

*Tests de méthodes dendrogéomorphologiques
pour l'analyse de phénomènes naturels*



Jérôme Lopez Saez, Cemagref, Institut de Géographie Alpine

Philippe Schoeneich, Institut de Géographie Alpine

Frédéric Berger, Cemagref

Christophe Corona, Institut de Géographie Alpine

I. RESUME ET RAPPORT D'ACTIVITE

Le projet initialement présenté comportait plusieurs volets. Le PGRN n'ayant accordé qu'une partie du crédit demandé, nous avons été amenés à recentrer le projet sur un volet principal méthodologique (développement et mise au point de méthodes dendrogéomorphologiques) et un volet d'équipement (station météo sur les sites de l'Harmalière et d'Avignonet).

Volet dendrogéomorphologique

Ce volet du projet a été réalisé au CEMAGREF (UR EM), principalement au travers d'un stage (2 mois) de Jérôme Lopez-Saez, au cours du printemps 2007. Le travail a en outre bénéficié de l'apport bénévole, non prévu au départ, de Christophe Corona, ex-doctorant qui a soutenu en février 2007 une thèse utilisant notamment la dendrogéomorphologie pour l'étude des dynamiques de cônes d'éboulis et de cônes mixtes en Oisans.

Le premier objectif du stage était de mettre en œuvre un certain nombre d'équipements récemment acquis par le CEMAGREF dans le but d'instaurer une chaîne d'analyse de données dendrologiques. Ces matériels sont:

- un banc de mesure micrométrique, pour la mesure de précision des cernes;
- un tomographe acoustique, pour l'imagerie de l'état du bois;
- un résistographe, pour la mesure in situ des variations de densité du bois.

Pour les deux derniers appareils, il s'agissait notamment de tester leur adéquation pour l'étude dendrogéomorphologique. Le test a été mené sur des arbres témoins d'essences diverses, en vue d'étudier les résultats potentiels et les conditions d'utilisation.

Les tests préliminaires avec le tomographe ont montré que ce dispositif donnait des images trop grossières et n'était pas adapté à l'étude dendrogéomorphologique. Son usage a donc été abandonné et les résultats préliminaires seront présentés ici. Les essais du résistographe étant concluants, il a été décidé de poursuivre son utilisation en comparaison et en complément avec la méthode dendrogéomorphologique classique.

Le second objectif de l'étude était d'explorer le potentiel des méthodes dendrogéomorphologiques pour la reconstitution de l'activité de phénomènes naturels, en particulier de mouvements de terrain. Vu l'ampleur du sujet et le temps limité disponible, l'étude s'est concentrée sur les points suivants:

- les résultats préliminaires obtenus sur le glissement de l'Harmalière par Jérôme Lopez-Saez pendant son mémoire de master ont été repris et affinés. Ces résultats obtenus par la méthode dendrogéomorphologique classique par carottage font l'objet de la première partie du rapport scientifique;
- pour l'utilisation du résistographe, il a été décidé de faire porter l'étude sur un cône d'avalanches de l'Oisans. La comparaison du résistographe et de la méthode dendrogéomorphologique classique nécessitait en effet de disposer de rondelles de troncs, qui n'étaient disponibles qu'en nombre trop limité pour le glissement de l'Harmalière. De plus, du fait de l'essence utilisée (*Pinus sylvestris*) et de l'activité quasi constante de ce glissement (résultant en un rapport signal/bruit défavorable), ce site ne paraissait pas adéquat pour une étude préliminaire. La participation de

Christophe Corona au projet a permis de disposer d'un échantillon de rondelles provenant d'un cône d'avalanches, sur lequel la méthode classique avait permis d'obtenir des résultats concluants. Bien que ce choix nous éloignait de la thématique affichée du projet (qui portait sur les glissements de terrain), il nous paraissait justifiable vu le caractère méthodologique et exploratoire du projet. Les résultats de la méthode résistographique font l'objet de la deuxième partie du rapport scientifique;

- des essais avec la méthode résistographique ont ensuite été menés aussi sur le glissement de l'Harmalière, et montrent le potentiel de l'outil dans ce contexte également. Les résultats sont toutefois trop partiels et préliminaires pour être présentés dans ce rapport. Ce volet sera poursuivi dans le cadre de la thèse de Jérôme Lopez-Saez (voir ci-dessous).

Volet équipement météo

Dans le projet, il était initialement prévu d'acquérir une station météo légère, à installer sur les sites d'observation de l'Harmalière/Avignonet dans le Trièves, dans le cadre de l'observatoire MOUVARGI d'Envirhonalp.

Une station de même type (Davis Vantage Pro) était en service depuis 2004 dans la Combe de Laurichard à 2700 m d'altitude et semblait donner satisfaction. Après deux ans de fonctionnement sans incident, des dysfonctionnements sont toutefois apparus en hiver 2006 (arrêt de l'enregistrement, dégradation des boîtiers, ...). Avant d'acquérir une station identique pour le Trièves, nous avons donc voulu connaître les causes des problèmes, ce qui a impliqué un démontage et des tests de la station du Laurichard, réalisés au printemps 2007. Les problèmes de cette station se sont avérés être dus essentiellement aux conditions très rudes du site, situé en altitude, et ne mettent donc pas en question l'usage d'une telle station dans les conditions du Trièves.

Entretemps, le LGIT avait installé une station identique, acquise sur ses propres fonds, sur le site d'Avignonet. Il n'était donc pas utile d'acquérir une deuxième station pour le même site. Au cours de l'année 2007, la station de mesure du LGIT (météo, DGPS et sismographe) a été vandalisée par deux fois, avec notamment un vol des panneaux solaires. Après discussion et en accord avec le LGIT, il a donc été décidé d'utiliser ce volet du crédit PGRN pour compléter l'équipement de la station du LGIT au Mas d'Avignonet:

- d'une part pour sécuriser la station (pose d'une clôture, modification de l'alimentation électrique);
- d'autre part pour compléter la mesure des paramètres nécessaires au calcul du bilan hydrique, à savoir: un suivi du couvert neigeux par caméra automatique, et un capteur foliaire d'évapotranspiration.

Ces compléments d'équipement sont en cours de commande et devraient être installés d'ici l'été 2008.

Bilan et perspectives

L'objectif principal de ce projet était d'initier une collaboration entre l'IGA et le CEMAGREF dans le domaine de la dendrogéomorphologie, appliquée aux glissements de terrain.

Le projet a permis d'accueillir un étudiant de niveau master et un docteur de l'IGA en stage au CEMAGREF, et d'optimiser l'utilisation de la chaîne opérationnelle dendrologique au CEMAGREF. Le stage a permis aussi de finaliser une demande de financement de thèse auprès de la Fondation MAIF (projet *DendroGliss*, thèse de Jérôme Lopez-Saez), financement obtenu en décembre 2007 (début probable de la thèse en mars 2008). Le travail va donc pouvoir continuer dans le cadre de cette thèse, qui sera réalisée en partenariat IGA-CEMAGREF (co-direction Philippe Schoeneich / Frédéric Berger). Les objectifs de cette thèse se situent dans le prolongement direct du présent projet, à savoir:

- développer le potentiel de la méthode dendrogéomorphologique pour la reconstitution de l'activité récente de glissements de terrain (à l'échelle de 1-2 siècles);
- tester différentes méthodes et différents paramètres de mesure sur diverses essences d'arbres dans divers contextes de glissement;
- reconstituer l'historique d'un certain nombre de cas d'étude.

Le projet financé par le PGRN a donc pleinement joué son rôle de catalyseur pour le démarrage d'une collaboration et de réponse à un appel d'offre. Au-delà du partenariat IGA-CEMAGREF, d'autres initiatives se mettent en place, notamment au laboratoire EDYTEM de l'Université de Savoie (sous l'impulsion de Laurent Astrade, par ailleurs partenaire du projet MAIF) ou au CEREGE à Aix (où Christophe Corona effectue actuellement un post-doc). C'est donc une véritable dynamique régionale, voire nationale qui est en train de se mettre en place autour du développement des méthodes dendrogéomorphologiques, et une communauté de chercheurs est en train de se structurer autour du pôle Grenoble-Chambéry.

Production scientifique du projet

- Lopez Saez Jérôme, Corona Christophe, Berger Frédéric, Dorren Luuk (soumis). Utilisation de la résistographie pour l'évaluation de la densité des cernes de croissance: apports pour la détection dendrogéomorphologique des impacts avalancheux. Article soumis aux *CRAS*.
- Lopez Saez Jérôme, Corona Christophe, Berger Frédéric (2007). *Use of resistograph for dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts*. Poster présenté au colloque SISSEF de Trento.
- Lopez Saez Jérôme, Corona Christophe, Berger Frédéric (2008). *Use of resistograph for dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts*. Poster présenté à l'EGU 2008, session *Tree-Ring Reconstructions in Natural Hazards Research*, 13-18 avril 2008, Vienne.

II. RAPPORT SCIENTIFIQUE

Le crédit obtenu par le Cemagref (soit 2000 euros), a été utilisé pour accueillir et encadrer un stagiaire sur la problématique de l'utilisation de la dendrogéomorphologie dans le contexte des glissements de terrain. Les travaux de recherche ont été axés sur l'utilisation des matériels de mesure qu'a récemment acquis l'unité de recherche Ecosystèmes montagnards. Il s'agit d'un résistographe et d'un scanner acoustique, le tomographe. Ces deux mois de recherche ont permis de comprendre le fonctionnement de ces nouveaux outils et de mettre en place une nouvelle méthode de diagnostic de l'activité de ce risque et de celui des avalanches. L'utilisation du résistographe a été testée à des fins dendrogéomorphologiques pour tenter de mettre en évidence une réponse densitométrique particulière des cernes diagnostics. Pour des raisons techniques, les sites d'étude où a été testé le résistographe sont le glissement de l'Harmalière et un dépôt avalancheux se situant dans le massif de l'Oisans. Ce dernier site a fait l'objet d'une étude dendrogéomorphologique réalisée dans le cadre d'une thèse soutenue en 2007 par Christophe Corona. Ces travaux de recherche ont abouti à la rédaction d'un article soumis aux CRAS, d'un article en cours de rédaction qui sera soumis à Natural Hazard, d'un poster présenté au colloque SISSEF de Trento 2007 et d'un poster pour l'EGU 2008.

Introduction

La dendrochronologie (du grec: dendron = arbre, chronos = temps, logos = étude) est une méthode de datation qui se base sur les arbres et qui, grâce aux cernes de croissance de ces derniers, permet de les dater. Cette méthode peut être utilisée dans toutes les régions où la croissance des arbres est rythmée par les saisons et, ainsi, toutes les essences d'arbres produisant des cernes annuels de croissance sont analysables. Cette science s'applique à divers domaines. La dendrochronologie englobe ainsi plusieurs disciplines utilisant les cernes datés pour étudier des phénomènes tels que le climat, l'archéologie, les mouvements des glaciers, l'environnement, l'eau, les feux de forêt et les processus géomorphologiques.

Les cernes annuels de croissance des arbres constituent donc le point de départ de la dendrochronologie. En règle générale, l'arbre produit chaque année un anneau dont la largeur varie en fonction de nombreux facteurs. L'analyse d'une section d'un tronc ou d'un échantillon permet de connaître les conditions dans lesquelles l'arbre a grandi, puisque la succession des cernes, du cœur à l'écorce, retrace toute la vie du végétal. «Le rythme de croissance de chaque bois est donc une sorte de curriculum vitae, une véritable mémoire qui retrace les événements ayant affecté la vie de l'arbre au cours du temps» [29]. A partir de l'échantillon prélevé, on obtient une séquence de cernes qui est ensuite comparée à une courbe de référence datée, ce qui permet d'obtenir une datation de l'arbre.

La dendrogéomorphologie, une des branches de la dendroécologie, utilise les perturbations de croissance des arbres pour identifier et reconstituer les processus géomorphologiques influençant la croissance des arbres. Leur étude permet donc d'établir une frise historique du processus géomorphologique étudié.

Le présent rapport décrit, tout d'abord, les principes de la dendrogéomorphologie et de son utilisation. Nous verrons par la suite les principaux résultats obtenus lors de l'étude dendrogéomorphologique sur le glissement de l'Harmalière. Enfin, nous décrirons la nouvelle méthode développée à partir de l'utilisation du résistographe pour interpréter et cartographier les avalanches.

1. Principes de la dendrogéomorphologie

La dendrogéomorphologie est une science qui interprète et date des processus géomorphologiques à l'aide de la dendrochronologie. Chaque processus géomorphologique, de par sa nature, a une influence spécifique sur le développement des arbres et a des conséquences déterminées sur la croissance de ces derniers. Ces influences sont enregistrées dans les cernes de croissance. De ce fait, l'analyse des cernes permet, dans une certaine mesure, de reconnaître les événements géomorphologiques qui ont touché l'arbre et de les dater. Si la naissance de l'arbre est antérieure au début du phénomène, on peut suivre l'évolution de ce dernier et de son influence sur l'arbre au cours du temps.

1.a. L'influence des processus géomorphologiques sur les arbres [46]

Les processus géomorphologiques qui affectent un tronc d'arbre agissent comme des facteurs écologiques, soit directement, soit indirectement. Ces facteurs sont de diverse nature: ils sont mécaniques (tensions, compressions ou changement de forme du tronc dus à des stress imposés à l'arbre, ...), édaphiques (effet de l'apport de sédiments dans l'atmosphère, variations des températures, érosion, déposition, eau, ...).

Ces facteurs ont des effets sur les arbres: en réponse aux événements qui l'affectent, l'arbre réagit. Constamment, il doit s'adapter à son environnement qui évolue. Les réactions de l'arbre varient selon l'effet induit par le processus géomorphologique. Elles sont visibles à plusieurs niveaux:

- les branches: l'arbre forme de nouvelles pousses s'il veut modifier la direction dans laquelle il croît;
- les racines;
- le cambium: il peut accélérer ou ralentir la croissance de l'arbre;
- les cellules vivantes: elles peuvent, si besoin est, former de nouvelles substances comme le bois de réaction;
- les cellules mortes: elles peuvent expliquer les raisons de la mort de l'arbre;
- la décomposition du bois: la façon dont le bois se décompose après sa mort donne des informations sur les conditions auxquelles le bois a été exposé après la mort de l'arbre.

Dans les sites géomorphologiquement actifs, de telles réactions peuvent être observées. Toutefois, il est souvent difficile d'associer un type de réaction à un processus, car de nombreux processus ont les mêmes effets sur les arbres et ces derniers y réagissent de la même manière. C'est donc l'interprétation du contexte géomorphologique qui permet l'identification du processus.

1.b. L'effet des glissements de terrain. [9]

Avant de présenter les différentes méthodes utilisées pour dater les glissements de terrain, il est nécessaire de noter que les glissements sont des processus géomorphologiques très complexes et diversifiés.

Figure 1. Les réactions de l'arbre face aux glissements

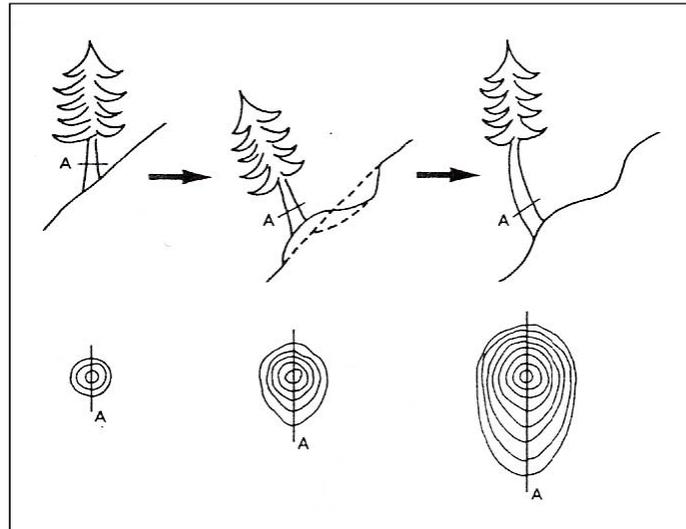


Illustration tirée de :R.R Braam, E.E.J. Weiss et P.A. Burrough :Spatial and temporal analysis of mass movement using dendrochronology, Catena, 1987.

L'arbre réagit à un glissement de terrain qui tend à l'incliner vers l'aval en se redressant: il adapte sa position à la pente qui évolue. Il cherche donc à retrouver une pousse verticale et rectifie ainsi son inclinaison peu favorable à sa stabilité. L'inclinaison peut être due à différents facteurs écologiques comme le vent, l'eau et la neige ou à des processus géomorphologiques comme les mouvements de masse ou les avancées glaciaires. La présence d'arbres courbés n'est donc pas forcément un indice d'une instabilité du terrain. On ne peut donc pas corréler arbre courbé et glissement de terrain. Par contre, dans une région où les arbres poussent à la verticale, on peut certifier qu'il n'y a pas de glissement et qu'il n'y en a pas eu depuis l'implantation desdits arbres.

Sur les zones reconnues instables, l'observation et l'analyse de troncs d'arbres permettent d'obtenir des informations temporelles et spatiales précieuses sur les mouvements. Comme nous l'avons vu, un arbre situé dans une zone glissée est courbé, mais il tend à se redresser.

Ces effets sont directement visibles sur la partie externe de l'arbre. Extérieurement, on observe donc un « coude » plus ou moins fort du tronc de l'arbre qui cherche à retrouver une position plus verticale. Il est donc possible d'estimer la direction d'un glissement ainsi que son amplitude. En effet, la direction dans laquelle l'arbre est incliné correspond à la direction du glissement. Sa force est visible grâce à l'aspect de la courbure : plus le coude est accusé, plus la déstabilisation subie par l'arbre a été importante. On peut aussi repérer le nombre d'inclinaisons et leur position relative sur le tronc. Les « réponses » de l'arbre à ces effets causés par l'instabilité sont visibles dans la partie interne du tronc, c'est à dire au niveau de ses anneaux de croissance : interruption ou régression de la croissance, formation de bois de compensation.

Les glissements peuvent produire d'autres effets encore sur les arbres : mise au jour des racines, dommages sur le tronc, tronc partiellement enterré, déracinement de l'arbre, etc.

Figure 2 : Illustrations d'effets liés au glissement de terrain de l'Harmalière.

Photos illustrant les effets liés au glissement de terrain de l'Harmalière

(Jérôme Lopez Saez, 2006)



Illustration 1: courbure de l'arbre

Illustration 2: rejets de l'arbre



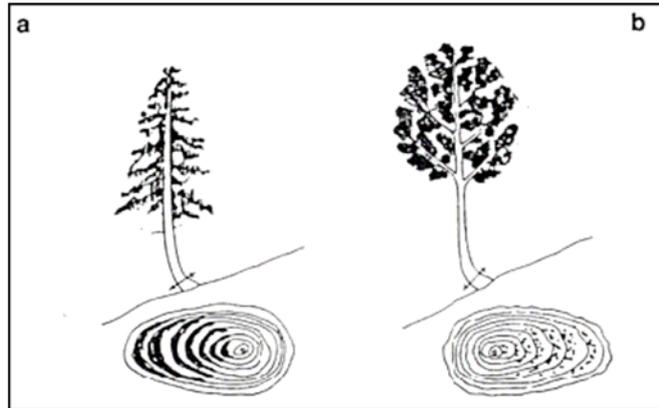
Illustration 3: mise au jour des racines

L'étude des cernes permet d'obtenir des informations plus précises que la simple observation extérieure de l'arbre. Elle permet de dater le glissement et de reconstituer son évolution. Pour pouvoir se redresser, l'arbre doit former du bois de réaction ou de compensation, d'un côté du tronc. Ce bois est spécial: il est formé de cellules à structure particulière et sa densité est en général forte. Son apparition entraîne un changement de la forme du tronc. Le cœur de l'arbre va s'excentrer et les cernes vont se développer, non plus de façon symétrique, mais asymétrique. La section du tronc devient ovale. Suivant l'intensité du glissement, l'arbre doit former plus ou moins de bois de compensation pour se redresser et son cœur s'excentre plus ou moins fortement. Le bois de réaction est différent chez les conifères (gymnospermes) et les feuillus (angiospermes). Ce bois est appelé bois de compression chez les conifères; il se forme typiquement dans la partie inférieure des branches et sur le côté situé en aval des troncs. Il doit son nom au fait qu'il se forme sur le côté comprimé du tronc. Il est de couleur jaune rouge. Chez les feuillus, le bois de réaction est nommé bois de tension, car il se forme sur la partie tendue des branches et du tronc; on le trouve sur le côté amont du tronc. Sa couleur est jaune gris.

Figure 3 : La formation de bois de réaction [16].

A: conifère : bois de compression formé en aval.

B : feuillus : bois de tension formé en amont.



Pour résumer, nous pouvons dire que les principaux effets des instabilités de terrain que l'on peut observer sur les arbres sont : l'inclinaison plus ou moins forte du tronc, la formation de bois de réaction, l'excentricité du cœur de l'arbre et la mise au jour des racines. Mais l'étude d'un tel processus est rendue plus complexe par deux phénomènes.

Le premier est le fait que tous les arbres affectés par le même glissement réagissent différemment. En effet, il est important de réaliser que chaque arbre produit sa propre réaction à un glissement, suivant son système racinaire (superficiel ou en profondeur), son essence, son âge, etc. Les arbres dont les racines sont petites, superficielles et peu épaisses sont très sensibles aux mouvements de terrain: ils sont moins stables car moins bien ancrés dans le sol. Au contraire, les arbres dont les racines sont profondes et solides sont plus résistants et ils sont même capables de limiter les effets d'un glissement de terrain superficiel.

Le second est qu'il existe une multitude de glissements différents et que chaque type a un effet spécifique sur la croissance des arbres:

- Sur un glissement rotationnel: les arbres sont penchés vers l'arrière et présentent une courbure face à l'amont. L'angle de courbure de l'arbre permet d'estimer l'ampleur de la rotation. Ce type de glissement peut casser les arbres.
- Sur un glissement translationnel: dans certains cas, les arbres peuvent se déplacer sur la surface de glissement en subissant peu de perturbations, si le terrain bouge en masse.
- Sur un glissement coulée: à l'endroit du départ de la coulée, les racines des arbres non emportés sont mises au jour et le tronc s'incline; des arbres sont déracinés et emportés par la masse qui glisse ; à l'endroit de l'accumulation de la masse glissée, les arbres sont partiellement ou entièrement recouverts: les racines sont privées d'oxygène et l'arbre sèche.

2. Méthode de la dendrogéomorphologie

Vu les différents types de glissements existants et leurs effets sur les arbres, il existe plusieurs méthodes pour dater un glissement. Comme nous l'avons vu, une observation de base du tronc des arbres concernés permet d'avoir une idée générale de l'ampleur, de la direction et de la force du glissement. La méthode à employer dépend du type de glissement en présence, ainsi que des échantillons à disposition.

2.a. La dendrochronologie : dater la mort des arbres pour dater le glissement [45]:

Dans l'approche dendrochronologique classique, on se contente de dater la mort d'arbres sub-fossiles, enfouis dans la masse glissée, ou des sols fossiles recouverts par le glissement ou intercalés dans la masse glissée [45]. Cette méthode permet de dater des événements importants tels que la phase initiale d'un glissement, des phases paroxysmiques, ou des événements de type coulées de boue.

Combinée avec la méthode du C^{14} , elle présente l'avantage de permettre la datation d'événements anciens, elle ne permet pas par contre de retracer l'évolution à court et moyen terme de l'activité «normale» d'un glissement.

Il est fréquent de retrouver des troncs lors de fouilles: ces derniers sont bien conservés et datables selon certaines conditions. En effet, ces troncs ne sont utilisables que si leur position dans le glissement est claire:

- si le bois se trouvait en aval du glissement et qu'il a été pris dans la masse au moment de l'avancée du glissement, on peut obtenir des renseignements sur la progression du glissement, puisque qu'on obtient pour chaque lieu de prélèvement la date du recouvrement;
- si le bois fait partie d'un plan de glissement secondaire, on peut obtenir des informations sur ce plan de glissement;
- si le bois est simplement incorporé à la masse sans que sa position soit spécifique, la date obtenue est peu interprétable.

On comprend donc bien l'importance que revêt la situation initiale du tronc puis sa position par rapport au glissement dans la datation.

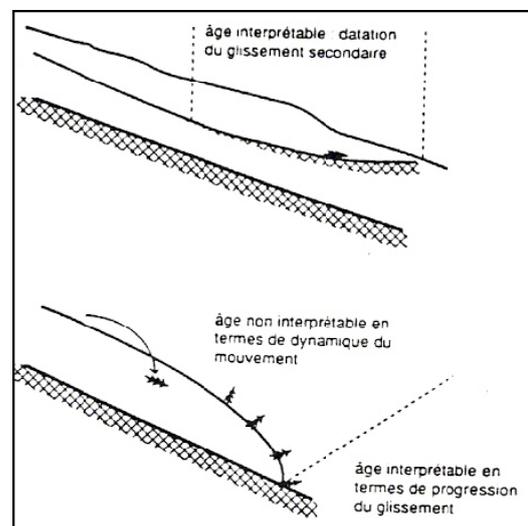


Figure 4 :

Illustration tirée de : Ph. Schoeneich. La datation des glissements de terrain, 1992.

Dans le cas d'un glissement catastrophique, tous les arbres retrouvés ont été emportés au même moment par la masse en mouvement. Dès lors, la date de la mort de tous les arbres est identique et elle correspond au moment où la coulée s'est mise en mouvement. Il s'agit donc de prélever des échantillons et de les positionner sur la courbe de référence correspondante pour obtenir l'âge de la mort des arbres et du déclenchement du glissement.

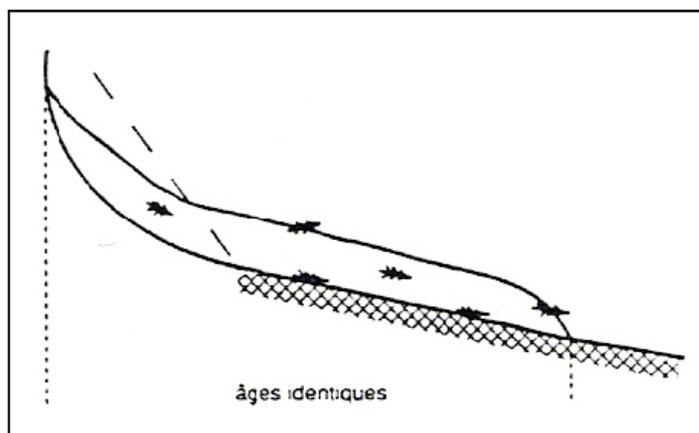


Figure 5 : Glissement catastrophique. Illustration tirée de : Ph. Schoeneich : La datation des glissements de terrain, 1992.

Si plusieurs glissements successifs ont eu lieu, il est possible d'identifier ces différentes phases sur la base des âges de mort des arbres : si on obtient deux groupes de troncs ayant des âges différents, on peut dire qu'il y a eu deux phases successives et les dater.

2.b. Les méthodes utilisées en dendrogéomorphologie.

Puisque la dendrogéomorphologie n'est qu'une application à un domaine particulier de la méthode de datation dendrochronologique, l'idée de base est identique: le principe général est de prendre des mesures sur des arbres ayant été affectés par des processus géomorphologiques, de même que des mesures sur des arbres «sains» et non affectés par ces processus. Il est nécessaire de construire une chronologie individuelle pour chaque arbre, puis d'établir des chronologies locales et régionales. Pour dater l'arbre, on compte les cernes: le nombre de cernes équivaut à l'âge de l'arbre. Afin d'éliminer les erreurs d'encodage, on compare la séquence à la chronologie et on la positionne de manière à dater l'échantillon. A partir de là, des méthodes plus spécifiques aux différents effets liés aux processus géomorphologiques sont utilisées.

2.b.1. Méthode basée sur l'inclinaison de l'arbre et l'excentricité du tronc :

Grâce à l'excentricité du tronc et à la formation du bois de réaction dus à l'inclinaison de l'arbre, il est possible de dater le processus géomorphologique qui a induit ces changements dans la croissance de l'arbre. Simplement en comptant le nombre d'anneaux excentrés, il est possible de dater le début du phénomène s'il est postérieur à la naissance de l'arbre. Dans le cas d'un glissement, la date de l'inclinaison correspond plus ou moins à la date du début de la mise en mouvement. Si ce dernier apparaît avant le début de la période végétative, l'inclinaison est visible la même année, alors que s'il débute après la période végétative, l'effet ne sera observable que l'année suivante.

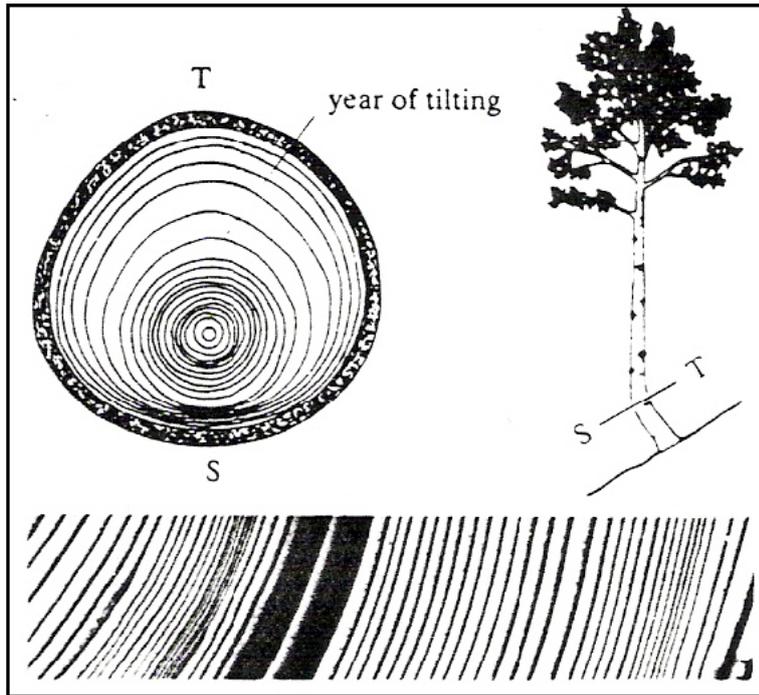


Figure 6: Illustration tirée de M. Kaennel et F.H. Schweingruber : Multilingual glossary of dendrochronology, 1995.

En outre, il est possible de suivre l'évolution du processus géomorphologique concerné en se basant sur les changements d'excentricité et de formation de bois compensation. B. Denneler [16], dans son travail de diplôme, propose une méthode basée sur le bois de compensation. Les variations de formation de ce bois ainsi que son apparition et sa disparition donnent des indications sur le moment où le glissement a débuté et sur son évolution. Ceci permet donc de reconstituer des mouvements de terrain.

Dans leur article, B.B. Braam, E.E.J. Weiss et P.A. Burrough [9], proposent de calculer l'excentricité à l'aide d'un indice, de la façon suivante

Figure 7 :
Calcul de l'excentricité.

Illustration tirée de B.B. Braam, E.E.J. Weiss et P.A. Burrough, [9]

$$E_i = \frac{RA_i - RC_i}{RA_i + RC_i}$$

E_i = indice d'excentricité de l'année i
 RA, RC = différents rayons

On mesure donc l'excentricité du tronc à plusieurs niveaux avant de les comparer. De cette manière, on repère les variations d'excentricité qui correspondent à des variations dans l'intensité du glissement de terrain. En effet, grâce à cette mesure, même une variation d'un seul degré dans l'angle d'inclinaison de l'arbre due à un ralentissement ou une accélération du glissement est détectable ; il est donc possible de repérer les éventuelles phases d'un glissement et de voir comment le phénomène évolue au cours du temps, en se basant sur les variations de l'excentricité de l'arbre.

Idéalement, il faudrait pouvoir travailler sur des «rondelles», ce qui implique toutefois de couper les arbres. Le calcul de l'indice d'excentricité permet de travailler sur des carottages effectués selon deux directions perpendiculaires, méthode non dommageable pour l'arbre.

3. Etude dendrogéomorphologique, glissement de l'Harmalière : [34]

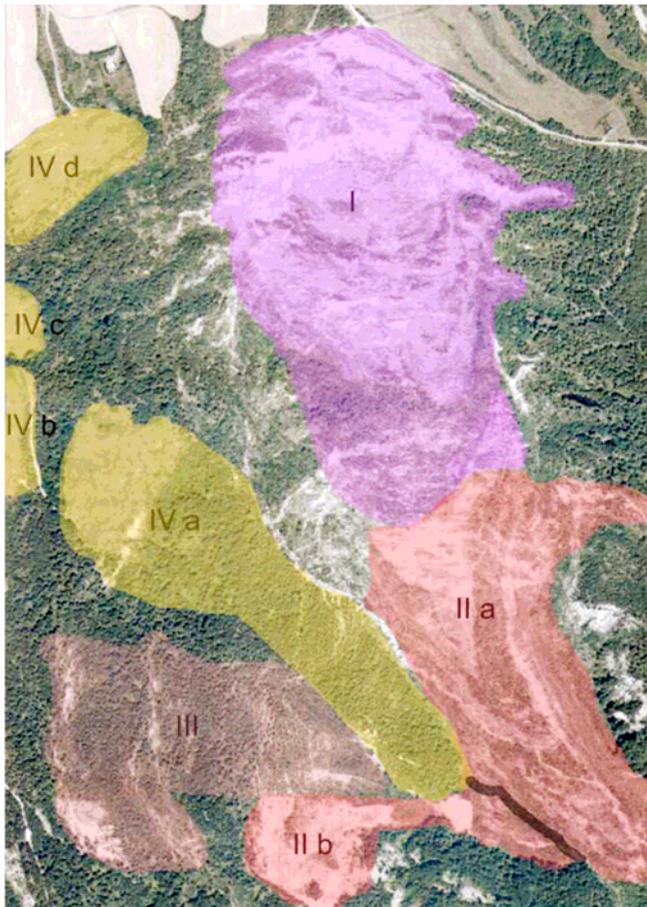


Figure 8 : Zones d'activité du glissement de l'Harmalière.

3.a. Présentation du site

Sinard est une commune située dans la région naturelle du Trièves, à 35 kilomètres au sud de Grenoble, en bordure d'un plateau dominant la profonde vallée du Drac. Située à une quarantaine de kilomètres au sud de Grenoble, la région du Trièves est riche en glissements de terrain : ils y occupent 7000 hectares et jusqu'à 60% du territoire de certaines communes [6]. Le relief, la géologie mais aussi le climat du Trièves favorisent en effet le déclenchement de ce type de phénomène, à savoir de nombreuses pentes, des argiles glaciolacustres, qu'une faible quantité d'eau réussit à mettre en mouvement, et une pluviosité relativement modérée (800 mm/an en moyenne) mais particulièrement brutale.

3.b. Origines et évolution du glissement

- ✓ facteurs intrinsèques du glissement.

Selon L. Besson [6], des mouvements anciens sont connus sur le site de l'Harmalière depuis le début du siècle. La nature des couches géologiques datant du Quaternaire fournit une première explication: la dépression du Trièves, occupée par un lac au cours du Würm, a été comblée progressivement par une épaisse couche d'argiles limoneuses. La présence de ces argiles litées constitue à double titre un facteur intrinsèque au mouvement de terrain.

D'une part la nature même de la roche la rend sensible au fluage puisque sa limite de liquidité (Atterberg) est faible, variant de 30% à 48%. D'autre part sa structure litée la rend sensible au cisaillement horizontal. La pente et la présence de nombreuses sources en amont du glissement exercent deux forces motrices sur le terrain : L. Besson signale une pente de 13°, qui a tendance à augmenter l'intensité de la composante tangentielle du poids. Les eaux provenant des sources à l'amont s'infiltrent facilement dans les fissures de traction ouvertes et ont pour effet de favoriser les deux types de pression hydrostatique et d'écoulement.

On remarque par ailleurs que les forces résistantes sont faibles : il n'y a pas de butée de pied du fait de la profondeur du lit du Drac, et la composante normale est peu importante du fait de la structure litée de la roche qui favorise une faible rugosité.

✓ Evolution du glissement avant 1981.

Nous faisons l'hypothèse d'un lent mouvement continu de l'ensemble du versant avant l'événement brutal du 7 mars 1981. L'étude comparée des photos aériennes de 1956 et de 1979 a permis de confirmer qu'avant 1981, l'évolution du glissement est lente et plutôt régulière. Sur la photo de 1956, on observe un complexe de fissures de traction disposé de façon hémisphérique sur le sommet de la combe. Vingt-trois ans plus tard, celles-ci ont reculé et certaines se sont élargies : en 1979, les plus hautes visibles sur la photo suivent plus ou moins la ligne de cote 700, mais entre ces deux dates, on ne remarque pas de changement majeur de la topographie ni de la couverture végétale.

✓ Les facteurs préparatoires et déclenchant de l'événement de 1981 et des suivants.

Certains facteurs à moyen ou court terme ont fait évoluer l'activité du glissement. Des mouvements brutaux en surface vont s'ajouter à des mouvements lents et plus réguliers, peut-être plus profonds.

L. Besson [6] nous donne des indications sur les facteurs qui ont pu préparer l'activation du glissement de 1981. Elle évoque deux premiers séismes survenus à un an d'intervalle en 1962 et 1963 qui auraient modifié la circulation générale des eaux souterraines. Nous pouvons supposer que le drainage des eaux a été perturbé, d'autant plus que d'autres séismes ont suivi. La pression hydrostatique sur le terrain s'en est probablement trouvée accrue. Durant l'hiver 1981, le manteau neigeux qui avait recouvert la zone a fondu brutalement. La fonte accompagnée de fortes pluies, a sans doute été un facteur déclenchant du glissement. Là encore, l'excédent d'eau a augmenté la pression hydrostatique et modifié le comportement des argiles. Le 7 mars 1981, le glissement s'est produit dans la zone en rive gauche qui apparaissait la moins active sur les photographies de 1956 et 1979. Il a mobilisé 250'000 m³ de matériaux, détruisant la majeure partie de la végétation, et s'est terminé en coulée boueuse, déversée dans le lac de retenue. L. Besson situe la niche d'arrachement principale de part et d'autre de la cote 700, ce qui correspondrait aux fissures les plus amonts, qui avaient tendance à s'écarter en 1979.

Les réactivations de 1983, 1988 et 1996 se sont produites dans des conditions comparables et ont affecté les mêmes secteurs.

3.c. Objectifs et présentation du secteur étudié

Le secteur Sud Ouest (secteur III de la fig. 8) fait partie des secteurs les plus actifs du glissement de l'Harmalière. Il présente des signes clairs d'activité sur les photos aériennes de 1956, et une fermeture nette des formations végétales sur les images plus récentes, indice d'un possible ralentissement des mouvements sur le secteur. Il était donc intéressant de voir si la dendrogéomorphologie permettait de retrouver cette évolution de l'activité, et de préciser les périodes d'activité maximale. Il contient également un secteur stable qui sert de référence. Le secteur central du glissement (secteur IVa de la fig. 8) présente des signes de mouvements très modérés.

L'essence dominante est le *Pinus sylvestris*. Le secteur est divisé en trois placettes, deux en bordure de niche d'arrachement, avec une végétation très influencée par les perturbations géomorphologiques. La troisième placette se situe dans le secteur central plus stable avec une végétation moins soumise aux perturbations.

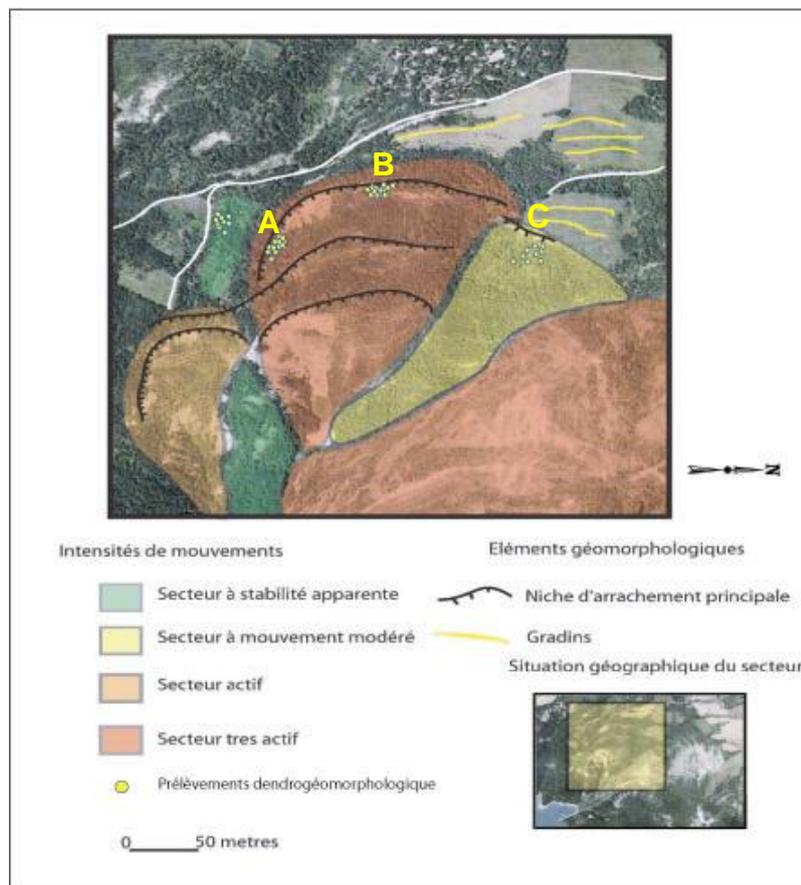


Figure 9 : Cartographie géomorphologique du secteur Sud Ouest, glissement de l'Harmalière.

Réalisation J. Lopez Saez, 2006.

3.c. Prélèvements:

L'étude réalisée sur le glissement de terrain de l'Harmalière fait appel à l'étude dendrogéomorphologique: des groupes d'arbres répartis sur le versant, dans trois placettes alignées le long d'un transect longitudinal ont été échantillonnés en vue d'atteindre les objectifs fixés.

Les carottes ont été réalisées courant d'année 2006. Sur chacun des arbres de chaque placette, les carottes ont été prélevées dans une même direction, c'est-à-dire Amont/Aval afin d'obtenir un rapport d'excentricité. Une hauteur préférentielle de 50 cm a été choisie pour les prélèvements, très variable cependant en raison des contraintes dues à la physiologie des troncs (départs des branches, végétation, pente,...).

Lorsque le prélèvement est effectué, vient ensuite la préparation des carottes. Une fois sèches, les carottes ont été collées au pistolet à colle sur des baguettes rainurées, puis planées perpendiculairement aux fibres du bois à l'aide d'une micro ponceuse (Dremmel) afin de permettre une observation optimale des cernes. Elles ont ensuite été scannées à haute résolution (600 à 1200 DPI) et pointées au moyen du logiciel COORECORDER (Cybis Elektronik): cette opération consiste, à partir du dernier cerne formé sous l'écorce, à marquer tous les cernes identifiés. L'épaisseur des cernes est ainsi obtenue avec une précision théorique de l'ordre de 0.01 mm.

3.d. Interdatation:

L'interdatation consiste à attribuer à chaque cerne l'année exacte de sa formation [22]. Le décompte des cernes à partir de l'écorce permet en théorie de dater chacun d'eux, mais il suffit d'une erreur ponctuelle pour décaler d'une ou de plusieurs années la date attribuée à chaque cerne. Un tel risque ne peut pas être pris dans une étude dendrogéomorphologique. L'interdatation consiste à vérifier et corriger la datation des cernes par comparaison des carottes entre elles. Elle n'est possible que si un ou plusieurs facteurs limitant agissent sur l'ensemble des arbres étudiés, facteurs généralement d'ordre climatique lorsqu'il s'agit d'arbres prélevés dans des peuplements différents. Précisons le détail de cette opération.

- **Le cerne.**

C'est l'anneau de bois produit par le cambium au cours d'une année de végétation. Le cerne d'un résineux, de *Pinus sylvestris* par exemple, est composé de bois initial clair et de bois final foncé. Le bois initial est formé de grandes cellules à parois minces, lui conférant une faible densité et sa couleur claire. Le bois final est composé de cellules à parois épaisses, généralement plus petites, qui lui donnent une densité supérieure et sa couleur foncée. Les épaisseurs relatives des bois initial et final varient d'un cerne à l'autre sur le même arbre et selon les espèces. Elles sont corrélées aux paramètres climatiques et écologiques [47].

Par exemple, le bois initial bien développé d'un cerne de *Pinus sylvestris* correspond à des conditions climatiques favorables (ensoleillement et bonne alimentation en eau) pendant la phase d'activité cambiale. La variabilité interannuelle de l'épaisseur des cernes peut être de grande amplitude. Les fluctuations de l'épaisseur des cernes, les variations relatives de l'épaisseur du bois initial et du bois final, et les anomalies de croissance (cellules gelées, traumatisme), créent des signes caractéristiques qui permettent de comparer, et d'interdater les carottes d'arbres différents.

- *Cerne caractéristique et année caractéristique.*

Le cerne caractéristique est un cerne qui se différencie de ceux qui l'encadrent par son épaisseur et/ou le rapport bois initial/bois final. Une fois identifié d'une carotte à l'autre d'un même arbre et sur tous les arbres d'une même population, l'année qui lui correspond devient «année caractéristique» ou «pointer year» [48]. Ainsi, le plus souvent, l'année caractéristique correspond à un cerne très mince sur l'ensemble d'une ou plusieurs populations.

- *Interdatation des carottes prélevées sur des arbres vivants.*

L'année calendaire du dernier cerne formé est connue, c'est l'année du prélèvement. Il est donc impératif de procéder à un carottage soigneux pour conserver la zone cambiale et l'écorce. La présence de ce dernier cerne permet d'accéder immédiatement au datage absolu. La comparaison des carottes d'un même arbre permet de vérifier ce datage. Les cernes caractéristiques et les séquences caractéristiques servent à contrôler l'absence de décalage d'une carotte à l'autre, qui pourrait être induit par un cerne absent. La comparaison des carottes d'arbres différents d'une même population permet de vérifier leur synchronisme. Le contrôle du synchronisme des arbres d'une population donnée est le préalable à la construction de la chronologie moyenne représentative de la population. Seule, la comparaison, ou l'interdatation de plusieurs arbres, 12 à 15 par population, supprime les risques d'erreur liés à l'absence accidentelle d'un cerne ou à des anomalies du cerne. Lorsque, accidentellement, une carotte s'interdate médiocrement avec les autres, cette carotte est éliminée.

3.e. Principaux résultats:

L'étude dendrogéomorphologique du secteur Sud Ouest a permis d'obtenir 6 phases d'excentricité principales sur les cinquante dernières années. Cinq d'entre elles ont une relation évidente avec le nombre d'événements pluviométriques mensuels exceptionnels.

L'illustration suivante propose un récapitulatif des phases d'excentricité des secteurs A, B et C, le nombre d'événements pluviométriques mensuels supérieurs au troisième quartile de la période 1948-2005 ainsi que le cumul des précipitations annuelles (3 années antérieures) (station Météo France de Monestier-de-Clermont).

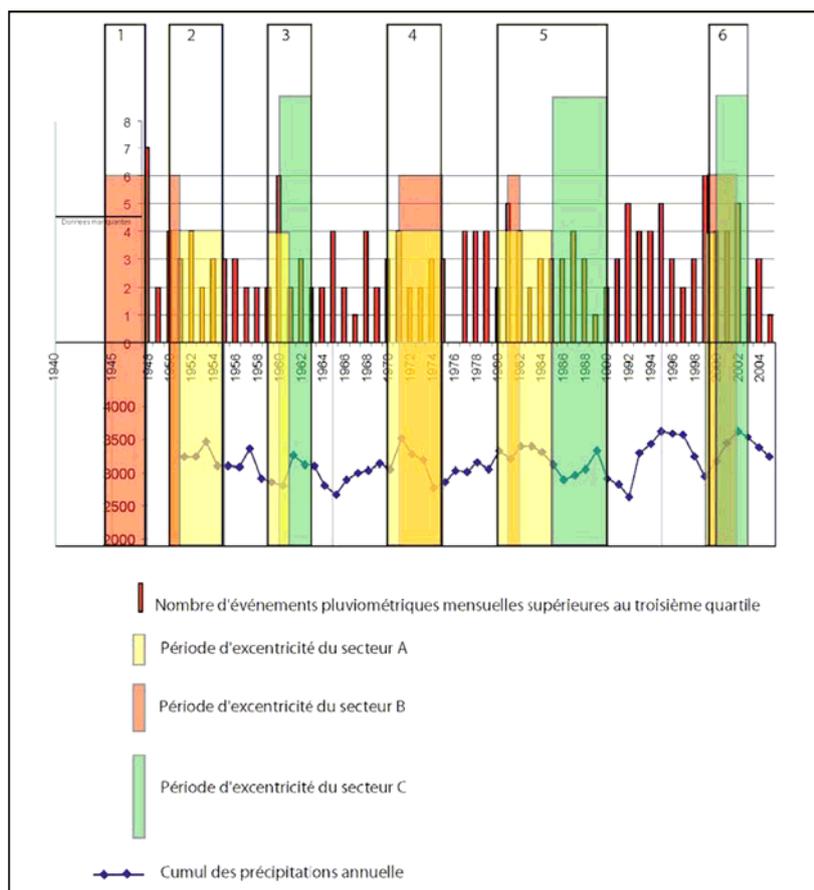
Les 6 phases d'excentricité débutent aux années suivantes: 1944, 1948, 1960, 1971, 1981 et 1999. La première phase n'est pas interprétable en termes d'influence des précipitations, les données de la station météo ne débutant qu'en 1948.

Les secteurs A et B connaissent quatre phases identiques (phase 2, 4, 5 et 6), avec pour chacune d'entre elles une année pluviométrique exceptionnelle qui précède les phases. Le secteur C, plus stable, confirme deux phases, celles de 1981 et 1999. Il laisse également supposer une phase en 1960. Après l'étude dendrogéomorphologique des trois secteurs, les années 1948, 1960, 1971, 1981 et 1999 seraient des dates d'activation du secteur Sud Ouest du glissement de l'Harmalière.

Contrairement à ce que laissaient supposer les photos aériennes, ce secteur du glissement aurait donc également connu une réactivation en 1981, et plus récemment en 1999.

Figure 10 : Relation entre le nombre d'événements pluviométriques mensuels supérieurs au troisième quartile, le cumul des précipitations annuelles et les périodes d'excentricités des trois secteurs, glissement de l'Harmalière.

Réalisation J. Lopez Saez



L'analyse dendrogéomorphologique a donc permis de dater avec une relative exactitude les mouvements récents qui ont affecté la partie Sud Ouest du glissement de l'Harmalière. L'interprétation s'est toutefois révélée difficile, surtout sur les secteurs A et B, du fait de l'activité continue de ces secteurs: les arbres étant continuellement déstabilisés, il en résulte un rapport signal/bruit défavorable, qui rend difficile l'identification des phases d'excentricité accrue. Il faut ajouter que *Pinus sylvestris*, du fait de son port souvent naturellement tortueux, rend parfois difficile également l'identification des courbures dues à des déstabilisations. L'utilisation de quelques rondelles en complément des carottages a permis d'assurer les interprétations. Dans le secteur C, moins actif, les phases d'activité ressortent plus nettement.

Ce secteur reste évidemment peu représentatif du fonctionnement de l'ensemble de ce vaste mouvement de masse mais sa position géographique laisse supposer qu'il a réagi à des contraintes exprimées par le secteur principal du glissement. L'étude permet d'établir cinq phases de mouvements avec un intervalle supérieur à dix ans. De cette étude, il ressort clairement que pour prévoir la réaction des arbres, et plus encore celle d'une forêt, aux perturbations géomorphologiques, il paraît indispensable de prendre en compte les études réalisées localement, qui seules permettent de comprendre les relations complexes qui existent entre l'espèce et son environnement. La méthode dendrogéomorphologique permet de mettre en évidence les périodes critiques de la croissance pour ainsi, par la suite, les comparer aux données pluviométriques ou autres afin d'établir une carte historique du secteur.

4. Utilisation de la tomographie acoustique

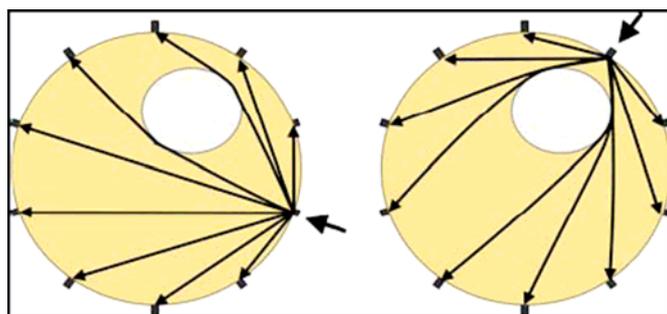
- Principe de fonctionnement :

Le Tomographe à ondes sonores PICUS® est un appareil de détection des foyers de pourriture et de cavités dans les arbres sur pied et dont l'utilisation n'occasionne qu'un très léger traumatisme à l'arbre.

Il est basé sur le principe que la vitesse du son dans le bois dépend du coefficient d'élasticité et de la densité du bois étudié. La plupart des dégâts aux arbres, dont les cavités et foyers de pourritures blanches ou cubiques, affectent les propriétés élastiques et la densité du bois et entraînent une perte de tenue mécanique, augmentant ainsi les risques de rupture. Ces propriétés liées aux tissus ligneux varient aussi bien inter-, qu'intra-spécifiquement, et seuls les foyers de pourriture de taille conséquente seront détectés. Ceci s'effectue par comparaison des mesures individuelles des temps de passages des signaux sonores sur l'arbre étudié, après pondération des écarts types.

Le tomographe est constitué d'une série de capteurs (12 dans notre cas) qui sont placés en des endroits ciblés avec soin sur le pourtour de l'arbre. Chaque capteur est relié à une pointe, ou clou zingué, qui est légèrement enfoncée dans l'écorce à l'aide d'un marteau, jusqu'à ce qu'elle atteigne le dernier cerne de croissance en formation ; la procédure étant répétée pour chaque capteur aux points sélectionnés. Les capteurs enregistrent le temps de passage des ondes sonores induites par les petits coups de marteau (généralement trois). Les vitesses relatives du son sont calculées à partir de ces données (temps de passage pour chaque percussion) on obtient un réseau dense de mesures des vitesses du son sur toute la section transversale.

A partir de ces données, un ordinateur est à même de définir instantanément, la cartographie couleur haute résolution de la section transversale. Cette carte, donne des informations quant à la présence ou non de foyers de pourriture et de cavités à l'intérieur de l'arbre. Il est possible également d'obtenir quantité d'informations, comme la portion de bois résiduel sain et le champ angulaire des creux.



Principe de collecte de données du tomographe PICUS®

Source : www.argus-electronic.de

- Mesures des ondes sonores :

Les principales étapes d'une mesure des ondes sonores avec le PICUS sont :

1. Détermination du niveau de mesure sur l'arbre (hauteur) et du nombre de points sondés.

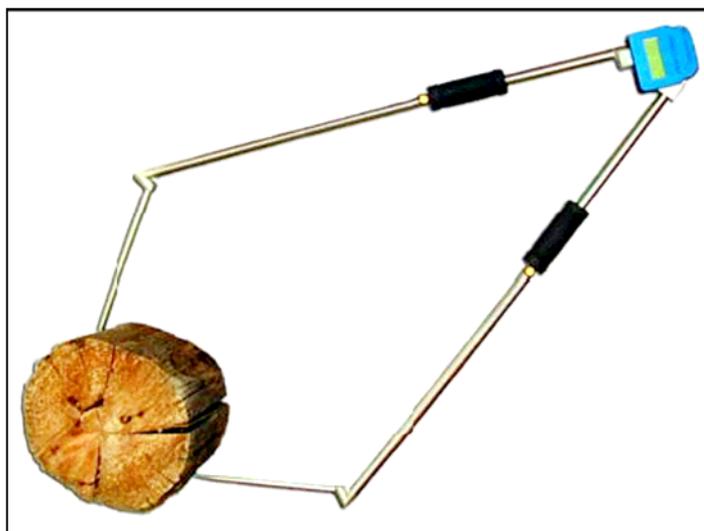
Pour déterminer le nombre de points à sonder, il faut mesurer la circonférence du tronc à l'aide d'un ruban. La distance maximum entre les capteurs est d'environ 50 cm du fait de la longueur du câble. La distance minimum entre deux capteurs ne doit pas être inférieure à 12-15 cm.

L'étape suivante consiste à identifier les signes extérieurs de défauts internes, comme les carpophores de champignons, fentes, cavités, écorce altérée, ...

2. Détermination de la forme géométrique du niveau étudié.

Dans la plupart des cas, la méthode « Forme libre » doit être utilisée.

Le compas « PICUS Calliper » est un accessoire permettant d'effectuer des mesures rapides et précises de l'arbre. Il mesure la distance exacte entre chaque point permettant ainsi d'obtenir une forme géométrique du tronc la plus exacte possible. En règle générale, une détermination géométrique précise est d'autant plus importante que le foyer de pourriture est discret.



Compas PICUS Calliper

Source : www.argus-electronic.de



Photo montrant la mesure entre deux capteurs à l'aide du compas Picus Calliper

Source : Cemagref

3. Pose de l'appareil sur l'arbre.

Les capteurs sont placés dans le sens inverse des aiguilles d'une montre

Les pointes doivent être en contact avec le bois. Il faut s'assurer que la longueur des pointes est supérieure à l'épaisseur de l'écorce. Lorsque l'arbre contient une cavité il ne faut en aucun cas placer de capteurs dans celle-ci.

Positionnement des capteurs autour de l'arbre.

Source : Cemagref

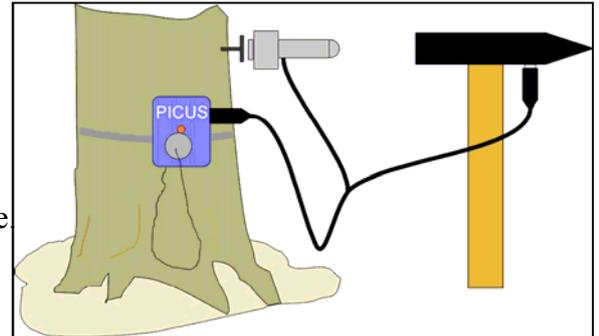


4. Capture des données.

Lorsque le système est prêt, la mesure des ondes sonores peut commencer. Il faut taper doucement sur le guide pour générer le signal sonore. Au minimum, trois coups dosés sont nécessaires, d'intensité la plus régulière possible. Le logiciel possède diverses fonctions lui permettant de compenser l'irrégularité de la frappe, mais les meilleurs résultats sont obtenus en s'appliquant à être le plus régulier possible. Il est probable que des arbres d'un fort diamètre avec des caries très conséquentes ne fournissent pas immédiatement de bons résultats. Il est alors recommandé de systématiquement augmenter le nombre de frappes.

Le croquis suivant montre la réalisation de la mesure sonore

Source : www.argus-electronic.de



5. Calcul et définition de la cartographie.

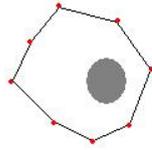
Lorsque l'ensemble des mesures sonores ont été faites, le logiciel va représenter les résultats sous forme de cartographie. Le tomographe détecte et reproduit les différences de transmission des ondes sonores dans le bois. La capacité du bois à transmettre des signaux sonores est fortement corrélée avec sa densité. En termes propres, le tomogramme ne peut être assimilé qu'à une simple « carte de densité » du niveau étudié. Ces tomogrammes sont utiles à l'évaluation de la tenue mécanique de l'arbre du fait que la densité du bois est fortement corrélée à son état de santé.

Une expérience approfondie des arbres et de leurs maladies, ainsi qu'une bonne maîtrise des principes d'utilisation du PICUS sont indispensables pour une lecture et une interprétation correctes des tomogrammes.

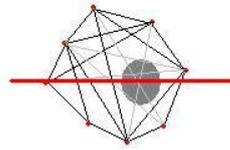
Le programme PICUS assigne des couleurs différentes aux différentes qualités de bois. Suite au calcul des vitesses relatives chaque point du tomogramme du niveau étudié sera codifié par une couleur particulière. Les zones à haute densité (vitesses maximales enregistrées) apparaissent en noir. Les couleurs blanc et bleu sont des régions de faible densité.

L'échelle de couleurs s'étend des vitesses maximales aux vitesses réduites. Le seuil de changement de couleur s'effectue selon plusieurs critères. Le schéma suivant détaille l'essentiel du processus.

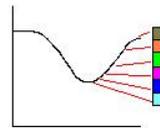
Dessin d'un arbre à foyer de pourriture



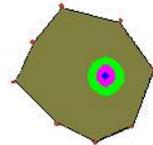
Axes de passages théoriques du signal sonore



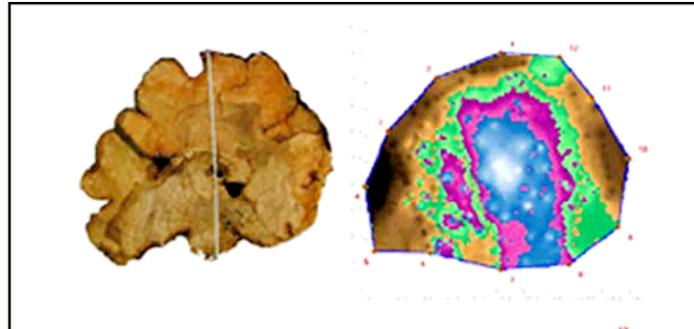
Vitesses le long de la ligne rouge
Et les codes de couleurs correspondants



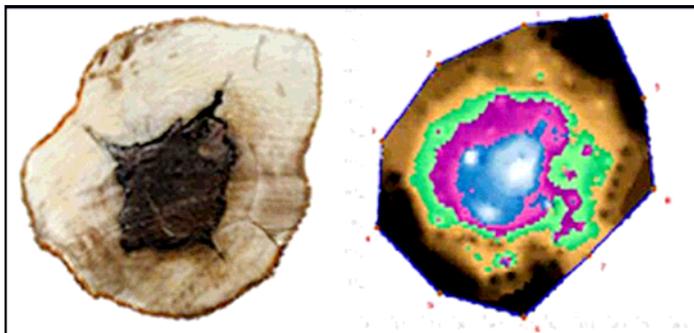
Tomogramme final
Exemples de tomogrammes :
Source : www.argus-electronic.de



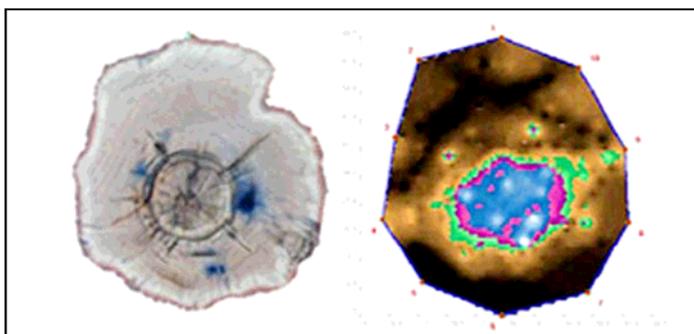
Tilleul infecté par *Ustulina deusta*



Tilleul avec une cavité

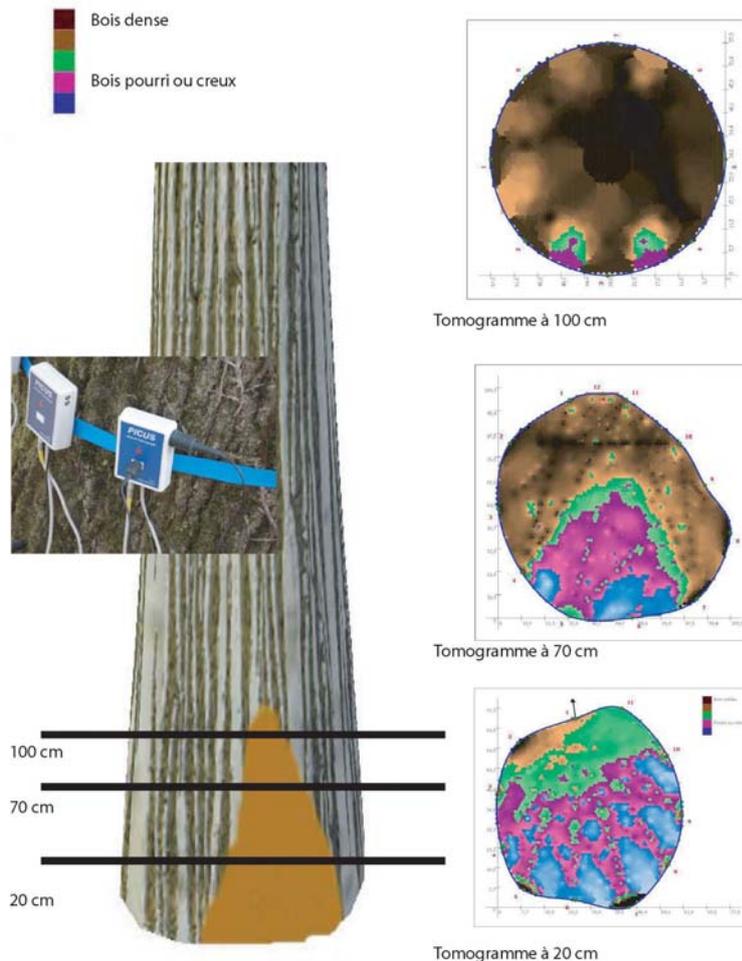


Chêne rouge avec rou lure



Nous avons testé le tomographe dans l'optique d'obtenir des informations supplémentaires sur la densité structurale de l'arbre. Après un temps d'adaptation et d'expérimentation, car l'outil nécessite une logistique lourde voire même laborieuse, nous voulions savoir si cet instrument pouvait nous matérialiser une quelconques différence de densité. Nous l'avons donc testé sur des rondelles de mélèze impactés par des avalanches et contenant donc des cicatrices et du bois de réaction. On sait que l'instrument nous permet assez facilement d'identifier les cavités et autres pourritures. Le principal objectif de la manipulation du tomographe est de connaître la capacité d'imager sous forme de tomogramme un bois perturbé. Malheureusement les premiers résultats sont plutôt négatifs et n'apportent rien d'intéressant à ce jour. A l'heure actuelle les résultats obtenus ne font pas apparaître une différence de densité entre le bois sain et le bois perturbé. Le protocole de mesure est actuellement au stade préliminaire et une nouvelle campagne de test va être mise en place.

Sonic tomographe



5. La résistographie, nouvelle méthode de diagnostic risque : L'utilisation du résistographe pour une analyse dendrogéomorphologique d'impacts avalancheux.

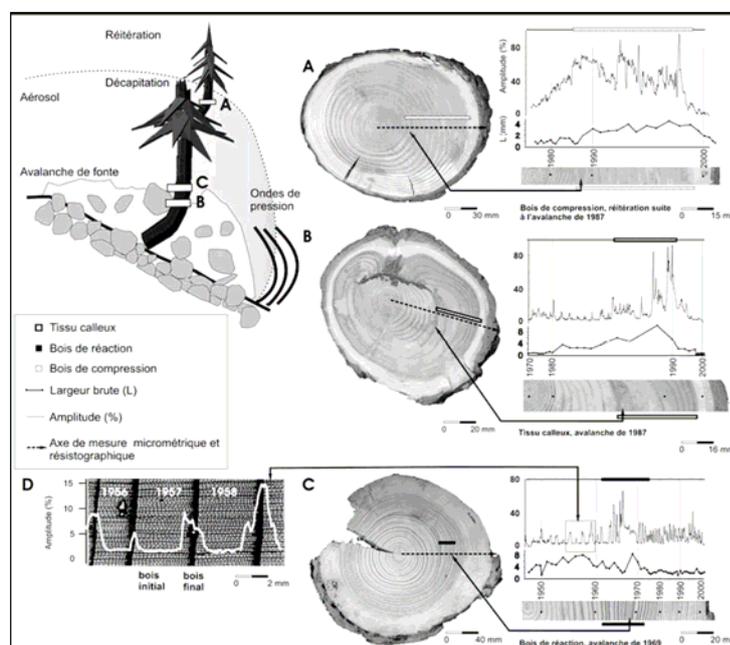
Le texte suivant est un résumé condensé de l'article soumis aux CRAS .

LOPEZ SAEZ J., CORONA C., BERGER F., DORREN L.

Cemagref, Division Ecosystèmes et Paysages montagnards, B.P. 7688, F-38402, Saint Martin d'Hères CEDEX, France.

Jerome.lopez@cemagref.fr ; christpohe.corona@libertysurf.fr ; Frederic.berger@cemagref.fr
Luuk.dorren@cemagref.fr.

La dendrogéomorphologie, subdivision de la dendrochronologie a été utilisée comme méthode pour l'étude et la datation de processus géomorphologiques passés. Cette approche, développée par Alestalo [1] précisée par Shroder [50] repose sur le fait que les arbres forment des anneaux de croissance chaque année et qu'ils réagissent immédiatement aux perturbations extérieures. Elle fournit des méthodes pour reconstituer des événements géomorphologiques passés tels que les avalanches [8, 27, 42] les debris flows [5, 54, 57], les glissements de terrain [3, 18, 31, 51, 52], les mouvements de glaciers [4, 10, 24] et les chutes de blocs [26, 33, 55]. Elle se base sur l'identification de perturbations de croissance – cicatrices, rejets, étage... - à l'origine de la formation de cernes diagnostiques de densité anormale. La présence de bois, jaune ou brun-rouge, court, à cellules denses et à cloisons épaisses, appelé bois de réaction, est, par exemple, révélatrice d'un impact [50]. L'existence d'un bourrelet constitué de tissu calleux à forte densité traduit la cicatrisation suite à une blessure [56] (figure 1).



Traditionnellement, la dendrogéomorphologie repose sur l'identification des cernes de croissance simplement par lecture directe des échantillons prélevés. La lourdeur des méthodes de mesure de la densité en laboratoire, méthode volumétrique [2] ou micro densitométrie à rayons X [15, 37, 40] est incompatible avec une étude dendrogéomorphologique fine qui repose, en général, sur plusieurs centaines de prélèvements [7, 13, 17, 38, 54, 55]. Des instruments de terrain non destructifs tels que le torsiomètre [30, 36] ou le pénétromètre de type « Pylodin » [11, 52, 59] existent. Ils ne permettent cependant qu'une mesure relative [36, 52, 61, 32], très localisée [25], limitée aux cernes périphériques [15, 36] et connaissent des dérives liées, notamment, à l'épaisseur variable de l'écorce [32].

Le résistographe [43] offre une alternative. Conçu pour l'expertise phytosanitaire préventive afin de détecter *in situ* la présence d'altérations ou de cavités, de densités faibles à nulles, au niveau d'arbres sur pieds ou de bois de construction [60], il traduit les variations de résistance de forage d'une aiguille en valeur de densité. Nous l'avons testé à des fins dendrogéomorphologiques pour tenter de mettre en évidence une réponse densitométrique particulière des cernes diagnostics.

Les prélèvements utilisés sont issus d'une étude dendrogéomorphologique réalisée au cours de l'été 2004 sur le dépôt d'avalanches Pierres Jean Jeanne (massif de l'Oisans, Alpes du Nord, France ; 45.03 N, 06.25 E) [13]. De forme conique, d'une longueur de 800 m, d'une surface de 49 hectares et d'un dénivelé de 400 m (1300-1700 m), ce dépôt est dominée par une corniche de 500 m de gneiss indifférenciés constituant l'assise du massif de la Meije au sud de Villar-d'arène (Notice explicative de la carte géologique, La Grave XXXIV-35, 1/50000, 1973). Ce dépôt a été retenu pour plusieurs raisons : -un fonctionnement avalancheux dominant avéré - des arbres présentent des morphologies variées et portent les traces d'impacts utilisables pour une reconstitution d'une chronique avalancheuse – une bonne documentation historique.

234 arbres y ont été échantillonnés. Les arbres les plus gros ont été sondés à la tarière de Pressler, à une hauteur moyenne de 100 cm, perpendiculairement à la courbe de niveau. 170 rondelles ont été prélevées sur les arbres morts ou impactés dont l'avenir était compromis et/ou ne présentant plus de qualité sylvicole.

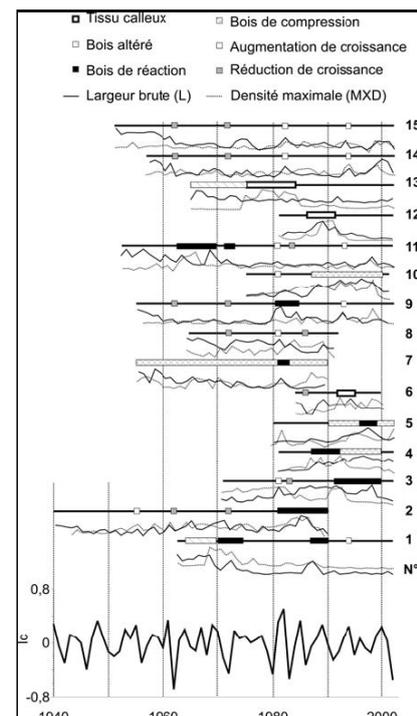


Figure 2. Types de bois, variation de l'indice de largeur (Ic) et de la densité des cernes de 15 mélèzes (*Larix decidua* Mill.) sur dépôt avalancheux

L'examen visuel des cicatrices et du bois de réaction a permis de déterminer avec certitude 13 années avalanches pour lesquelles le nombre d'impacts est élevé: 1914, 1922, 1924, 1927, 1940, 1943, 1953, 1955, 1969, 1974, 1981, 1988 et 1994 [13].

15 rondelles issues de cette campagne de prélèvements ont fait l'objet de mesures résistographiques. 11 d'entre elles présentent des signes visibles d'impacts avalancheux passés. Les 4 autres sont des échantillons témoins ne présentant aucune perturbation. Des mesures résistographiques et micrométriques ont été utilisées afin de déterminer les paramètres de largeur et de densité de 613 cernes. L'interdatation, qui consiste à attribuer à chaque cerne l'année exacte de sa formation, a été réalisée grâce à la méthode des cernes caractéristiques. Les cernes étroits de 1962, 1972, 1983, 1986 et les cernes larges de 1955, 1981, 1988 et 1993 de la série de référence, établie sur le dépôt avalancheux, à partir d'arbres sains ont été utilisés comme cernes diagnostics. L'échantillon le plus âgé a été daté à 1943, le plus jeune à 1987.

Le profil résistographique de chacune des rondelles a été mesuré selon un axe identique à celui de la micrométrie à l'aide d'un résistographe de type "IML Resi F400". L'instrument est composé d'une unité de forage et d'un module de stockage (figure 3).



Figure 3. Unité de forage du résistographe "IML Resi F400"

Une aiguille de 1.5 à 3 millimètres de diamètre est introduite à vitesse constante dans le bois. La consommation de l'unité de forage et l'amplitude de la résistance au forage sont mesurées électroniquement tous les dixièmes de millimètres et converties en densité. Les variations de densité intra et interannuelles sont affichées à l'échelle 1:1 sur une bande de papier cirée au moyen d'un stylet pour une lecture directe. Elles sont également stockées sous forme numérique dans le module électronique et peuvent être traitées au moyen du logiciel FTools(© Instrumenta Mechanik Labor GmbH).

Pour atteindre l'objectif fixé, il convient de délimiter chaque cerne sur le profil résistographique et de lui attribuer les paramètres qui lui correspondent. Cette délimitation a été réalisée au moyen de FTools. Afin de déceler des erreurs ponctuelles de comptage, un coefficient de corrélation, r de Pearson, a été calculé entre les séries individuelles de largeur de cernes issues de l'analyse micrométrique et celles issues de la mesure résistographique. La largeur (L), la densité maximale (MXD) et la variance intra-cerne ($VARD$), qui intègre conjointement l'amplitude et la dispersion des valeurs de densité intra-cerne, ont ensuite été déterminées pour chaque cerne. La matrice de données ainsi obtenue a été traitée au moyen d'une analyse multifactorielle en composantes principales (ACP) (figure 4).

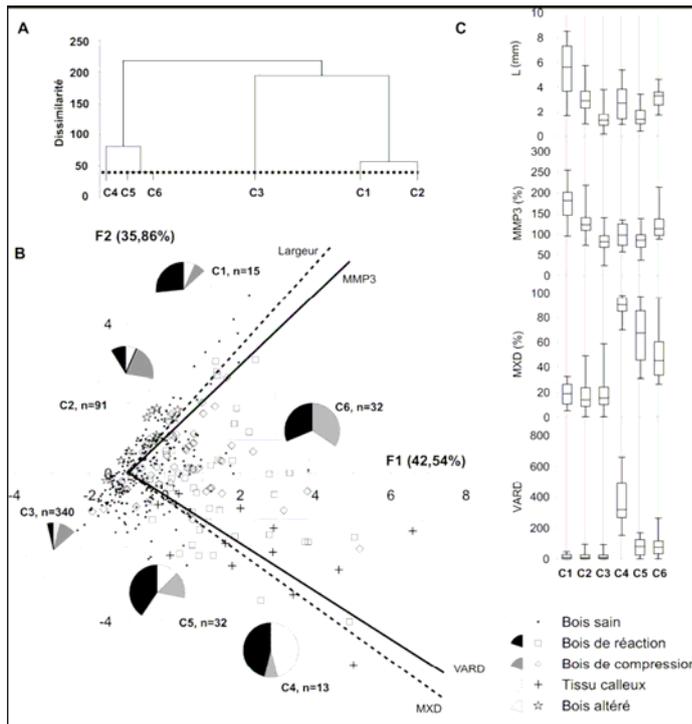


Figure 4. Principaux résultats de l'analyse multivariée.
 (A) Classification Ascendante Hiérarchique
 (B) Analyse en Composantes Principales
 (C) Caractéristiques (L, MMP3, MXD et VARD) des classes identifiées

Une grille de lecture simplifiée du signal densitométrique est obtenue à partir des ellipses à 80% de confiance de chacune des classes identifiées. Basées sur la largeur et la densité maximale, elle permet une identification probabiliste des perturbations au sein de ce signal. L'utilisation combinée de la grille probabiliste et du résistographe offre des perspectives en matière de spatialisation et de cartographie de l'aléa avalancheux.

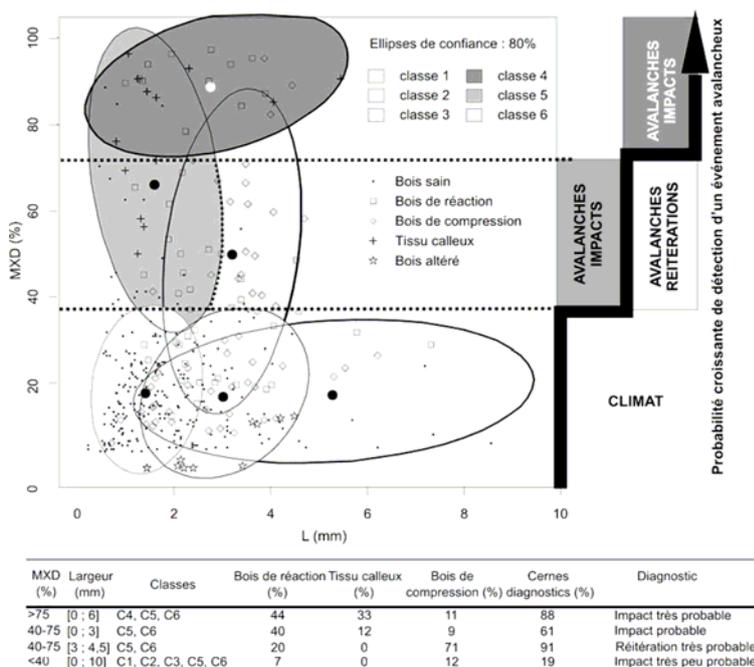


Figure 5. Grille d'identification probabiliste des perturbations au sein d'un signal densitométrique.

CONCLUSION :

La mise en place et la validation de la méthode résistographique s'est faite essentiellement sur le dépôt avalancheux de Pierre Jean Jeanne en Oisans. Ce choix s'explique principalement par une connaissance précise du site car il a fait l'objet d'une étude dendrogéomorphologique fine réalisé dans le cadre d'une thèse soutenue en février 2007 par Christophe Corona (doctorant IGA). A l'heure actuelle, la méthode est en cours d'application sur le glissement de l'Harmalière et les premiers résultats indiquent une réponse densitométrique particulière, notamment celle de l'excentricité. Cette réponse permet d'envisager la création d'une cartographie exhaustive à grande échelle afin de comprendre et de spatialiser avec précision le glissement de terrain. Nous nous intéressons également à la possible utilisation de la méthode pour dater la mise à nu de racines notamment sur des berges de rivière et même de niche d'arrachement végétalisée. Cette étude entre dans une optique de recherche mise en place par le Cemagref et l'Institut de géographie Alpine et d'une demande de financement de thèse déposée auprès de la fondation MAIF.



Use of resistograph for dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts

LOPEZ SAEZ J., CORONA C. and BERGER F.
 Cemagref, Division Ecosystèmes et paysages montagnards, B.P. 7688, F-38402, Saint-Martin d'Hères CEDEX, France
 jerome.lopez@cemagref.fr ; christophe.corona@libertysurf.fr ; frederic.berger@cemagref.fr



Introduction

Dendrogeomorphology represents one of the subfields of dendrochronology and has repeatedly been used to study and date past geomorphic processes.

This method is based on identification of visible defects in the tree morphology, such as scars, broken crowns or branches, candleabra trees and tilted stems.

These growth disturbances can be linked with occurrence of particular tree rings (compression or reaction wood, callous tissue) with abnormal density.

Traditionally, identification of tree rings is only visual by direct reading of samples. Wood density cannot be determined by a volumetric or a X-Ray method that is accurate but too expensive for a large scale sampling usually involving hundreds of discs or cores.

The resistograph offers an alternative method. It is suited for detecting wood cavity in phytosanitary research. It allows a rapid assessment of standing trees or construction wood with low or null density. As such relative density of particular tree-rings can be evaluated.

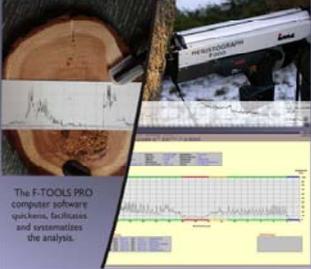
The resistograph



The IMPL-RESI system is based on a drilling resistance measuring method. A drilling needle with a diameter of 1.5 to 3.00 mm penetrates into the wooden subject with a regular advance and the drilling resistance is measured.

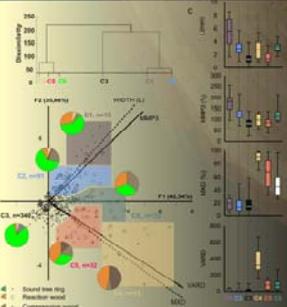
The delicate drilling needle works carefully and precisely.

The output data are clear and precise while the wood remains almost unimpaired.



The F-TOOLS PRO computer software quickens, facilitates and systematizes the analysis.

Principal Component and Clustering Analysis

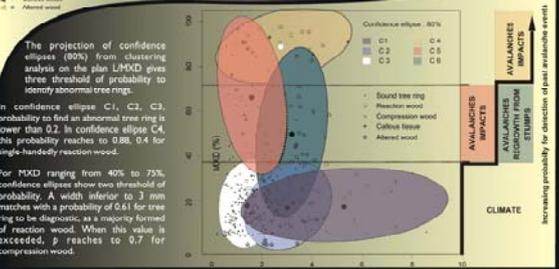


Factorial plan delimited by principal components F1 and F2 from PCA explains 76.9% of overall variance of the dataset. Density variables: MXD (Maximum Latewood Density) and VARD (Internal variance of tree-ring Density), positively contribute to F1 for 34.6% and 32.7%, ring width parameters (Wron 1), and Moving Average (MMP3) respectively explain 36.1 and 31.4% of variance contained in F2.

The dendrogram produced by the clustering algorithm aggregates data in six groups (C1 to C6) at distinctness 35. From the anatomical point of view, C1, C2, C3 basically aggregate sound tree rings with low MXD and almost null VARD. Distinction between C1, C2 and C3 is linked to L and MMP3.

C4, C5, C6 aggregates 56 abnormal tree rings (sum = 77). These classes differentiate by high MXD ($M_{max} > 40\%$) and VARD ($M_{max} > 100$). C4 differs from C5 and C6 by MXD ($M_{max} > 90\%$) and VARD ($M_{max} > 200$). 13 samples, six formed of reaction wood and six of callous tissue, characterized by high VARD and MXD, are aggregated in this class.

More than 60% of abnormal tree rings constitute C5 and C6 (32 samples in each one). In C5, reaction wood (13 samples) is predominant. C6 is equally constituted of wound rings and rings formed of reaction or compression wood.

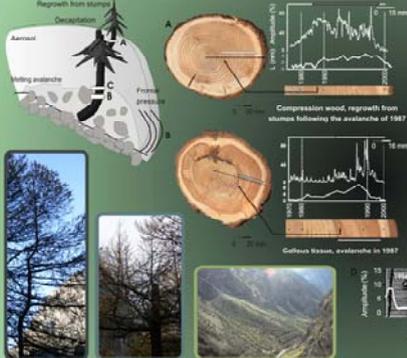


The projection of confidence ellipses (90%) from clustering analysis on the plan LMXD gives three threshold of probability to identify abnormal tree rings.

In confidence ellipse C1, C2, C3, probability to find an abnormal tree ring is lower than 0.2. In confidence ellipse C4, this probability reaches to 0.88, 0.4 for single-handedly reaction wood.

For MXD ranging from 40% to 75%, confidence ellipses show two threshold of probability. A width inferior to 3 mm matches with a probability of 0.61 for tree ring to be diagnostic, as a majority formed of reaction wood. When this value is exceeded, p reaches to 0.7 for compression wood.

Micrometric and resistographic measurements on 15 discs from an avalanche talus.



Regrowth from stumps

Compression wood, regrowth from stumps following the avalanche of 1987

Callous tissue, avalanche in 1987

Early Late wood

Reaction wood, avalanche in 1988

Conclusion

Achieved measurements show, on an avalanche talus and on *Larix deSous Mil*, the reliability of the resistograph to detect tree rings with an abnormal mechanical resistance. The projection of confident ellipses on the plan LMXD provides probability benchmarks to identify disturbances by direct reading of a dendrochronologic signal.

The combined use of this synthetic document and resistograph offer prospects for spatialization and cartography of avalanches limits. Fast, non destructive and easy to implement this method can be used for an exhaustive sample campaign. It offers interesting prospects about cartography of avalanche hazards.

Bibliography

1) C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 221 p. 2) J. C. Corona, The Impact of Climate Change on the Alps, 2006. 3) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 4) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 5) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 6) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 7) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 8) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 9) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 10) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 11) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 12) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 13) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 14) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 15) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 16) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 17) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 18) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 19) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 20) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 21) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 22) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 23) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 24) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 25) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 26) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 27) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 28) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 29) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 30) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 31) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 32) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 33) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 34) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 35) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 36) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 37) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 38) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 39) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 40) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 41) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 42) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 43) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 44) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 45) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 46) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 47) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 48) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 49) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 50) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 51) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 52) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 53) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 54) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 55) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 56) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 57) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 58) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 59) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 60) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 61) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 62) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 63) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 64) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 65) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 66) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 67) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 68) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 69) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 70) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 71) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 72) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 73) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 74) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 75) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 76) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 77) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 78) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 79) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 80) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 81) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 82) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 83) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 84) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 85) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 86) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 87) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 88) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 89) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 90) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 91) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 92) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 93) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 94) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 95) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 96) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 97) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 98) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 99) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007. 100) J. C. Corona, A. Berger, J. Lopez Saez, Dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts on *Larix deSous Mil* (Savoie, France). Thesis in Geomatics, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007.

BIBLIOGRAPHIE :

- [1] J. Alestalo, Dendrochronological interpretation of geomorphic processes, *Fennia* 105 (1971), 1-139.
- [2] ASTM (American Society for Testing and Materials), Standard test methods for specific gravity of wood and wood-based materials. Annual book of ASTM standards volume 4.09, wood. ASTM International, Philadelphia, Pa, 1985.
- [3] L. Astrade, J.P. Bravard, N. Landon, Mouvements de masse et dynamique d'un géosystème alpestre: étude dendrogeomorphologique de deux sites de la de la vallée de Boulc (Diois, France), *Géographie Physique et Quaternaire* 52 (1998) 153-165.
- [4] T. Bachrach, K. Jakobsen, J. Kinney, P. Nishimura, A. Reyes, C. P. Laroque, D. J. Smith, Dendrogeomorphological assessment of movement at Hilda rock glacier, Banff National Park, Canadian Rocky Mountains, *Geografiska Annaler* 86A (2004), 1-9.
- [5] F. Baumann F., K.F. Kaiser, The Muletta debris fan, eastern Swiss Alps: a 500-year debris flow chronology, *Arctic and Alpine Research* 31 (1999) 128-134.
- [6] L. Besson, Mouvement de terrain en milieu forestier et agricole dans le Trièves, Isère. Contexte géologique et Socio-économique, Colloque sur les mouvements de terrain, Caen, 1983.
- [7] D. Boucher, L. Fillion, B. Héту, Reconstitution dendrochronologique et fréquence des grosses avalanches de neige dans un couloir subalpin du mont Hog's Back, Gaspésie centrale (Québec), *Géographie Physique et Quaternaire* 58 (2004) 169-187.
- [8] D.R. Butler, G.P. Malanson, A history of high-magnitude snow avalanches, southern Glacier National Park, Montana, U.S.A. *Mountain Research and Development* 5 (1985) 175-182.
- [9] R.R. Braam, E.E.J. Weiss et P.A. Burrough, Spatial and temporal analysis of mass movement using dendrochronology, *Catena*, 1987 / R.R. Braam, E.E.J. Weiss et P.A. Burrough, Dendrogeomorphological analysis of mass movement, a technical note on the research method, *Catena*, 1987 / P. Schoeneich, La datation des glissements de terrain, *Balkema*, 1992 / P. Schoeneich, J. Tercier, JP. Hurni, Ch. Et A. Orcel, Les crises catastrophiques du glissement des Parchets, *Quaternaire*, 1996.
- [10] R. Carter, S. Leroy, T. Nelson, C. P. Laroque, D. J. Smith, Dendroglaciological investigations at Hilda Creek rock glacier, Banff National Park, Canadian Rocky Mountains, *Géographie physique et Quaternaire* 53 (1999) 365-371.
- [11] G. Chantre, E. Sutter-Barrot, R. Gouma, A. Bouvet, De l'intérêt de l'utilisation du Pilodyn dans l'étude de la qualité du bois : application à l'épicéa commun et à l'épicéa de Sitka, *Annales AFOCEL* (1992) 145-177.
- [12] G. Chantre., P. Rozenberg, Can drill resistance profiles (Resistograph) lead to within-profile and within-ring density parameters in Douglas-fir wood? in *Proceedings of CTIA – International Union of Forest Research Organizations (IUFRO) International Wood Quality Workshop: Timber Management Toward Wood Quality and End-Product Value*, Québec, 18–22 August 1997. Edited by S.Y. Zhang, R. Gosselin, and G. Chauret. Forintek Canada Corp., Sainte-Foy, Que. 1997 pp. 41-47.
- [13] C. Corona, Evolution biostasique du paysage, géodynamique nivéo-périglacière et fluctuations climatiques récentes dans la haute vallée de la Romanche (Alpes du Nord France), Thèse de doctorat en Géographie, Université Joseph Fourier, Grenoble I, 2007, 752 p.
- [14] D.J. Cown, Comparison of the Pilodyn and torsionmeter methods for the rapid assessment of wood density in living trees. *N.Z. Journal of Forest Science* 8 (1978) 384-391.
- [15] D.J. Cown, B.C. Clement, A wood densitometer using direct scanning with X-rays. *Wood Science and Technology* 17 (1983) 91-99.
- [16] B. Denneler :Eine dendrogeomorphologische Studies in Gams, 1992
- [17] S. Dube, L. Fillion, B. Hetu, Tree-ring reconstruction of high-magnitude snow avalanches in the northern Gaspé Peninsula, Quebec, Canada. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 36 (2004) 555-564.
- [18] R. Fantucci, M. Sorriso-Valvo, Dendrogeomorphological analysis of a slope near Lago, Calabria (Italy). *Geomorphology* 30 (1999) 165-174.
- [19] J.C. Flageollet, les mouvements de terrain et leur prévention, Paris, Masson, 1988.
- [20] B. Francou, L'ébouilisation en haute montagne, Thèse de doctorat d'état en Géographie, 2 tomes, Université de Paris VII, Caen, Editec, 1988, 684 p.
- [21] B. Francou, C. Manté, Analysis of the segmentation in the profile of alpine talus slopes, *Permafrost and Periglacial Processes* 1 (1990) 53-60.
- [22] H.C. Fritts, *Tree Rings and Climate*, Academic Press, New York, 1976, 567 p.
- [23] H. Gärtner, Glacial Landforms, *Tree Rings: Dendrogeomorphology*, in: Elias, S.A. (Ed.) 2007: *Encyclopedia of Quaternary Sciences*, Vol.2, Elsevier, 2007, 979-988.
- [24] J.R. Giardino, J.R. Shroder, J.F., M.P. Lawson, Tree-ring analysis of movement of a rockglacier complex on Mount Mestas, Colorado, U.S.A., *Arctic and Alpine Research* 16 (1984) 299-309.

- [25] B.L. Greaves, N.M.G. Borallho, N.M.G., C.A. Raymond, A. Farrington, Use of a Pilodyn for the indirect selection of basic density in *Eucalyptus nitens*. *Canadian Journal of Forest Research* 26 (1996) 1643-1650.
- [26] P. Gsteiger, Steinschlagschutzwald. Ein Beitrag zur Abgrenzung, Beurteilung und Bewirtschaftung, *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 144 (1993) 115–132.
- [27] E.G. Hebertson, M. J. Jenkins, Historic climate factors associated with major avalanche years on the Wasatch Plateau, Utah, *Cold Regions Science and Technology*, 37 (2003) 315-332.
- [28] R.L. Holmes, Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 43 (1983) 69-78.
- [29] Introduction aux méthodes en géographie physique, chapitre sur la dendrochronologie, éd. E.Reynard, 1996.
- [30] F. Isik, B. Li, Rapid assessment of wood density of live trees using the Resistograph for selection in tree improvement programs, *Canadian Journal of Forest Research* 33 (2003) 2426-2435.
- [31] G.C. Jacoby., P.L. Williams, B. M. Buckley, Tree ring correlation between prehistoric landslides and abrupt tectonic events in Seattle, Washington, *Science* 258 (1992) 1621-1623.
- [32] L. Koch, L. Fins, Genetic variation in wood specific gravity from progeny tests of ponderosa pine (*Pinus ponderosa* Laws.) in northern Idaho and Western Montana. *Silvae Genetica* 49 (2000) 174-181.
- [33] M. Lafortune, L. Filion, B. Hétu, Dynamique d'un front forestier sur un talus d'éboulis actif en climat tempéré froid (Gaspésie, Québec), *Géographie physique et Quaternaire* 51 (1997) 1-15.
- [34] J. Lopez Saez, La dendrogéomorphologie, outil d'interprétation d'un glissement de terrain. Etude du secteur Sud Ouest du glissement de l'Harmalière, Mémoire Master, UJF-IGA, 2006.
- [35] G. Nepveu, Y. Birot, Les corrélations phénotypiques juvénile-adulte pour la densité du bois et la vigueur chez l'Épicéa. *Annales des Sciences forestières* 36 (1979) 125-149.
- [36] V.P.G. Moura, R.D Barnes, J.S. Birks, A comparison of three methods of assessing wood density in provenance of *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh., and other *Eucalyptus* species in Brazil. *Australian Forest Research* 17 (1987) 83-90.
- [37] M.L. Parker, L.A. Josza, X-ray scanning machine for tree-ring width and density analyses, *Wood and Fiber* 5 (1973) 192-197.
- [38] S. Perret, M. Stoffel, H. Kienholz, Spatial and temporal rockfall activity in a forest stand in the Swiss Prealps – a dendrogeomorphological case study. *Geomorphology* 74 (2006) 219–231
- [39] V. Petitcolas V, Dendroécologie comparée de l'épicéa, du mélèze, du pin cembro et du pin à crochets en limite supérieure de la forêt dans les Alpes françaises: influence de la variabilité macro-écologique. Thèse de Doctorat en Biologie, Université Joseph Fourier, Grenoble I, 1998, 186 p.
- [40] H. Polge, Etablissement des courbes de variation de la densité du bois par exploration densitométrique de radiographies d'échantillons prélevés à la tarière sur des arbres vivants. Applications dans les domaines technologiques et physiologiques, *Annales des Sciences forestières* 23 (1966) 1-206.
- [41] H. Polge, R. Keller, Première appréciation de la qualité du bois en forêt par utilisation d'un torsiomètre. *Annales des Sciences forestières* 27 (1970) 197-223.
- [42] S.A. Rayback, A dendrogeomorphological analysis of snow avalanches in the Colorado Front Range, USA. *Physical Geography* 19 (1998) 502-515.
- [43] F. Rinn, F.H. Schweingruber, E. Schar, Resistograph and X-ray density charts of wood comparative evaluation of drill resistance profiles and X-ray density charts of different wood species. *Holzforschung* 50 (1996) 303–311.
- [44] C. Rolland, Fonctionnement hydrique et croissance du Sapin (*Abies alba* Mill.) dans les Alpes françaises. Dynamique des flux de sève, écophysiologie et dendroécologie. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble I, France, Grenoble, France, 1993, 180 p.
- [45] P. Schoeneich, J. Tercier, JP. Hurni, Ch. Et A. OrceI, Les crises catastrophiques du glissement des Parchets : indices d'une augmentation des précipitations extrêmes entre 2000 et 1500 BP, 1996 / P. Schoeneich, La datation des glissements de terrain, 1992
- [46] F.H Schweingruber, *Tree Rings*, 1988 / J. Alestalo, *Dendrochronological interpretation of geomorphic processes*, 1971.
- [47] F.H. Schweingruber, *Tree Rings Basics and Applications of Dendrochronology.* , Kluwer Academic Publishing, Dordrecht (1988) 276 pp
- [48] F.H. Schweingruber, F.H. Dendroecological information in pointer years and abrupt growth changes, in : E.R. Cook and L.A. Kairiukstis, eds., *Methods of Dendrochronology : Applications in the Environmental Sciences.* International Institute for Applied Systems Analysis, Kluwer Academic Publishers, Boston, MA, 1990, pp. 277-283.
- [49] F.H. Schweingruber, D. Eckstein, F. Serre-bachet, O.U Braeker, Identification, presentation and interpretation of Event Years and Pointer Year in Dendrochronology, *Dendrochronologia*, p. 9-38, 1990.
- [50] J.F. Shroder, Dendrogeomorphology: Review and new techniques of tree-ring dating, *Progress in Physical Geography* 2 (1980) 161-188.
- [51] O. Solomina, Dendrogeomorphology: research requirements, *Dendrochronologia* 20 (2002) 233-245.

- [52] J.R. Sprague, J.T. Talbert, J.B. Jett, R.L. Bryant, Utility of the Pilodyn in selection for mature wood specific gravity in loblolly pine, *Forest Science* 29 (1983) 696-701.
- [53] M. C. Stefanini, Spatio-temporal analysis of a complex landslide in the Northern Apennines (Italy) by means of dendrochronology, *Geomorphology*, 63 (2004) 191-202.
- [54] M. Stoffel, I. Lièvre, D. Conus, M.A. Grichting, H. Raetzo, H.W. Gärtner, M. Monbaron, 400 years of debris flow activity and triggering weather conditions: Ritigraben VS, Switzerland, Arctic, Antarctic and Alpine Research 37 (2005) 387-395.
- [55] M. Stoffel, I. Lièvre, M. Monbaron, S. Perret, Seasonal timing of rockfall activity on a forested slope at Täschgufer (Valais, Swiss Alps) – a dendrochronological approach, *Zeitschrift für Geomorphologie* 49 (2005) 89-106.
- [56] M. Stoffel, A review of studies dealing with tree rings and rockfall activity: The role of dendrogeomorphology in natural hazard research, *Natural Hazards* 39 (2006) 51-70.
- [57] H. Strunk, Frequency distribution of debris flows in the Alps since the “Little Ice Age”, *Zeitschrift für Geomorphologie*, suppl. 83 (1992) 71-81.
- [58] T.E. Timell, Springer Wood Series Vol 2: compression Wood in Gymnosperms, Springer, New York, 1986, 706-1338.
- [59] M. Villeneuve, E.K. Morgenstern, L.P. Sebastian, Estimation of wood density in family tests of jack pine and black spruce using the Pilodyn tester, *Canadian Journal of Forest Research* 17 (1987) 1147-1149.
- [60] P.M. Winistorfer, W. Xu, R. Wimmer, Application of drill resistance technique for density profile measurement in wood composite panels. *Forest Products Journal* 45 (1995) 50–53.
- [61] A.D. Yanchuk, G.K. Kiss, Genetic variation in growth and wood specific gravity and its utility in the improvement of interior spruce in British Columbia, *Silvae Genetica* 42 (1993) 141-148.