

La dendrogéomorphologie



Principes
Méthodes
Applications

Année 2014

Jérôme Lopez-Saez (Irstea)
Christophe Corona (CNRS)

sous la direction de Frédéric Berger (Irstea)



Soutenir la recherche
pour prévenir les risques.



MINISTÈRE
DE L'ÉCOLOGIE,
DU DÉVELOPPEMENT
DURABLE
ET DE L'ÉNERGIE

Auteurs

Jérôme Lopez-Saez

Docteur en géographie

■ Irstea, Centre de Grenoble,
2 rue de la Papeterie, BP76, 38402 Saint-Martin-d'Hères cedex



Christophe Corona

Docteur en géographie

Chargé de recherche

■ CNRS, UMR 6042 GEOLAB
Université Blaise Pascal, Maison des Sciences de l'Homme
4 rue Ledru, 63057 Clermont-Ferrand cedex



Sous la direction de

Frédéric Berger



*Responsable de l'équipe « Protection, ingénierie écologique, restauration »
de l'Unité Écosystèmes montagnards d'Irstea, Centre de Grenoble*

2 rue de la Papeterie, BP76, 38402 Saint-Martin-d'Hères cedex

Année 2014



Sommaire

Partie 1 ■ Principes et méthodes

1 ■ Formation des cernes de croissance	10
2 ■ Principes de la dendrochronologie	11
2.1. Histoire de la discipline	
2.2 Un principe fondamental : l'interdatation	
2.3 Principes additionnels	
3 ■ La dendrogéomorphologie	14
4 ■ Les indicateurs utilisés en dendrogéomorphologie	16
5 ■ Approche de terrain	22
6 ■ Le choix de l'arbre	24
7 ■ Travail en laboratoire	27

Partie 2 ■ Domaines d'application

1 ■ Reconstitution de la fréquence et de l'intensité des événements	33
2 ■ Analyse de l'étendue spatiale et de l'emprise des aléas	36
3 ■ Facteurs déclenchants et relation avec le climat	41
4 ■ Développement d'un nouvel indicateur : les racines déchaussées	43
Conclusions et perspectives	46

Glossaire (<i>mots marqués d'un astérisque dans le texte</i>)	48
---	----

Bibliographie	48
---------------	----



Avant-propos

« Un peuple qui oublie son passé se condamne à le revivre »

Winston Churchill

De tout temps, l'homme et les sociétés humaines se sont intéressés à la connaissance et la compréhension des événements passés et plus généralement de l'histoire, pour mieux appréhender le futur.

Dans cette recherche de connaissance historique, les arbres sont de précieux alliés. En effet, la biologie et l'architecture de l'arbre font que celui-ci est un véritable enregistreur de marqueurs temporels dans ces anneaux de croissances : les cernes. D'ailleurs, quels sont les musées d'histoire naturelle qui n'ont pas une rondelle de Sequoia ou d'une autre espèce titulaire d'un record de longévité, rondelle sur laquelle les principales dates et faits historiques marquants sont indiqués ? Quelle est la personne qui n'a pas un jour estimé par comptage des cernes, sur une souche, une grume ou une pièce de bois, l'âge d'un arbre qui a été abattu et replacé sur cette séquence chronologique sa propre date de naissance ainsi que celles de ses proches ?

Sans s'en rendre compte, cette personne a été l'espace d'un instant un dendrochronologue. En effet, la science qui a pour objectif général la reconstitution historique à partir des cernes d'arbre s'appelle la dendrochronologie. Quand celle-ci est appliquée au contexte de la reconstruction de l'activité passée des risques naturels, elle prend alors le nom de dendrogéomorphologie.

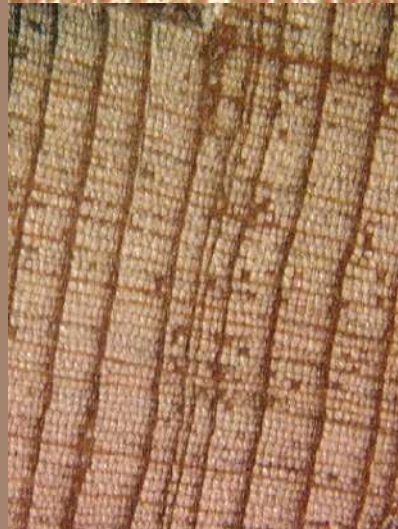
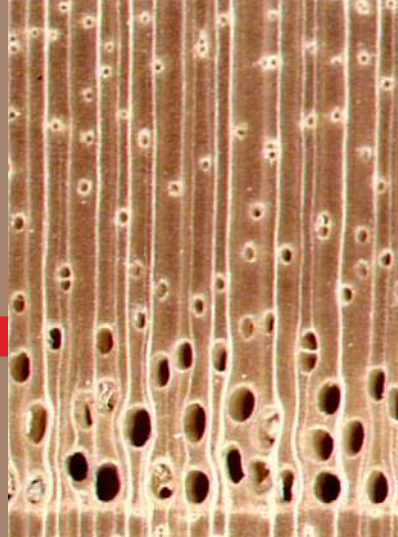
La vocation de ce guide est de fournir aux gestionnaires, scientifiques et étudiants, travaillant dans le domaine de la connaissance et de la prévention des risques naturels, des méthodes et des outils, illustrés par des exemples concrets, pour réaliser une étude dendrogéomorphologique.

Ce guide présente la synthèse des études et des travaux de recherches qui ont été financés dans la période 2008 à 2012 par le Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie (Direction Générale de la Prévention des Risques), la fondation MAIF et le projet européen interrégional espace alpin Paramount.

Frédéric Berger

Partie 1

Principes et méthodes





1 ▪ Formation des cernes de croissance

2 ▪ Principes de la dendrochronologie

2.1. Histoire de la discipline

2.2 Un principe fondamental : l'interdatation

2.3 Principes additionnels

3 ▪ La dendrogéomorphologie

4 ▪ Les indicateurs utilisés en dendrogéomorphologie

5 ▪ Approche de terrain

6 ▪ Le choix de l'arbre

7 ▪ Travail en laboratoire



1 ■ Formation des cernes de croissance

Chez les plantes vasculaires ligneuses, le bois est un tissu végétal qui exerce plusieurs fonctions dont celles liées au support mécanique, à la conduction de la sève brute et à la constitution de réserves. Il forme le tronc, les racines et les branches de ces plantes dont la tige est pérenne. Son diamètre s'accroît d'années en années. Cette croissance, dite secondaire, est liée à la division d'un méristème*, une couche de cellules périphériques appelée cambium*. L'activité cambiale est ainsi à l'origine de la formation du bois d'un arbre ou d'un arbuste.

Sous un climat tempéré, caractérisé par une saisonnalité, les arbres produisent un cerne annuel durant la période d'activité végétative (d'avril à septembre, dans l'hémisphère Nord). La distinction des cernes annuels est possible grâce aux variations de la taille (superficie) des cellules et de l'épaisseur des parois cellulaires au cours de la saison de croissance.

Les deux principaux groupes de plantes ligneuses, les gymnospermes* et les angiospermes dicotylédones*, forment du bois aux caractéristiques anatomiques distinctes.

Chez les conifères (gymnospermes), le cerne est constitué (Fig.1A) :

- d'un bois initial clair, de faible densité, à trachéides* larges et parois minces, qui se forme au printemps ;
- d'un bois final plus sombre, de densité supérieure, à trachéides de petite taille, à parois épaisses, qui se forme en été et au début de l'automne.

Ces trachéides assurent le transport et le stockage des nutriments, de l'eau et la stabilité mécanique de l'arbre.

Chez les feuillus (angiospermes), on distingue trois types de cellules :

- les vaisseaux et les trachéides sont les organes de la conduction (transport de l'eau et de la sève) ;
- les parenchymes garantissent le soutien et le stockage des nutriments ;
- les fibres assurent la stabilité mécanique.

L'anatomie des cernes est plus complexe que celle des conifères puisque différentes configurations peuvent être observées, notamment en ce qui concerne le diamètre et la répartition des vaisseaux (Fig.1B,C). Par exemple, chez les espèces à zone poreuse (*Quercus*, *Fraxinus*, Fig.1B), le bois initial est identifiable grâce à une ou plusieurs rangées tangentielles de vaisseaux de diamètre important. Les cernes de croissance des espèces à pores diffus (*Acer*, Fig.1C, *Populus*), sont constitués de vaisseaux de diamètres peu variables ; le bois final est confiné dans une zone terminale très étroite ce qui rend la délimitation des cernes complexes.

La largeur des cernes annuels varie en fonction des espèces, des individus, de l'âge, de la position (hauteur), du statut (dominance), des caractéristiques du houppier (hauteur, nombre de branches), ainsi que des conditions écologiques (sol, drainage, régime nutritif, lumière, actions anthropiques, processus géomorphologiques...) et climatiques.



Fig. 1A : Microsection d'un cerne de croissance de conifère.
A, *Pinus incinata*

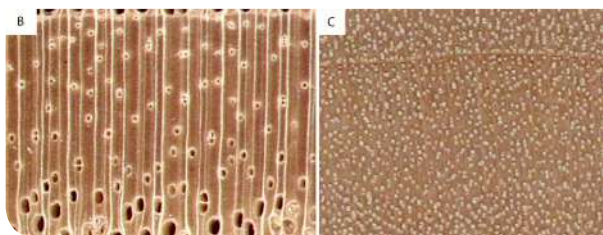


Fig. 1B, C : Microsections des cernes de croissance de feuillus.
B, *Fraxinus excelsior*. C, *Acer opalus*

2 ■ Principes de la dendrochronologie

2.1 Histoire de la discipline

La dendrochronologie (du grec : dendron = arbre ; kronos = temps ; logos = étude) est la science qui traite de l'étude et de la datation des cernes de croissance des arbres. La première référence écrite sur l'appréhension du rôle de l'arbre dans l'enregistrement des fluctuations climatiques est attribuée à Léonard de Vinci au XVe siècle. Cependant, la méthode ne s'est réellement formalisée qu'au début du XXe siècle sous l'impulsion de l'astronome et physicien américain A.E. Douglass. Celui-ci a en effet noté l'occurrence de cernes étroits sur des arbres étudiés dans de nombreux sites de l'ouest des États-Unis. Le caractère synchrone de ces cernes remarquables, qu'il attribue à la sécheresse, lui permet de jeter les bases de l'interdatation comme outil potentiel de datation. Après avoir développé de longues chronologies, il sera l'auteur, dès 1914, des premières datations dendrochronologiques, effectuées sur des sites archéologiques amérindiens, publiées dans la revue « National Geographic ».

D'abord principalement utilisée en archéologie, la dendrochronologie s'est diversifiée en plusieurs branches en réponse à l'apparition de problématiques nouvelles et a intégré les sciences de l'environnement. Par exemple, on parle de dendroclimatologie lorsque les signaux dendrochronologiques sont utilisés pour reconstruire les paléoclimats, de dendroécologie pour l'étude de la réponse de l'arbre à son environnement, et de dendrogéomorphologie lorsque l'arbre peut utiliser comme un bioindicateur des processus géomorphologiques passés.

L'épaisseur des cernes varie en réponse à différents facteurs endogènes (des facteurs biotiques tels que l'âge, la longévité, la sensibilité, la génétique) et exogènes (le climat, le sol, l'exposition, la dynamique du peuplement et les actions anthropiques). On considère ainsi une série de cernes comme une agrégation linéaire de plusieurs signaux, pouvant être exprimée de la façon suivante :

$$R_t = C_t + A_t + \alpha D1_t + \alpha D2_t + \varepsilon_t$$

avec

R_t série de largeurs de cernes observée,

C_t signal climatique (signal de hautes fréquences lié aux variations interannuelles du climat),

A_t tendance d'âge (variations de basses fréquences liées à l'âge de l'arbre),

$D1_t$ impulsion liée à une perturbation endogène locale (sylviculture, sénescence des arbres dominants...),

$D2_t$ impulsion liée à une perturbation exogène au peuplement (feux, tempêtes, agents pathogènes, pullulations d'insectes, processus géomorphologiques...),

ε_t part non expliquée des variations interannuelles, liée à chaque individu.

En l'absence de perturbation, la variabilité interannuelle de l'épaisseur des cernes, retranscrite de façon quasi-similaire par les individus d'une même espèce qui vivent sous des conditions climatiques semblables, est principalement due à la variabilité climatique (température, précipitation, enneigement...). Ainsi, en comparant les variations d'épaisseur de cernes de différentes séries, il est possible de synchroniser (d'interdater) des séquences provenant d'arbres ayant eu des périodes de vie communes. L'interdatation se base sur l'identification de cernes et de séquences de cernes caractéristiques correspondant le plus souvent à des événements climatiques limitants (sécheresse, froids extrêmes) ou stimulants (précipitations abondantes). Certains cernes présentant une anatomie particulière (cernes de gel par exemple), qui se retrouvent chez plusieurs arbres, constituent également des repères chronologiques fiables.

2.2 Un principe fondamental : l'interdatation

L'interdatation est le principe de base de la dendrochronologie. Il permet de vérifier l'agencement synchrone des séries individuelles de croissance et ainsi d'attribuer à chaque cerne à l'année exacte de sa formation (Fig. 2).

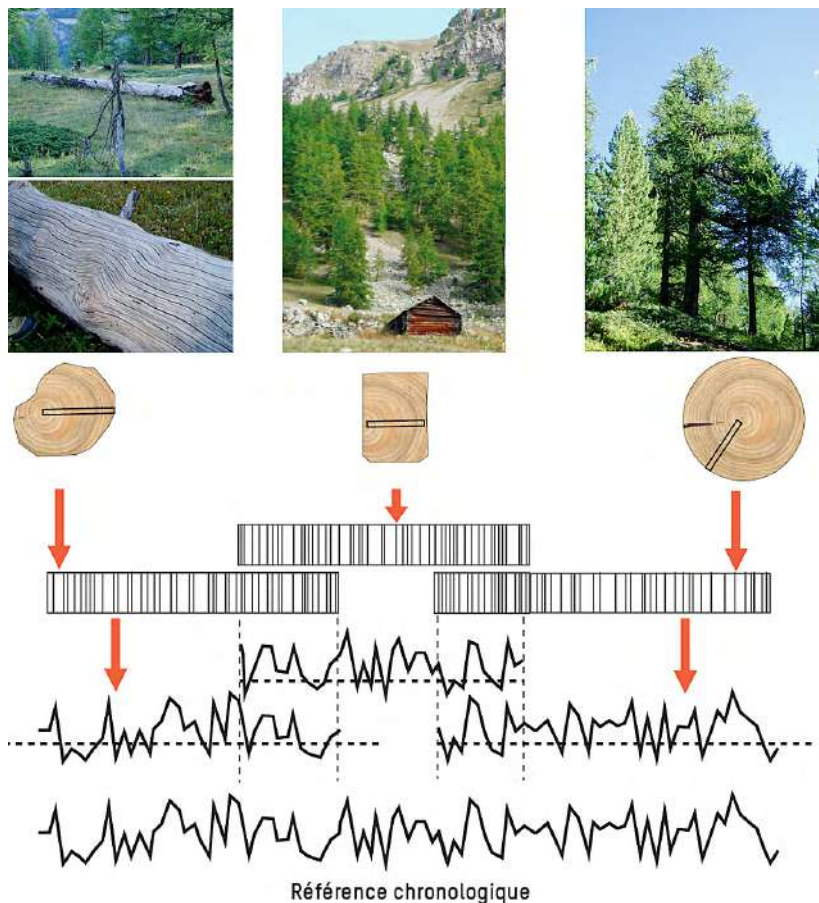


Fig. 2 : Principe d'interdatation

Le principe permet également la construction de chronologies de référence d'une longueur supérieure à la durée de vie des arbres par synchronisation de bois d'époques différentes. Celles-ci sont construites à partir d'arbres vivants datés, puis complétées avec des bois d'époques antérieures (pièces archéologiques, bois fossiles...), en partie contemporains. L'interdatation permet, par comparaison des patrons de croissance, d'attribuer une date calendaire à chacun des cernes qui compose la série non datée. En se basant sur ce principe, les dendrochronologues ont pu développer, depuis plusieurs décennies, des chronologies de cernes plurimillénaires dans différentes régions du monde caractérisées par un climat à alternances saisonnières et par l'existence de peuplements forestiers longévifs.

2.3 Principes additionnels

Suite aux travaux de Douglass, la dendrochronologie s'est rapidement orientée vers la reconstruction du climat : l'objectif est alors d'établir des relations entre la croissance radiale des arbres et les facteurs climatiques sur la période pour laquelle des séries météorologiques sont disponibles. Cette relation est ensuite utilisée pour reconstruire le climat passé à partir de longues chronologies de largeur de cernes. Trois principes additionnels ont été énoncés afin de valider ces reconstitutions. Ils régissent l'ensemble des études dendroécologiques, dendrogéomorphologiques et dendroclimatologiques.

» Le principe d'uniformité

Selon ce principe, les processus physiques et biologiques qui gouvernent la croissance sont invariants. Autrement dit, les processus qui gouvernent la croissance des arbres dans le passé et le présent sont identiques. Par conséquent, les relations cerne-climat établies dans le contexte climatique actuel peuvent être transposées à des périodes passées.

» Le principe du facteur limitant

La loi du minimum ou principe du facteur limitant stipule que la croissance d'une espèce ne peut dépasser le niveau permis par le facteur le plus limitant :

- en milieu boréal et en montagne au niveau de la limite supraforestière, la largeur des cernes est ainsi généralement thermo-dépendante : ce sont les températures qui limitent la croissance radiale ;
- en milieu méditerranéen, elle est souvent pluvio-dépendante, bien qu'un effet stressant des températures soit fréquemment observé, les facteurs hydriques et thermiques n'étant pas indépendants ;
- en contexte tempéré, la largeur de cerne dépend simultanément des températures et des précipitations.

» Le principe de l'optimum écologique

La loi de tolérance et le principe de l'optimum écologique définissent qu'une espèce qui pousse en limite de son aire de répartition (au niveau d'un écotone, par exemple) sera plus sensible aux facteurs du milieu.



3 ■ La dendrogéomorphologie

La dendrogéomorphologie est basée sur le concept de « Événement-changement / Impact / Réponse » [Fig.3]. L'« Événement-changement » regroupe les processus géomorphologiques et les changements naturels et/ou anthropiques du milieu suffisamment rapides et irréversibles à l'échelle de quelques années (érosion, sédimentation, mise à l'eau, intervention humaine...). 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 du milieu (sédimentation à la base du tronc, asphyxie ou exposition des racines, ouverture du milieu...). Le stress (mais aussi parfois l'amélioration des conditions de croissance) entraîne, à partir d'un certain seuil, une « Réponse » de l'arbre.

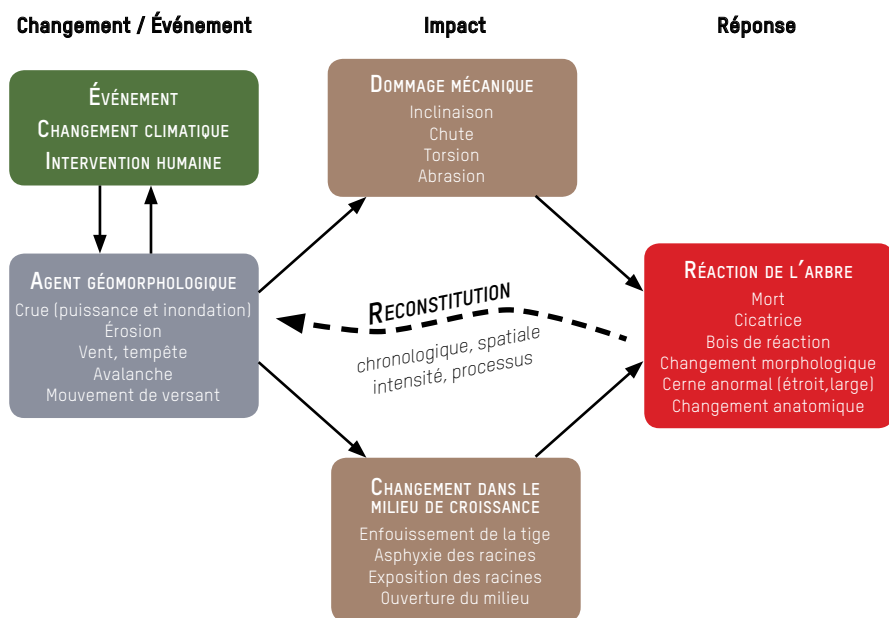


Fig. 3 : L'approche dendrogéomorphologique

Lorsque le stress est trop violent, il peut occasionner la mort de l'arbre. En cas de survie, les réponses peuvent concerner la croissance radiale de l'arbre (cerne ou série de cernes anormalement étroits ou larges), sa morphologie (cicatrice, reprise de croissance apicale, changement d'axe, courbure racine adventive) ou son anatomie (formation de bois de réaction, de rangées tangentielles de canaux résinifères traumatiques, modifications de la structure cellulaire). L'analyse et la datation de ces réponses dans les séries de cernes présentent un grand intérêt pour la reconstitution de différents processus, qu'il s'agisse de la morphogenèse postglaciaire des fonds de vallées, des variations de niveaux de lacs, d'éruptions volcaniques, de glissements de terrain, d'avalanches, de chutes de pierres, de laves torrentielles et de géomorphologie fluviale.

L'identification de ces dommages et leur datation à partir des cernes permettent de reconstituer :

- la chronologie des événements ou des changements avec une précision annuelle (grâce aux cernes) à mensuelle (via l'étude de la position de marqueurs anatomiques à l'intérieur du cerne) ;
- l'intensité (le processus doit dépasser un certain seuil pour entraîner un stress et une réponse) ;
- l'emprise délimitée en fonction de la répartition des arbres qui présentent une réponse ;
- le type de processus déterminé grâce à la position de marqueurs anatomiques dans le cerne. En se basant sur la position de lignes tangentielles de canaux résinifères formées en réponse à un impact, les processus d'origine torrentielle, qui se produisent plutôt pendant la période végétative, ont par exemple pu être distingués des processus avalancheux qui ont lieu pendant la période de dormance.

À l'heure actuelle, 107 publications scientifiques (Fig.4) ont été réalisées dans le domaine de la dendrogéomorphologie, pour la plupart (75 %) aux États-Unis (31 études), en Suisse (25), en France (13) et au Canada (13). Les processus géomorphologiques les plus fréquemment étudiés sont les avalanches (35 études), les laves torrentielles (30), les glissements de terrain (28) et dans une moindre mesure les chutes de pierres (10). Les conifères (*Picea*, *Pinus* et *Larix*) sont utilisés dans 80 % des reconstructions. À ce jour, les études sur les feuillus sont rares et ne concernent que quelques espèces (*Fraxinus*, *Quercus*, *Fagus*, *Populus*). Cette différence s'explique essentiellement par :

- la difficulté lors du prélèvement (bois dur) ;
- la lisibilité des cernes de croissance, notamment pour les feuillus à pores diffus (réalisation de lames minces nécessaire) ;
- la prédominance des conifères dans ces milieux à morphogenèse active, localisés préférentiellement en altitude ;
- le caractère souvent longévif des conifères qui permet la réalisation de reconstitutions pluri-centenaires.

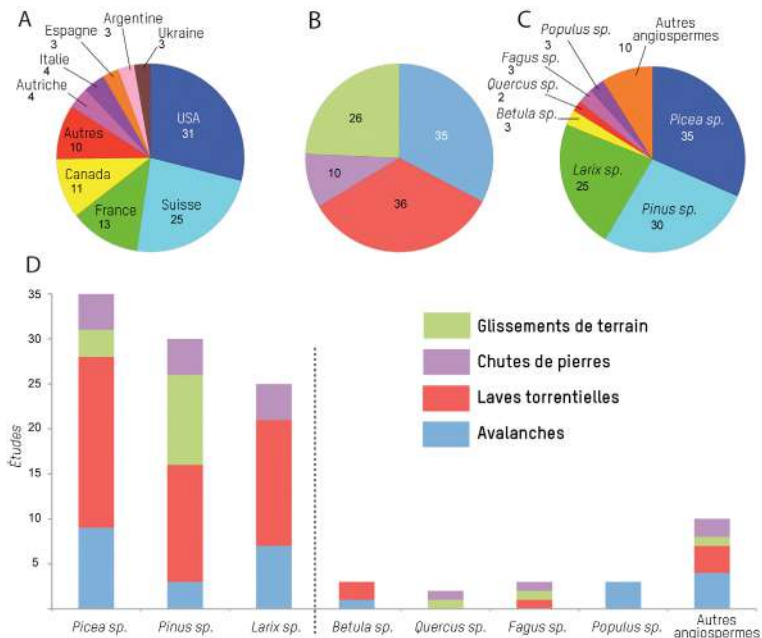


Fig. 4 : Aperçu bibliographique dans le domaine de la dendrogéomorphologie

4 ■ Les indicateurs utilisés en dendrogéomorphologie

Les différentes réponses observées sur les arbres sont présentées dans le paragraphe ci-dessous. Leur type, leur intensité, voire leur cumul dépendent fortement de la nature de l'événement, lequel peut se produire sous la forme d'un phénomène continu ou soudain :

- Colonisation ou recolonisation des surfaces (Fig.5) : les processus géomorphologiques entraînent la création de nouvelles formes (terrasses, moraines, cônes...) et une morphogenèse active où des processus de forte intensité éliminent complètement un peuplement forestier (Fig.5A). Dans ce contexte, l'année de germination des nouvelles pousses sur la surface dénudée est utilisée pour dater un événement ou la formation de paléoformes (Fig.5B). Cependant, cette méthode doit intégrer un délai d'écèse qui correspond à la période comprise entre la stabilisation de la forme (ou le déboisement) et la germination du premier arbre. Ce délai varie en fonction de la nature du sol, des conditions climatiques, ainsi que de la disponibilité des semis.

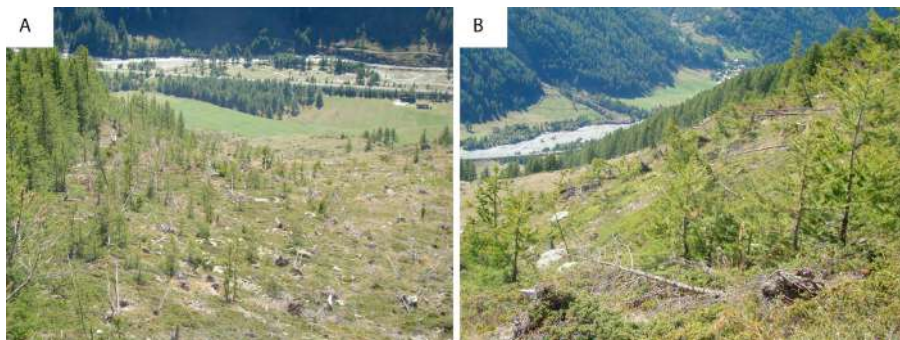
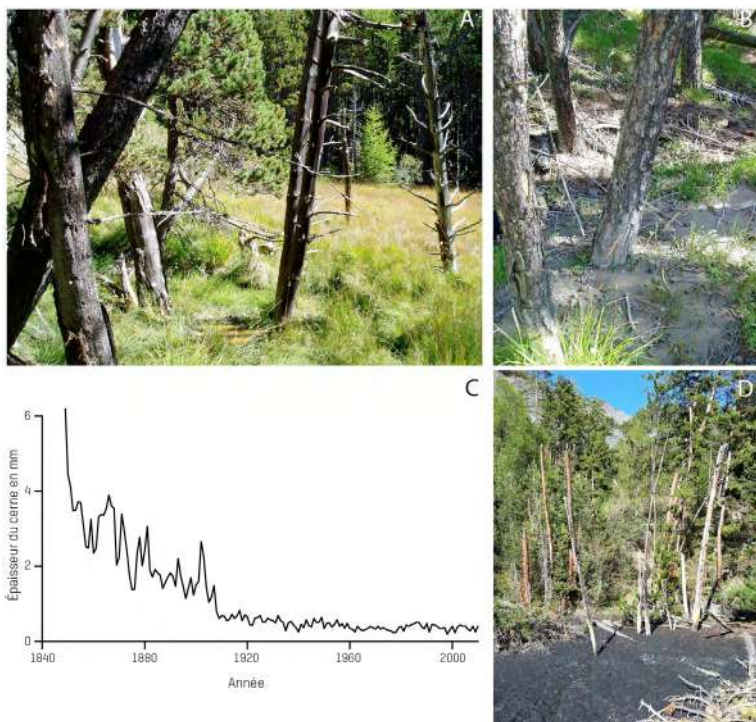


Fig. 5. (A) Versant totalement déboisé par le passage d'une avalanche (Massif du Queyras). (B) Recolonisation de nouvelles pousses (*Larix decidua*) après le passage d'une avalanche de forte intensité (Massif du Queyras)

- Cernes large(s) ou étroit(s) et mort de l'arbre (Fig.6) : lorsqu'un événement provoque la disparition d'un ou plusieurs arbres, l'ouverture du milieu entraîne une augmentation de la largeur des cernes de croissance des arbres voisins non perturbés (en raison de la diminution de la compétition et d'un accès facilité aux ressources). À l'inverse, un stress trop violent peut occasionner une diminution abrupte de croissance radiale (qui se traduit par une succession de cernes étroits) et parfois se révéler irréversible. Un déchaussement des racines, en perturbant l'apport en nutriments, entraîne une réduction de la croissance radiale dans le tronc et dans les racines exposées. L'impact des inondations ou des modifications durables des niveaux des plans d'eau peut également être reconstitué en analysant les variations de la croissance, puisque la saturation en eau du sol riverain retarde la levée de dormance ou ralentit la croissance. Dans le cas des glissements de terrain ou des laves torrentielles, l'enfouissement de la base du tronc par des sédiments (sous forme de lobes ou de levées, par exemple) provoque une diminution durable de la croissance (Fig.6B,C), et dans certains cas, la mort de l'arbre (Fig.6A,D). L'identification de la première année de réduction de croissance permet de dater l'enfouissement avec une résolution annuelle (Fig.6C).



*Fig. 6 : Comportement d'un îlot de Pinus uncinata face à l'enfouissement.
(A,D) arbres morts par enfouissement de la base de leurs troncs suite à un dépôt brutal de sédiments. Lorsque l'enfouissement n'entraîne pas la mort de l'arbre (B), une baisse brutale du patron de croissance s'observe (C).
En 1907, la série connaît une baisse significative de la croissance*

- Reprise de croissance apicale (Fig.7) : les chutes de pierres, les écoulements d'eau, les laves torrentielles ou le souffle d'une avalanche peuvent causer une décapitation de l'arbre ou la cassure de certaines branches (ce phénomène est plus fréquent parmi les grands arbres dont les tiges sont plus rigides). L'étêtement induit souvent une croissance caractéristique, dite « en candélabre », liée à la reprise de dominance apicale par une ou plusieurs branches latérales. Cette morphologie en candélabre est également observée lorsque les arbres sont impactés par des blocs à proximité de la surface du sol ; dans ce cas, la propagation sinusoïdale des ondes de choc dans le tronc sont à l'origine de la décapitation de l'arbre (effet hula hoop). Dans la plupart des cas, la perte d'apex induit aussi une baisse significative de la croissance radiale durant plusieurs années.



Fig. 7 : Mélèzes présentant un port en candélabre suite à une décapitation par avalanche (Massif du Queyras)

- Formation de tissu calleux et de cicatrices (Fig.8) : les blessures résultant d'un impact mécanique peuvent être observées sur la tige, sur les branches ou au niveau des racines (cicatrices d'abrasion) (Fig.8A). Lorsque l'énergie de l'impact est suffisante pour détruire localement le cambium, la croissance de l'arbre est perturbée dans le segment blessé. Afin de minimiser les risques de cassure, de pourriture et d'attaques parasitaires dans l'ouverture créée par l'impact, l'arbre produit du tissu calleux (Fig.8C) en périphérie de la zone endommagée. Lorsque l'événement se produit durant la période végétative, cette cicatrisation est quasi-immédiate. En cas de blessure durant la période de dormance, la production de tissu calleux commence au printemps lors de la reprise de l'activité cambiale. Le tissu calleux va progressivement recouvrir la zone endommagée, de la périphérie vers le centre. Après plusieurs années, lorsque le processus de cicatrisation est terminé, la blessure complètement refermée est indétectable en l'absence de prélèvements. Récemment, des études ont montré que la sensibilité des arbres à l'égard des impacts mécaniques dépendait de l'espèce considérée, mais également de la fréquence/intensité de l'aléa considéré. Par exemple, seules les chutes de pierres caractérisées par des énergies cinétiques importantes seront susceptibles d'endommager des essences à écorce épaisse (mélèze ou chêne pubescent, par exemple). Ces dernières intégreront donc préférentiellement les processus de forte intensité mais de faible fréquence. Les essences caractérisées par une écorce fine (hêtre, érable) sont systématiquement endommagées lors de l'impact quel que soit le volume du bloc considéré. Elles permettront de reconstituer l'aléa quelle que soit sa fréquence ou son intensité.

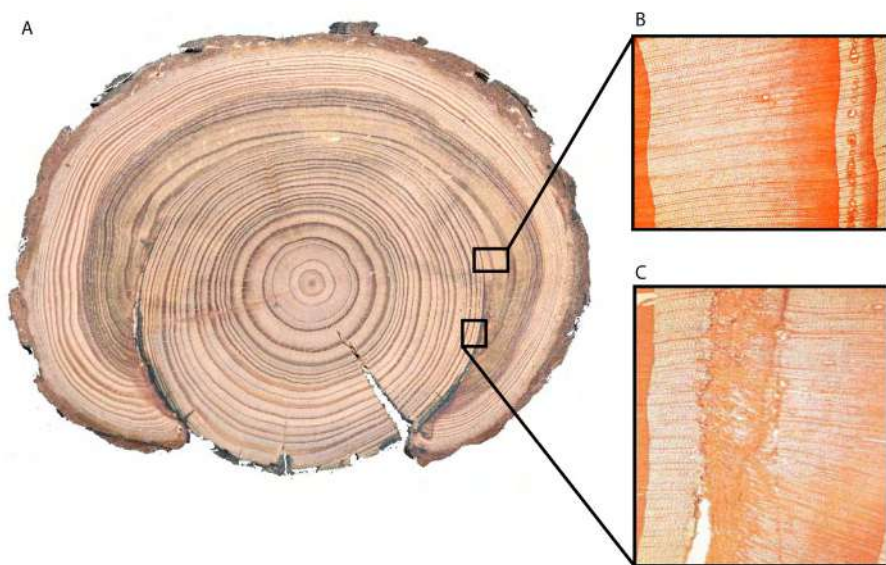


Fig. 8 : Cicatrice d'impact (A) formée de tissu calleux à structure chaotique (C) et ligne de canaux résinifères traumatiques (B) sur une section de mélèze

- Racines adventives (Fig.9) : les laves torrentielles, les crues ou les glissements de terrain peuvent enfouir des arbres en déposant des sédiments à la base de la tige. Un enfouissement modéré perturbe l'apport d'eau et de nutriments et cause une réduction de la croissance radiale de l'arbre. Les arbres, en particulier ceux qui possèdent un système racinaire fasciculé, produisent alors dans la partie supérieure du dépôt des racines adventives disposées en strates. La datation de ces racines permet de déterminer l'âge du dépôt. Lorsque l'enfouissement dépasse un certain seuil, il peut se révéler létal. Ainsi, un épicéa adulte réagit immédiatement à l'ensevelissement par la mise en place de racines adventives et dépérit lorsque le dépôt atteint 1,6 à 1,8 m, en raison de contraintes physiologiques trop fortes.



Fig. 9 : Racines adventives sur un *Picea abies*

- Bois de réaction (Fig.10) : la pression induite par le dépôt de matériaux ou la déstabilisation d'un arbre par un glissement de terrain ou l'érosion peuvent conduire à l'inclinaison du tronc (Fig.10A). Le phototropisme entraîne alors une réorientation de la tige qui se traduit, d'un point de vue morphologique, par une courbure de cette tige. En cas d'événements répétés, cette dernière peut présenter des coudes successifs. Cette morphologie est associée à un patron de croissance excentrique provoqué par la formation de bois de réaction caractérisé par la lignification plus importante destinée à assurer la stabilité mécanique de l'arbre (Fig.10C,D). Chez les conifères, la formation de bois de compression est liée à une division cambiale accélérée sur la face inférieure de l'axe incliné et opposé à la contrainte. La croissance diminue sur la face supérieure. Ce bois est facilement identifiable en raison de sa couleur foncée, jaune ou brun rouge, liée à des trachéides arrondies, denses, à parois épaisses (Fig.10B,C).

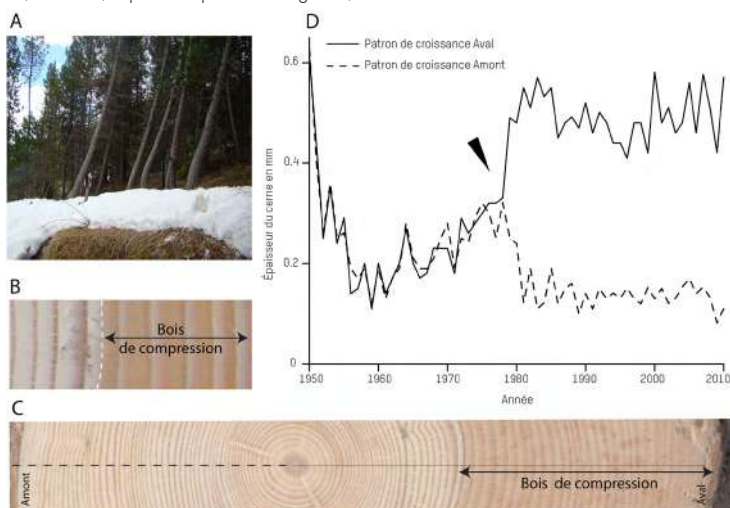


Fig. 10 : Basculement de *Pinus uncinata* par l'activité d'un glissement de terrain (A). (B) formation de bois de compression qui suit la perte de verticalité de l'arbre. (C) Section convexe et concave de *Pinus uncinata* qui présente une série de croissance excentrique suite à une instabilité de versant (D)

Les feuillus réagissent par la formation de bois de tension et l'excentricité apparaît, au contraire, sur le côté amont du tronc. Dans les deux cas, la réaction sera la plus marquée dans le segment de l'arbre où le centre de gravité a été déplacé lors de l'inclinaison du tronc. La croissance excentrique et/ou le changement anatomique sont bien visibles dans les séquences de cernes, ce qui permet une datation précise de l'événement.

Le basculement peut également être à l'origine d'une réduction de la croissance radiale. Il s'avère parfois trop faible pour modifier significativement le géotropisme. La formation de bois de réaction est alors restreinte au bois final. Dans ces deux cas, la datation du basculement est possible avec une résolution annuelle. En revanche, un basculement important et soudain durant la période végétative induit une formation quasi-immédiate de bois de réaction. Lorsque l'événement a lieu pendant la période de dormance, la réaction est observée dans le bois initial de la première année post-événement. Dans les deux cas, l'événement peut être daté avec une résolution saisonnière.

- Rangées tangentielle de canaux résinifères traumatiques (Fig.11) : certaines espèces de conifères (*Larix decidua*, *Picea abies*, *Abies alba*) produisent des rangées tangentielles de canaux résinifères traumatiques dans le xylème*, suite à des dommages du cambium (voir aussi Fig.8B). Lorsque la blessure survient durant la période végétative, la production de résine commence quelques jours après l'événement et les rangées tangentielles de canaux résinifères sont formées moins de trois semaines après l'impact. La position des rangées dans le cerne peut, dans ce cas, être utilisée pour la reconstitution d'événements passés avec une précision mensuelle (Fig.11A,B). Plusieurs études ont ainsi démontré que la position de ces canaux à l'intérieur du cerne diagnostic varie selon le processus considéré. Ces études ont utilisé la position des canaux afin de distinguer les perturbations liées aux avalanches de celles liées aux chutes de pierres ou aux laves torrentielles. Toutefois, des précautions doivent être prises en ce qui concerne cet indicateur : en effet, il a été démontré que l'éloignement par rapport à l'axe de la blessure, selon des directions radiales et longitudinales, induisait une migration des rangées tangentielles vers des portions plus tardives du cerne.

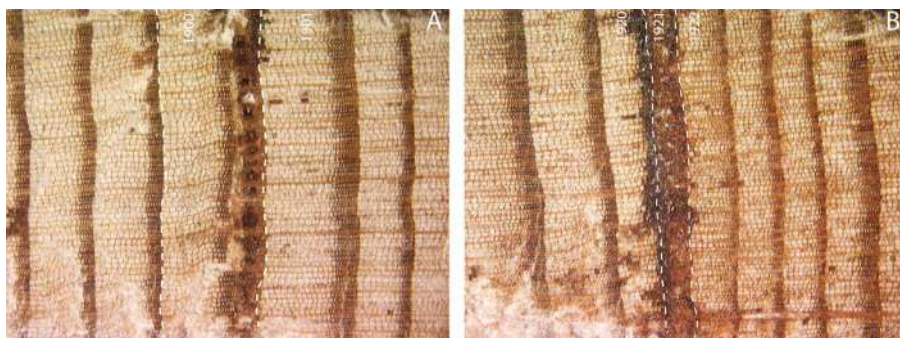
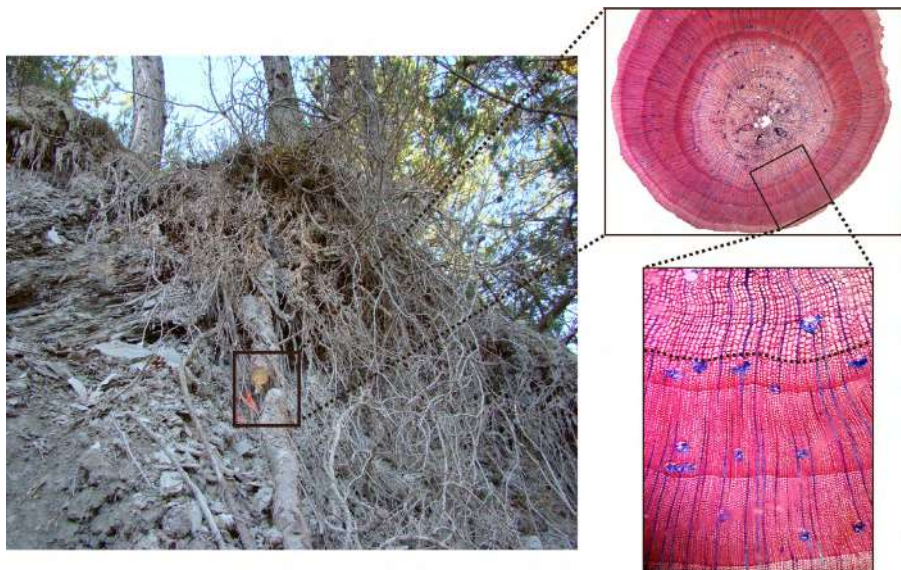


Fig. 11 : Rangées tangentielles de canaux résinifères traumatiques observées sur *Larix decidua*
(A) Le cerne de croissance de l'année 1900 montre la formation
d'une rangée tangentielle dans le bois final du cerne
(B) La rangée se situe sur la totalité du cerne de croissance de l'année 1921

- Racines dénudées (Fig.12) : certains processus géomorphologiques provoquent la mise à l'air partielle ou totale du système racinaire. Outre la perte de stabilité et d'apport en nutriments, qui vont entraîner une diminution de la croissance radiale, des modifications anatomiques (diminution de la taille des cellules, densité et lignification accrues de la paroi cellulaire) s'opèrent au sein de la racine déchaussée.



*Fig. 12 : Modifications anatomiques observées sur une racine de Pinus uncinata suite à une mise à l'air brutale.
 Les cernes de croissance formés avant la mise à l'air
 présentent des trachéides de grande taille avec une paroi mince.
 Les cernes postérieurs à la mise à l'air
 sont caractérisés par des trachéides de surface réduite, à paroi plus épaisse*

Ces changements anatomiques sont attribués aux modifications des conditions environnementales (augmentation des amplitudes thermiques, variations de l'humidité plus marquées) et sont destinées à éviter les phénomènes d'embolie au sein des tissus. Ces modifications sont synchrones avec la mise à l'air dans le cas de processus d'érosion brutaux. Elles constituent donc des repères chronologiques particulièrement fiables pour dater la mise à l'air et quantifier des vitesses d'érosion.

5 ■ Approche de terrain

La réalisation d'une carte géomorphologique détaillée, qui repose classiquement sur l'examen de cartes topographiques, géologiques et de photographies aériennes et dont l'échelle peut varier selon le type d'analyse et l'aléa étudié, est un préalable indispensable à toute étude dendrogéomorphologique. Cette cartographie est déterminante afin d'identifier les processus à l'origine des dommages observés sur les peuplements. Elle servira également de base pour l'échantillonnage (Fig.13).

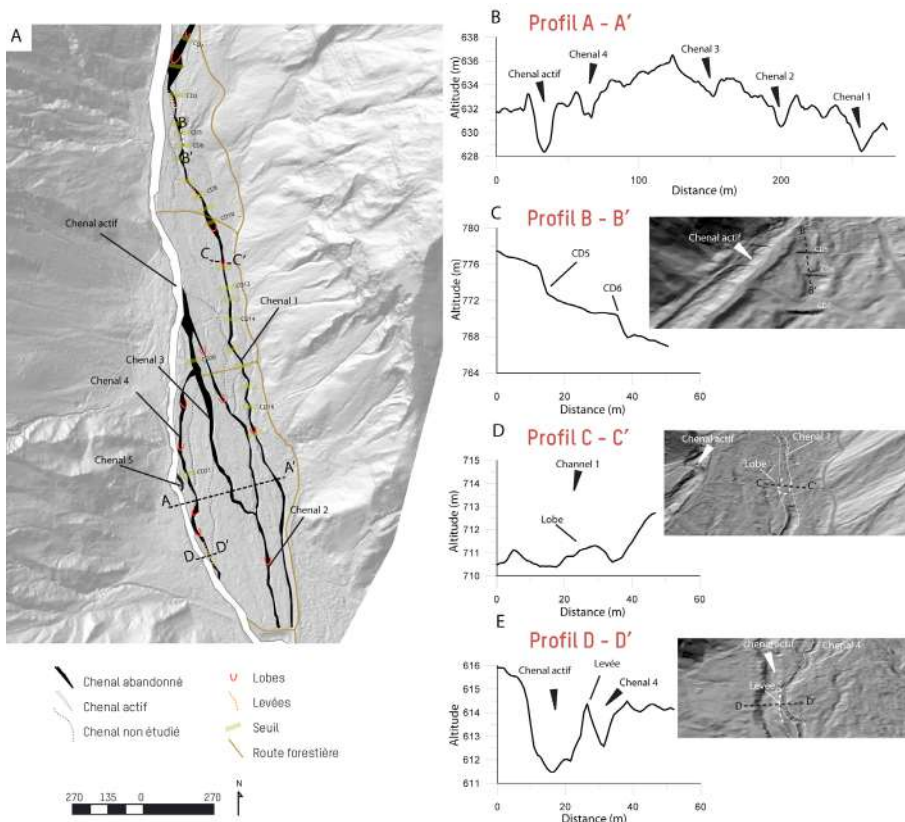


Fig. 13 : Exemple d'une carte géomorphologique, site du Manival (Isère, France), qui repose sur l'utilisation des données Lidar (A). (B,C,D,E) Profils topographiques mettant en évidence de manière très précise les formes géomorphologiques caractéristiques (d'après Lopez-Saez et al., 2011)

La cartographie portera sur les formes d'érosion (talwegs, chenaux...) et de dépôt (cône torrentiels, avalancheux, lobes, levées...), mais pourra également inclure des éléments complémentaires (paléoformes, blocs déposés, nature et densité de la couverture végétale...) qui serviront d'indicateurs qualitatifs pour les résultats d'analyses dendrochronologiques. Les données issues de l'analyse dendrogéomorphologiques seront également systématiquement confrontées aux archives documentaires (Fig.14) (rapports techniques, textes, articles de presse, cartes, photographies obliques et aériennes anciennes, qui fournissent des indications concernant la date, la localisation et l'ampleur des événements passés (Fig.14A,B). Ces chroniques historiques sont également utilisées pour valider les reconstructions.

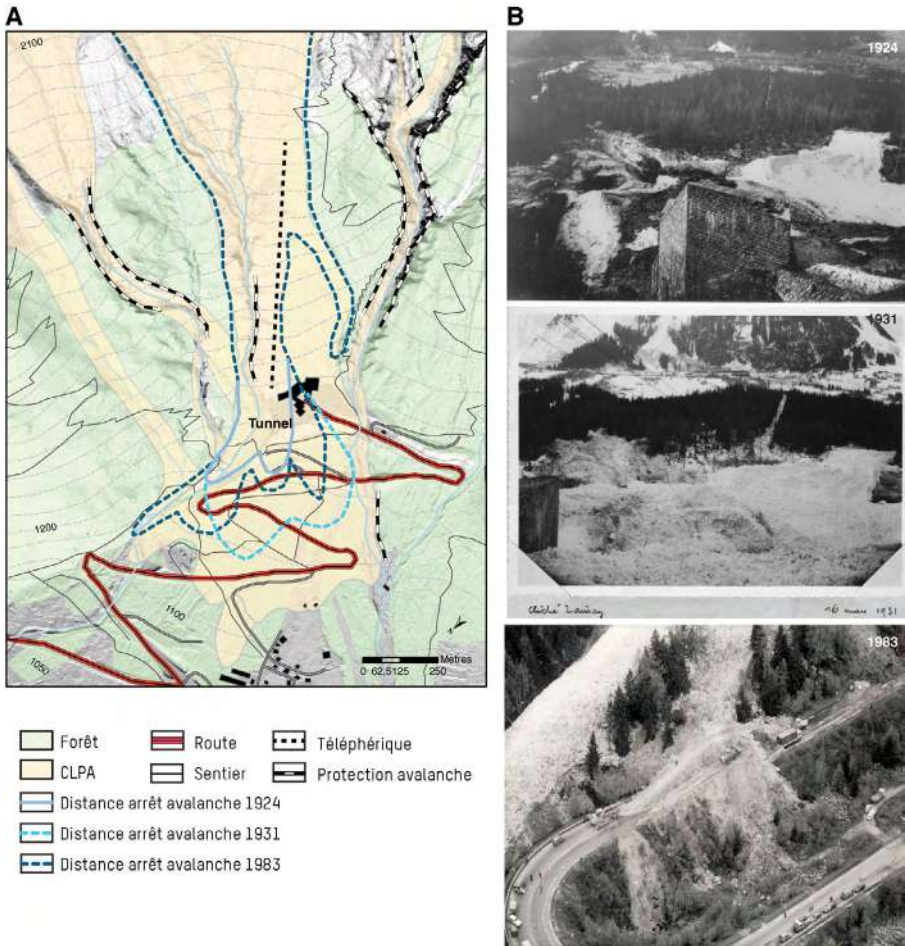


Fig. 14 : Extensions spatiales (A) et photographies historiques des avalanches catastrophiques de 1924, 1931 et 1983 [couloir des Pèlerins, Chamonix] (d'après Corona et al., 2012)

6 ■ Le choix de l'arbre

Le choix des arbres est basé sur un examen externe de la surface de la tige (afin d'identifier des perturbations morphologiques). Il dépend également de la position de l'individu considéré par rapport à l'extension processus étudié. Plusieurs informations, relatives à l'arbre échantillonné, doivent être inventoriées dans une fiche de terrain :

- sa localisation sur la carte géomorphologique ;
- les perturbations de croissance visibles (cicatrices, inclinaison du tronc, enfouissement partiel de la tige, étêtatement, destruction des racines, érosion) ;
- la localisation des échantillons prélevés ;
- le diamètre à hauteur de poitrine ;
- la position par rapport aux arbres voisins.

Une photographie de chaque arbre permet d'affiner l'interprétation des reconstitutions.

L'analyse des cernes de croissance est facilitée sur des sections de tronc (Fig.15). Le prélèvement d'une section ou d'un coin est en général possible sur un arbre mort ou sur des souches après une coupe de bois effectuée par bûcheronnage (Fig.15C,D). En raison des finalités scientifiques de l'analyse, de la fonction de protection des forêts étudiés et du caractère ancien et parfois patrimonial des peuplements, l'abattage des arbres est très rare dans le cadre d'études dendrogéomorphologiques. Seules les études portant sur les racines déchaussées nécessitent des prélèvements de la totalité de la section (Fig.15B). Les prélèvements au niveau de la tige sont, en revanche, le plus souvent réalisés sous la forme de carottes extraites à l'aide d'une tarière de Pressler (Fig.15A).

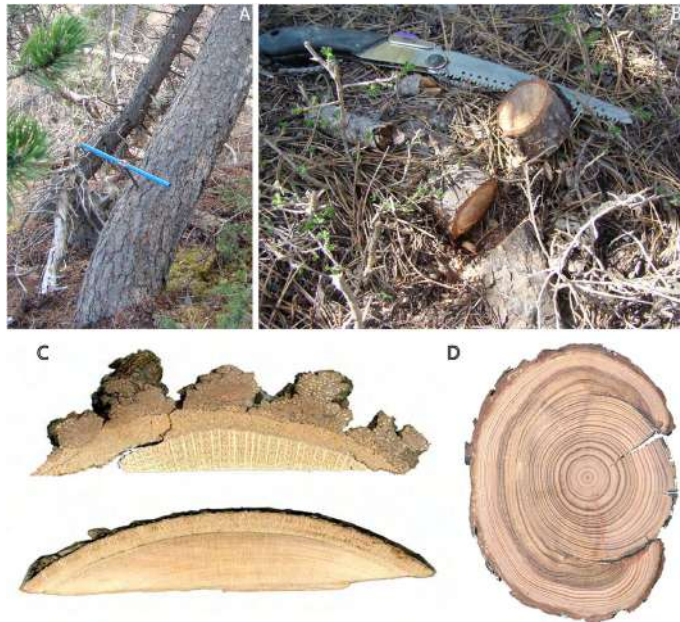
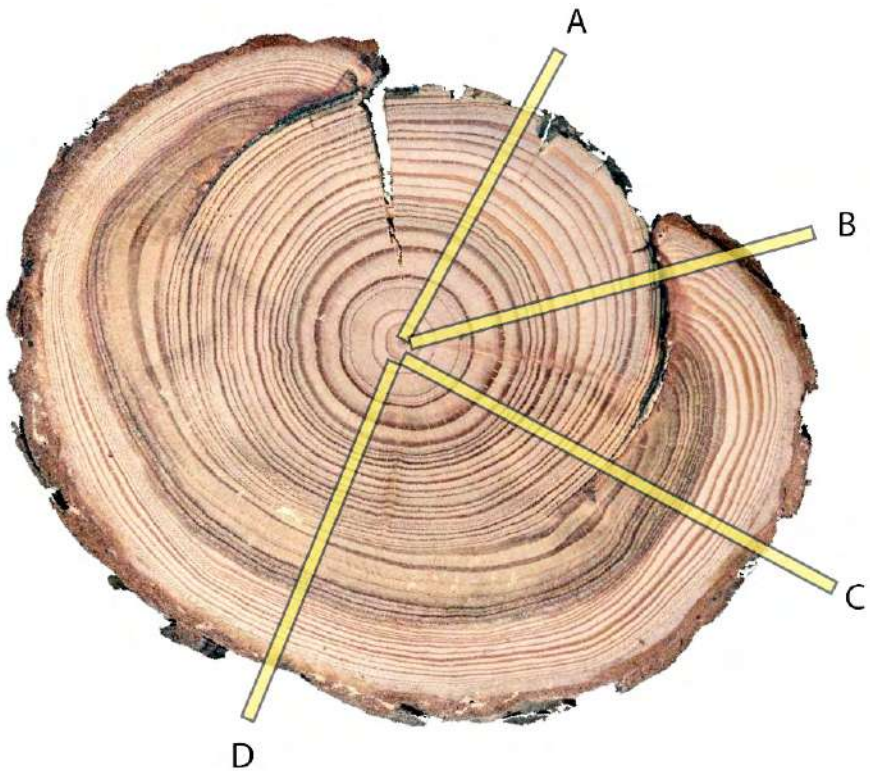


Fig. 15 : Les techniques d'échantillonnage. (A) prélèvement d'une carotte sur un tronc à l'aide d'une tarière de Pressler. (B) prélèvement d'une racine dénudée à l'aide d'une scie japonaise. (C) coins et (D) sections

La nature de la perturbation de croissance conditionne la localisation (hauteur et direction) du prélèvement ainsi que le nombre d'échantillons minimum pour chaque arbre. Pour les arbres présentant une cicatrice, les datations des événements sont plus aisées sur une section complète du tronc, à l'emplacement où la blessure est la plus grande. Deux carottes extraites du côté opposé à la blessure et dans l'excroissance calleuse peuvent cependant suffire (Fig.16, section A et D). Dans ce cas, les prélèvements doivent être positionnés précisément : réalisés sur les marges de l'excroissance calleuse (Fig.16, section B), ils seront caractérisés par des cernes manquants puisque les blessures cicatrisent depuis la périphérie ; à l'inverse, les échantillons prélevés en dehors du tissu calleux risquent de ne montrer aucun signe de perturbation et ne permettront donc pas de reconstituer un événement (Fig.16, section C).



*Fig. 16 : Stratégie d'échantillonnage d'une cicatrice
(d'après Stoffel, 2006)*

Deux carottes prélevées perpendiculairement à la ligne de plus grande pente, au niveau de la zone de courbure maximale du tronc, seront nécessaires pour dater le basculement. L'enfouissement de la base de la tige peut être mis en évidence par deux échantillons réalisés selon deux directions opposées (idéalement parallèlement à la ligne de plus grande pente). Les prélèvements doivent être réalisés au plus près du sol (20-40 cm) afin d'acquies de longues séries de largeur de cernes qui intègrent un maximum de perturbations. Les arbres étêtés et survivants (rejets) sont échantillonnés à des hauteurs similaires en dessous du niveau de décapitation. L'analyse des racines déchaussées est normalement basée sur des sections en raison de cernes souvent manquants ou incomplets. Le repérage de la position des échantillons par rapport à la surface du sol est dans ce cas essentiel pour la compréhension et l'interprétation des processus d'érosion et la quantification des taux de dénudation.

Des prélèvements additionnels sont systématiquement réalisés sur des populations de référence non perturbées, localisées à proximité des sites d'étude. Les arbres sont sélectionnés en fonction de leur âge : seuls les plus vieux sont échantillonnés afin d'augmenter la longueur de la chronologie de référence. Ils ne doivent pas présenter de perturbations de croissance visible - liées à des processus géomorphologiques ou à des attaques de pathogènes - et sont choisis en position de dominance afin de maximiser les influences climatiques dans le signal dendrochronologique. Pour chaque arbre, deux carottes sont extraites perpendiculairement à la pente, à hauteur de poitrine (130 cm). En général, une trentaine d'arbres constituent la population de référence.

Enfin, pour la datation des surfaces dénudées ou des paléoforces par la végétation en place, plusieurs corrections doivent être apportées aux dates obtenues sur les plus vieux échantillons :

- l'âge est ajusté afin de tenir compte de la hauteur de prélèvement ;
- le nombre de cernes manquants est estimé au moyen d'une cible forestière lorsque la moelle de l'arbre n'est pas présente sur le prélèvement ;
- le délai d'écèse est en général estimé par l'analyse diachronique de photographies aériennes.

7 ■ Travail en laboratoire

En laboratoire, les échantillons sont analysés et les données traitées suivant les procédures standards utilisées en dendrochronologie.

La première étape consiste à préparer les échantillons afin d'optimiser la lecture des cernes de croissance (Fig.17). Cette étape est cruciale pour l'identification ultérieure des perturbations de croissance. Une fois retirée du tube utilisé pour garantir le stockage, le transport et la conservation de l'échantillon, la carotte est collée sur un support de médium, préalablement rainurée (profondeur 2 mm, largeur 5 mm, longueur 400 mm), à l'aide d'une colle à bois transparente. Un grand soin doit être apporté au collage : les fibres du bois doivent être positionnées perpendiculairement au support afin de permettre une observation, une lecture et une datation optimales des cernes de croissance. Après séchage (environ douze heures), chaque échantillon fait l'objet d'un surfacage minutieux. Les échantillons sont généralement poncés à l'aide d'une ponceuse orbitale professionnelle.

La surface convexe de la carotte (Fig.17A) est aplanie au moyen d'un disque à grain grossier (grain 80) (Fig.17B).

Elle est ensuite traitée avec des disques de finesse croissante, du grain 120 (Fig.17C) au grain 320 (Fig.17D).

Enfin, pour obtenir une lecture optimale du cerne de croissance, l'échantillon (Fig.17E) est lustré avec un disque à grains très fins (600).

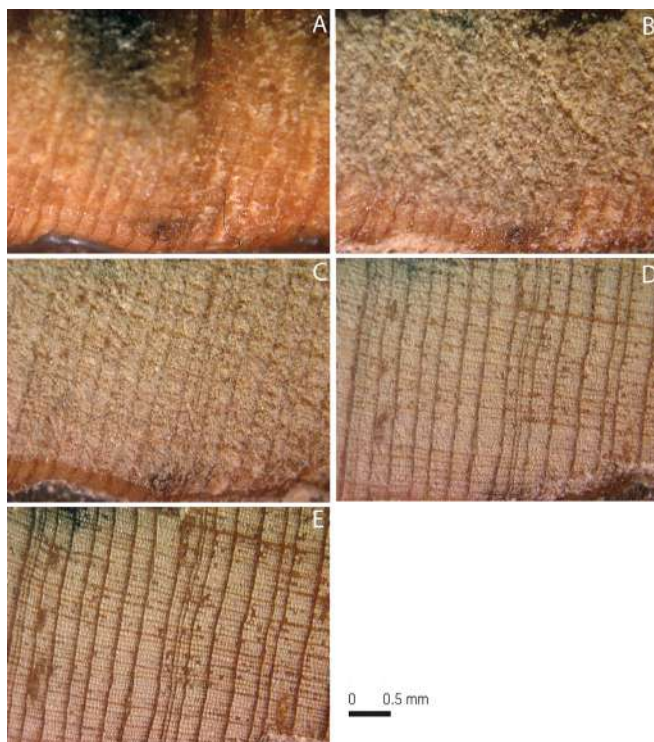


Fig. 17 : Évolution de la surface d'un échantillon après les différentes étapes de ponçage

Un protocole identique est utilisé sur les sections de troncs et de racines. Les échantillons poncés sont analysés selon un protocole en trois étapes qui inclut :

- le décompte et le pointage des cernes de croissance ;
- l'identification des cernes caractéristiques ;
- la mesure de la largeur des cernes à l'aide d'un dispositif optique constitué d'une loupe binoculaire fixée à une table de mesure digitale mobile, associée à un logiciel d'analyse statistique des séries temporelles (Fig.18).



Fig. 18 : Table de lecture Lintab permettant l'observation des échantillons ainsi que la mesure de la largeur des cernes de croissance

Une chronologie de référence est construite à partir des carottes prélevées sur les arbres non perturbés. Les largeurs de cernes sont mesurées et les séries de la largeur de cernes sont interdatées. Chaque série est ensuite indexée et standardisée afin de retirer les signaux non climatiques (tendance d'âge, effets stationnels) du signal dendrochronologique. Cette standardisation est réalisée au moyen de courbes d'ajustement de type négative exponentielle ou spline, qui permettent d'éliminer le signal basse fréquence et de maximiser les fluctuations interannuelles.

Les séries de largeur de cernes sont transformées en indice correspondant au ratio entre la largeur du cerne et la valeur prédite par la courbe d'ajustement. Afin de garantir la robustesse de la chronologie de référence, celle-ci est limitée à la période couverte par au moins cinq individus.

Les largeurs de cernes des arbres perturbés sont mesurées selon un protocole identique. Les séries obtenues sont comparées graphiquement et statistiquement avec la chronologie de référence. La comparaison graphique consiste à superposer les séries provenant d'arbres perturbés et de la chronologie de référence pour identifier des patrons de croissance similaires. Les procédures statistiques permettent de valider l'interdatation : elles reposent sur des tests de similarité ou de corrélation. Ces tests statistiques sont réalisés à l'aide de logiciels dédiés (ARSTAN, COFECHA).

Après l'interdatation, les courbes de croissance sont analysées visuellement afin d'identifier et de dater les dérives de croissance (diminution ou augmentation brutale et durable de la croissance) attribuables à des processus géomorphologiques (Fig.19).

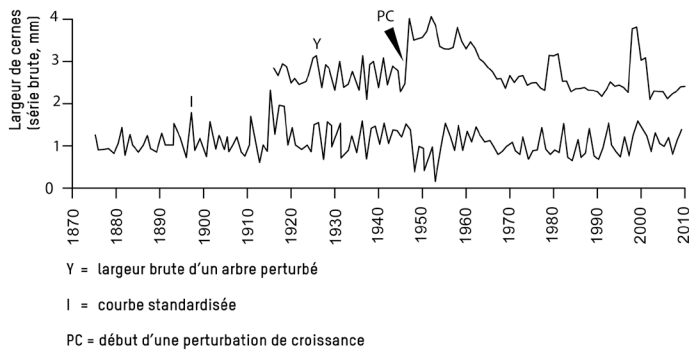


Fig. 19 : Exemple de comparaison entre une courbe de croissance d'un arbre perturbé et la chronologie de référence

Dans le cas d'arbres inclinés, les modifications de l'anatomie des cellules (lignification, diminution de la taille) permettent de dater l'année initiale de séquences de bois de réaction. Le tissu calleux, formé suite à une blessure, est identifié grâce à sa structure chaotique liée à l'absence d'alignement radial des cellules. Les rangées tangentielles de canaux résinifères traumatiques, liées au processus de cicatrisation chez certains conifères, sont également identifiées visuellement.

Les perturbations de croissance observées durant la première décennie des séries dendrochronologiques sont systématiquement exclues de l'analyse. En effet, durant cette période juvénile, les arbres particulièrement flexibles sont sensibles à des contraintes mécaniques liées, par exemple à la pression de la neige (creeping) ou au frottement par les animaux. Les échantillons non interdatés sont également exclus.

Toutes les perturbations datées ne peuvent pas être attribuées à des événements passés. Afin d'éviter une détermination erronée des aléas et de retirer le bruit lié à des facteurs endogènes (chablis, par exemple) ou exogènes (épidémies de parasites) au peuplement, les perturbations de croissance datées sont généralement classées en fonction de leur intensité. Une fréquence minimale annuelle des perturbations est ensuite fixée pour qu'une année soit considérée comme une année d'occurrence de l'aléa :

$$I_t = (\Sigma(R_t) / \Sigma(A_t)) * 100$$

où

I_t représente la fréquence des perturbations au cours de l'année t,

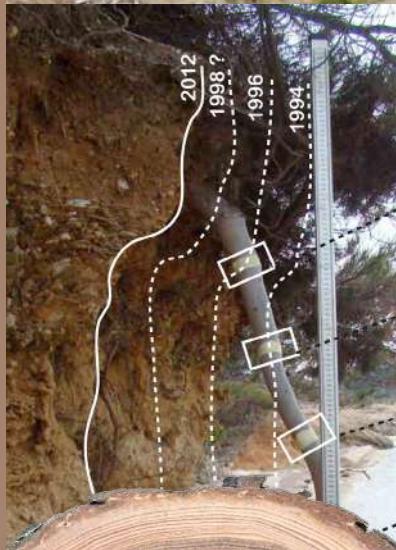
R représente le nombre d'arbres qui présentent une perturbation,

A représente le nombre total d'arbres vivants au cours de cette même année.

Dans le cas des reconstitutions avalancheuses, les auteurs considèrent que des indices compris entre 10 % et 40 % indiquent l'occurrence d'un événement. Un nombre minimal de perturbations (en général 10) est cependant utilisé afin de limiter le biais lié au faible nombre d'individus dans les parties les moins répliquées de la reconstitution. Enfin, l'analyse de la répartition spatiale des arbres endommagés au cours d'une année permet de valider ou non la détection d'un événement.

Partie 2

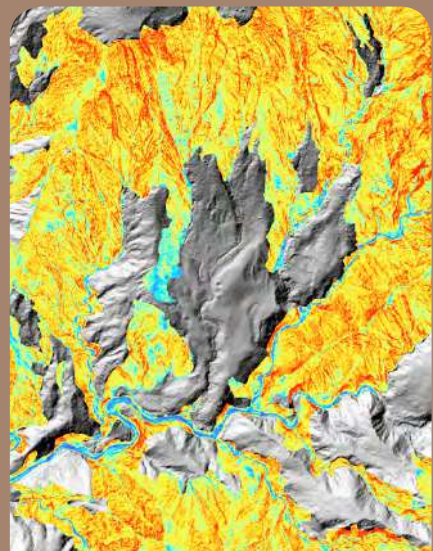
Domaines
d'application





- 1 ■ Reconstitution de la fréquence et de l'intensité des événements
- 2 ■ Analyse de l'étendue spatiale et de l'emprise des aléas
- 3 ■ Facteurs déclenchants et relation avec le climat
- 4 ■ Développement d'un nouvel indicateur : les racines déchaussées

Conclusions et perspectives



La dendrogéomorphologie repose sur la capacité des végétaux ligneux à réagir à des stress exogènes, liés aux perturbations ou aux changements qui affectent leur milieu de croissance, et sur l'enregistrement de ces réponses dans les caractéristiques des cernes annuels de bois ou dans des anomalies morphologiques visibles. L'analyse de la croissance radiale des arbres, de leur morphologie et de leur anatomie, permet de dater les événements passés tels que les laves torrentielles, les glissements de terrain, les chutes de pierres, les avalanches, les crues ou de quantifier l'érosion continentale et littorale (Fig.20). L'approche permet également de reconstituer la période de retour et l'extension spatiale de ces processus avec des résolutions temporelles annuelles à mensuelles.



Fig. 20. Aperçu des types de processus géomorphologiques qui font l'objet d'études dendrogéomorphologiques
 (A) couloir d'avalanches, massif du Queyras
 (B) torrent du Manival, massif de la Chartreuse
 (C) érosion de falaise, île de Porquerolles
 (D) bloc, Valdrome
 (E) glissement de terrain des Aiguettes, Ubaye
 (F) badland marneux de Draix

1 ■ Reconstitution de la fréquence et de l'intensité des événements

L'histoire des laves torrentielles a été largement étudiée dans les Alpes depuis plusieurs décennies. Après les études pionnières de Hupp et al. (1987) réalisées sur les pentes du Mont Shasta (Californie), la dendrogéomorphologie a été utilisée par Strunk (1997) pour reconstituer l'activité des laves torrentielles dans les Dolomites (Italie) via l'analyse de la date de germination des racines adventives de troncs enfouis. Des travaux récents, réalisés dans les Alpes valaisannes (Suisse), démontrent le potentiel considérable de la dendrogéomorphologie dans l'analyse de processus torrentiel en milieu de montagne. L'étude réalisée sur 1 100 conifères poussant sur le cône torrentiel du Ritigraben a permis d'élargir la fréquence connue des événements de 10 à 124 laves torrentielles (Fig.21) et de prolonger la série jusqu'en 1570 (Stoffel et Béniston, 2006). Dans le Massif de la Chartreuse, l'étude dendrogéomorphologique du torrent du Manival a permis de reconstituer les divagations des laves torrentielles (Lopez-Saez et al., 2011a). Au total, 156 *Pinus sylvestris* ont été échantillonnés dans les chenaux de divagation du torrent du Manival et 375 perturbations de croissance ont été datées dans les échantillons prélevés. Ces perturbations anatomiques ont permis de reconstituer 13 laves torrentielles entre 1931 et 2008 dont 4 seulement étaient recensées dans les archives historiques.

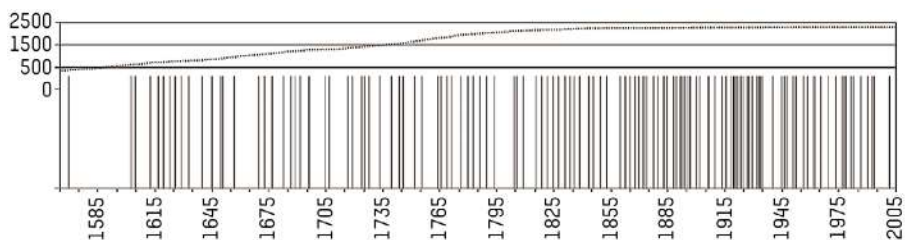


Fig. 21. Reconstitution dendrogéomorphologique des laves torrentielles du Ritigraben (Suisse) depuis 1570.
La ligne en pointillé correspond à la somme des échantillons disponibles pour chaque année
(d'après Stoffel et Béniston, 2006)

En outre, des reconstitutions régionales ont été réalisées dans les régions de Valteline (Italie), de Zermatt (Suisse) et de Vorarlberg (Autriche) afin de mieux mettre en évidence le rôle des sources sédimentaires et des fluctuations du climat dans le déclenchement, la fréquence et la magnitude des laves torrentielles.

Dans le domaine des avalanches, l'approche dendrogéomorphologique a surtout été utilisée pour reconstruire des chroniques événementielles. Le matériel transporté par les avalanches de fonte ou le souffle des avalanches en aérosol sont à l'origine de nombreuses cicatrices d'impact, de rupture de la tige, des cassures et des reprises de croissance au niveau de la tige. Afin d'éviter une détermination erronée des années avalancheuses, les perturbations de croissance sont généralement classées en fonction de leur potentiel pour la reconstitution (Reardon et al., 2008). Une fréquence minimale des perturbations annuelles a également été fixée pour qu'une année soit considérée comme avalancheuse. Les seuils utilisés varient ainsi de 10 % (Corona et al., 2010) à 40 % des arbres échantillonnés (Butler et Malanson, 1985).

Les travaux pionniers ont été réalisés dans les Montagnes Rocheuses et au Canada. Dans les Pyrénées et dans les Alpes françaises, les reconstructions sont plus récentes. Une étude dendrogéomorphologique menée sur un dépôt avalancheux dans le massif de l'Oisans a permis de reconstituer l'évolution et la fréquence et de l'intensité des avalanches (Corona et al., 2010). L'étude fait ressortir, au cours du siècle écoulé, 13 avalanches de forte intensité dont 6 sont validées par les documents d'archives. Dans le massif du Queyras (Alpes du Sud), les peuplements de mélèzes pluri-centenaires offrent des perspectives pour la reconstitution de la fréquence avalancheuse fini-Holocène. Sur le dépôt de l'Echalp, 163 *Larix decidua* ont été échantillonnés et 514 perturbations de croissance ont été datées avec une précision annuelle. Ces perturbations de croissance ont permis de reconstituer 37 épisodes avalancheux depuis 1338 (Corona et al., 2013 ; Fig.22). Récemment, dans la vallée de Chamonix, sur un couloir d'avalanches précisément documenté, Corona et al. (2012) ont démontré que 43 % des avalanches listées dans les archives historiques pouvaient être reconstruites au moyen d'une approche dendrogéomorphologique. Ces archives regroupent, depuis le 17ème siècle, des témoignages ponctuels des habitants du hameau des Pèlerins, menacé par l'avalanche. Depuis le début du 20ème siècle, elles sont complétées par des observations systématiques réalisées par les agents du service de restauration des terrains en montagne (RTM). Ces observations consignées dans l'Enquête Permanente des Avalanches (EPA) sont particulièrement fiables. En effet, le couloir a fait l'objet d'un suivi minutieux puisqu'il menace les infrastructures réalisées pour les Jeux olympiques de 1924 et depuis les années 1950, la route d'accès au tunnel du Mont-Blanc. La comparaison des données historiques et des reconstitutions issues des cernes de croissance des arbres démontrent la fiabilité de l'approche dendrogéomorphologique.

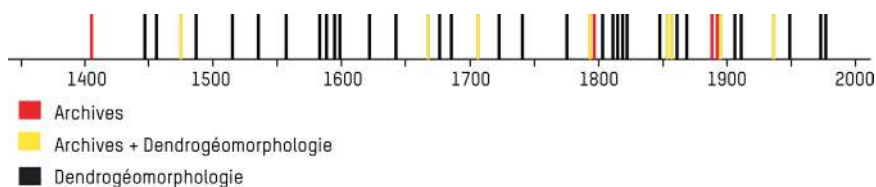


Fig. 22. Reconstitution dendrogéomorphologique des avalanches du couloir de l'Echalp depuis 1338. Comparaison entre les archives historiques et la reconstitution obtenue à partir d'une approche dendrogéomorphologique, couloir de L'Echalp (d'après Corona et al., 2013)

Contrairement à d'autres processus observés de manière systématique, le recensement des phases d'activité et des réactivations des glissements de terrain s'avère souvent très lacunaire. Tous les glissements de terrain ne peuvent pas être étudiés. L'utilisation de la méthode est conditionnée par la profondeur, l'intensité et la présence d'un couvert forestier. Seuls les glissements superficiels (<6 m), non catastrophiques et d'intensité faible à modérée, qui vont endommager la tige et le système racinaire sans détruire l'arbre, peuvent faire l'objet d'une étude dendrogéomorphologique. Ainsi, les variations soudaines d'excentricité ont été interprétées comme des marqueurs d'instabilité (Astrade et al., 1998). Cependant, l'utilisation de cette méthode suppose la détermination d'un seuil de variation d'excentricité rarement précisé. Le plus souvent, la résolution de la reconstitution est pluriannuelle et des phases de déclenchement sont proposées (Braam et al., 1987). Plus récemment, des travaux sur des conifères utilisent l'année initiale de séquence de bois de réaction pour dater l'occurrence d'un événement. Cette approche permet d'obtenir des reconstitutions de résolution annuelle. Une résolution mensuelle peut être obtenue lorsque des analyses anatomiques sont réalisées afin de positionner le bois de réaction à l'intérieur du cerne. Par ailleurs, l'analyse de la réorientation de l'arbre et de la localisation du bois de réaction dans le tronc par rapport à la pente générale du versant permet de préciser la nature, la profondeur et la direction du glissement. L'âge du peuplement est également un indicateur puisqu'il peut coïncider avec le dernier épisode catastrophique d'un glissement de terrain (Carrara et O'Neill, 2003).

L'utilisation des cernes perturbés pour la reconstitution des phases de réactivation des glissements de terrain a été initialement développée aux États-Unis, au Canada et au Japon. En Europe, la dendrogéomorphologie a permis la reconstitution de la fréquence des glissements de terrain dans les Alpes françaises et italiennes et dans les Pyrénées espagnoles. Les reconstitutions couvrent quelques décennies à plusieurs siècles.

Dans la vallée de l'Ubaye (Alpes-de-Haute-Provence), plusieurs glissements de terrain superficiels ont ainsi fait l'objet de reconstitutions (Lopez-Saez, 2011). Basée sur l'observation des séries de croissance de 978 arbres perturbés échantillonnés sur 13 glissements de terrain, l'approche dendrogéomorphologique a permis de dater 91 phases de réactivation au cours du siècle écoulé (Fig.23). Récemment, des travaux de calibration de l'approche dendrogéomorphologique ont été réalisés pour les glissements de terrain. D'un point de vue temporel, il a été démontré que seulement 30 arbres répartis de manière homogène dans le corps du glissement permettaient d'obtenir des reconstitutions satisfaisantes à condition de privilégier les individus les plus vieux présentant de nombreuses perturbations de croissance (Corona et al., 2014).

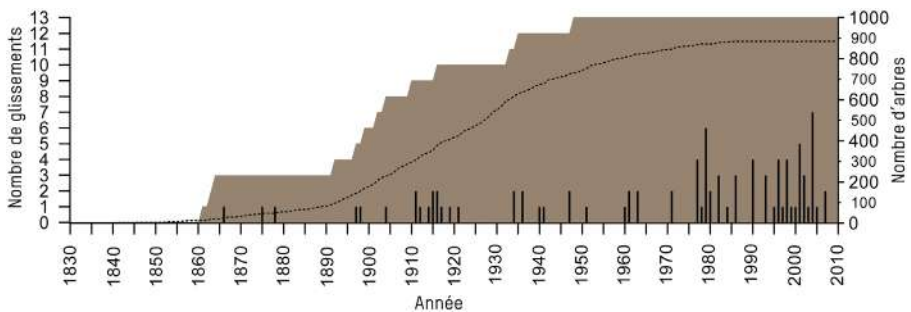


Fig. 23. Reconstitution dendrogéomorphologique des glissements de terrain de la vallée de l'Ubaye (France) depuis 1860. La ligne en pointillé correspond à la somme des arbres vivants pour chaque année. Le fond vert pâle indique pour chaque année, le nombre de glissements qui présente une reconstitution dendrogéomorphologique [d'après Lopez-Saez, 2011]

Malgré le potentiel de l'approche dendrogéomorphologique, l'activité de chutes de pierres n'a été que rarement reconstituée au moyen des séquences de cernes (Stoffel, 2006). Les premières études concernant l'interaction entre les peuplements forestiers et les chutes de pierres se sont concentrées sur la datation des grandes avalanches rocheuses et des écroulements de grande ampleur plutôt que sur la reconstitution des chutes de pierres individuelles. Lafortune et al. (1997) ont été les premiers à s'intéresser aux chutes de pierres afin de mettre en évidence, sur des tabliers d'éboulis, les interactions entre les vitesses d'enfouissement des arbres et la dynamique de la lisière forestière. Les premiers travaux portant sur la fréquence, la magnitude, la répartition spatiale et la saisonnalité des chutes de pierres ont été réalisés par Stoffel et al. (2005) dans la vallée de Zermatt (Alpes suisses). Leurs études ont démontré des fluctuations importantes dans la fréquence des chutes de pierres depuis l'an 1600 et l'apparition d'événements de plus grande intensité durant des décennies caractérisées par des étés plus chauds (1720, 2003). Depuis ces études pionnières, les méthodes ont simplement été répliquées dans d'autres sites en particulier dans les Alpes suisses et les Pyrénées (Andorre).

2 ■ Analyse de l'étendue spatiale et de l'emprise des aléas

L'emprise des événements passés peut également être délimitée précisément en fonction de la répartition des arbres qui présentent une réponse anatomique. Plusieurs études se sont, par exemple, focalisées sur la reconstruction de l'emprise spatiale des aléas naturels à partir d'une approche dendrogéomorphologique.

Dans le canton du Valais (Alpes suisses), Stoffel et al (2008) ont couplé une cartographie géomorphologique à grande échelle du torrent du Ritigraben avec un échantillonnage dendrogéomorphologique particulièrement dense. Cette analyse a permis de reconstituer précisément le tracé des laves torrentielles passées et de dater plus de 200 dépôts (86 % des dépôts identifiés sur le cône) associés à ces événements (Stoffel et al., 2008) (Fig.24).

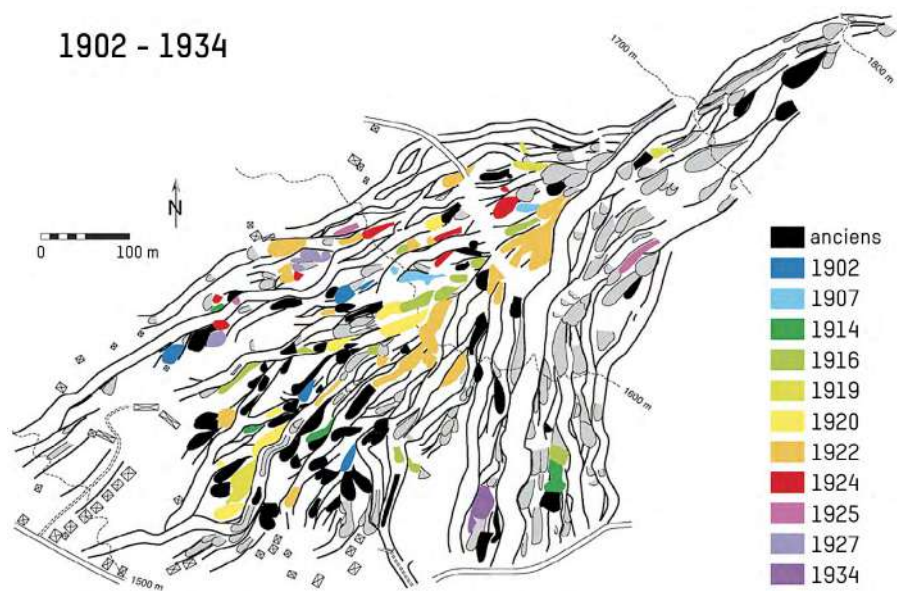


Fig. 24. Répartition spatiale des dépôts pendant des événements de laves torrentielles au Ritigraben entre 1902 et 1934 (d'après Stoffel et al., 2008)

De la même manière, Bollschweiler et al. (2008) ont utilisé conjointement (i) les perturbations de croissance dans les arbres, afin de reconstituer l'extension des crues torrentielles passées dans les chenaux actifs (Fig.25A) et (ii) l'âge des plus anciens arbres colonisant les chenaux inactifs (Fig.25B) afin de déterminer la période d'inactivité minimale de ces derniers (Fig.25C).

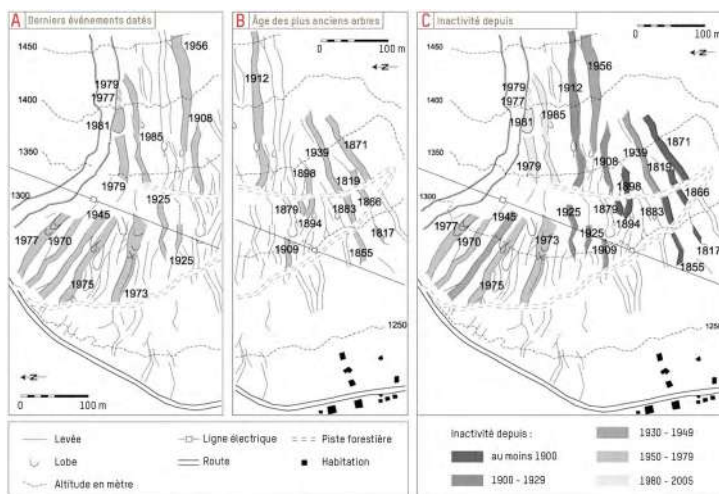
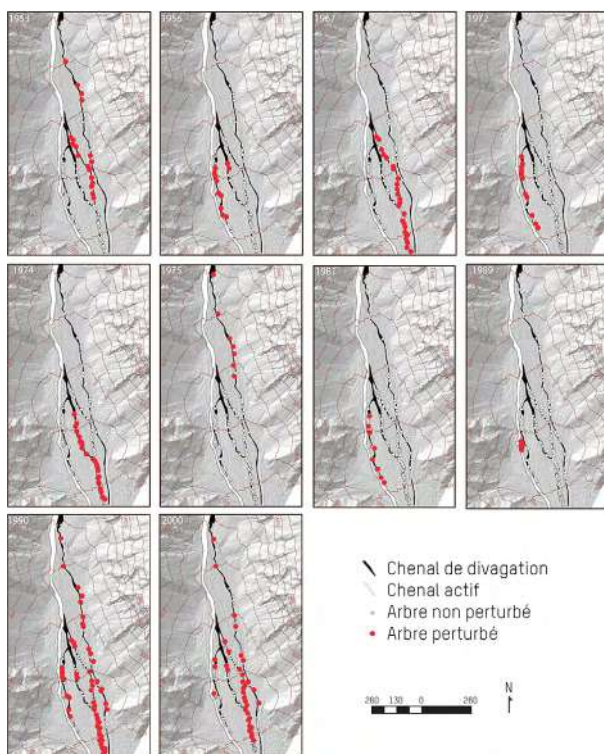


Fig. 25. Croisement entre les derniers événements torrentiels datés par dendrogéomorphologie [A] et l'âge des plus anciens arbres échantillonnés [B] dans le but de reconstituer la période d'inactivité des chenaux de divagation du torrent de la Grosse Grabe [C] (Suisse, d'après Bollschweiler et al., 2008)

Récemment, dans les Alpes françaises, le couplage des données LIDAR avec les résultats issus d'une approche dendrogéomorphologique ont permis de mettre en évidence les phénomènes de divagation d'un torrent alpin et de reconstituer l'extension des laves torrentielles depuis 1953 (Fig.26; Lopez-Saez et al., 2011a).

Fig. 26. Reconstitution de l'extension des laves torrentielles dans les chenaux de divagation du torrent du Manival depuis 1953 (d'après Lopez-Saez et al., 2011a)



Dans les Alpes autrichiennes, Mayer et al. (2010) ont proposé une reconstruction d'écoulements hyper-concentrés couvrant les 200 dernières années. Les auteurs démontrent que les arbres intègrent ces processus même si les matériaux dolomitiques, charriés par l'écoulement, sont de petit diamètre et les dépôts observés sur le cône, de taille décimétrique, au maximum.

En ce qui concerne les avalanches, les cartographies obtenues ont été validées, dans la vallée de Chamonix, par comparaison avec des archives historiques détaillées, disponibles pour des événements d'ampleur exceptionnelle (Fig.27). Ces comparaisons démontrent que les reconstitutions sous-estiment systématiquement la distance d'arrêt des avalanches en raison d'interventions anthropiques ou de l'absence de peuplements forestiers à la base des couloirs avalancheux (Corona et al., 2012). En revanche, la dendrogéomorphologie permet d'affiner l'emprise latérale des événements cartographiés sur les documents réglementaires (carte de localisation des phénomènes avalancheux - CLPA, par exemple).

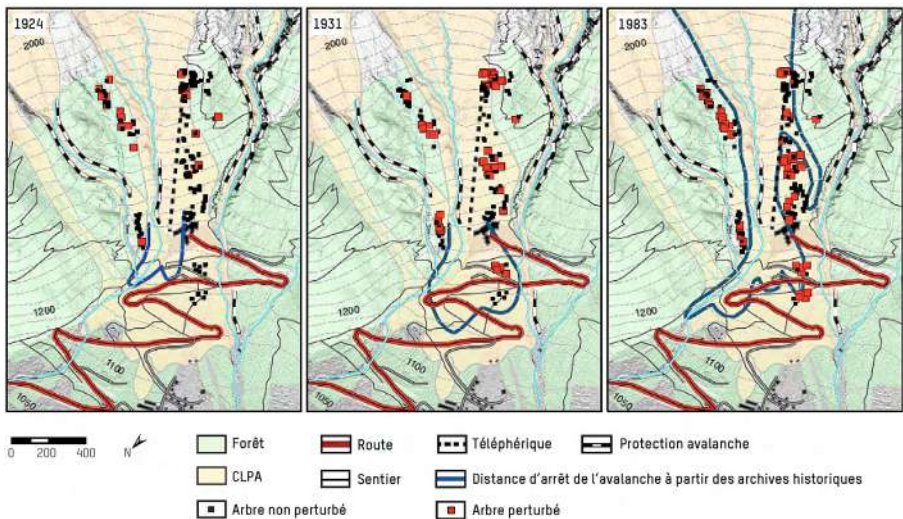


Fig. 27. Reconstitution de l'extension spatiale des avalanches du couloir des Pèlerins (1924, 1931 et 1983) à partir d'une approche dendrogéomorphologique et comparaison avec les distances d'arrêt obtenues à partir des archives historiques (d'après Corona et al., 2012)

Le caractère continu de l'enregistrement des aléas naturels dans les cernes de croissance des arbres permet enfin de déterminer et de cartographier les périodes de retour des différents aléas naturels étudiés.

Dans le cas des glissements de terrain, les chroniques dendrogéomorphologiques issues d'une campagne d'échantillonnage exhaustive (300 arbres échantillonnés) ont été couplées avec un modèle probabiliste (modèle de Poisson) (Lopez-Saez et al., 2013a). Ce couplage permet d'obtenir des cartographies à très grande échelle des probabilités de réactivation pour les 5, 10, 20, 50 et 100 prochaines années. Ces documents (Fig.28 A, B, C, D) sont particulièrement adaptés aux demandes des gestionnaires du fait de leur résolution métrique et de leur dimension prospective. Ce type de cartographie nécessite cependant un échantillonnage exhaustif (>200 arbres) (Corona et al., 2014).

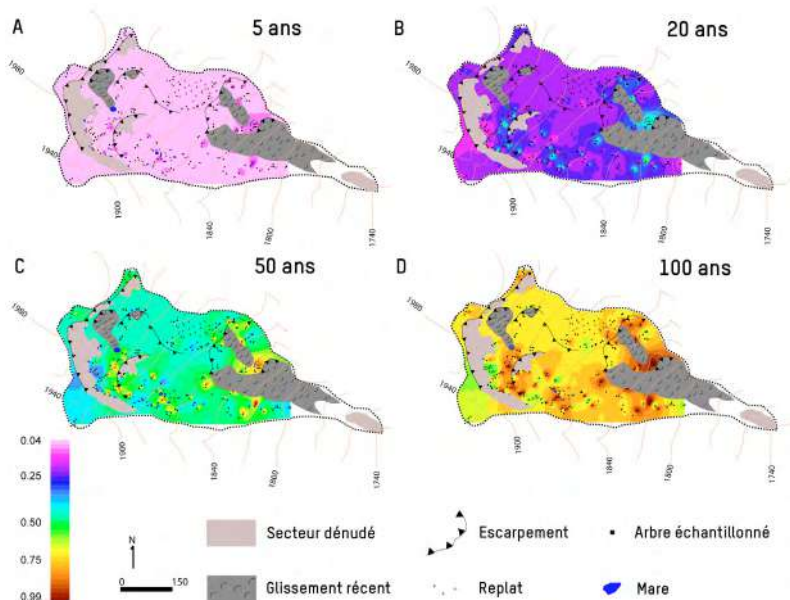
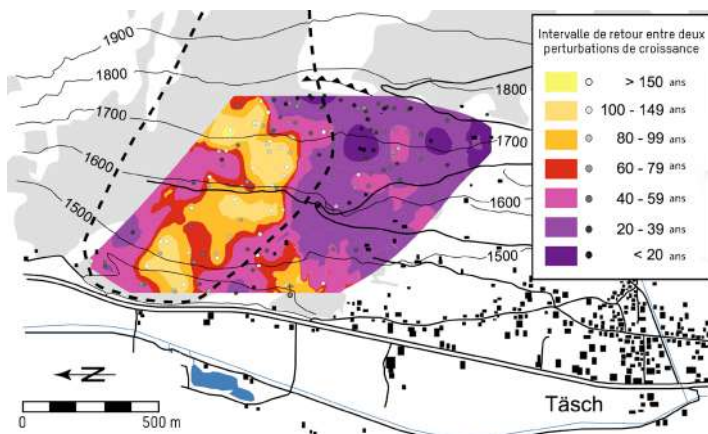


Fig. 28. Probabilité de réactivation du glissement de terrain des Aiguettes au cours des 5, 20, 50 et 100 prochaines années. La probabilité a été calculée au moyen du couplage de l'approche dendrogéomorphologique et d'un modèle probabiliste de Poisson (d'après Lopez-Saez et al., 2013a)

Les premiers travaux portant sur l'emprise spatiale et la période de retour des chutes de pierres ont été réalisés sur le versant du Taschgufer (Alpes suisses). Sur la base d'un échantillonnage exhaustif (270 sections transversales et 564 carottes prélevées sur 135 *Larix decidua*), 741 événements ont été reconstruits depuis 1600 (Stoffel et al., 2005). La cartographie à haute résolution de la période de retour des chutes de pierres met en évidence les trajectoires préférentielles depuis 400 ans (Fig.29). Elle montre une dichotomie très nette entre la partie septentrionale du versant caractérisée par des périodes de retour supérieures à un siècle et la partie méridionale où les chutes de blocs sont très fréquentes (période de retour < 40 ans).

Fig. 29. Cartographie de l'intervalle de retour entre deux chutes de pierres, versant du Tashgufer (d'après Stoffel et al., 2005)



Depuis ces études pionnières, les études se sont focalisées sur les réactions anatomiques de l'arbre suite à des impacts mécaniques des chutes de pierres. Ainsi Stoffel et al. (2005b), puis Schneuwly et Stoffel (2008), ont utilisé les lignes tangentielles de canaux résinifères produites en périphérie des blessures afin de dater l'activité passée des chutes de pierres avec une résolution saisonnière. Cependant, l'échantillonnage exhaustif et l'analyse des sections prélevées sont particulièrement chronophages. Pour pallier cet inconvénient, Trappmann et Stoffel (2012) ont reconstitué la fréquence des chutes de pierres en utilisant l'âge de l'arbre, obtenu par le prélèvement d'une carotte par individu et le nombre de cicatrices identifiées visuellement sur le même individu. Les travaux, réalisés dans une futaie mixte de hêtres et de sapins, ont mis en évidence une sensibilité supérieure du hêtre à l'égard des impacts mécaniques. En effet, des chutes de pierres de faible intensité, suffisantes pour endommager l'écorce très fine du hêtre n'ont pas une énergie suffisante pour atteindre le cambium de *Picea abies* protégé par une écorce plus épaisse. Ces résultats ont été récemment transposés à deux espèces de feuillus, *Quercus pubescens* et *Acer Opalus* (Favillier et al., 2015). La méthode utilisée se base sur la cartographie systématique des arbres (847), le décompte des blessures visibles (1230), l'établissement d'une courbe âge/diamètre et épaisseur de l'écorce/diamètre pour chaque espèce. Les deux espèces reproduisent une décroissance amont/aval similaire aux chutes de blocs (Fig.30A,B). L'intervalle de retour calculé à partir des chênes est cependant supérieur (+20 ans) à celui obtenu en utilisant uniquement les érables (Fig.30C). Cette différence est expliquée par des écorces de structure et d'épaisseur différentes (14 mm en moyenne pour un chêne de 30 cm de diamètre, 4 mm pour un érable de diamètre identique).

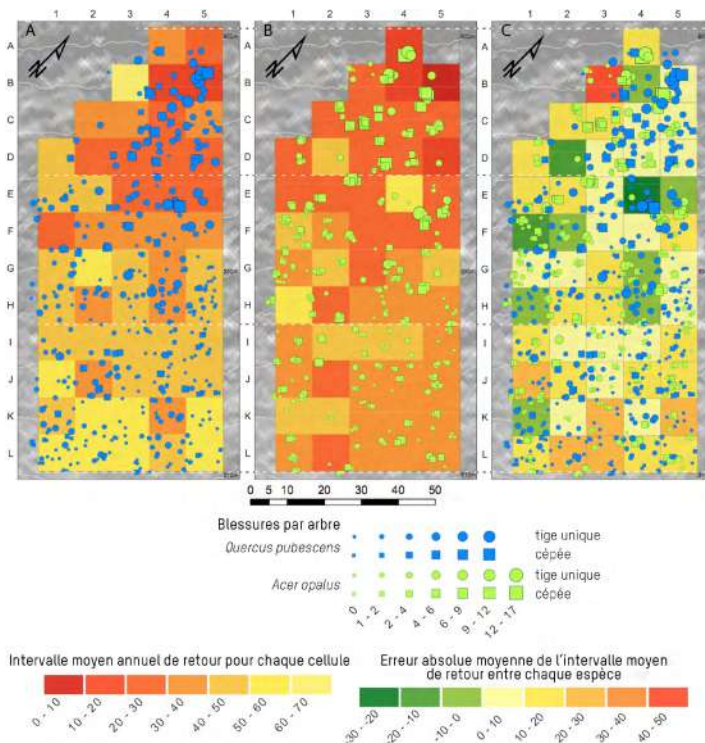


Fig. 30. Intervalle moyen annuel de retour et différence entre chaque espèce d'une chute de pierre enregistré pour le *Quercus pubescens* (A) et *Acer opalus* (B) [d'après Favillier et al., 2015]

3 ■ Facteurs déclenchants et relation avec le climat

Les reconstitutions obtenues au moyen de l'approche dendrogéomorphologique présentent un caractère continu et une résolution saisonnière à annuelle. Elles peuvent donc être comparées aux données climatiques saisonnières à annuelles. Ces comparaisons ont permis de mieux appréhender les relations existant entre les fluctuations du climat et les variations de la fréquence des mouvements de versant.

Les études de Stoffel et al. (2005) dans la vallée de Zermatt (Alpes suisses) ont, par exemple, démontré des fluctuations importantes de la fréquence des chutes de pierres depuis le début du XVIII^e siècle et l'apparition d'événements de plus grande intensité durant des périodes caractérisées par des étés plus chauds [1720, 2013]. La datation mensuelle des événements, grâce aux rangées tangentielles de canaux résinifères, démontre une très nette prédominance des chutes de pierres durant la période de gel-dégel au printemps et une activité beaucoup moins soutenue pendant l'été.

Dans le massif du Queyras, Corona et al. (2013) ont mis en évidence des augmentations de la fréquence des avalanches au début des XVI^e et XIX^e siècle, puis au cours de la décennie 1850-1860. Ces périodes coïncident avec des phases d'avancées glaciaires documentées dans l'arc Alpin et sont caractérisées par des températures hivernales très basses (Fig31).

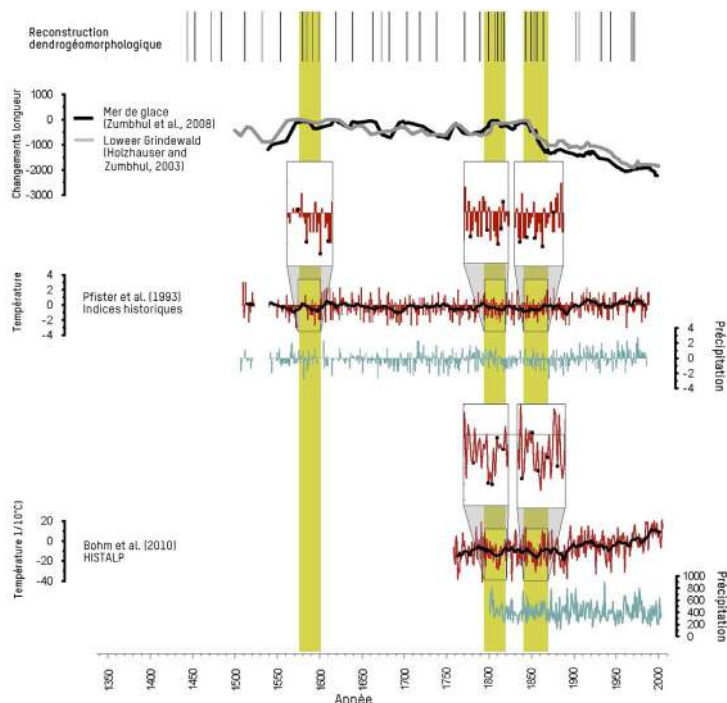


Fig. 31. Comparaison de la reconstruction dendrogéomorphologique avec l'avancée et le recul glaciaire de la Mer de Glace et du Lower Grindewald, des indices historiques de Pfister pour les températures hivernales et les précipitations, et les séries de précipitations et de températures issues de la base de données HISTALP (d'après Corona et al., 2013)

De la même manière, dans le canton du Valais (Alpes suisses), la confrontation des chronologies régionales obtenues en combinant les reconstructions réalisées sur plusieurs torrents avec les données climatiques ont démontré que les changements climatiques passés, récents et futurs ne causaient pas un accroissement de la fréquence des laves torrentielles, mais une augmentation de leur intensité et de leur extension spatiale [Stoffel, 2010].

La comparaison avec les données météorologiques permet également de mieux identifier les facteurs déclenchants. Dans le sud de la France, Astrade et al. (1998) expliquent ainsi que les périodes caractérisées par une fréquence accrue des mouvements de versant sont précédées de plusieurs épisodes pluvieux au cours de l'été et par un cumul de précipitations important durant l'intersaison automne-hiver. Dans la vallée de l'Ubaye (Alpes-de-Haute-Provence), Lopez-Saez et al. (2013b) montrent la concordance entre les phases de réactivation de 7 glissements de terrain, des précipitations abondantes et des températures douces durant les mois d'hiver et de printemps qui précèdent les événements (Fig.32).

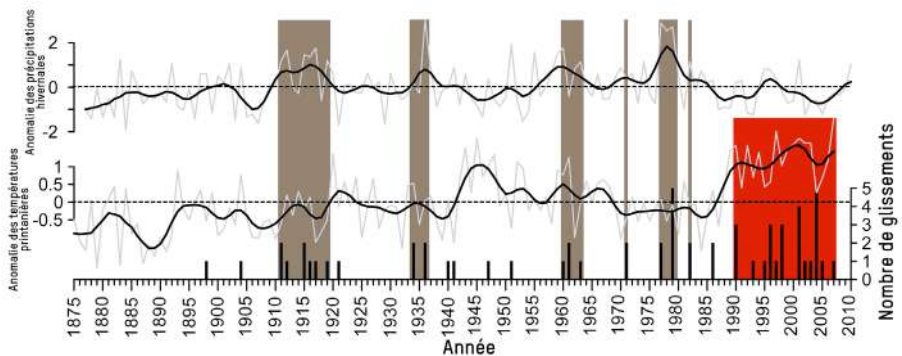


Fig. 32. Comparaison entre la reconstruction de l'activité passée des glissements de terrain et le cumul des précipitations hivernales et les anomalies de températures printanières (d'après Lopez-Saez et al., 2013b)

Pour les avalanches, la comparaison des chroniques reconstituées combinées aux données historiques disponibles et des séries météorologiques a également permis de déterminer les paramètres nivo-météorologiques favorables au déclenchement. En Amérique du Nord, des cumuls neigeux supérieurs à la moyenne expliquent l'occurrence d'avalanches de forte intensité [Reardon et al., 2008]. Ces cumuls de précipitations ont pu être corrélés à des anomalies négatives de l'oscillation décennale du Pacifique (PDO) et de l'oscillation australe El Nino (ENSO). Au Québec, depuis 1950, toutes les années caractérisées par une fréquence avalancheuse élevée coïncident avec des cumuls de précipitations neigeuses supérieurs à la moyenne [Germain et al., 2009].

Les déclenchements sont également favorisés par une fréquence élevée des tempêtes de neige, par l'occurrence d'épisodes pluvieux au cours de l'hiver, par des séquences de pluies verglaçantes associées à des vents violents et par des débuts d'hiver froids et peu enneigés.

Dans la vallée de la Romanche (Alpes françaises), au cours de la période 1961-2005, la probabilité de déclenchement d'une avalanche est significativement corrélée aux cumuls de précipitations de décembre et de janvier et à des températures inférieures à la moyenne en début d'hiver. Cette probabilité est de l'ordre de 4 % pour un cumul de 50 cm, 54 % pour 150 cm et atteint 86 % pour 200 cm [Corona et al., 2010].

4 ■ Développement d'un nouvel indicateur : les racines déchaussées

Assez paradoxalement, les études dendrochronologiques pionnières consacrées à la quantification de l'érosion étaient basées sur l'analyse des cernes de croissance au niveau des racines et non au niveau de la tige. En effet, le déchaussement des racines engendre une croissance excentrique, la formation de bois de réaction et souvent une scarification (présence de cicatrices). Dès les années 1960, ces indicateurs ont été utilisés pour mesurer des taux de dénudation dans différents contextes bioclimatiques (Stoffel et al., 2013).

Lamarche (1984) a par exemple utilisé les racines de *Pinus aristata*, mises à nu par l'érosion aréolaire, comme repères pour reconstituer le niveau du sol. L'année de mise à l'air est déterminée :

- par le passage d'une croissance concentrique à une croissance excentrique ;
- par des cicatrices d'abrasion qui affectent la partie supérieure de la racine dénudée.

En divisant la hauteur de déchaussement par la durée de l'exposition, l'auteur propose ainsi des vitesses d'érosion comprises entre 0,012 et 0,15 mm/an au cours des 3000 dernières années.

De la même manière, Mc Auliffe et al. (2006) ont reconstruit les épisodes de sédimentation et d'érosion sur le plateau du Colorado (Arizona) au cours des 400 dernières années. Leurs résultats démontrent que les anomalies de croissance les plus récentes observées, et notamment les cicatrices d'abrasion dans les racines, coïncident avec une transition d'un climat sec à un climat plus humide.

Par la suite, les racines déchaussées ont été utilisées dans différents contextes, pour quantifier le recul de berges lacustres, estimer des vitesses d'incision liées au ravinement, quantifier l'impact du piétinement animal, notamment. Les travaux récents indiquent que les analyses macroscopiques sont insuffisamment fiables en contexte d'ablation continue, puisque des croissances excentriques, fréquemment associées au processus de dénudation, ont été observées dans des racines souterraines (Stoffel et al., 2013).

Dans ce contexte, les modifications anatomiques importantes qui se produisent suite à l'affleurement constituent le seul indicateur robuste et fiable pour dater la mise à l'air avec une résolution annuelle. Ces changements diffèrent selon les espèces :

- un épaississement et une lignification accrue de la paroi cellulaire, ainsi qu'une réduction très marquée de la surface des trachéides du bois initial, sont observés chez les conifères ;
- chez les feuillus, la mise à l'air induit une augmentation du nombre et de la taille des vaisseaux.

Ces changements peuvent être attribués à un changement de fonction de la racine (passage d'une fonction d'alimentation à une fonction mécanique de maintien de la stabilité) et à une adaptation aux modifications des conditions environnementales (augmentation des amplitudes thermiques, alternances gel/dégel plus fréquentes...) consécutives à la mise à l'air.

Ces modifications anatomiques ont été utilisées dans différents contextes : pour dater le recul des berges dans des chenaux torrentiels, quantifier l'érosion aréolaire engendrée par la fréquentation touristique ou reconstruire les phases d'érosion liées au marnage en contexte lacustre. Corona et al. (2015) ont reconstruit l'évolution du profil de falaises littorales sablo-gréseuses décimétriques (Fig.33) sur le littoral méditerranéen. Les résultats obtenus en utilisant les racines de *Pinus halepensis* concordent avec ceux obtenus à partir de méthodes traditionnelles (photogrammétrie, suivi des falaises au moyen d'un Lidar terrestre).

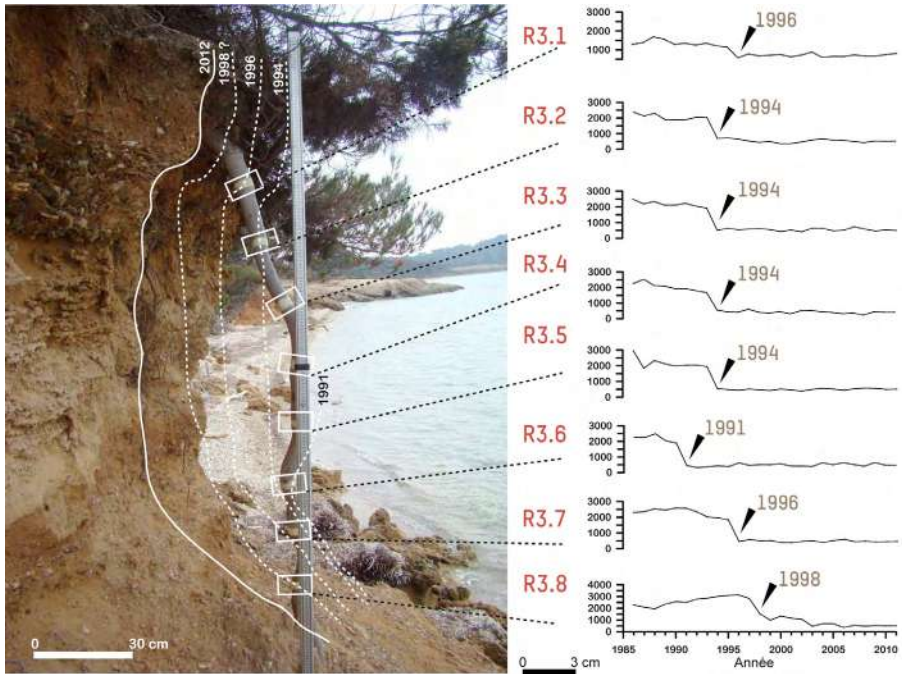


Fig. 33. Exploitation d'une racine déchaussée pour la reconstitution de l'évolution du profil de falaise depuis 1991 [d'après Corona et al., 2015]

En contexte d'ablation continue, des précautions doivent cependant être prises afin d'obtenir une quantification précise de l'érosion. En effet, sur substrat sédimentaire, les modifications anatomiques peuvent survenir alors que la racine est située à quelques centimètres en-dessous de la surface du sol (Corona et al., 2011). Sur badland* marneux, ce biais doit nécessairement être ajusté pour que les vitesses d'érosion obtenues grâce à l'approche dendrogéomorphologique coïncident avec celles obtenues par un suivi micrométrique. À l'échelle du bassin versant, les taux d'érosion moyens, après ajustement, sont comparables à ceux obtenus, par cubage sédimentaire, à l'exutoire (Fig.34; Lopez-Saez et al., 2011b).

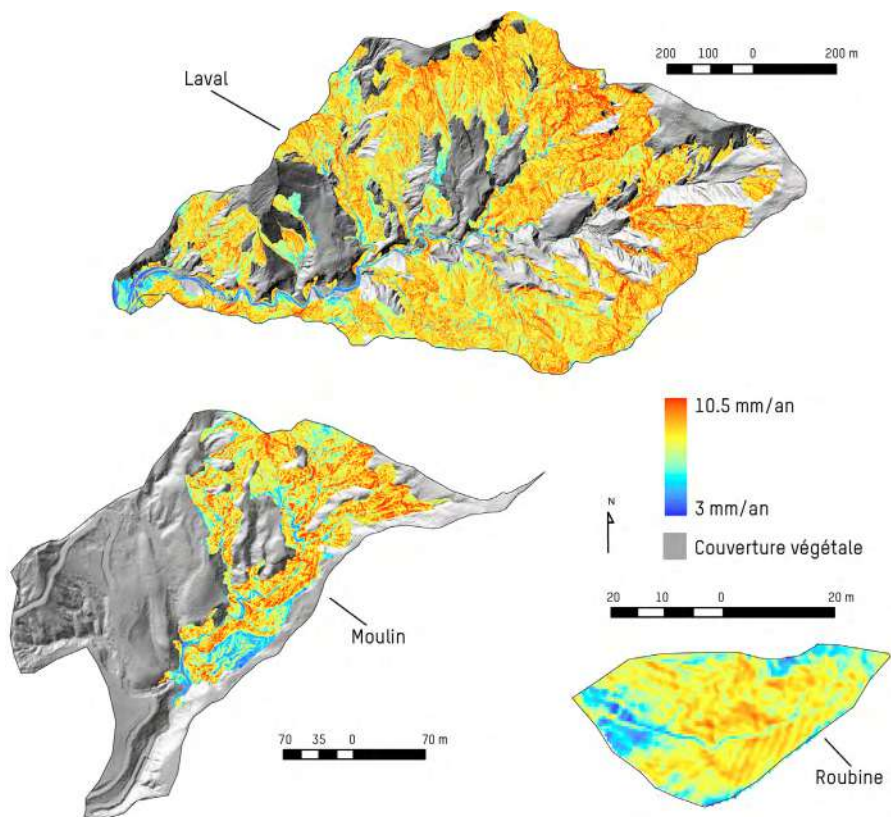


Fig. 34. Cartographies des vitesses d'érosion dans les bassins versants du Laval, Moulin et Roubine (Draix, Alpes-de-Haute-Provence) déduites de l'analyse des racines déchaussées [d'après Lopez-Saez et al., 2011b]

Conclusions et perspectives

La dendroécologie a connu un développement rapide au cours des dernières décennies en raison notamment de l'émergence de nouvelles problématiques environnementales liées, par exemple, au réchauffement du climat et aux pressions accrues sur le milieu naturel.

La dendrogéomorphologie, dérivée de la dendroécologie, est d'un grand intérêt pour la reconstitution et la connaissance des aléas naturels et de la morphogénèse. Il faut cependant garder à l'esprit que les reconstitutions dérivées des cernes de croissance ne sont jamais complètes et représentent une fréquence minima des événements passés. Par exemple, dans les Alpes françaises, Corona et al. (2010, 2012) démontrent que la moitié des événements listés dans l'Enquête Permanente sur les Avalanches (EPA) entre 1951 et 1994 sont reconstitués au moyen de l'approche dendrogéomorphologique. Cette proportion est équivalente à celle obtenue par Reardon et al. (2004) dans les Montagnes Rocheuses. Plusieurs raisons peuvent être avancées pour expliquer ces différences :

- seuls les processus de magnitude et d'extension spatiale suffisantes pour avoir des impacts sur la végétation ligneuse sont reconstruits (McClung et Schaerer, 1993) ; par exemple, les avalanches qui n'atteignent pas la zone boisée ou limitées à la partie centrale d'un couloir, souvent asylvatique, ne peuvent pas être identifiées ;
- un événement majeur peut masquer les traces d'événements antérieurs de plus faible intensité. Une crue centennale qui endommage fortement le peuplement forestier peut ainsi effacer les dommages liés à des événements de récurrence supérieure. De la même manière, un événement de forte intensité, qui détruit le peuplement, ne pourra en aucun cas être reconstruit à partir des cernes de croissance.
- la dendrogéomorphologie ne permet pas la détection d'événements ayant une période de retour infra-annuelle. De ce fait, lorsque plusieurs événements ont lieu la même année, un seul est reconstruit.
- la réponse des arbres à une perturbation de forte intensité peut s'étendre sur plusieurs années, ce qui empêche, durant ce laps de temps, toute détection d'événements ultérieurs ;
- la détection des événements est basée sur l'utilisation de seuils fixés arbitrairement. Ces seuils prennent simultanément en compte le nombre d'arbres endommagés et le nombre d'arbres vivants. Des seuils élevés minimisent le risque d'introduction de bruit dans la reconstruction, mais peuvent également conduire à l'exclusion d'aléas de faible intensité ou limités spatialement (Reardon et al., 2008).
- la reconstruction des événements les plus anciens est complexe du fait du nombre limité d'individus survivants.

Malgré ces restrictions, de nombreuses perspectives de développement existent, tant d'un point de vue méthodologique que scientifique.

1 ■ Sur le plan méthodologique, l'optimisation de l'échantillonnage est une priorité afin de réduire les coûts/bénéfices des analyses. Elle nécessitera la mise en place de stratégies d'échantillonnage précisément stratifiées, couplées à des méthodes statistiques permettant de quantifier l'incertitude dans les reconstructions. De nouveaux indicateurs devront également être recherchés afin d'affiner les reconstitutions. Les travaux réalisés récemment sur la quantification des changements anatomiques suite à des perturbations sur des micro-sections radiales, mais également transversales (Arbellay et al., 2014) ou sur l'apport de la tomographie à rayon X (Stoffel et Klinkmüller, 2013) afin de mieux cerner la réponse des arbres suite à une blessure, vont dans ce sens. De nombreuses espèces, notamment les feuillus ou les ligneux bas, encore rarement étudiées en dendrogéomorphologie, recèlent également un fort potentiel et permettront d'élargir le panel des indicateurs.

2 ■ En matière de recherche fondamentale, les relations entre l'intensité des perturbations et les réponses anatomiques (et chimiques) devront être affinées à l'échelle du cerne de croissance. L'objectif est ici double : il s'agira non seulement d'améliorer la résolution des reconstructions, mais également de reconstruire l'intensité des processus passés en complément de leur fréquence. Des reconstructions devront être produites à l'échelle régionale, sur plusieurs bassins versants ou couloirs avalanches, pour éliminer le bruit lié à des spécificités stationnelles, mais également afin de faire ressortir les variations de fréquence de l'aléa attribuables aux fluctuations du climat et notamment au réchauffement actuel. Afin d'atteindre cet objectif, des reconstructions pluricentennaires, qui intègrent la péjoration climatique du Petit Âge Glaciaire et l'optimum climatique médiéval devront être privilégiées. Des perspectives de reconstruction plus longues existent également en couplant les résultats obtenus à partir des arbres vivants avec ceux dérivés d'arbres fossiles (Miramont et Sivan, 2001).

3 ■ Enfin, les études réalisées sur les différents mouvements de versant ont démontré l'apport la dendrogéomorphologie pour la cartographie des risques naturels. De la même manière, Trappmann et al. (2014) ont récemment montré que des cartographies à grande échelle, utilisables pour un positionnement optimal de futurs ouvrages de protection, pouvaient être produites en couplant les analyses dendrogéomorphologiques et les modèles trajectographiques de chutes de pierres. Les travaux réalisés afin d'améliorer l'échantillonnage (Corona et al., 2014) et de permettre une détermination des périodes de retour à partir d'un examen visuel des tiges (Trappmann et Stoffel, 2013 ; Favilier et al., 2015) permettent d'abaisser les coûts de l'approche. Dans le futur, l'intégration systématique des reconstitutions dans les modèles de propagation et des méthodes encore optimisées de détection des impacts dans les tiges (de type résistographie ou tomographie) faciliteront l'intégration de cette approche dans les projets de zonage à très grande échelle.

Glossaire

- **Angiospermes dicotylédones** : végétaux qui portent des fruits.
- **Badland** : paysage ruiniforme des terrains marnex ou argileux, raviné par les eaux du ruissellement.
- **Cambium** : fine couche de cellules méristématiques située entre le bois et le liber (partie intérieure de l'écorce d'un arbre).
- **Gymnospermes** : plantes dont l'ovule est à nu et est porté par des pièces foliaires groupées sur un rameau fertile (cône).
- **Méristème** : tissu biologique constitué de cellules indifférenciées formant une zone de croissance où ont lieu les divisions cellulaires.
- **Parenchymes** : tissus végétaux constitués de cellules vivantes, qui permettent des communications intercellulaires et une circulation des substances à l'intérieur des cellules.
- **Trachéïdes** : suites de cellules sclérifiées (donc mortes) et vidées de leur contenu pour devenir des capillaires de conduction de la sève brute.
- **Xylème** : constituant des tissus végétaux formé de l'association de vaisseaux, de cellules mortes ou vivantes de soutien et de cellules associées.

Bibliographie

- **Arbellay E., Stoffel M., Sutherland E.K., Smith K.T., Falk D.A.(2014)** – Changes in tracheid and ray traits in fire scars of North American conifers and their ecophysiological implications. *Annals of Botany* 114, 223–232.
- **Astrade L., Bravard J.-P., Landon N. (1998)** – Mouvements de masse et dynamique d'un géosystème alpestre : étude dendrogéomorphologique de deux sites de la vallée de Boulc (Diois, France). *Géographie Physique et Quaternaire*, 52, 153–165.
- **Bollschiweiler M., Stoffel M., Schneuwly D. (2008)** – Dynamics in debris-flow activity on a forested cone: a case study using different dendroecological approaches. *Catena* 72, 67–78.
- **Braam R.R., Weiss E.E.J., Burrough A. (1987)** – Spatial and temporal analysis of mass movement using dendrochronology. *Catena* 14, 573–584.
- **Butler D.R., Malanson G.P. (1985)** – A history of high-1 magnitude snow avalanches, southern Glacier National Park, Montana, U.S.A. *Mountain Research and Development* 5, 175–182.
- **Carrara P.E., O'Neill J.M. (2003)** – Tree-ring dated landslide movements and their relationship to seismic events in south-western Montana, USA. *Quaternary Research* 59, 25–35.
- **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., Rovéra G., Stoffel M., Astrade L., Berger F. (2011)** – High resolution, quantitative reconstruction of erosion rates based on anatomical changes in exposed roots – critical review of existing approaches and independent quality control of results. *Geomorphology*, 125, 433–444.
- **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 Regions Science and Technology*, 74–75, 31–42.
- **Corona C., Lopez-Saez J., 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, 292–304.
- **Corona C., Lopez-Saez J., Stoffel M. (2014)** – Defining optimal sample size, sampling design and thresholds for dendrogeomorphic landslide reconstructions. *Quaternary Geochronology*, 22, 72–84.
- **Corona C., Lopez-Saez J., Rovéra G., Stoffel M., Berger F. (2015)** sous presse – Quantification of cliff retreat in soft coastal rocks using anatomical changes in exposed tree roots. *Earth Surface Processes and Landforms*.
- **Favillier A., Lopez-Saez J., Corona C., Trappmann D., Toe D., Stoffel M., Berger F. (2015)** sous presse. Potential of two submontane broadleaved species to reveal spatio-temporal patterns of rockfall activity. *Geomorphology*.
- **Germain D., Filion L., Hétu B. (2009)** – Snow avalanche regime and climatic conditions in the Chic-Choc Range, eastern Canada. *Climatic Change* 92, 41–167.
- **Hupp C.R., Osterkamp W.R., Thornton J.L. (1987)** – Dendrogeomorphic evidence and dating of recent debris flows on Mount Shasta, northern California. *U.S. Geological Survey Professional Paper* 1396B, 1–39
- **Lafortune M., Filion L., Hétu B. (1997)** – Dynamique d'un front forestier sur un talus d'éboulis actif en climat tempéré froid (Gaspésie, Québec). *Géographie physique et Quaternaire* 51(1), 67–80.
- **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.
- **Lopez-Saez J., Corona C., Gotteland A., Stoffel M., Berger F., Liébault F. (2011a)** – Debris-flow activity in abandoned channels of the Manival torrent reconstructed with Lidar and tree-ring data. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 11, 1247–1257.
- **Lopez-Saez J., Corona C., Stoffel M., Rovéra G., Astrade L., Berger F. (2011b)** – Quantification of aerial erosion rates in marly badland based on anatomical changes in exposed roots and Lidar data, *Earth Surface Processes and Landforms*, 36 (9), 1162–1171.
- **Lopez-Saez J., Corona C., Stoffel M., Berger F. (2013a)** – High-resolution fingerprints of past landsliding and spatially explicit, probabilistic assessment of future activations : Aiguettes landslide, Southeastern French Alps. *Tectonophysics*, 602, 355–369,
- **Lopez-Saez J., Corona C., Stoffel M., Berger F. (2013b)** – Climate change increases frequency of spring landslides in the French Alps. *Geology*, 41, 619–622
- **Mayer B., Stoffel M., Bollschweiler M., Hübl J., Rudolf-Miklau F. (2010)** – Frequency and spread of debris floods on fans: a dendrogeomorphic case-study from a dolomite catchment in the Austrian Alps. *Geomorphology* 118, 199–206.

- **Miramont C., Sivan O. (2001)** – Subfossil trees (*Pinus Silvestris* L.) as evidences of Late Glacial and Holocene climatic changes in Southern Alps (Nord Mediterranean area, France). Colloque international : Past Climate Variability in Europe and Africa, Aix-en-Provence 27-31 août 2001.
- **McAuliffe J.R., Scuderi L.A., McFadden L.D. (2006)** – Tree-ring record of hillslope erosion and valley floor dynamics: landscape responses to climate variation during the last 400yr in the Colorado Plateau, northeastern Arizona. *Global and Planetary Change* 50, 184-201.
- **McClung D., Schaerer P. (1993)** – *The Avalanche Handbook*. The Mountaineers, Seattle, 271 p.
- **Reardon B.A., Fagre D.B., Steiner R.W. (2004)** – Natural avalanches and transportation: a case study from Glacier National Park, Montana, USA. *International Snow Science Workshop*, Jackson, 582-597.
- **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 Glaciers National Park, Montana, USA. *Arctic, Antarctic and Alpine Research* 40, 148-160.
- **Schneuwly D.M., 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 Sciences* 8, 203-211.
- **Stoffel M., Lièvre I., Conus D., Grichting M.A., Raetzo H., Gärtner H.W., Monbaron M. (2005)** – 400 years of debris flow activity and triggering weather conditions: Ritigraben VS, Switzerland. *Arctic, Antarctic and Alpine Research* 37, 387-395.
- **Stoffel M. (2006)** – A review of studies dealing with tree rings and rockfall activity: the role of dendrogeomorphology in natural hazard research. *Natural Hazards* 39, 51-70.
- **Stoffel M., Beniston M. (2006)** – On the incidence of debris flows from the early Little Ice Age to a future greenhouse climate: a case study from the Swiss Alps. *Geophysical Research Letters* 33, L16404.
- **Stoffel M., Conus D., Grichting M.A., Lièvre I., Maître G. (2008)** – Unraveling the patterns of late Holocene debris-flow activity on a cone in the Swiss Alps: chronology, environment and implications for the future. *Global and Planetary Change* 60, 222-234.
- **Stoffel M. (2010)** – Magnitude-frequency relationships of debris flows: a case study based on field surveys and tree-ring records. *Geomorphology* 116, 67-76.
- **Stoffel M., Klinkmüller, M. (2013)** – 3D analysis of anatomical reactions in conifers after mechanical wounding: first qualitative insights from X-ray computed tomography. *Trees – Structure and Function* 27: 1805 – 1811.
- **Stoffel M., Corona C., Ballesteros Canovas J. A., Bodoque del Pozo J. M. (2013)** – Dating and quantification of erosion processes based on exposed roots. *Earth-Science Reviews* 123, 18-34.
- **Strunk H. (1997)** – Dating of geomorphological processes using dendrogeomorphological methods. *Catena* 31, 137-151.
- **Trappmann D., Stoffel M. (2012)** – Counting scars on tree stems to assess rockfall hazards: A low effort approach, but how reliable? *Geomorphology* 180, 181:180-186.

Conception et réalisation

Nicole Sardat

Infographiste et responsable de communication ■ Irstea, Centre de Grenoble

Photographies

©Jérôme Lopez-Saez et Christophe Corona

