

Collection
EDYTEM

Numéro 8 - Année 2009

*Cahiers de
Géographie*

NEIGE et GLACE de MONTAGNE

Reconstitution, dynamique, pratiques



LA DENDROGLACIOLOGIE OU L'APPORT DE L'ÉTUDE DES CERNES D'ARBRES POUR LA RECONSTITUTION DES FLUCTUATIONS GLACIAIRES HOLOCÈNES

*DENDROGLACIOLOGY,
THE TREE-RING CONTRIBUTION TO RECONSTRUCT HOLOCENE GLACIAL FLUCTUATIONS*

MELAINE LE ROY ¹, LAURENT ASTRADE ¹, JEAN-LOUIS EDOUARD ²,
CÉCILE MIRAMONT ², PHILIP DELINE ¹

¹ Laboratoire EDYTEM, Université de Savoie/CNRS, Campus scientifique, F 73376 Le Bourget-du-Lac cedex.

² Laboratoire IMEP, CNRS, Bâtiment Villemin, Europôle Méditerranéen de l'Arbois, BP 80, F 13545 Aix-en-Provence cedex 04.

Contact : melaine.le-roy@univ-savoie.fr

RÉSUMÉ

La dendroglaciologie est l'un des champs de la dendrochronologie qui s'applique à la reconstitution des fluctuations glaciaires en analysant le signal climatique et/ou géomorphologique contenu dans les cernes de croissance des arbres. Son utilisation est devenue courante aujourd'hui pour dater les récurrences glaciaires dans les régions où les glaciers ont pénétré des secteurs boisés lors des péjorations climatiques de l'Holocène. L'intérêt majeur de cette méthode est de permettre une meilleure résolution (annuelle dans des conditions favorables) que les autres méthodes de datation utilisées sur la période holocène.

Nous présentons ici une revue des différentes méthodes utilisées en dendroglaciologie à partir d'exemples pris dans la littérature ; une attention particulière est portée aux travaux effectués dans la région alpine.

MOTS-CLÉS : DENDROCHRONOLOGIE, FLUCTUATIONS GLACIAIRES, HOLOCÈNE, MÉTHODE DE DATATION.

ABSTRACT

Dendroglaciology is one of the subfields of dendrochronology which applies to the reconstruction of glacial fluctuations by analyzing the climatic and/or geomorphological signal contained in trees growth rings. Today, its use became current to date glacial recurrences in areas where glaciers penetrated into forested zone during Holocene climatic peyorations. The major interest of this method is to allow a better resolution (annual under favorable conditions) than other methods of dating used over the Holocene.

We hereby present a review of the various methods used in dendroglaciology from examples taken in the literature; a particular attention is carried in the studies made in the alpine region

KEYWORDS: DENDROCHRONOLOGY, GLACIAL FLUCTUATIONS, HOLOCENE, DATING METHOD.

INTRODUCTION

La dendrochronologie est la science qui traite de l'étude et de la datation des cernes de croissance des arbres. Bien que dès le XV^e siècle Leonard de Vinci ait déjà remarqué la nature annuelle des cernes et relié leur largeur au facteur précipitation, la méthode ne s'est réellement développée qu'au début du XX^e siècle sous l'impulsion de l'astronome et physicien américain A.E. Douglass. Celui-ci a en effet noté l'occurrence de cernes étroits sur des arbres étudiés dans de nombreux sites de l'ouest des Etats-Unis. L'observation, sur un vaste territoire, de ces cernes remarquables qu'il attribue à la sécheresse lui permet de jeter les bases de l'interdatation comme outil potentiel de datation. Après avoir développé de longues chronologies, il sera l'auteur, dès 1914, des premières datations dendrochronologiques, effectuées sur des sites archéologiques indiens (Douglass, 1921).

Dans la seconde partie du XX^e siècle, la dendrochronologie s'est diversifiée en plusieurs branches en réponse à l'apparition de problématiques nouvelles. Si aujourd'hui les applications à l'archéologie et à l'histoire sont toujours d'actualité, la dendrochronologie a également intégré les sciences de l'environnement (Schweingruber, 1988, 1996). On parle donc de *dendro-climatologie* pour l'utilisation de longues séries dendrochronologiques à des fins de reconstitutions paléoclimatiques (Fritts, 1976 ; Büntgen *et al*, 2006 ;

Hughes *et al*, 2009), de *dendro-écologie* pour l'étude de la réponse de l'arbre à son environnement et aux changements climatiques (Petitcolas et Rolland, 1996 ; Keller *et al*, 2000), et de *dendro-géomorphologie* pour l'étude des processus géomorphologiques. En effet, les végétaux ligneux ont une grande capacité de réaction face aux stress liés aux perturbations de leur milieu de croissance (*process-event-response*, Shroder, 1978). L'analyse et la datation de ces réactions présente donc un grand intérêt pour la reconstitution de différents processus (Alestalo, 1971 ; Wiles *et al*, 1996), qu'il s'agisse de la morphogénèse postglaciaire des fonds de vallées (Becker et Schirmer, 1977 ; Sivan *et al*, 2006), des variations de niveaux de lacs (Stockton et Fritts, 1973 ; Bégin et Payette, 1988), d'éruptions volcaniques (Yamaguchi, 1983), de glissements de terrains (Shroder, 1978), d'avalanches (Casteller *et al*, 2007. Reardon *et al*, 2008), de chutes de pierre (Stoffel *et al*, 2005a), de laves torrentielles (Stoffel *et al*, 2005b), de géomorphologie fluviale (Astrade et Bégin, 2002 ; Astrade *et al*, 2009). C'est à cette branche que l'on peut rattacher la dendroglaciologie qui a pour objet la reconstitution des fluctuations glaciaires. Cet article se propose donc, après un rappel des bases de la dendrochronologie, de présenter cette technique et les résultats obtenus dans les Alpes.

I - LE PRINCIPE DE LA DENDROCHRONOLOGIE

Sous un climat tempéré marqué par la saisonnalité, les arbres produisent un cerne annuel durant la période d'activité végétative (d'avril à septembre). Le cerne est constitué chez les conifères d'un bois initial clair (car constitué de trachéides larges aux parois fines) qui se forme au printemps, et d'un bois final plus sombre (trachéides petites aux parois épaisses) qui se forme en été et au début de l'automne. L'épaisseur des cernes (mais aussi la densité maximum et la signature isotopique du bois) varie en réponse à différents facteurs internes (facteurs biotiques tels que l'âge, la longévité, la sensibilité, ou génétiques) et externes (climat, sol, exposition, dynamiques de population, action anthropique, etc).

La variabilité interannuelle de l'épaisseur des cernes, retranscrite de façon *quasi* similaire par les individus d'une même espèce qui vivent sous des conditions climatiques semblables, est principalement due à la variabilité climatique (température, précipitations, enneigement, etc). Ainsi, en comparant les variations d'épaisseur de cernes de différentes séries, il est possible de synchroniser des séquences venant d'arbres ayant eu des périodes de vie communes. Cette synchronisation ou interdatation (*crossdating*) s'effectue grâce à des tests statistiques (Eckstein, 1969 ; Baillie, 1982)

et à une vérification visuelle. L'interdatation se base sur l'identification de cernes originaux, soit parce qu'ils sont particulièrement minces, soit parce qu'ils présentent une anatomie particulière (cernes de gel, cernes à bois final étroit liés à des épidémies de tordeuse grise chez le mélèze, par exemple), qui se retrouvent chez plusieurs arbres et qui constituent des repères chronologiques. Ces années caractéristiques ou *pointer years* (Schweingruber *et al*, 1990) peuvent même être significatives au-delà de l'échelle régionale et permettre des corrélations sur de longues distances (téléconnexions) (Rolland *et al*, 2000). Pour une séquence de tels cernes on parlera de signature caractéristique. L'interdatation permet en outre de détecter les anomalies de croissance (faux cernes ou cernes absents) qui peuvent être présentes dans les séries et perturber la datation.

Identifier les cernes ou les séquences caractéristiques et attribuer à chaque cerne l'année exacte de sa formation est à la base de la construction des chronologies de référence. Celles-ci sont construites en partant d'arbres vivants dont on connaît l'année du dernier cerne sous l'écorce (qui correspond à l'année du prélèvement s'il est fait en été) puis en remontant le temps avec des bois de différentes sources (pièces archéologiques, bois subfossiles...) pour pouvoir étendre la chro-

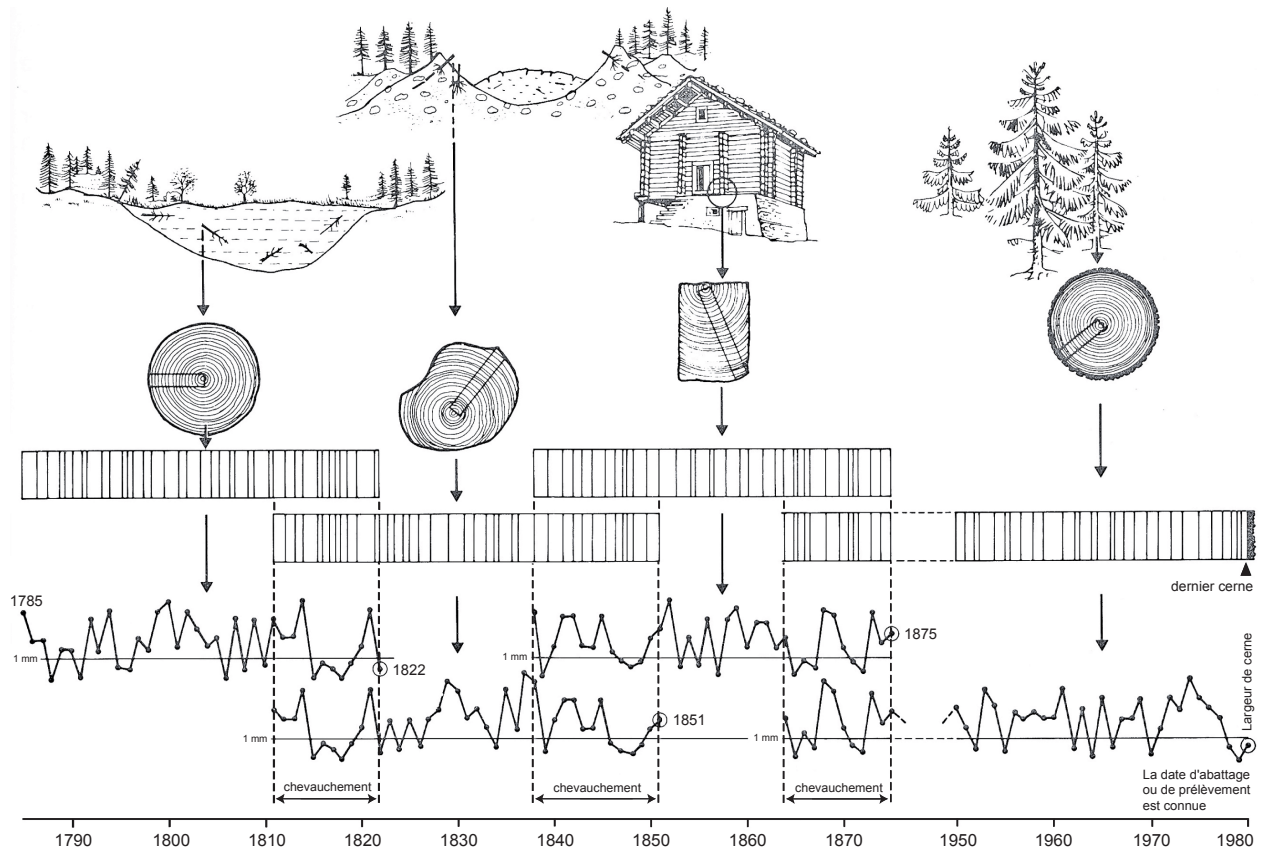


Figure 1 - Le principe de l'interdatation et son utilisation pour la construction d'une chronologie dendrochronologique (traduit de Schweingruber, 1988).

nologie au-delà de la période couverte par les arbres vivants (figure 1). L'interdatation va ensuite permettre d'attribuer une date calendaire à des séries non datées en les comparant avec la chronologie de référence. L'intérêt majeur de la dendrochronologie est sa résolution annuelle (voire saisonnière). Mais dans le cas de bois subfossiles (*i.e.* restes ligneux conservés dans des dépôts sédimentaires quaternaires), elle est souvent conditionnée par le degré de conservation de l'échantillon (présence ou non de l'écorce, de l'aubier).

A toutes les étapes du traitement, l'objectif est de minimiser les caractéristiques individuelles afin de faire ressortir le signal commun (le climat). Au niveau de l'arbre, plusieurs rayons sont mesurés et moyennés, ce qui constitue une série individuelle. De la même façon pour effectuer une datation on privilégie, dans la mesure du possible, la construction d'une chronologie à partir de quelques échantillons contemporains issus d'un même site, afin de tamponner les réponses individuelles. Enfin la qualité d'une chronologie de référence est jugée sur sa couverture, c'est-à-dire le nombre d'échantillons recouvrant chaque année.

Les données dendrochronologiques n'étant pas seulement influencées par le climat, un traitement statistique doit être effectué sur les données brutes pour faire disparaître l'effet géométrique lié à l'âge (pour une quantité identique de bois produite, les cernes périphériques sont plus étroits que les cernes proches de

la moelle puisque le bois est réparti sur un rayon plus grand) et rendre les données homogènes et comparables entre elles. Ce procédé s'appelle la standardisation (Fritts, 1976 ; Cook et Kairiukstis, 1990). Différents types de traitements statistiques sont utilisés afin de mettre en évidence les variations de haute fréquence, ou de moyenne et basse fréquence.

Dans une perspective de calibration du ^{14}C , mais aussi pour des reconstitutions paléoenvironnementales basées sur la comparaison de différents proxy à haute résolution (cernes d'arbres, varves lacustres et marines, carottes de glace, données historiques et phénologiques), les dendrochronologues ont développé depuis quelques décennies des chronologies multimillénaires dans différentes régions du globe (Ferguson, 1969 ; Lara et Villalba, 1993 ; Gruud *et al*, 2002 ; Hantemirov et Shiyatov, 2002). En Europe, les plus longues chronologies concernent le chêne. Celle d'Allemagne du sud atteint 10 400 ans. L'interdatation de cette série avec des chronologies de pin préboréales d'Europe centrale permet d'étendre la chronologie datée de façon absolue jusqu'au milieu du Dryas récent (12 593 cal. BP) et de dater la transition Tardiglaciaire / Holocène (Friedrich *et al*, 2004 ; Schaub *et al*, 2008). Dans la région alpine, et plus particulièrement en zone subalpine (au niveau de la limite des arbres), les très longues chronologies sont rares. Une chronologie de *Pinus Cembra* couvrant en continu les 9111 dernières années a été développée

récemment pour les Alpes orientales (Nicolussi *et al*, 2009). Dans les Alpes suisses et françaises les longues chronologies continues pour les essences subalpines (principalement mélèze et pin cembro) couvrent respectivement 1300 ans (Büntgen *et al*, 2004 ; 2006), et un peu plus que le dernier millénaire (Edouard, 2007 ;

Edouard et Thomas, 2008). Dans les Alpes du sud, plusieurs chronologies flottantes (calées par des dates ^{14}C) existent également sur l'ensemble de la période holocène et sur le tardiglaciaire (Miramont *et al*, 2000 ; Edouard, 1994 ; Edouard *et al*, 2002 ; Edouard et Thomas, 2008 ; Sivan et miramont, 2008.).

II - APPLICATION À L'ÉTUDE DES FLUCTUATIONS GLACIAIRES

La dendroglaciologie se définit comme la reconstitution des fluctuations glaciaires par l'analyse des cernes d'arbres (Innes, 1987 ; Luckman, 1998 ; Smith et Lewis, 2007). Cette discipline inclut donc la datation de moraines avec des arbres vivants ou subfossiles, mais également la reconstitution de paléo-bilans de masse glaciaires au moyen de séries dendrochronologiques. Par extension, la tentative (plus indirecte) de relier les fluctuations de la limite supérieure des arbres aux variations de la ligne d'équilibre glaciaire peut également rentrer dans ce cadre (Solomina, 2002). La dendroglaciologie est cantonnée aux régions où les glaciers ont interféré avec l'étage montagnard au cours de l'Holocène, excluant les massifs montagneux sous climats continentaux arides. Le terrain de prédilection pour son utilisation se trouve principalement dans les cordillères côtières du continent américain (Alaska, Canada et Patagonie) où les travaux de ce genre sont les plus anciens et les plus nombreux (Lawrence, 1950 ; Bray et Struik, 1963 ; Heikkinen, 1984 ; Ryder et Thompson, 1986 ; Villalba *et al*, 1990 ; Luckman, 2000 ; Koch et Kilian, 2005 ; Koch *et al*, 2007a, 2007b ; Jackson *et al*, 2008 ; Masiokas *et al*, 2009). Elle a également été mise en œuvre dans les Alpes (Holzhauser, 1984 ; 1997 ; Holzhauser et Zumbühl, 1996 ; Holzhauser *et al*, 2005 ; Pelfini, 1999), en Asie centrale (Solomina, 1996) et en Himalaya (Bräuning, 2006).

Employée à l'origine pour dater les fluctuations du Petit Age Glaciaire (P.A.G.), la dendroglaciologie peut maintenant être utilisée sur une partie de l'Holocène grâce à l'extension des chronologies qui permettent l'attribution de dates calendaires à des récurrences glaciaires très anciennes. Les datations précises obtenues avec les techniques dendrochronologiques s'avèrent primordiales pour pouvoir effectuer des comparaisons entre chronologies glaciaires de massifs différents. L'objectif étant de pouvoir évaluer le synchronisme d'épisodes climatiques, mêmes brefs (comme l'évènement 8200 BP par exemple), ce qui est difficile avec la précision qu'autorisent le ^{14}C (Menounos *et al*, 2004) ou la lichénométrie.

En dendroglaciologie, les arbres peuvent être utilisés de différentes manières et n'apportent pas les mêmes informations selon leur position géographique, stratigraphique, etc, au sein de la marge proglaciaire. Nous allons donc détailler les principales manières d'utiliser les arbres pour dater des fluctuations glaciai-

res, ainsi que les précautions à prendre quant à l'interprétation des données recueillies.

1 - L'âge des arbres vivants sur les formations glaciaires

A priori, dans ce cas de figure, le décompte des cernes du plus vieil arbre échantillonné procure un âge minimum de la formation sur lequel il a poussé, ceci n'étant vrai que si les arbres présents sont de première génération (Sigafos et Hendricks, 1969). Cependant, pour évaluer la date du dépôt de la moraine avec la plus grande précision possible, il faut prendre en compte différents facteurs :

- le comptage des cernes peut amener à des erreurs substantielles pour Koch (2009) qui propose une méthodologie basée sur l'interdatation et la constitution d'une chronologie propre à chaque site, et non plus sur un simple décompte. En effet les cernes absents ou les faux cernes peuvent conduire à une sous- ou à une sur-estimation de l'âge des moraines s'ils ne sont pas détectés – l'erreur associée pouvant aller jusqu'à une dizaine d'années selon cette étude ;
- l'âge de l'arbre à la hauteur du prélèvement doit également être déterminé et ajouté à la valeur précédente (*age-height correction*). En effet, l'âge indiqué par la carotte prélevée, souvent à hauteur de poitrine (1,2 m), ne reflète pas l'âge réel de l'arbre. La correction de l'âge par rapport à la hauteur d'échantillonnage se fait en mesurant les taux de croissance de plants de la même espèce sur le site étudié. Mais l'application uniforme de cette valeur moyenne ne prend pas en compte la variabilité microclimatique et topographique inhérente aux terrains de montagne, et les variations de croissance importantes qui en découlent. Elle doit donc être pondérée en mesurant le taux de croissance radiale près de la moelle (souvent corrélé à la hauteur de l'arbre) indiquant s'il s'agit d'un individu à croissance rapide ou non. Selon les cas, on appliquera alors une correction basée sur un taux de croissance élevé pour les individus dont les premiers cernes sont larges, et inversement s'ils sont étroits (Winchester et Harrison, 2000 ; Koch, 2009). Pour diminuer l'impact de ce biais, il est conseillé d'effectuer les prélèvements

le plus près possibles du sol afin de conserver le plus grand nombre de cernes ;

- enfin, il faut estimer une valeur d'écèse (*ecesis*) c'est-à-dire la période comprise entre la stabilisation du dépôt et la germination du premier arbre. Cela peut être fait par analogie avec la littérature existante, ou plus sûrement en calibrant cette valeur à proximité du site étudié, si une surface bien datée (*e.g.* moraine, glissement de terrain) est disponible pour quantifier le taux de recolonisation (McCarthy et Luckman, 1993 ; Strumia et Schweingruber, 1996). Le délai d'écèse peut varier fortement selon les caractéristiques du site (altitude, orientation, enneigement, etc) et doit donc être déterminé localement (Gutsell et Johnson, 2002). Malgré les précautions prises, l'âge dérivé sera un âge minimum car on ne peut pas déterminer l'écèse pour un arbre particulier (McCarthy et Luckman, 1993).

2 - Les ruptures de croissance chez les arbres proches du glacier

Parfois les arbres directement témoins de la poussée glaciaire continuent à vivre après avoir été touchés par le glacier ou heurtés par des débris supraglaciaires. L'analyse des cernes et l'interdatation de la série donne alors de manière indiscutable à la fois la position et la date précise de la poussée glaciaire. Cette technique, courante en dendroglaciologie, se base sur la datation des signatures particulières que sont les cicatrices, l'apparition de bois de réaction, ou la mise en place chez certains conifères de lignes de canaux résinifères traumatiques (Bollschweiler *et al*, 2008). La réponse à la déstabilisation causée par le glacier va se traduire, chez les conifères, par l'apparition de cernes excentriques (bois de réaction) du côté du tronc opposé à la poussée glaciaire, et rendre l'événement facilement datable (figure 2). Le bois de réaction et les cicatrices peuvent également être causés par d'autres processus, tels que les chutes de pierre, les crues, les laves torrentielles ou les avalanches. Elles font de l'arbre un enregistreur fidèle des modifications de son environnement, de façon continue et sur une longue période, si les événements n'entraînent pas la mort de l'individu.

La réduction du taux de croissance des arbres situés à proximité immédiate du glacier est parfois utilisée pour identifier les phases de crues glaciaires (Nicolussi et Patzelt, 1996). L'interdatation des chronologies individuelles doit se faire, dans ce cas, avec une chronologie de référence indépendante du phénomène étudié – en l'occurrence l'influence glaciaire. Cette méthode doit s'appuyer pour Luckman (1998) sur la démonstration claire d'un lien entre la chute du taux de croissance chez les arbres bordiers et la présence du glacier (dépôt d'une moraine, par exemple). Elle aboutit pour cet auteur à des résultats contrastés comme le mon-

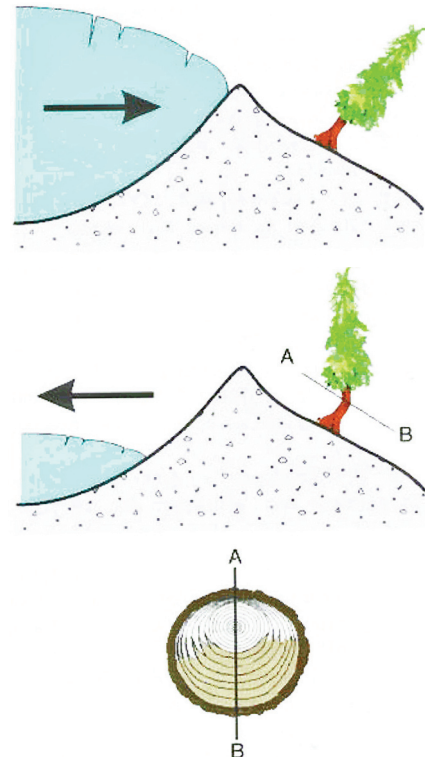


Figure 2 - Formation de bois de réaction en réponse à une crue glaciaire chez les arbres poussant sur une moraine (Smith et Lewis, 2007)

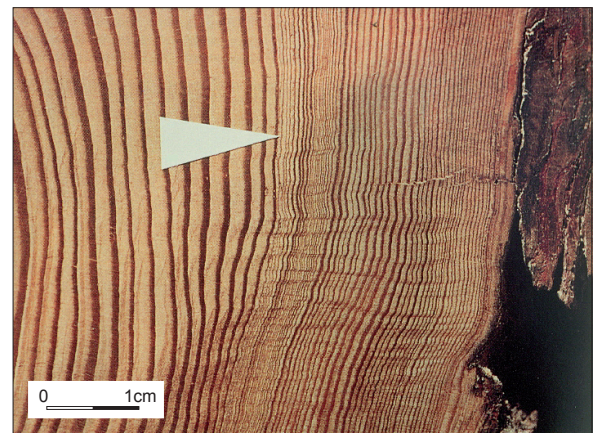


Figure 3 - Forte chute de croissance à partir de 1505 (flèche) chez un mélèze proche du Glacier d'Aletsch en réponse à une petite avancée glaciaire. La crue suivante, plus importante, sera responsable de la mort de cet arbre en 1588. La présence de l'écorce sur cet échantillon autorise une datation précise (photo H. Holzhauser).

trent des exemples pris dans les Rocheuses canadiennes (Luckman, 1998). En effet, il semble que la chute du taux de croissance due à la proximité de la glace (figure 3) ne soit observable que chez les individus situés à moins de 5 m du front glaciaire (Bray et Struik, 1963 ; Villalba *et al*, 1990). En revanche les baisses de croissance observées dans les chronologies de référence régionale s'avèrent bien corrélées (LaMarche et

Fritts, 1971 ; Matthews, 1977), ou même anti-corrélées (Villalba *et al*, 1990), avec les épisodes de crues glaciaires et les dates de dépôt de moraines.

3 - Les arbres morts libérés par le retrait du glacier

Les arbres trouvés à l'intérieur de la marge proglaciaire se divisent en deux catégories selon l'interprétation qui est faite de l'endroit où ils ont poussé :

- les bois *in situ* sont ceux qui sont retrouvés en position de vie, soit sous forme de souches en place dans la marge proglaciaire, soit sous forme de troncs reposant en lits parallèles dans la face proximale des grandes moraines latérales composites (Osborn, 1986 ; Reyes et Clague, 2004). Dans les moraines latérales, l'évidence d'une croissance *in situ* est moins forte (à moins que les racines ne reposent au niveau d'un horizon organique – *i.e.* un paléosol), car les arbres ont parfois pu être remobilisés par une crue postérieure à celle qui les a tués, ou résulter d'avalanches sur les versants (figure 4, A2). C'est alors l'orientation du tronc et son aspect, de même que les caractéristiques géomorphologiques locales qui doivent être examinées. Dans les deux cas, les arbres sont mis au jour par érosion du till (du fait de l'incision des émissaires proglaciaires, ou de la régularisation des moraines). Dans les Alpes, aucun bois plus vieux que 4000 BP n'a été retrouvé dans les moraines latérales, ce qui indique que ces formations se sont principalement construites durant le Néoglaire (Joerin, 2006). Les bois *in situ* représentent la seule preuve indiscutable de la position du glacier pour une date donnée. Ces

souches en position de vie dans les marges proglaciaires sont relativement fréquentes au Canada où de véritables forêts fossiles ont pu être observées grâce au retrait glaciaire de ces dernières décennies (Luckman, 1995 ; Wood et Smith, 2004). De tels gisements sont plus rares dans les Alpes. Certains glaciers suisses (Aletsch, Zmutt, Zinal, Allalin notamment) sont cependant connus pour avoir recouvert des boisements matures pendant l'Holocène (Röthlisberger *et al*, 1980) ;

- les bois détritiques sont les bois retrouvés dans les marges proglaciaires mais qui ne sont plus en position de vie, donc souvent à l'aval du site où ils ont poussé. Leur apparence témoigne du transport intra- ou sous-glaciaire qu'ils ont subi : absence d'écorce, érosion de surface, incrustation de sédiments, déformation, etc. La préservation de petites branches ou de l'écorce signifie un transport court, ou un enfouissement sur place dans le cas de souches *in situ* (Koch *et al*, 2007a). Les bois détritiques posent généralement des problèmes d'interprétation. Ryder et Thomson (1986) ont listé les interprétations possibles des datations obtenues sur ces bois, selon l'endroit où l'échantillonnage a été réalisé (figure 4). Un bois détritique en position stratigraphique (dans une moraine latérale ou dans le till de la marge proglaciaire) indique un âge maximum pour une avancée du glacier. Il définit également l'extension minimum du glacier car celui-ci doit avoir atteint au moins le bois et probablement l'avoir dépassé (Koch *et al*, 2007a). Si ce bois résulte d'une avalanche et n'a pas été tué par une crue glaciaire, il indique toujours un âge maximum qui n'est pas très éloigné de la date réelle car sa conservation est due à son incorporation au sédiment glaciaire. En effet,

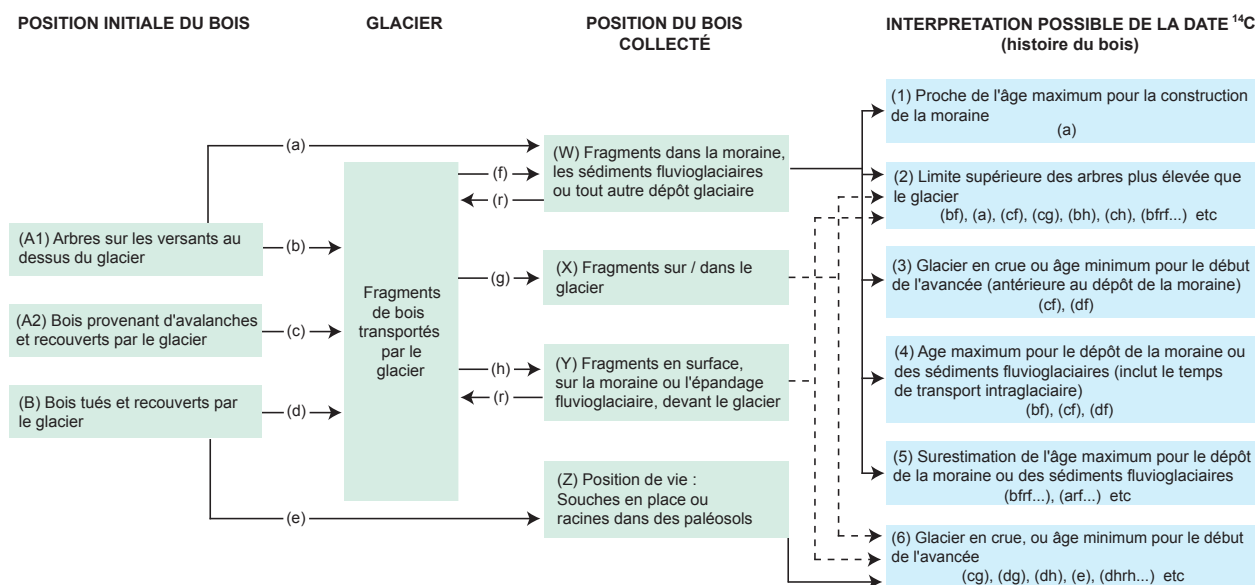


Figure 4 - Interprétations possibles des datations effectuées sur des bois provenant d'une marge proglaciaire (traduit de Ryder et Thomson, 1986).

des troncs exposés à l'air libre dans un environnement alpin pourrissent généralement en 30 à 60 ans (Röthlisberger et Schneebeli, 1979). Les bois trouvés aux fronts des glaciers actuels indiquent en outre une extension plus faible du glacier lors de phases de recul prononcé, et donc un âge minimum pour ces retraits paroxystiques.

Quand un échantillonnage significatif (plusieurs dizaines de pièces) est possible, les bois (*in situ* et/ou détritiques) permettent d'établir une chronologie précise des récurrences glaciaires en identifiant les périodes où de grandes quantités d'arbres sont morts par enfouissement (Wiles *et al.*, 1999 ; Luckman, 2000 ; Joerin *et al.*, 2008 ; Barclay *et al.*, 2009). Les bois sub-fossiles peuvent aussi être utilisés pour prolonger les chronologies de référence au-delà de la limite permise par les arbres vivants poussant à proximité (500-600 ans) et permettre ainsi des datations calendaires sur un plus grand intervalle. Lorsque les bois collectés sur la marge proglaciaire ne peuvent être interdatés avec des chronologies existantes, la datation au ^{14}C est utilisée pour fournir une date relative à la chronologie qui sera alors flottante. Mais la méthode radiocarbone est moins précise et il existe une incertitude dans la comparaison des données. Elle peut néanmoins être grandement améliorée par la technique du *wiggle-matching* qui consiste à dater au ^{14}C plusieurs échantillons (d'un même bois ou d'une chronologie flottante) faiblement espacés (*e.g.* tous les 10 ans). Les différents échantillons serviront ainsi à ancrer la séquence sur la courbe de calibration du ^{14}C et à améliorer très sensiblement la résolution de la date (Kromer, 2009).

4 - La reconstitution de dendro-bilans de masse

Cette procédure utilise les techniques des reconstitutions dendroclimatiques et se fonde sur la corrélation négative qui existe entre la croissance des cernes et

les paramètres favorisant le bilan de masse glaciaire (*i.e.* forte accumulation hivernale, fraîcheur et nébulosité estivale). Les périodes de bilans de masse positifs sont ainsi souvent caractérisées par des cernes plus étroits que la moyenne chez les arbres poussant en limite supérieure de la forêt, à proximité des zones englacées. Cette relation, qui a été mise en évidence dans plusieurs massifs et pour des essences différentes (LaMarche et Fritts, 1971 ; Matthews, 1977 ; Bhattacharyya *et al.*, 2006 ; Borgaonkar *et al.*, 2009), peut donc être utilisée pour reconstituer l'histoire des glaciers par le biais du calcul de paléo-bilans de masse. La méthode est particulièrement adaptée aux régions où il n'existe pas de sources historiques, ou bien pour pouvoir remonter au-delà de ces sources dans des massifs comme les Alpes.

Nicolussi (1995) a reconstitué les bilans de masse annuels du glacier Hintereis (Autriche) jusqu'en 1400 AD en employant une série dendrochronologique de *Pinus Cembra*, principalement contrôlée par la température estivale. Par la suite, d'autres tentatives ont été menées en reconstruisant séparément les bilans de masse estivaux et hivernaux avec des données dendrochronologiques indépendantes (Watson et Luckman, 2004 ; Larocque et Smith, 2005). En effet, les bilans de masse hivernaux et estivaux n'étant pas forcément corrélés, il faut trouver deux proxy différents pour modéliser l'un et l'autre, et aboutir à une reconstitution plus juste du bilan de masse annuel. Pour Linderholm *et al.* (2007), l'utilisation des séries dendrochronologiques est adaptée à la modélisation du bilan estival mais pas à celle du bilan hivernal du glacier de Storglaciären (Suède), pour lequel il faut un proxy indépendant (un indice de circulation atmosphérique dans ce cas).

Avec le développement de chronologies multi-millénaires, le potentiel existe pour que ces reconstitutions continues et à haute résolution puissent remonter plus loin que le Petit Age Glaciaire sur lequel elles ont été menées jusqu'à présent, et s'étendre à une partie de l'Holocène (Smith et Lewis, 2007).

III - LES RÉSULTATS OBTENUS DANS LES ALPES

La découverte de restes ligneux exposés par le retrait des glaciers n'est pas récente puisqu'aux XVIII^e et XIX^e siècles des troncs fossiles étaient déjà observés au front du glacier de l'Unteraar et du glacier inférieur de Grindelwald en Suisse (Röthlisberger et Schneebeli, 1979). Cependant leur étude systématique n'a commencé que dans les années 1960-70, époque à laquelle de nombreux échantillons ont été exhumés des marges proglaciaires – parfois à l'occasion de grands travaux hydroélectriques – puis datés au radiocarbone (Röthlisberger et Oeschger, 1961 ; Corbel et Le Roy Ladurie, 1963 ; Bezinge, 1976 ; Vivian, 1975, 1976 ; Röthlisberger *et al.*, 1980). Plus récemment, l'analyse dendrochronologique de tels échantillons a permis de

faire beaucoup progresser la compréhension des fluctuations glaciaires holocènes dans les Alpes centrales et orientales.

La chronologie néoglaciale des glaciers suisses et autrichiens est aujourd'hui bien contrainte grâce notamment aux travaux de Holzhauser et de ses collaborateurs sur les glaciers d'Aletsch, glacier du Gorner et glacier inférieur de Grindelwald en Suisse (Holzhauser et Zumbühl, 1996 ; Holzhauser, 1997 ; Holzhauser *et al.*, 2005), et aux travaux de Nicolussi et Patzelt (1996, 2001) sur les glaciers de Pasterze et de Gepatsch en Autriche. Ces études se basent principalement sur la datation de souches trouvées *in situ* dans les marges proglaciaires, et sur des sources historiques pour la période

la plus récente (les 450 dernières années).

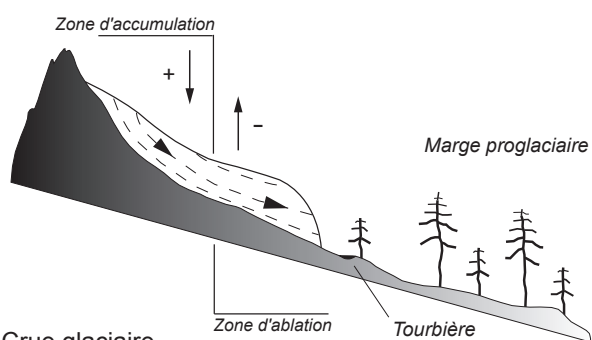
D'autre part, la datation, principalement au ^{14}C , des bois trouvés au niveau des fronts glaciaires actuels par les équipes des universités de Bern et Innsbruck, a permis de faire émerger une chronologie des phases de contractions glaciaires sur l'ensemble de l'Holocène (Hormes *et al.*, 1998 ; 2001 ; 2006 ; Nicolussi et Patzelt, 2000 ; 2001 ; Joerin, 2006 ; Joerin *et al.*, 2006 ; 2008). Il apparaît ainsi que de nombreuses phases de retrait ont marqué l'Holocène (surtout la première moitié). Le cumul de ces intervalles indique même que les glaciers ont été moins étendus qu'ils ne le sont actuellement pendant au moins la moitié de l'Holocène (Ivy-Ochs *et al.*, 2009). Les troncs retrouvés sont supposés avoir poussé pendant des périodes plus chaudes dans et/ou sur le bord de bassins de sédimentation situés actuellement sous la glace (figure 5). Ils en sont expulsés aujourd'hui à la faveur de vidanges sous-glaciaires. Le fait que des morceaux de

tourbe compressée les accompagnent accrédite cette hypothèse. Des profils radar effectués au glacier de Tschierva (Grisons, Suisse) montrent qu'un tel bassin existe un kilomètre à l'amont du front actuel. Les travaux menés sur ce site par Joerin *et al.* (2008) indiquent que l'altitude de la ligne d'équilibre glaciaire (LEG) était plus de 220 m supérieure à celle de l'année de référence (1985) pendant les différentes périodes où des arbres ont pu pousser sur ce site (vers 9200 cal. BP, de 7450 à 6650 cal. BP, et de 6200 à 5650 cal. BP). Dans le cadre de cette étude, l'interdatation des séries dendrochronologiques issues des bois subfossiles avec la série dendrochronologique des Alpes orientales a permis d'attribuer pour la première fois des âges calendaires à ces phases de retrait holocènes. On peut noter en outre que ces optimums holocènes reconstitués d'après les glaciers coïncident avec les reconstitutions d'une limite supérieure des arbres bien supérieure à l'actuelle dans les Alpes orientales (Nicolussi *et al.*, 2005).

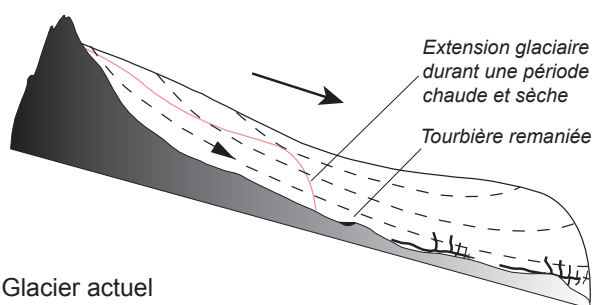
Dans les Alpes occidentales, peu de bois ont été trouvés dans les marges proglaciaires jusqu'à présent, et peu d'études ont été réalisées. Une dizaine d'échantillons provenant des massifs du Mont Blanc et des Ecrins ont été datés par Vivian dans les années 1970. Les âges obtenus s'échelonnaient entre 500 BP et 8000 BP (Vivian, 1975). Bless (1984) et Wetter (1987) ont également daté, entre l'Actuel et 3600 BP, une vingtaine de bois issus des moraines latérales des glaciers de la vallée de Chamonix (Argentière, Mer de Glace et les Bossons). Très peu de ces bois étaient en position de vie et ils n'ont pas fait l'objet d'analyse dendrochronologique. Edouard (1978) relate le peu d'éléments ligneux trouvés dans le bassin de la Romanche, région peu boisée aujourd'hui. Sur le versant italien du massif du Mont Blanc, Orombelli et Porter (1982) ont daté deux troncs issus de la moraine latérale droite du glacier de la Brenva, et Aeschlimann (1983) a publié une série densitométrique (mesure de la densité du bois final qui est un bon indicateur des températures estivales) pour un mélèze fossile de 300 ans extrait du site du Jardin du Miage, où une forêt a été enfouie par l'avancée du glacier du Miage au XVII^e siècle. L'auteur en déduit une interprétation climatique de la première partie du P.A.G. Enfin, Edouard (1994) dresse un panorama des bois subfossiles retrouvés au dessus de la limite actuelle de la forêt dans les Alpes françaises, mais peu des échantillons recensés ne proviennent de marges proglaciaires.

En dépit de ce bilan, un potentiel existe pour de telles études dans les Alpes occidentales, comme le prouvent les échantillons récoltés récemment par un des auteurs dans les massifs du Mont Blanc et des Ecrins. Une synthèse des travaux existants accompagnée d'une prospection exhaustive et de l'emploi de la dendrochronologie pourra contribuer à jeter un éclairage nouveau sur la chronologie glaciaire de la région.

Glacier plus réduit que l'Actuel



Crue glaciaire



Glacier actuel

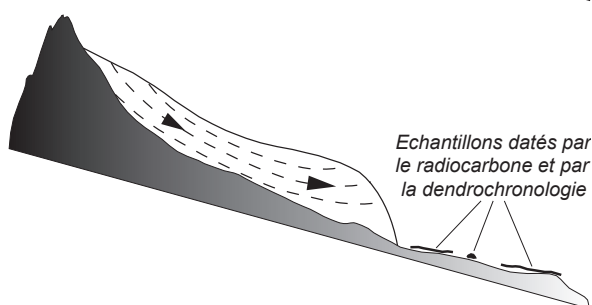


Figure 5 - Colonisation végétale et développement de tourbière dans la marge proglaciaire lors de périodes de retrait prononcé du glacier. La matière organique est ensuite érodée par une crue glaciaire, puis transportée dans et/ou sous le glacier, conservée dans le sédiment glaciaire, pour être enfin exposée au niveau du front lors d'une autre période de retrait (modifié de Hormes *et al.*, 2001).

CONCLUSION

La dendrochronologie est un outil de datation particulièrement intéressant puisqu'il autorise des reconstitutions paléoclimatiques à haute résolution, très recherchées dans l'évaluation de la variabilité climatique passée.

Les fluctuations glaciaires holocènes sont à présent relativement bien connues dans les Alpes centrales et orientales même si des zones d'ombre persistent – notamment sur l'amplitude et le synchronisme des fluctuations pendant la première moitié de la période (Ivy-Ochs *et al.*, 2009). Ces résultats ont été possibles grâce à l'apport de la dendrochronologie qui a permis, dans de nombreux cas, des datations calendaires précises. Cependant, les Alpes occidentales (principalement la partie française de la chaîne) ont été beaucoup moins étudiées puisque aucune chronique holocène n'est disponible. De plus, les travaux qui existent, toujours contraints par des datations radiocarbone, n'ont concerné que les grands appareils du massif du Mont Blanc pendant la deuxième moitié de l'Holocène. Il

existe donc un besoin de chronologies glaciaires plus précises sur cette zone et l'utilisation de la dendrochronologie serait un moyen d'y parvenir.

C'est l'objet de la thèse en cours de M. Le Roy au laboratoire EDYTEM que de tenter d'établir une chronologie, la plus précise possible, des fluctuations glaciaires holocènes dans les Alpes occidentales avec, entre autres méthodes de datation, le recours privilégié à la dendrochronologie. Pour cela, la première étape consiste à établir des référentiels dendrochronologiques propres au Alpes du nord occidentales – car ils n'existent pas actuellement – pour les deux essences subalpines les plus courantes, le pin cembro et le mélèze. Cela nécessite un travail de prospection afin d'identifier les plus vieux arbres vivants, le bâti ancien, et les bois subfossiles conservés dans les sédiments (tourbières, lacs). Ces chronologies de référence permettront, dans un second temps, de dater les échantillons récoltés dans les marges proglaciaires.

BIBLIOGRAPHIE

- AESCHLIMANN H., 1983. Zur Gletschergeschichte des italienischen Mont Blanc Gebietes : Val Veni - Val Ferret - Rutor. Thèse de Doctorat, Université de Zürich, 106 p.
- ALESTALO J., 1971. Dendrochronological interpretation of geomorphic processes. *Fennia* 105, 1-140.
- ASTRADE L., BÉGIN Y., 2002. Utilisation de la dendrochronologie comme outil de diagnostic et d'évaluation du fonctionnement des hydrosystèmes. In Ruffinoni C., Piégay H., Pautou G., Les ripisylves dans les hydrosystèmes fluviaux, éd. I.D.F.-C.N.R.S.
- ASTRADE L., CORENBLIT D., DUFOUR S., LE LAY Y.F., LIÉBAULT T F., PIÉGAY H., STEIGER J., 2009. La végétation ligneuse dans les systèmes fluviaux anthropisés : quelques avancées conceptuelles et méthodologiques récentes. In L'évolution de la recherche sur les hydrosystèmes continentaux en géographie, Comité National Français de Géographie, éd. L'Harmattan, 54 p.
- BAILLIE M.G.L., 1982. Tree-ring dating and archaeology. Croom Helm, London, 271 p.
- BARCLAY D.J., WILES G.C., CALKIN P.E., 2009. Tree-ring crossdates for a first millennium advance of Tebenkof Glacier, Southern Alaska. *Quaternary Research*, 71, 22-26.
- BECKER B., SCHIRMER W., 1977. Paleocological study on the Holocene valley development of the River Main, southern Germany. *Boreas*, 6, 4, 303-321.
- BÉGIN Y., PAYETTE S., 1988. Dendroecological evidence of lake-level changes during the last three centuries in subarctic Quebec. *Quaternary Research*, 30, 210-220.
- BEZINGE A., 1976. Troncs fossiles morainiques et climat de la période holocène en Europe. *Bulletin de la Murithienne*, 93, 93-111.
- BHATTACHARYYA A., SHAH S.K., CHAUDHARY V., 2006. Would tree-ring data of *Betula Utilis* would be potential for the analysis of Himalayan glacial fluctuations ? *Current Science*, 91, 6, 754-761.
- BLESS R., 1984. Beiträge zur Spät- und Post- glazialen Geschichte der Gletscher im Nordöstlichen Mont Blanc Gebiet. *Physische Geographie*, 15, Zürich.
- BOLLSCHWEILER M., STOFFEL M., SCHNEUWLY D.M., BOURQUI K., 2008. Traumatic resin ducts in *Larix Decidua* stems impacted by debris flows. *Tree Physiology*, 28, 2, 255-263.
- BORGAONKAR H.P., SOMARU RAM, SIKDER A.B., 2009. Assessment of tree-ring analysis of high elevation *Cedrus Deodara* D. Don from Western Himalaya (India) in relation to climate and glacier fluctuation. *Dendrochronologia*, 27, 59-69.
- BRAÜNING A., 2006. Tree-ring evidence of "Little Ice Age" glacier advances in southern Tibet. *The Holocene*, 16, 3, 369-380.
- BRAY J.R., STRUIK G.J., 1963. Forest growth and glacial chronology in eastern British Columbia, and their relation to recent climatic trends. *Canadian Journal of Botany*, 41, 1245-1271.
- BÜNTGEN U, ESPER J, SCHMIDHALTER M, FRANK DC, TREYDTE K, NEUWIRTH B, WINIGER M (2004) Using recent and historical larch wood to build a 1300-year Valais-chronology. *TRACE* 2, 85-92
- BÜNTGEN U., FRANK D.C., NIEVERGELT D., ESPER J., 2006. Summer temperature variations in the European Alps, A.D. 755-2004. *Journal of Climate*, 19, 5606-5623.
- CASTELLER A., STÖCKLI V., VILLALBA R., MAYER A.C., 2007. An evaluation of dendroecological indicators of snow avalanches in the Swiss Alps. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 39, 2, 218-228.

- COOK E.R., KAIRIUKSTIS L.A., 1990. Methods of dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences. Kluwer, Netherlands, 394 p.
- CORBEL J., LE ROY LADURIE E., 1963. Datation au ^{14}C d'une moraine du Mont Blanc. *Revue de Géographie Alpine*, 51, 1, 173-175.
- DOUGLASS A.E., 1921. Dating our prehistoric ruins: how growth rings in trees aid in the establishing the relative ages of the ruined pueblos of the southwest. *Natural history*, 21, 1, 27-30.
- ECKSTEIN D., 1969. Entwicklung und Anwendung der dendrochronologie zur Altersbestimmung der Siedlung Haithabu. Dissertation Universität Hamburg, 113 p.
- EDOUARD J.L., 1978. La glaciation de l'Oisans. Contribution à la connaissance des fluctuations glaciaires postwürmiennes. Thèse de Doctorat de 3^{ème} cycle, Université Joseph Fourier, Grenoble, 329 p.
- EDOUARD J.L., 1994. Les lacs d'altitude dans les Alpes françaises. Contribution à la connaissance des lacs d'altitude et à l'histoire des milieux montagnards depuis la fin du Tardiglaciaire. Thèse de Doctorat d'Etat, Université Joseph Fourier, Grenoble, 798 p.
- EDOUARD J.L., GUIBAL F., NICAULT A., RATHGEBER C., TESSIER L., THOMAS A., WICHA S., 2002. Arbres subfossiles (*Pinus cembra*, *Pinus uncinata* et *Larix decidua*) et évolution des forêts d'altitude dans les Alpes françaises au cours de l'Holocène. Approche dendrochronologique. In Richard H. et Vignot A. (Eds.) Actes du colloque international « Equilibre et rupture dans les écosystèmes depuis 20000 ans en Europe de l'Ouest : durabilité et mutation », Annales littéraires, 730. Série "Environnement, Sociétés et Archéologie", Presses Universitaires Francomtoises, n° 3, 403-411.
- EDOUARD J.L., 2007. Les très vieux arbres vivants et les arbres morts, témoins et vestiges des forêts du passé dans les Alpes du Sud : lecture dendrochronologique d'un patrimoine naturelle et humain. Catalogue de l'exposition "Forêts alpines et Charpentes de Méditerranée" sous la dir. de P. Bernardi, édition du Fournel 1, 9-16.
- EDOUARD J.L., THOMAS A., 2008. Cernes d'arbres et chronologie holocène dans les Alpes françaises. Actes de la Table ronde JurAlp "Dynamique holocène de l'environnement dans le Jura et les Alpes : du climat à l'Homme" dir. M. Desmet, M. Magny, F. Mocchi, Aix en Provence, 15-16 novembre 2007, *Collection EDYTEM*, 6, Chambéry, 179-190.
- FERGUSON C.W., 1969. A 7104 year annual tree-ring chronology for Bristlecone Pine, *Pinus Aristata*, from the White Mountains, California. *Tree-ring Bulletin* 29, 3-4, 3-29.
- FRIEDRICH M., REMMEL S., KROMER B., HOFFMANN J., SPURK M., KAISER K.F., ORCEL C., KÜPPERS M., 2004. The 12,460-years Hohenheim oak and pine tree-ring chronology from central Europe – A unique annual record for radiocarbon calibration and paleoenvironment reconstruction. *Radiocarbon*, 46, 3, 1111-1122.
- FRITTS H.C., 1976. Tree-rings and climate. Academic Press, London, 576 p.
- GRUDD H., BRIFFA K.R., KARLÉN W., BARTHOLIN T.S., JONES P.D., KROMER B., 2002. A 7400-year tree-ring chronology in northern Swedish Lapland : natural climatic variability expressed on annual to millennial timescales. *The Holocene*, 12, 6, 657-665.
- GUTSELL S.L., JOHNSON E.A., 2002. Accurately aging trees and examining their height-growth rates: implication for interpreting forest dynamics. *Journal of Ecology*, 90, 153-166.
- HANTEMIROV R.M., SHIYATOV S.G., 2002. A continuous multimillennial ring-width chronology in Yamal, northwestern Siberia. *The Holocene*, 12, 6, 717-726.
- HEIKKINEN O., 1984. Dendrochronological evidence of variations of Coleman Glacier, Mount Baker, Washington, U.S.A. *Arctic and Alpine Research*, 16, 1, 53-64.
- HOLZHAUSER H., 1984. Zur Geschichte der Aletschgletscher und des Fieschergletschers. *Physische Geographie*, 13, Zürich.
- HOLZHAUSER H., 1997. Fluctuations of the Grosser Aletsch Glacier and the Gorner Glacier during the last 3200 years: new results. In Frenzel B., Boulton G.S., Gläser B., Huckriede U. (Eds) Glacier fluctuations during the Holocene, *Palaoklimaforschung*, 16, 35-58.
- HOLZHAUSER H., ZUMBÜHL H.J., 1996. To the history of the Lower Grindelwald Glacier during the last 2800 years - palaeosols, fossil wood and historical pictorial records - new results. *Zeitschrift für Geomorphologie Neue Folge*, 104, 95-127.
- HOLZHAUSER H., MAGNY M., ZUMBÜHL H.J., 2005. Glacier and lake-level variations in west-central Europe over the last 3500 years. *The Holocene*, 15, 6, 789-801.
- HORMES A., SCHLÜCHTER C., STOCKER T.F., 1998. Minimal extension phases of Unteraarglacier (Swiss Alps) during the holocene based on ^{14}C analysis of wood. *Radiocarbon*, 40, 2, 809-817.
- HORMES A., MÜLLER B.U., SCHLÜCHTER C., 2001. The Alps with little ice : evidence for eight Holocene phases of reduced glacier extent in the Central Swiss Alps. *The Holocene*, 11, 3, 255-265.
- HORMES A., BEER J., SCHLÜCHTER C., 2006. A geochronological approach to understanding the role of solar activity on holocene glacier length variability in the Swiss Alps. *Geografiska Annaler*, 88A, 4, 281-294.
- HUGHES M. K., DIAZ H., SWETNAM T.W., 2009. Dendroclimatology : Progress and Prospects. Springer, New York, sous presse.
- INNES J.L., 1987. Dendroglaciological investigations in Norway. In Hands AR, Walker DR (éd.), Applications of Tree-ring studies. *B.A.R. International Series*, 333, 107-120.
- IVY-OCHS S., KERSCHNER H., MAISCH M., CHRISTL M., KUBIK P.W., SCHLÜCHTER C., 2009. Latest Pleistocene and Holocene glacier variations in the European Alps. *Quaternary Science Reviews*, 1-13, sous presse.
- JACKSON S.I., LAXTON S.C., SMITH D.J., 2008. Dendroglaciological evidence for Holocene glacial advances in the Todd Icefield area, northern British Columbia Coast Mountains. *Canadian Journal of Earth Sciences* 45, 1, 83-98.
- JOERIN U., 2006. Holocene glacier fluctuations in the Swiss Alps, Thèse de doctorat, Université de Bern, 104 p.
- JOERIN U., STOCKER T.F., SCHLÜCHTER C., 2006. Multicentury glacier fluctuations in the Swiss Alps. *The Holocene*, 16, 5, 697-704.
- JOERIN U., NICOLUSSI K., FISCHER A., STOCKER T.F., SCHLÜCHTER C., 2008. Holocene optimum events inferred from subglacial sediments at Tschierwa Glacier, Eastern Swiss Alps. *Quaternary Science Reviews*, 27, 337-350.

- KELLER T., ÉDOUARD J.L., GUIBAL F., GUIOT J., TESSIER L., VILA B., 2000. Impact d'un scénario climatique de réchauffement global sur la croissance des arbres. *Comptes rendus Académie des Sciences*, Paris, Sciences de la Vie/ Life Sciences, 323, 913-924.
- KOCH J., 2009. Improving age estimates for late Holocene glacial landforms using dendrochronology - some examples from Garibaldi Provincial Park, British Columbia. *Quaternary Geochronology*, 4, 130-139.
- KOCH J., KILIAN R., 2005. "Little Ice Age" glacier fluctuations, Gran Campo Nevado. *The Holocene*, 14, 1, 20-28.
- KOCH J., OSBORN G.D., CLAGUE J.J., 2007a. Pre-"Little Ice Age" glacier fluctuations in Garibaldi Provincial Park, Coast Mountains, British Columbia, Canada. *The Holocene*, 17, 8, 1069-1078.
- KOCH J., CLAGUE J.J., OSBORN G.D., 2007b. Glacier fluctuations during the past millennium in Garibaldi Provincial Park, southern Coast Mountains, British Columbia. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 44, 1215-1233.
- KROMER B., 2009. Radiocarbon and dendrochronology. *Dendrochronologia*, 27, 15-19.
- LAMARCHE V.C. JR, FRITTS H.C., 1971. Tree-rings, glacial advance, and climate in the Alps. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 7, 1-2, 125-131.
- LARA A., VILLALBA R., 1993. A 3620-year temperature record from Fitzroya cupressoides tree-rings in southern South America. *Science*, 260, 1104-1106.
- LAROCQUE S.J., SMITH D.J., 2005. "Little Ice Age" proxy glacier mass balance records reconstructed from tree-rings in the Mt Waddington area, British Columbia Coast Mountains, Canada. *The Holocene*, 15, 5, 748-757.
- LAWRENCE D.B., 1950. Estimating dates of recent glacier advances and recession rates by studying tree growth layers. *Transaction of the American Geophysical Union*, 31, 243-248.
- LINDERHOLM H.W., JANSSON P., CHEN D., 2007. A high-resolution reconstruction of Storglaciären mass balance back to 1780/81 using tree-ring data and circulation indices. *Quaternary Research*, 67, 12-20.
- LUCKMAN B.H., 1995. Calendar-dated, early "Little Ice Age" glacier advance at Robson Glacier, British Columbia, Canada. *The Holocene*, 5, 2, 149-159.
- LUCKMAN B.H., 1998. Dendroglaciologie dans les Rocheuses du Canada. *Géographie Physique et Quaternaire*, 52, 139-151.
- LUCKMAN B.H., 2000. The Little Ice Age in the Canadian Rockies. *Geomorphology* 32, 357, 384.
- MASIOKAS M.H., LUCKMAN B.H., VILLALBA R., DELGADO S., SKVARCA P., RIPALTA A., 2009. Little Ice Age fluctuations of small glaciers in the Monte Fitz Roy and Lago del Desierto, south Patagonian Andes, Argentina. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, sous presse.
- MATTHEWS J.A., 1977. Glacier and climatic fluctuations inferred from tree-growth variations over the last 250 years, central southern Norway. *Boreas*, 6, 1-24.
- MCCARTHY D.P., LUCKMAN B.H., 1993. Estimating ecesis for tree-ring dating of moraines, a comparative study from the Canadian Cordillera. *Arctic and Alpine Research*, 25, 63-68.
- MENOUNOS B., KOCH J., OSBORN G., CLAGUE J.J., MAZZUCCHI D., 2004. Early Holocene glacier advance, southern Coast Mountains, British Columbia, Canada. *Quaternary Science Reviews*, 23, 1543-1550.
- MIRAMONT C., SIVAN O., ROSIQUE T., ÉDOUARD J.-L., JORDA M., 2000. Subfossil trees deposits in the middle Durance (Southern Alps, France). Environmental changes since Allerød to Atlantic. *Radiocarbon*, 42, 3, 423-435.
- NICOLUSSI K., 1995. Jahrringe und massenbilanz - Dendroklimatologische rekonstruktion der massenbilanzreihe des Hintereisferners bis zum jahr 1400 mittels Pinus Cembra-reihen aus den Ötztaler Alpen, Tirol. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 30, 11-52.
- NICOLUSSI K., PATZELT G., 1996. Reconstructing glacier history by means of tree-ring investigations. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 32, 207-215.
- NICOLUSSI K., PATZELT G., 2000. Discovery of early-Holocene wood and peat on the forefield of the Pasterze glacier, Eastern Alps, Austria. *The Holocene*, 10, 2, 191-199.
- NICOLUSSI K., PATZELT G., 2001. Untersuchungen zur holozänen gletscherentwicklung von Pasterze und Gepatschferner (Ostalpen). *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 36, 1-87.
- NICOLUSSI K., KAUFMANN M., PATZELT G., VAN DER PLICHT J, THURNER A., 2005. Holocene tree-line variability in the Kauner valley, Central Eastern Alps, indicated by dendrochronological analysis of living trees and subfossil logs. *Vegetation History and Archaeobotany*, 14, 3, 221-234.
- NICOLUSSI K., JOERIN U.E., PATZELT G., THURNER A., MELVIN T.M., SCHLÜCHTER C., 2009. A 9,1 ka long continuous tree-ring width chronology as a base for analyses on the environmental and climatic evolution in the Alps during the Holocene. *Geophysical Research Abstracts*, 11, EGU 2009-10506, 2009.
- OROMBELLI G., PORTER S., 1982. Late holocene fluctuations of Brenva Glacier. *Geografia Fisica e Dinamica del Quaternario*, 5, 14-37.
- OSBORN G., 1986. Lateral-moraine stratigraphy and Neoglacial history of Bugaboo Glacier, British Columbia. *Quaternary Research*, 26, 171-178.
- PELFINI M., 1999. Dendrogeomorphological study of glacier fluctuations in the Italian Alps during the Little Ice Age. *Annals of Glaciology*, 28, 123-128.
- PETITCOLAS V., ROLLAND C., 1996. Dendroecological study of three subalpine conifers in the region of Briançon (French Alps). *Dendrochronologia*, 14, 147-153.
- REARDON B.A., PEDERSON G.T., CARUSO C.J., FAGRE D.B., 2008. Spatial reconstructions and comparisons of historic snow avalanche frequency and extent using tree-rings in Glacier National Park, Montana, U.S.A. *Arctic, Antarctic and Alpine Research* 40, 1, 148-160.
- REYES A.V., CLAGUE J.J., 2004. Stratigraphic evidence for multiple Holocene advances of Lillooet Glacier, southern Coast Mountains, British Columbia. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 41, 903-918.
- ROLLAND C., DESPLANQUE C., MICHALET R., SCHWEINGRUBER F.H., 2000. Extreme tree rings in Spruce (*Picea Abies* [L.] Karst.) and Fir (*Abies Alba* Mill.) stands in relation to climate, site, and space in the southern French Alps. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 32, 1, 1-13.

- RÖTHLISBERGER H., OESCHGER H., 1961. Datierung eines ehemaligen standes des Aletschgletschers durch radioaktivitätsmessung an holzproben und bemerkungen zu holzfunden an weiteren gletschern. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 4, 3, 191-205.
- RÖTHLISBERGER H., SCHNEEBELI W., 1979. Genesis of lateral moraine complexes, demonstrated by fossil soils and trunks ; indicators of postglacial climatic fluctuations. In Schlüchter C. (éd.) *Moraines and varves; origin, genesis, classification*, A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 387-419.
- RÖTHLISBERGER H., HAAS P., HOLZHAUSER H., KELLER W., BIRCHER W., RENNER F., 1980. Holocene climatic fluctuations - Radiocarbon dating of fossil soils (fAh) and woods from moraines and glaciers in the Alps. *Geographica Helvetica*, 35, 5, 21-52.
- RYDER J.M., THOMPSON B., 1986. Neoglaciation in the southern Coast Mountains of British Columbia: chronology prior to the late Neoglacial maximum. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 23, 273-287.
- SCHAUB M., KAISER K.F., FRANK D.C., BÜNTGEN U., KROMER B., TALAMO S., 2008. Environmental change during the Allerød and Younger Dryas reconstructed from Swiss tree-ring data. *Boreas*, 37, 1, 74-86.
- SCHWEINGRUBER F.H., 1988. *Tree-rings, basics and applications of dendrochronology*. Kluwer, Academic Press, Dordrecht, Boston, London, 276 p.
- SCHWEINGRUBER F.H., 1996. *Tree rings and Environment, Dendroecology*. Birmensdorf, Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research. Berne, Stuttgart, Vienne, Haupt, 609 p.
- SCHWEINGRUBER F.H., ECKSTEIN D., SERRE-BACHET F., BRAKER O.U., 1990. Identification, presentation and interpretation of event years and pointer years in dendrochronology. *Dendrochronologia*, 8, 9-38.
- SHRODER J.F., 1978. Dendrogeomorphological analysis of mass movement on Table Cliffs Plateau, Utah. *Quaternary Research*, 9, 168-185.
- SIGAFOOS R.S., HENDRICKS E.L., 1969. The time interval between stabilization of alpine glacial deposits and establishment of tree seedlings. *U.S. Geological Survey Professional Paper*; 650-B, 89-93.
- SIVAN O., MIRAMONT C., EDOUARD J.L., 2006. Rythmes de la sédimentation et interprétations paléoclimatiques lors du Postglaciaire dans les Alpes du Sud. 14C et dendro-géomorphologie, deux chronomètres complémentaires. In ALLEE P., LESPEZ L. (éd.) - *L'érosion entre société, Climat et Paléoenvironnement*. Table ronde de Clermont-Ferrand en l'honneur de R. Neboit-Guilhot (25-27 mars 2004), Clermont-Ferrand, Presses universitaires Blaise-Pascal, 2006.
- SIVAN O., MIRAMONT C., 2008. Les variations temporelles et spatiales de la morphogenèse postglaciaire des fonds de vallons sud-alpins. L'exemple du bassin-versant du Drouzet (Haute-Alpes, France). *Quaternaire*, 19, 3, 229-238.
- SMITH D.J., LEWIS D., 2007. Dendroglaciology. In *Encyclopedia of Quaternary Science*, S.A. Elias. Elsevier Scientific, 2, 986-994.
- SOLOMINA O., 1996. Long-term variations of mountain glaciers in the former USSR (FSU). *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 32, 197-205.
- SOLOMINA O., 2002. Dendrogeomorphology : research requirements. *Dendrochronologia*, 20, 1-2, 233-245.
- STOCKTON C.W., FRITTS H.C., 1973. Long-term reconstruction of water level changes for Lake Athabasca by analysis of tree rings. *Water Resources Bulletin*, 9, 5, 1006-1027.
- STOFFEL M., SCHNEUWLY D., BOLLSCHWEILER M., LIEVRE I., DELALOYE R., MYINT M., MONBARON M., 2005a. Analyzing rockfall activity (1600-2002) in a protection forest - a case study using dendrogeomorphology. *Geomorphology*, 68, 224-241.
- STOFFEL M., LIÈVRE I., CONUS D., GRICHTING M.A., RAETZO H., GÄRTNER H.W., MONBARON M., 2005b. 400 years of debris-flow activity and triggering weather conditions: Ritigraben, Valais, Switzerland. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 37, 3, 387-395.
- STRUMIA G., SCHWEINGRUBER F.H., 1996. Colonization and tree-ring growth in the forefield of Lys Glacier (Western Alps, Italy) since the Little Ice Age. *Dendrochronologia*, 14, 165-178.
- VILLALBA R., LEIVA J.C., RUBULLS S., SUAREZ J., LENZANO L., 1990. Climate, tree-ring, and glacial fluctuations in the Rio Frias valley, Rio Negro. Argentina. *Arctic and Alpine Research*, 22, 3, 215-232.
- VIVIAN R., 1975. *Les glaciers des Alpes Occidentales*. Allier, Grenoble, 516 p.
- VIVIAN R., 1976. Glaciers alpins et chronologie holocène. *Bulletin de l'Association des Géographes Français*, 433, 105-118.
- WATSON E., LUCKMAN B.H., 2004. Tree-ring based mass-balance estimates for the past 300 years at Peyto Glacier, Alberta, Canada. *Quaternary Research* 62, 9-18.
- WETTER W., 1987. Spät- und Postglaziale Gletscherschwankungen im Mont Blanc Gebiet : Untere Vallée de Chamonix-Val Montjoie. *Physische Geographie*, 22, Zürich.
- WILES G.C., CALKIN P.E., JACOBY G.C., 1996. Tree-ring analysis and Quaternary geology : principles and recent applications. *Geomorphology*, 16, 259-272.
- WILES G.C., BARCLAY D.J., CALKIN P.E., 1999. Tree-ring-dated "Little Ice Age" histories of maritime glaciers from western Prince William Sound, Alaska. *The Holocene*, 9, 163-173.
- WINCHESTER V., HARRISON S., 2000. Dendrochronology and lichenometry : colonization, growth rates and dating of geomorphological events on the east side of the North Patagonian Icefield, Chile. *Geomorphology*, 34, 181-194.
- WOOD C., SMITH D., 2004. Dendroglaciological evidence for a neoglacial advance of the Saskatchewan glacier, Banff National Park, Canadian Rocky Mountains. *Tree Ring Research*, 60, 1, 59-65.
- YAMAGUCHI D.K., 1983. New tree-ring dates for recent eruptions of Mount Saint Helens. *Quaternary Research*, 20, 246-250.

NEIGE et GLACE de MONTAGNE

Reconstitution, dynamique, pratiques

Sommaire

Editorial
Introduction

1 - Reconstitution

- Coutterand S. *et al.* - Le lobe glaciaire lyonnais au maximum würmien : glacier du Rhône ou/et glaciers savoyards ?
- Ravel L. *et al.* - Désenglacement du haut bassin versant du Vorz (massif de Belledonne, Isère), au Tardiglaciaire et à l'Holocène.
- Rey P.-J. - Sociétés et fluctuations du climat dans les Alpes nord-occidentales au Néolithique moyen.
- Le Roy *et al.* - Étude des fluctuations glaciaires du Petit Âge de Glace dans le Massif des Écrins : apports de la lichénométrie.
- Kirkbride M.P. - Datation des moraines holocènes d'Islande par tephrochronologie : un état de l'art.
- Le Roy *et al.* - La dendroglaciologie, ou l'apport de l'étude des cernes d'arbres pour la reconstitution des fluctuations glaciaires holocènes.
- Rabatel A. - Évolution glaciaire dans les andes subtropicales chiliennes entre 1955 et 2007 : conséquences pour la ressource en eau.
- Le Roy *et al.* - Un inventaire des aérographies du massif du Mont Blanc.

2 - Dynamique

- Ravel L. - Évolution géomorphologique de la haute montagne alpine dans le contexte actuel de réchauffement climatique.
- Gruber S. - Le permafrost de haute montagne.
- Deline P. *et al.* - L'Aiguille du Midi (massif du Mont Blanc) : un site remarquable pour l'étude du permafrost des parois d'altitude.
- Saulnier G.-M. *et al.* - Un éléphant volant est-il un oiseau ? Perspectives pour l'observation hydrométéorologique des milieux de montagne.
- Jobard S. - L'instrumentation du glacier du Baounet : quels apports pour la traçabilité des mesures environnementales ?
- Moreau L. - L'exploration du cryokarst glaciaire et son intérêt scientifique pour l'étude du drainage des eaux de fonte.
- Mazué R. *et al.* - Suivi de l'évolution de la couverture detritique d'un glacier noir par photo-comparaison : le glacier d'Estelette.

3 - Pratiques

- Paccard P. - Réchauffement climatique et ressource neige en domaines skiables.
- Gauchon C. - Les hivers sans neige et l'économie des sports d'hiver : un phénomène récurrent, une problématique toujours renouvelée.
- Laslaz L. - L'exclusion des glaciers des zones centrales des Parcs nationaux de la Vanoise et des Écrins et leur équipement pour le ski d'été.
- Cayla N. - Les sentiers d'interprétation glaciaire : des outils de valorisation différenciée des glaciers et de leur territoire.
- Lambert R. - Cartozonage : de la carte au zonage du risque avalanche.
- Moulin A. *et al.* - L'incertitude liée aux avalanches dans les Alpes du Nord : identifications et implications pour la gestion.

La «Collection Edytem»
a pour objet de mettre en avant
l'apport de la géographie, de la géologie
et des sciences de l'environnement
dans l'étude des milieux et territoires
de montagne.

Déclinée en «numéros thématiques», elle
met en avant les travaux réalisés au sein
du laboratoire Edytem et les résultats
de ses programmes et actions
de recherche.



Prix - 15 euros

ISBN 978-2-918435-00-6

