World Data Center- A for Paleoclimatology Data Contribution Series # 93-027. NOAA/NGDC Paleoclimatology Program, Boulder CO, USA.
- Pigeon P., D'Ercole R. (1999) L'expertise internationale des risques dits naturels : intérêt géographique. *Annales de Géographie*, Vol. 108 (608): pp 339-357.
- Potter N. (1969) Tree-ring dating of snow avalanche tracks and the geomorphic activity of avalanches, northern Absaroka Mountains, Wyoming, Boulder, CO. *Geological Society of America, Special Paper 123*: 141-165.
- Rayback SA. (1998) A dendrogeomorphological analysis of snow avalanches in the Colorado Front Range, USA. *Physical geography* 19: 502-515.
- Reardon BA., Pederson GT., Caruso CJ., Fagre DB. (2008) Spatial reconstructions and comparisons of historic snow avalanche frequency and extent using tree rings in Glacier National Park, Montana, U.S.A. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 40: 148-160.
- Schaerer PA. (1972) Terrain and vegetation of snow avalanche sites at Rogers Pass, British Columbia in Mountain Geomorphology. In: Slaymaker O, McPherson HJ (Eds.), Tantalus Research Ltd., Vancouver, BC, pp. 215-222.
- 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 Regions Science and Technology* 99: 12-26.
- Schweizer J., Jamieson JB., Schneebeli M. (2003) Snow avalanche formation. *Rev Geophys* 41, doi:10.1029/2002RG000123
- Shroder JF. (1978) Dendrogeomorphological analysis of mass movement on Table Cliffs Plateau, Utah. *Quaternary Research* 9: 168-185.
- Shroder JF. (1980) Dendrogeomorphology: review and new techniques of tree-ring dating. *Progress in Physical Geography* 4: 161-188.
- Stoffel M., Bollschweiler M., Hassler GR. (2006) Differentiating past events on a cone influenced by debris-flow and snow avalanche activity, a dendrogeomorphological approach. *Earth Surface Processes and Landforms* 31: 1424-1437.
- Stoffel M., Bollschweiler M. (2008) Tree-ring analysis in natural hazards research - an overview. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 8: 187-202.
- Stoffel M., Bollschweiler M., Butler DR., Luckman BH. (2010) Tree rings and natural hazards: a state-of-the-art. Springer, Heidelberg, Berlin, New York, 505 p.

- Strunk H. (1997) Dating of geomorphological processes using dendrogeomorphological methods. *Catena* 31: 137-151.
- Thouret JC. (2002): Aléas et risques volcaniques : comprendre pour prévoir et mieux gérer pour durer - *Annales de Géographie*, NO. 627-628: 503-523.
- Tumajer J., Treml V. (2015) Reconstruction ability of dendrochronology in dating avalanche events in the Giant Mountains, Czech Republic. *Dendrochronologia* 34: 1-9
- Vallet J. (2002) Saisie de la couverture neigeuse de sites avalancheux par des systèmes aéroportés, Thèse pour l'obtention du grade de docteur Es Sciences Techniques, Faculté ENAC, Science & ingénierie de l'environnement, Lausanne, 168 p.

Tables des Figures

Parties 1 à 3 et 5

Figure 1. Zonage du couloir avalancheux de Maloqueste, Massif du Queyras (Hautes-Alpes, France, source : Jérôme Lopez-Saez, 2011).....	11
Figure 2. Différentes phases d'écoulement d'une avalanche sous la forme d'un départ en plaque (a) et d'un départ ponctuel (b) (source WSL).....	12
Figure 3. Exemple d'une avalanche en aérosol (a) et d'une avalanche coulante (b) (source : www.avalanches1eres6.com).....	13
Figure 4. Destruction des locaux de l'Union Nationale des Centres sportifs de Plein Air par l'avalanche de Val d'Isère en 1970 (a) (source : http://lvb.avalanche.free.fr/) et Chalets détruits après l'avalanche de Montroc en 1999 (source : Dauphiné Libéré).....	14
Figure 5. Répartition spatiale de la fréquence d'occurrence d'avalanche à partir d'une période d'observation de 14 ans sur la commune de Zuoz (Suisse) (source : Swiss Federal Office of Topography).....	16
Figure 6. Reconstitution de l'extension spatiale des avalanches du couloir des Pèlerins (1924, 1931 et 1983) à partir d'une approche dendrogéomorphologique et comparaison avec les distances d'arrêt obtenues à partir des archives historiques (d'après Corona <i>et al.</i> , 2012).....	17
Figure 7. Exemple de reconstitution des avalanches à partir d'une approche géo-historique sur le couloir des Pèlerins (Chamonix), selon le type (a), les dates d'occurrence (b, c) et l'altitude des zones d'arrêts (d); d'après Corona <i>et al.</i> (2012).....	18
Figure 8. Concept "Changement/Évènement - Impact - Réponse" de Schoder (1978, 1980) adapté par Astrade et Bégin (2003)	20
Figure 9. Diversité des perturbations de croissance engendrées par des avalanches (Lopez-Saez et Corona, 2015)	21
Figure 10. Période de reconstitution des principales études dendrogéomorphologiques appliquées aux avalanches. Les barres jaunes représentent les minima solaires de Maunder, Dalton et Spörer. RCR : réchauffement climatique récent; PAG : Petit Age Glaciaire. (Mainieri, 2015)	25
Figure 11. Nombre maximal d'arbres échantillonnés sur un dépôt avalancheux pour les principales études de dendrogéomorphologie appliquée aux avalanches (Mainieri, 2015).....	26
Figure 12. Carte des phénomènes avalancheux recueillis par témoignages dans le massif du Queyras. Source : Irstea. Réalisation R. Mainieri, 2015.....	56
Figure 13. Carte des phénomènes avalancheux délimités par photo-interprétation dans le massif du Queyras. Source : Irstea. Réalisation R. Mainieri, 2015.	57
Figure 14. Peuplement de mélèzes dans le massif du Queyras. Données issues de l'IFN. Réalisation R. Mainieri, 2015.....	58

Figure 15. Carte des couloirs avalancheux ayant un potentiel dendrogéomorphologique dans la vallée du Haut Guil. Source : Irstea, IFN. Réalisation R. Mainieri, 2015.	59
Figure 16. Carte des couloirs avalancheux ayant un potentiel dendrogéomorphologique dans la vallée du Bas Guil. Source : Irstea, IFN. Réalisation R. Mainieri, 2015.....	60
Figure 17. Schéma des principales étapes menant à la validation croisée de la distance d'écoulement et de la période de retour en comparant la modélisation statistique et l'analyse dendrogéomorphologique, d'après Schläppy <i>et al.</i> (2014).....	62
Figure 18. Exemple d'application du logiciel de modélisation RAMMS dans Vallée de la Sionne, VS, Suisse (source : WSL).....	63

Table des Tableaux

Parties 1 à 3 et 5

Tableau 1. Synthèse bibliographique des études dendrogéomorphologiques appliquées aux avalanches, d'après Corona <i>et al.</i> (2013) mise à jour par Mainieri (2015).....	23
--	----

Table des matières

RESUME	3
ABSTRACT	4
REMERCIEMENTS	5
SOMMAIRE	6
LISTE DES ABREVIATIONS	7
1. INTRODUCTION	8
2. PROJET DE RECHERCHE	10
3. CONTEXTE SCIENTIFIQUE DE L'ETUDE	10
3.1 L'ALEA "AVALANCHE"	10
3.1.1 <i>Définition</i>	10
3.1.2 <i>Zonage et phases de l'avalanche</i>	11
3.1.3 <i>Facteurs à l'origine des avalanches</i>	13
3.2 RISQUE ET EXPOSITION DES ENJEUX	13
3.3 L'ETUDE DES FREQUENCES ET DES PERIODES DE RETOUR	16
3.4 L'APPORT DES DONNEES PALEO-ENVIRONNEMENTALES.....	17
3.4.1 <i>Les limites des données géo-historiques</i>	17
3.4.2 <i>La dendrogéomorphologie comme approche paléo-environnementale</i>	19
3.4.3 <i>La dendrogéomorphologie appliquée à l'aléa "avalanche"</i>	20
3.5 SPECIFICITE DE L'ETUDE DANS SON CHAMP SCIENTIFIQUE	24
4. EVOLUTION OF AVALANCHE ACTIVITY AND FOREST LAND COVER ON SOULIERS AVALANCHE PATH DURING THE LAST CENTURIES, QUEYRAS MASSIF, SOUTH ALPS	27
ABSTRACT	27
4.1 INTRODUCTION.....	28
4.2 STUDY SITE	29
4.3 MATERIAL AND METHODS.....	30
4.3.1 <i>Dendrogeomorphic analysis</i>	30

4.3.2	<i>Tree rings reconstruction of avalanches events</i>	31
4.3.3	<i>Analysis of forest land evolution</i>	32
4.3.4	<i>Climate influence on avalanche frequency</i>	32
4.4	RESULTS	33
4.4.1	<i>Age structure and evolution of the forest stand</i>	33
4.4.2	<i>Reconstruction of avalanche events</i>	34
4.4.3	<i>Snow avalanches–climate relationships</i>	34
4.5	DISCUSSION	35
4.5.1	<i>Snow avalanche and Climate Comparison with Echalp path</i>	35
4.5.2	<i>Causes and Impacts of land change</i>	36
4.6	CONCLUSION	37
4.7	CAPTIONS	38
	REFERENCES	48
5.	PERSPECTIVES	54
5.1	IMPACT DES FLUCTUATIONS CLIMATIQUES SUR LA FREQUENCE ET/OU L'INTENSITE DES AVALANCHES	54
5.2	COULOIRS AVALANCHEUX DU QUEYRAS A POTENTIEL DENDROGEOMORPHOLOGIQUE	55
5.3	INTEGRATION DES DONNEES DANS LES MODELES	61
5.3.1	<i>La modélisation des avalanches</i>	61
5.3.2	<i>L'apport de la dendrogéomorphologie dans les modèles</i>	62
5.3.3	<i>Limites et perspectives de l'approche dendrogéomorphologique</i>	63
5.4	LE PROJET "DENDROAVAL"	64
6.	CONCLUSION	66
7.	BIBLIOGRAPHIE	67
	TABLES DES FIGURES	73
	TABLE DES TABLEAUX	74
	TABLE DES MATIERES	76