

Essai

Dendroglaciologie dans les Rocheuses du Canada

Dendroglaciology in the Canadian Rockies

Dendroglaziologie in den kanadischen Rockies

Brian H. Luckman

Volume 52, numéro 2, 1998

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/004845ar>

DOI : <https://doi.org/10.7202/004845ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

Les Presses de l'Université de Montréal

ISSN

0705-7199 (imprimé)

1492-143X (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

Luckman, B. H. (1998). Essai : dendroglaciologie dans les Rocheuses du Canada. *Géographie physique et Quaternaire*, 52(2), 139–152. <https://doi.org/10.7202/004845ar>

Résumé de l'article

La dendroglaciologie consiste en l'utilisation de séries dendrochronologiques datées de manière absolue afin de reconstituer l'évolution des mouvements glaciaires. Les séries peuvent être utilisées (a) pour déterminer l'âge minimal des formations d'origine glaciaire sur la base des dates d'établissement des plus vieux arbres qui s'y sont établis, (b) pour dater précisément les dommages subis par les arbres vivants (basculement, abrasion des tiges) au contact de la marge glaciaire, et (c) pour dater la mort d'arbres atteints par les mouvements du front glaciaire (interdation des patrons de croissance des arbres morts avec ceux d'arbres vivants de grande longévité). Bien que les bois *in situ* soient préférables dans de telles études, les subfossiles transportés et trouvés dans les dépôts avoisinants peuvent livrer des résultats fort utiles. La position et la datation de ces arbres fournissent des indications sur les fluctuations du glacier au cours du dernier millénaire. Cet essai illustre les approches et les indicateurs dendroglaciologiques utilisés dans la Cordillère du Canada à l'aide de certains exemples des études des mouvements glaciaires lors du Petit Âge glaciaire.

Essai

DENDROGLACIOLOGIE DANS LES ROCHEUSES DU CANADA

Brian H. LUCKMAN, Department of Geography, University of Western Ontario, London, Ontario , N6A 5C2, luckman@julian.uwo.ca.

Manuscrit reçu le 3 mai 1995 ; manuscrit révisé et accepté le 9 janvier 1997

RÉSUMÉ La dendroglaciologie consiste en l'utilisation de séries dendrochronologiques datées de manière absolue afin de reconstituer l'évolution des mouvements glaciaires. Les séries peuvent être utilisées (a) pour déterminer l'âge minimal des formations d'origine glaciaire sur la base des dates d'établissement des plus vieux arbres qui s'y sont établis, (b) pour dater précisément les dommages subis par les arbres vivants (basculement, abrasion des tiges) au contact de la marge glaciaire, et (c) pour dater la mort d'arbres atteints par les mouvements du front glaciaire (interdatation des patrons de croissance des arbres morts avec ceux d'arbres vivants de grande longévité). Bien que les bois *in situ* soient préférables dans de telles études, les subfossiles transportés et trouvés dans les dépôts avoisinants peuvent livrer des résultats fort utiles. La position et la datation de ces arbres fournissent des indications sur les fluctuations du glacier au cours du dernier millénaire. Cet essai illustre les approches et les indicateurs dendroglaciologiques utilisés dans la Cordillère du Canada à l'aide de certains exemples des études des mouvements glaciaires lors du Petit Âge glaciaire.

ABSTRACT *Dendroglaciology in the Canadian Rockies.* Dendroglaciology is the use of absolutely dated tree-ring series to reconstruct the history of glacier fluctuations. Tree-ring series may be used (a) to provide minimum ages for glacial landforms by dating the germination of the oldest tree growing on the surface; (b) to provide exact dates from living trees damaged (tilted or scarred) at former glacial margins and, (c) to provide, by crossdating with long living-tree chronologies, calendar "kill" dates for trees within the glacier forefield that were overridden by the glacier. Although *in-situ* wood is preferred for these studies useful results can also be obtained from detrital material of limited but known provenance. This paper outlines the materials and methods used in dendroglaciology with a series of examples derived from studies of Little Ice Age glacier fluctuations in the Canadian cordillera.

ZUSAMMENFASSUNG *Dendroglaziologie in den kanadischen Rockies.* Die Dendroglaziologie benutzt absolut datierte dendrochronologische Serien, um die Entwicklung der glazialen Bewegungen zu rekonstruieren. Die Jahresring-Serien können benutzt werden, (a) um das minimale Alter der Landformen glazialen Ursprungs mittels der Daten über die hier zuerst angesiedelten Bäume zu bestimmen, (b) um die Schäden an den lebenden Bäumen (Kippung, Beschädigung der Stämme) durch Kontakt mit dem Eisrand zu datieren, und (c) um das Absterben von durch Bewegungen der Eisfront beschädigten Bäumen zu datieren (Interdatierung der Wachstumsmuster der abgestorbenen Bäume mit denen von lebenden langlebigen Bäumen). Zwar sind die Wälder *in situ* in solchen Studien vorzuziehen, doch können die subfossilen Materialien, welche in danebenliegende Ablagerungen transportiert und dort gefunden wurden, sehr nützliche Ergebnisse beisteuern. Die Position und die Datierung dieser Bäume geben Hinweise zu den Schwankungen des Gletschers während des letzten Jahrtausends. Diese Studie stellt die Methoden und die dendroglaziologischen Indikatoren dar, die man in den kanadischen Kordilleren angewendet hat, unter Zuhilfenahme gewisser Beispiele von den Untersuchungen der glazialen Bewegungen während der kleinen Eiszeit.

INTRODUCTION

Le terme allemand *dendroglaziologie* introduit par Fritz Schweingruber (1993) définit la « subdivision de la dendroécologie qui utilise les informations contenues dans des cernes datés pour étudier et dater les mouvements des glaciers » (Kaennel et Schweingruber, 1995). Bien que la dendroglaciologie soit considérée comme un sous-domaine de la dendrogeomorphologie (Schroder, 1980), elle emploie une grande variété de techniques (datation des réponses des arbres aux perturbations, interdatation de patrons de largeurs de cernes d'arbres sensibles aux fluctuations climatiques, repérage spatio-temporel des patrons de colonisation et de mortalité des arbres en marge du glacier). Dans les Rocheuses du Canada, la dendrochronologie est la principale technique employée pour dater les moraines du Petit Âge glaciaire situées sous la limite altitudinale des arbres. Cet article présente une synthèse des applications possibles de la dendroglaciologie en s'appuyant sur la reconstitution des mouvements glaciaires survenus au cours du dernier millénaire dans les Rocheuses. Cette technique permet une résolution annuelle ou, à tout le moins, de dater des événements de façon plus précise qu'avec le radiocarbone (Stuiver et Becker, 1993). En l'absence de registres historiques comme il en existe pour les Alpes, par exemple (Rothlisberger, 1976; Zumbuhl, 1986), les arbres constituent d'intéressants marqueurs permettant de reconstituer l'évolution des mouvements glaciaires. Les mêmes principes pourraient être utilisés pour reconstituer les phénomènes survenus au début du Néoglaciale durant l'Holocène, à partir de subfossiles ligneux plus anciens. Tels que datés au ^{14}C ces subfossiles sont encore hors de portée d'une interdatation avec les longues séries dendrochronologiques actuellement disponibles.

PRINCIPES GÉNÉRAUX DE LA DENDROGLACIOLOGIE

Les premières applications des techniques dendroglaciologiques consistaient simplement à dater les moraines en dénombrant les cernes des arbres qui s'y étaient installés au fil des ans (ex: Heusser, 1956). Le nombre de cernes annuels datés fournit l'âge minimal des surfaces morainiques, dans la mesure où la colonisation végétale a immédiatement suivi le retrait du glacier. Inversement, les phases d'avancée du glacier sont datées en utilisant les cicatrices sur les tiges et les phases de bois de réaction chez les arbres vivants ayant subi des poussées glaciaires. Par ailleurs, dans les Rocheuses il est rare que les conifères (*Picea engelmannii*, *Abies lasiocarpa*, *Pinus albicaulis* et *Pinus contorta*) occupant les moraines présentent des anomalies de croissance comme les faux-cernes ou les cernes manquants. La seule espèce présentant systématiquement des séquences de cernes absents est *Larix lyallii* (Colenutt et Luckman, 1995). De telles lacunes sont toutefois rares chez les jeunes arbres (Colenutt et Luckman, 1991) et, même dans les cas extrêmes, le nombre de cernes manquants dépasse rarement cinq par siècle. Ainsi, l'erreur

maximale de datation par le dénombrement des cernes serait tout au plus de 10-14 ans pour un mélèze de 200 à 300 ans.

La datation des cernes annuels des chicots de bois et des troncs subfossiles trouvés dans les dépôts morainiques est plus difficile parce qu'elle nécessite l'établissement de chronologies de référence issues d'arbres occupant des sites voisins à des fins d'interdatation. La mesure des cernes est alors essentielle parce qu'il est impossible de bien les dater en employant les techniques visuelles comme le « *skeleton plot* » (Douglas, 1939) ou le « diagramme des cernes diagnostiques » (Schweingruber *et al.*, 1990). Bien que l'établissement de telles chronologies demande un surcroît d'effort comparativement au simple dénombrement des cernes, une telle pratique est beaucoup plus prometteuse parce qu'elle permet d'inclure dans l'analyse un large éventail de matériaux ligneux pouvant servir ultérieurement aux reconstitutions paléoclimatiques. L'interdatation sera d'autant facilitée par l'accroissement progressif du nombre d'échantillons utilisés.

La provenance du matériel mort que l'on cherche à dater est aussi importante à considérer. Les bois *in situ* (fig. 1), comparativement aux bois transportés (fig. 2), n'ont pas nécessairement la même signification dans le contexte écologique hétérogène que présente le milieu montagnard. La distinction est aussi essentielle pour l'interprétation des processus géomorphologiques qui ont pu influencer leur croissance ou provoquer leur mortalité et leur transport

Les souches conservées en position de vie permettent l'interprétation des conditions d'établissement et de mortalité des arbres. Elles peuvent indiquer, par exemple, la position exacte du glacier à un moment précis et, par le fait même,



FIGURE 1. Souches d'arbres tronquées trouvées *in situ*, dans un ancien chenal d'eau de fonte de la zone proglaciaire du glacier Robson. Le dernier cerne de chacune de ces souches indique 1246 (droite) et 1236 ap. J.-C. (gauche). Le tronc coupé à l'arrière-plan est aussi mort en 1246. La zone pâle sur la photographie montre un ancien till affleurant à la marge d'un ancien chenal d'eau de fonte.

Sheared in-situ stumps outcropping in an abandoned meltwater channel in the Robson Glacier forefield (glacier flow from right to left). The sheared stumps have outer ring dates of 1246 (right) and 1236 A.D. (left). The cut log in the background also died in 1246. The light coloured area is till exposed in a former channel wall.



FIGURE 2. Bois détritique recouvrant la surface de la zone proglaciaire du glacier Peyto (plus précisément au site dit du Pied de l'Abrupt), en juillet 1991. Cet arbre a fourni une série dendrochronologique qui a été interdatée entre 899 et 1246 ap. J.-C. Des troncs enracinés du même âge ont été observés à 10-20 m en amont.

Detrital wood lying on the surface, Peyto Glacier forefield, at the "Lower Cliff" Site, July 1991. This tree contained a ring series that crossdated between 899-1246 A.D. Rooted stumps of similar age occur 10-20 m upvalley of this locality.

de situer l'altitude minimale de la limite des arbres. Les bois déplacés pose le problème de l'interprétation de leur origine parce que la source des bois est inconnue et qu'ils peuvent même provenir d'un dépôt d'âge antérieur.

Les bois déplacés sont appelés les « bois détritiques » pour les distinguer des bois *in situ*. Il s'agira principalement des bois trouvés au front des glaciers. Certains ont été dégagés des dépôts délavés et ensuite transportés par les eaux de fonte ; d'autres ont subi directement les effets du mouvement glaciaire. Il peut aussi s'agir de bois issus d'arbres ayant colonisé les dépôts, mais dont le lieu d'origine ne peut être déterminé. Les bois détritiques n'offrent donc que des possibilités limitées pour la reconstitution des paléoenvironnements (voir la discussion de Ryder et Thomson, 1986). De toute évidence, l'arbre qui a produit le subfossile a poussé en amont ou à une altitude plus élevée par rapport au site où il a été récupéré. Par conséquent, le site de récupération ne fournit qu'une altitude ou une distance minimale de la limite des arbres par rapport aux positions glaciaires. À défaut d'une anomalie morphologique qui permettrait de déterminer la cause de la mortalité (marque d'abrasion, bris mécanique), le subfossile ne peut servir à situer exactement la position du glacier. Le bois pourrait très bien avoir été transporté d'un lieu éloigné des systèmes morainiques actuels (par des avalanches ou par l'homme) ou encore provenir du remaniement d'un dépôt d'âge antérieur et d'origine non glaciaire.

L'exemple suivant est particulièrement éloquent à cet égard. En 1989, des fragments de bois ont été observés sur les sandurs à la base d'un glacier sans nom de l'île d'Axel Heiberg dans l'Arctique canadien (79°55' N, 88°30' O). Ce site était dépourvu d'arbres au Pléistocène. Conséquemment, ces fragments de bois proviendraient vraisemblable-

ment d'un affleurement fossilifère datant de l'Éocène, comme ceux du site de Geodetic Hills situé à plusieurs kilomètres à l'est du lieu d'observation (Bassinger 1986 ; Christie et McMillan, 1991). Dans un tel contexte, il devient évident que de tels arbres peuvent fausser l'interprétation des mouvements glaciaires récents.

Par ailleurs, la datation des sédiments à l'aide des cernes des bois subfossiles n'est précise que dans la mesure où les arbres sont morts au moment de l'enfouissement ou qu'ils n'ont pas survécu longtemps après la perturbation. Des arbres morts en place ou des troncs gisant en surface ont été trouvés en aval des glaciers de Peyto (Luckman, 1995), d'Athabasca et de Bennington (Luckman, 1986). Ces bois occupaient une bande à moins de 15 m des limites atteintes par ces glaciers au Petit Âge glaciaire. Ils ont livré des dates au radiocarbone remontant à 1150 BP (Luckman, 1986). L'incorporation de ce matériel ligneux à l'intérieur des moraines du Petit Âge glaciaire peut donc devenir problématique dans la mesure où il fournit des dates nettement plus vieilles (de 800 à 1000 ans) que l'âge réel des moraines. Ces observations montrent que dans un climat froid de type alpin, le bois peut très bien être conservé longtemps en surface, même jusqu'à mille ans avant d'être enseveli. D'autres études ont montré que des délais plus longs peuvent survenir en milieux de pergélisol (Lamb, 1977, pl. IV in Vincent, 1990). À défaut de pouvoir établir clairement la localisation de l'affleurement source des débris ligneux trouvés, une réelle confusion peut persister quant à l'interprétation des dates livrées par ces vieux subfossiles.

L'UTILISATION DES ARBRES VIVANTS

ÂGE MINIMAL

Les premiers travaux de dendroglaciologie, nous l'avons dit, utilisaient l'âge minimal et le basculement des arbres par les glaciers pour reconstituer l'historique du Petit Âge glaciaire (Heusser, 1956). L'utilisation de l'âge du plus vieil arbre occupant la surface d'un dépôt morainique dans le but de dater sa mise en place soulève deux problèmes : (1) Il doit s'agir du plus vieil arbre disponible et (2) il est nécessaire d'estimer l'écèse, c'est-à-dire le temps écoulé entre la formation de la moraine et la germination de l'arbre. Cette estimation de l'écèse (Kaennel et Schweingruber, 1995) peut être précisée à partir des travaux écologiques publiés antérieurement ou être déterminée au site même grâce aux diverses techniques déjà élaborées par Luckman (1986) et McCarthy et Luckman (1993). Dans les Rocheuses du Canada, la durée de l'écèse varie généralement entre 10 et 20 ans (fig. 3). Elle peut toutefois exceptionnellement atteindre 70 à 90 ans si le substrat morainique ou le micro-climat sont défavorables. Il demeure impossible d'estimer ce délai pour des arbres spécifiques (par exemple, pour le plus vieil arbre trouvé), ce qui accentue l'imprécision de la datation de la moraine. De plus, sur les moraines situées près de la limite altitudinale des arbres, le délai de colonisation peut être nettement plus long. Par exemple, l'établissement des arbres peut n'être qu'épisodique et ne peut se produire que lorsque les conditions climatiques sont favorables (par ex.,

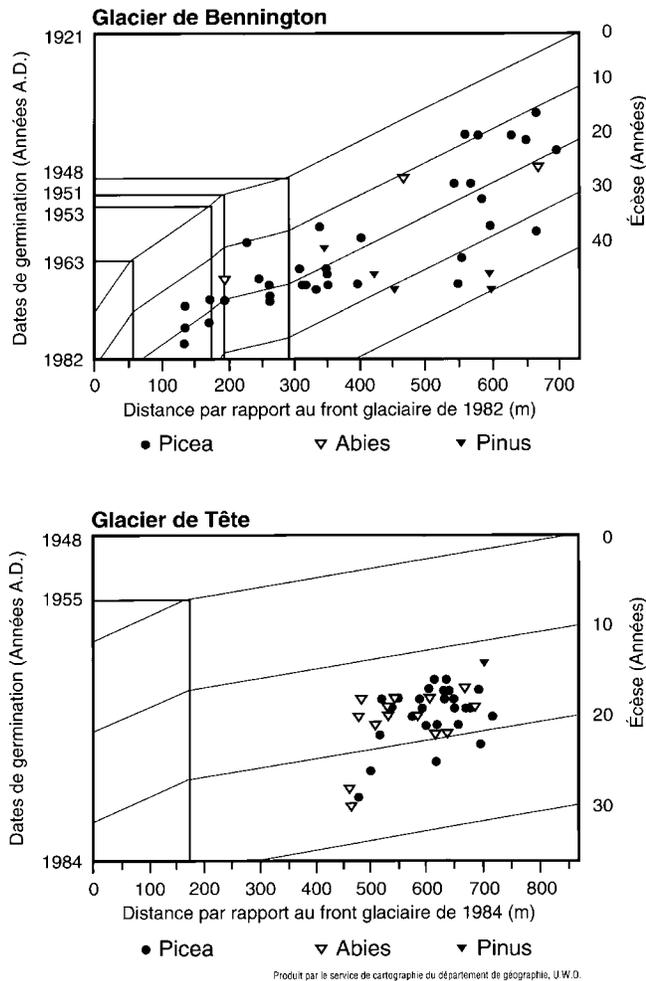


FIGURE 3. Année de germination des arbres au front de deux glaciers de la Cordillère du Canada. Les dates sur l'axe vertical se réfèrent à la position connue des fronts glaciaires indiquée sur l'axe horizontal. L'âge de germination de chacun des arbres est exprimé en fonction de la distance par rapport au front du glacier. À chacun des graphiques, la ligne supérieure en pente indique les positions glaciaires interpolées en supposant une récession constante entre les positions connues du front glaciaire. Les lignes parallèles inférieures donnent une interprétation de la position des arbres selon les écèses déterminés (de 10 ou 20 ans). Les arbres croissant aux sites plus favorables près des deux glaciers ont des valeurs d'écèse de 10-20 ans (adapté de McCarthy et Luckman, 1993).

Tree germination dates in front of two glaciers in the Canadian cordillera. Dates on the vertical axis refer to known ice-front positions indicated on the horizontal axis. The germination date for each tree is plotted against the distance from the glacier snout. In each diagram the upper sloping line indicates interpolated ice-front positions assuming constant frontal recession between known ice-front locations. The lower parallel lines indicate the position at which trees with selected ecesis values (e.g., 10, 20 years) should plot on this diagram. Trees growing at the most favourable sites in both areas have ecesis values of 10-20 years (redrawn from McCarthy and Luckman, 1993).

un réchauffement climatique entraînant une élévation de la limite des arbres atteignant les moraines libérées depuis longtemps par le glacier). Dans la Cordillère, la présence de tessons de verre provenant d'un téphra dans la partie supérieure du sol pourrait contribuer à résoudre certains de ces

problèmes en permettant de distinguer les systèmes morainiques datant du Petit Âge glaciaire des formations antérieures. Le plus jeune téphra daté au radiocarbone dans cette région remonte à 2400 BP (Luckman et Osborn, 1979). Il s'agit donc d'un âge minimal pour ce dépôt morainique.

ÂGE DES PERTURBATIONS

La signature dendrochronologique des perturbations permet de dater de manière absolue (à l'année près) certains événements glaciaires. Dans bon nombre de cas, ces perturbations sont enregistrées par les arbres situés à proximité des moraines terminales du Petit Âge glaciaire, bien qu'il soit possible qu'elles aient atteint d'autres arbres à l'intérieur du domaine proglaciaire.

Voici deux exemples de perturbations d'origine glaciaire qui ont touché les arbres de deux vallées glaciaires des Rocheuses. Le premier exemple vient du glacier Penny, dans les Premier Ranges, en Colombie-Britannique. Après une longue période de retrait au début du XX^e siècle, le glacier s'est accru entre 1960 et 1980 (Luckman *et al.*, 1987). Un petit arbre (fig. 4) qui avait colonisé le domaine proglaciaire en 1940 a été partiellement enfoui dans les débris rocheux d'une moraine de poussée, mais l'arbre a survécu. (L'arbre n'a malheureusement pas survécu au scientifique qui l'a trouvé !) L'analyse d'une coupe transversale a révélé une séquence de bois de réaction témoignant du basculement de l'arbre au cours de l'hiver 1980-1981, révélant ainsi le moment précis de la formation de la moraine. La réaction de l'arbre atteste ainsi de l'âge de la dernière période d'activité de la moraine, mais



FIGURE 4. Moraine de poussée récente au front du glacier Penny, Premier Ranges, en Colombie-Britannique (juillet 1984). Le gros arbre a germé au cours des années 1940. Quelques branches basses ont été enfouies sous des blocs morainiques. Le petit arbre à gauche du cahier de notes était enraciné sous la moraine qui est plus récente. Cet arbre a été ployé et pratiquement enseveli par la moraine au cours de l'hiver 1980-81.

Recent push moraine in front of Penny Glacier, Premier Ranges, B.C. (July, 1984). The larger tree germinated in the 1940s and some of the lower branches are trapped between the moraine boulders. The smaller tree to the left (by the notebook) was rooted in the surface beneath the moraine, tilted and almost completely buried by the moraine. The tilting event was dated to the 1980-81 winter by the presence of a reaction wood series following the 1980 ring on one side of the tree.

dans le cas d'arbres morts incorporés aux débris rocheux des moraines, toutes les précautions doivent être prises au cours de l'examen des dates de mortalité. Au glacier Bennington, un tel arbre a été trouvé en position de croissance à l'intérieur d'une moraine du XVIII^e siècle. Cependant, la datation au radiocarbone et les interdatations dendrochronologiques subséquentes ont révélé que l'arbre s'est établi, a cru et est mort après la formation de la moraine. Il ne fournit donc qu'un âge minimal pour la formation de la moraine.

Le deuxième exemple provient de la moraine terminale du glacier Athabasca (Luckman, 1988a). Ici, la moraine correspond à une petite crête de moins d'un mètre de hauteur adossée au versant. Des observations faites le long de la crête morainique ont révélé que plusieurs arbres semblaient avoir été déformés par le glacier, lors de la construction de la moraine (fig. 5). L'un de ces arbres a pu être étudié en détail grâce à une autorisation de coupe accordée par le Service des parcs nationaux du Canada. L'âge de deux coupes transversales prélevées à 30 cm l'une de l'autre sur ce qui semblait, de prime abord, être une tige, différait de 100 ans, curieusement (fig. 6). L'analyse détaillée de l'échantillon a révélé que lorsque l'arbre était tout jeune (d'une taille de 2 de 4 m), il fut renversé et partiellement enfoui dans la

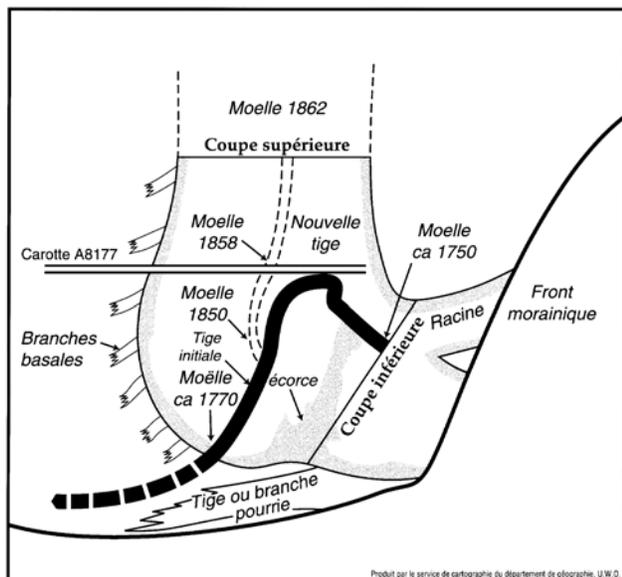


FIGURE 5. Croquis (coupe) de l'arbre déformé (A84-1) croissant sur le versant extérieur de la moraine du Petit Âge glaciaire au glacier Athabasca, en Alberta. Le tronc initial (en noir) était probablement un jeune arbre issu de la strate arborescente basse qui a été renversé au cours de l'avancée glaciaire, en 1843 ou 1844 ; l'arbre a survécu et une nouvelle pousse s'est développée pour former le tronc de l'arbre échantillonné en 1984. Vue vers l'est (adapté de Luckman, 1988a, fig 5).

Cross-sectional sketch of the deformed tree (A84-1) growing out of the proximal slope of the Little Ice Age terminal moraine at Athabasca Glacier, Alberta. The original stem (shown in black) was probably an understory sapling that was knocked over by the glacier advance in 1843 or 1844 but not killed. A new vertical shoot developed to form the trunk of the tree sampled in 1984. The view is from the west (redrawn from Luckman 1988a, Fig. 5).



FIGURE 6. Photographie (vue vers le sud-ouest) de l'arbre endommagé (A84-1) de la figure 5. Noter les branches mortes recouvrant la surface du sol, parmi lesquelles se trouve le tronc initial. Le front de la moraine, d'environ 1 m de hauteur, est caché par la zone sombre à gauche.

Photograph of the damaged tree (A84-1) shown in Figure 5 taken prior to sampling. The view is from the north-east. Note the dead branches lying on the ground, one of which was the original stem. The moraine face, which is only about one metre high at this site, is hidden in the dark area to the left.

moraine. Le tronc échantillonné est en fait un rejet de souche qui s'est développé après le basculement de l'arbre, remplaçant l'axe principal. Un examen attentif du patron de croissance de la coupe basale révèle une diminution importante de la largeur des cernes commençant en 1843 ou 1844, qui est probablement attribuée aux dommages causés par le glacier. Au cours d'une période de 30 à 40 ans, aucun arbre ne s'est implanté sur la moraine. L'écèse serait alors d'environ 30-40 ans à ce site qui présente des stress climatiques marqués. À la lumière de ces observations, les anomalies de croissance des arbres et les déplacements d'axes peuvent fournir de précieuses indications sur d'anciennes perturbations.

UTILISATION DES ARBRES MORTS

DATATION DES ARBRES MORTS À LA MARGE DES GLACIERS

Comme l'illustre l'exemple précédent, l'expansion d'un glacier peut endommager, faire s'incliner ou provoquer la mort des arbres. Les arbres endommagés par les poussées datant du Petit Âge glaciaire et ayant survécu jusqu'à aujourd'hui sont toutefois rares. Par contre, les arbres morts en position de vie et les débris ligneux de surface sont très courants. Les matériaux de surface bien préservés peuvent être interdatés à l'aide d'une série dendrochronologique de référence établie à partir d'arbres vivants à proximité. Cette interdatation rend possible l'obtention des dates de mortalité ou des dommages causés par les glaciers ayant perturbé la croissance des arbres. Cette approche intégrant la mesure des cernes, l'élaboration de séries dendrochronologiques et l'interdatation offre beaucoup plus de possibilités qu'un simple dénombrement des cernes pour déterminer l'activité des glaciers dans ce type de milieu.

Les observations effectuées sur une centaine de mètres le long de la moraine latérale du glacier Peyto indiquent que sept arbres ont été tués entre 1837 et 1841 (Luckman, 1996a). Un autre arbre a été incliné et endommagé en 1845 ou 1846 (fig. 7). Ces résultats précisent davantage l'âge probable de la mise en place de la moraine. Certains arbres endommagés par un glacier peuvent survivre pour disparaître sénescents ultérieurement. Signalons à titre d'exemple le cas d'un arbre situé juste à l'intérieur (1-2 m) des limites atteintes par le glacier Dome au Petit Âge glaciaire (limites définies par l'aire des débris morainiques : Luckman, 1986). Cet arbre mort en 1910 a survécu longtemps après avoir été blessé et incliné lors d'une poussée glaciaire en 1846 (fig. 8 et 9).

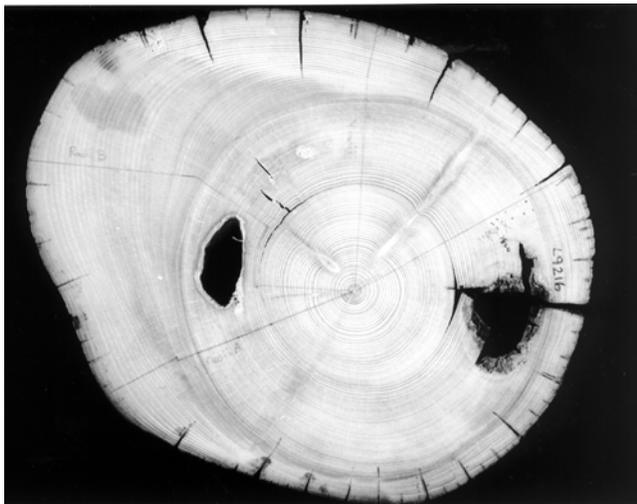


FIGURE 7. Coupe transversale d'un tronc en place (L9216) trouvé à la limite de la ligne d'érosion glaciaire sur la moraine latérale ouest du glacier Peyto, en Alberta. Cet arbre, qui a été ployé par le glacier en 1846, a survécu jusqu'en 1900. La série dendrochronologique élaborée à partir de la largeur des cernes de cet arbre est présentée à la figure 15.

Cross section of a standing snag (L9216) from the glacier trimline on the west lateral moraine of Peyto Glacier, Alberta. This tree was tilted by the glacier in 1846 but survived and lived until 1900. A ringwidth series from this tree is shown in Figure 15.

En somme, ce sont les arbres situés directement à la marge active du glacier qui sont les meilleurs indicateurs des périodes d'avancée glaciaire. Toutefois, l'avancée évidemment doit se faire sur une pente couverte de végétation. Une telle approche ne permet donc d'établir que la position ultime occupée par le glacier.

DATATION DES RÉSIDUS LIGNEUX A L'INTÉRIEUR DU DOMAINE PROGLACIAIRE¹

Dans la majorité des sites englacés des Rocheuses, l'avancée du Petit Âge glaciaire aux XVIII^e et XIX^e siècles a été la plus importante avancée glaciaire de l'Holocène. Presque tous les témoins des événements antérieurs au

1. Ici l'expression « domaine proglaciaire » traduit le terme anglais *glacier forefield* qui décrit la région entre le front glaciaire actuel et la limite morainique du Petit Âge glaciaire



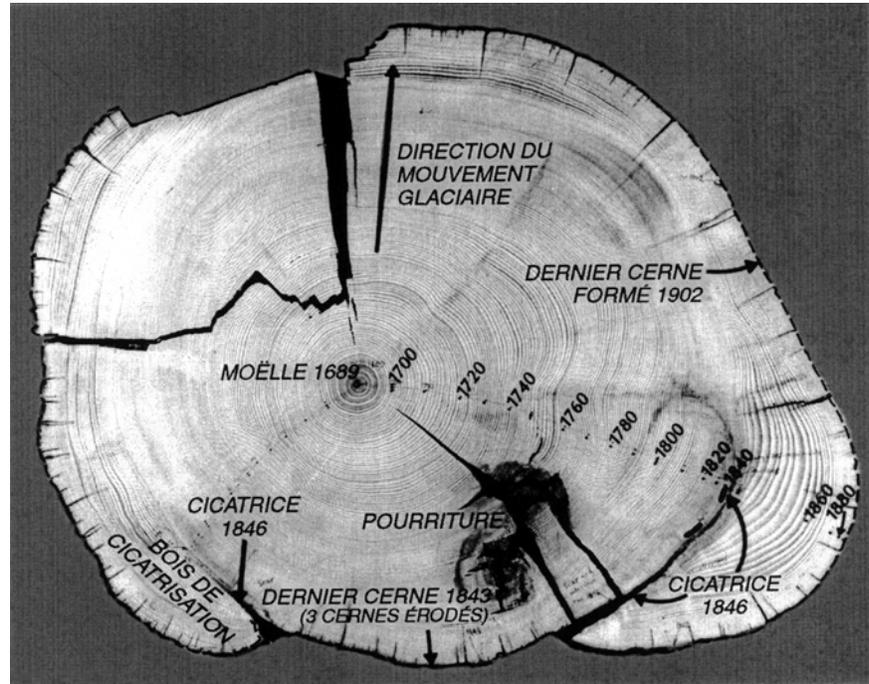
FIGURE 8. Zone proglaciaire du glacier Dome, en Alberta. L'homme se tient à la limite du till du Petit Âge glaciaire sur ce versant ; il donne la position maximale du glacier. Le gros tronc couché à la surface du sol, autrefois en position verticale, était à l'origine enraciné à environ 1 m en amont de sa position actuelle (la souche pourrie est cachée derrière le tronc), c'est-à-dire à environ 2 à 3 m à l'intérieur de la limite du Petit Âge glaciaire. La coupe transversale présentée à la figure 9 provient de cet arbre. Le gros bloc en position intermédiaire marque la dernière position du glacier. La plus grande partie de la moraine a été éliminée subséquentement par l'activité fluviale. Un tronc semblable, mais plus petit que celui étudié, apparaît à l'arrière plan.

Dome Glacier Forefield, Alberta. The person is standing at the limit of Little Ice Age till on this slope indicating the maximum position of the glacier. The large snag lying on the ground was previously standing and rooted about one meter upslope of its present lower end (the rotted stump is hidden behind the snag), i.e. about 2-3 m within the Little Ice Age limit. The section shown in Figure 9 was cut from this tree. The large boulder in the intermediate distance marks the position of the glacier terminus. Most of the moraine was destroyed by subsequent fluvial activity. A similar but smaller standing snag is visible in the background.

Petit Âge glaciaire ont été retrouvés et dégagés, le plus souvent à l'intérieur des moraines latérales ou encore dans le domaine proglaciaire. L'âge des restes ligneux est habituellement estimé à l'aide du radiocarbone. Toutefois, du fait que ces subfossiles renferment généralement plus de 200 cernes annuels, d'ailleurs souvent dépourvus d'anomalies (bois de réaction, baisse de croissance) qui pourraient com-

FIGURE 9. Coupe transversale de l'arbre présenté à la figure 8. La crue glaciaire de 1846 y a produit une cicatrice d'abrasion sur la face tournée vers le glacier au bas du versant. Elle a également déclenché la formation de bois de réaction en réponse à une inclinaison de la tige (indiquée par la flèche sur la face opposée de l'arbre). Les séries dendrochronologiques ont été interdatées avec des arbres vivant à proximité du site. La cicatrice fournit la date précise de l'extension maximale du glacier au Petit Âge glaciaire.

Cross section of the tree shown in Figure 8. This tree was scarred by the ice on its downslope face in 1846 and also slightly tilted at that time (note the reaction wood series by the arrowhead on the opposite side of the tree). The ring series were crossdated with living trees at this site and the scar evidence provides a precise calendar date for the maximum position of Little Ice Age Advance at this site.



pliquer leur analyse, il est possible de les dater beaucoup plus précisément grâce à l'interdatation dendrochronologique. D'une résolution centenaire (^{14}C), la datation passe ainsi à une précision annuelle. Les applications potentielles de cette technique ne sont limitées que par la longueur et la qualité de la chronologie de référence qu'on peut établir en utilisant les arbres situés au-delà du domaine proglaciaire.

Cette approche a été utilisée avec succès pour dater de nombreux glaciers pour lesquels nous donnerons ici quelques exemples. Au glacier Peyto, des débris ligneux d'âges variés ont été trouvés à l'intérieur du domaine proglaciaire. Ces débris proviennent de populations ligneuses distinctes qui s'étaient établies à différentes époques dans la zone atteinte par la dernière avancée du Petit Âge glaciaire. Dans la zone terminale de la crue du Petit Âge glaciaire (fig. 10, secteur A sur la fig. 11), les débris de tronc étaient éparpillés à la surface du till. Des souches en place écrasées y ont été aussi observées (fig. 11). L'interdatation de ce matériel à l'aide de la série dendrochronologique de référence indique que ces arbres seraient morts entre 1700 et 1836 sous l'influence de la poussée glaciaire (voir tableau en médaillon, fig. 11). Ceci corrobore la date du maximum glaciaire de 1837 à 1846, déterminée à partir des données du site de la moraine latérale ouest (fig. 11) et confirmée par la datation des derniers cernes de plusieurs souches en place dans le centre de la vallée. Malheureusement, la surface extérieure de plusieurs de ces souches était pourrie, ce qui limite la précision de la datation.

Environ 500 m en amont (site dit du Pied de l'Abrupt, fig. 11), une seconde population de débris ligneux subfossiles fut découverte. Elle a permis l'élaboration d'une chronologie flottante sur 500 ans. L'interdatation avec des séries chronologiques provenant d'arbres vivants à ce site ou de sites voi-



FIGURE 10. Bois détritiques sur le versant à proximité de la moraine terminale du glacier Peyto, en Alberta. Ces arbres sont morts au cours de l'avancée du glacier qui a atteint son extension maximale au Petit Âge glaciaire vers 1840 ap. J.-C. L'âge du dernier cerne de ces arbres et d'autres arbres semblables (voir tableau en cartouche de la fig. 11) montrent que les arbres sont morts entre 1721 et 1836.

Detrital wood debris on the proximal slope of the terminal moraine at Peyto Glacier, Alberta. These trees were killed during the glacier advance to its Little Ice Age maximum position ca. 1840 A.D. Outer ring dates from these and similar trees (inset Table, Figure 11) indicate death dates between 1721 and 1836.

sins, a fait ressortir une vague de mortalité entre 1246 et 1346 (fig 11). Le dernier cerne formé d'une souche en place y a été daté à environ 1375 ap. J.-C. (Luckman, 1996a).

À ce matériel récent s'ajoutent des débris ligneux transportés qui furent découverts au site de Two Gerries (fig. 11) et à proximité du front glaciaire actuel. Ces débris ligneux, qui furent déposés sur des bancs de gravier après avoir été

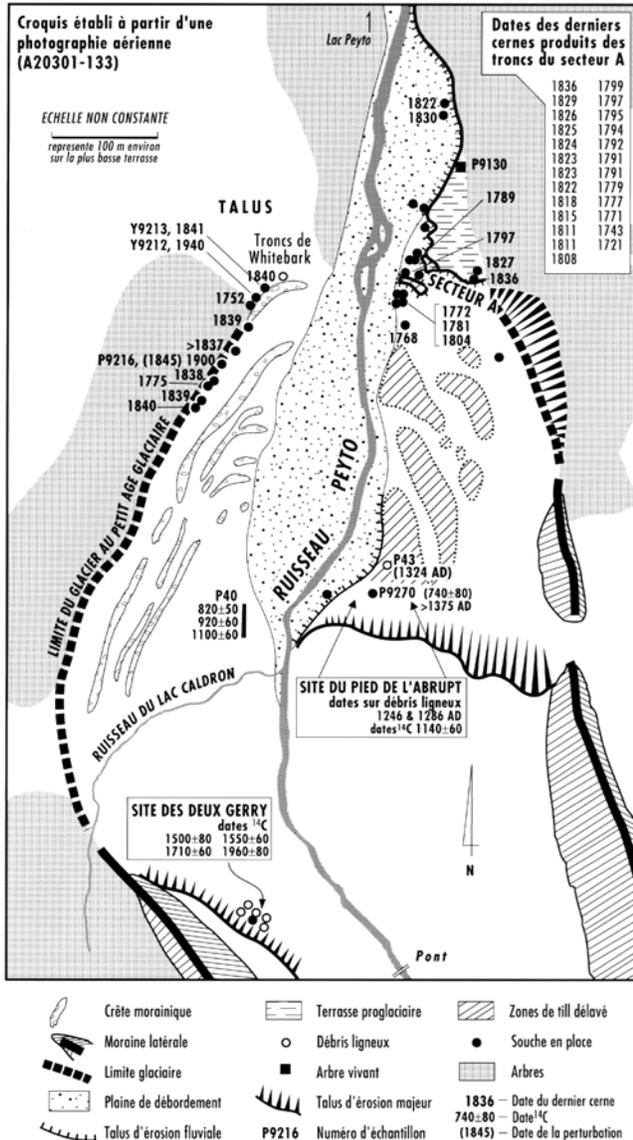


FIGURE 11. Configuration de la portion inférieure du domaine proglaciaire du glacier Peyto, en Alberta, montrant les formes glaciaires et les repères chronologiques employés pour la reconstitution des fluctuations glaciaires. Noter en particulier: (i) la date de mortalité des arbres le long de la moraine latérale occidentale; (ii) l'âge des derniers cernes chez les arbres *in situ* et détritiques (voir tableau en médaillon) dans la zone terminale. D'après ces données, le maximum glaciaire ayant été atteint dans les années 1840; (iii) l'âge des vieux peuplements du site dit du Pied de l'Abrupt et de celui de Two Gerries, en amont de la vallée, où des arbres sont morts par suite de deux avancées glaciaires entre ca 1246-1375 ap. J.-C. et ca 1500-1900 ¹⁴C ans BP (adapté de Luckman, 1996a).

Map of the lower forefield area of Peyto Glacier, Alberta showing the glacial landforms and the available dating control for glacier fluctuations at this site. Note in particular; (i) the calendar kill-dates from trees along the western lateral moraine; (ii) the outer ring dates from *in-situ* and detrital trees (see inset table) in the terminal zone that corroborate the 1840s date for the glacier maximum position; (iii) the older calendar and radiocarbon dates from the Cliff Foot Site and Two Gerries Site further upvalley where trees were killed by glacier advances between ca. 1246-1375 A.D. and ca. 1500-1900 ¹⁴C yr. BP, respectively (redrawn from Luckman, 1996).

transportés par le ruisseau Peyto, ont livré des âges au ¹⁴C compris entre 1500 et 1900 ans BP (Two Gerries) et 2800 et 3000 BP (front glaciaire actuel). Des paléosols et des souches en place attestent de la présence ancienne de ces deux peuplements en amont (Luckman *et al.*, 1993 ; Luckman, 1996a). D'après ces observations, il semble y avoir eu deux crues glaciaires distinctes qui auraient écrasé directement les peuplements forestiers établis antérieurement. Toutefois, les débris ligneux datés de 6000 à 8000 BP qui furent observés au front des glaciers Athabasca et Dome (Luckman, 1988b ; Luckman *et al.*, 1993) ne peuvent être interprétés de la même manière puisque la source des débris n'a pu être localisée. Sur la base d'autres observations à la limite des arbres et en s'appuyant sur l'histoire climatique régionale, Luckman (1988b) a supposé que ces débris ligneux provenaient probablement de vieilles tourbières remaniées par le glacier. Par conséquent, ils ne seraient pas directement associés à une récurrence glaciaire.

Dans le contexte des problèmes étudiés ici, le dernier exemple montre bien l'importance de localiser la source des débris ligneux et de déterminer la cause exacte de mortalité des arbres. Dans les sites où les arbres sont morts avant la période couverte par les séries de cernes des arbres encore vivants, les chronologies flottantes apportent un complément d'information, dans la mesure où elles peuvent être utilisées à la fois pour déterminer la durée de la phase forestière et pour consacrer la période marquée par l'avancée glaciaire. Cette approche n'est valable qu'aux sites où il peut être démontré que les arbres sont bel et bien disparus à la suite d'une crue glaciaire.

Au glacier Robson, en Colombie-Britannique, deux sites forestiers ont été découverts dans le domaine proglaciaire. La première forêt enfouie, initialement rapportée par Heusser (1956), comprend plusieurs souches en place écrasées par le glacier (fig. 1). Une chronologie flottante a été élaborée à partir de ce matériel et d'autres débris ligneux trouvés dans le domaine proglaciaire. Les échantillons ont été interdatés grâce à une longue chronologie d'arbres vivants provenant d'un site situé à 75 km, soit au glacier Bennington (fig. 12). Les séries interdatées ont permis la reconstitution d'une période d'avancée glaciaire comprise entre 1142 et *circa* 1350 ap. J.-C. (fig. 13) à un taux moyen de 3 m/an durant les phases initiales du Petit Âge glaciaire (Luckman, 1995). Plus récemment, une seconde forêt a été découverte au front glaciaire actuel. Cette forêt a été datée entre 3000 et 3500 ans BP. Bien que l'analyse détaillée de la série ne soit pas terminée, une chronologie flottante de 320 ans a été élaborée à partir de ce matériel.

ARBRES SITUÉS À PROXIMITÉ DES GLACIERS

Plusieurs auteurs ont tenté de dater les fluctuations antérieures du glacier en étudiant les périodes de réduction du taux de croissance des arbres situés à proximité. L'interprétation des fluctuations glaciaires sur la base de telles observations doit obligatoirement s'appuyer sur la démonstration claire d'un lien entre la présence du glacier soulignée par la mise en place d'une moraine spécifique et des patrons de

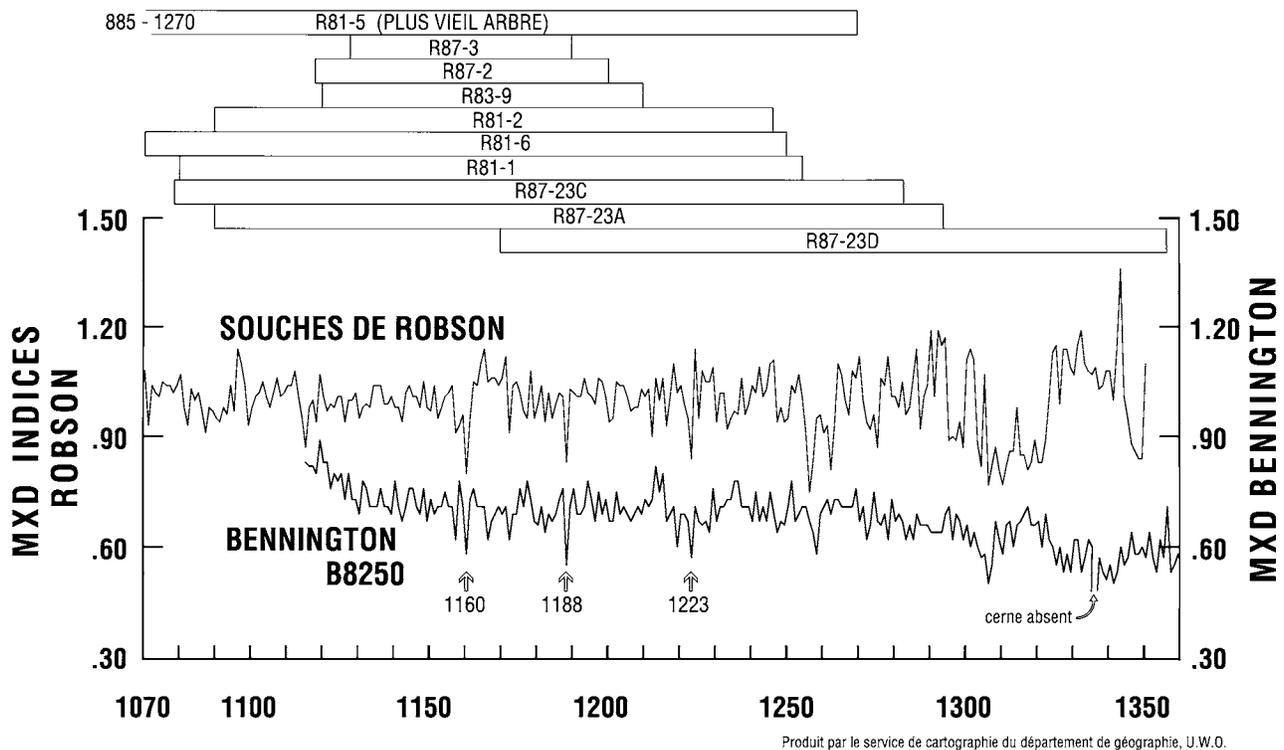


FIGURE 12. Interdatation des arbres ensevelis au glacier Robson, en Colombie-Britannique. La série dendrochronologique supérieure est une chronologie indexée de la densité maximale du bois final élaborée à partir des 10 séries indiquées (*Picea engelmannii*). La courbe inférieure est une série moyenne produite à partir d'une souche de *Pinus albicaulis* au glacier Bennington situé à environ 75 km du glacier Robson. L'interdatation est clairement indiquée par les cernes pâles en 1160, 1188 et 1223, ce qui est confirmé par l'utilisation du logiciel COFECHA (Holmes, 1992) (adapté de Luckman, 1995, fig. 6).

*Crossdate of the buried trees at Robson Glacier, B.C. The upper tree-ring series shown is an indexed chronology of maximum latewood density developed from the 10 series shown (mainly *Picea engelmannii*). The lower curve is a single record from a calendar-dated *Pinus albicaulis* snag that grew at Bennington Glacier about 75 km. south-east of Robson Glacier. The crossdate is clearly indicated by the light latewood rings in 1160, 1188 and 1223 and confirmed by COFECHA software (Holmes 1992) (redrawn from Luckman 1995, Fig. 6).*

croissance particuliers décelés chez les arbres bordiers. Deux exemples permettront d'illustrer les limites d'une telle interprétation. Le premier concerne le glacier Peyto et le deuxième, le glacier Athabasca.

Au glacier Peyto, bien que les arbres morts indiquent une avancée glaciaire entre 1837 et 1841, la chronologie de cinq arbres, situés à moins de 30 m de la zone d'activité glaciaire, ne montre alors aucun signe d'influence glaciaire (fig. 14). Les patrons de croissance complexes de ces arbres reflètent plutôt les perturbations d'autre nature qu'ils ont subies. Les arbres L9212 et L9213 ont poussé à moins d'un mètre de la limite atteinte par le glacier. L'arbre L9213 est mort en 1841. L'arbre L9212 a survécu jusqu'en 1943 environ, mais il a connu une très faible croissance au cours des 10 à 15 années suivant la mort de l'arbre voisin (L9213). L'arbre L9130 fut partiellement enseveli dans des chenaux anastomosés en aval de la limite du Petit Âge glaciaire, mais il a tout de même survécu. Sa croissance a ralenti au cours d'une période de 20 à 30 ans, avant que le glacier n'ait atteint son extension maximale. Ainsi, sur la base des données présentées à la figure 14, on peut difficilement estimer la date de la position ultime du glacier au Petit Âge glaciaire.

À l'opposé, en d'autres sites, il existe une étroite relation entre l'histoire glaciaire locale et les séries dendrochronologiques régionales. Au glacier Athabasca, une grande quantité de débris ligneux, issus d'individus formant la limite des arbres sur le versant opposé au front du glacier, fournissent un premier exemple. Les arbres sont morts au cours de la période 1650 à 1700, soit juste avant l'avancée glaciaire contre la base du versant (Luckman, 1994a). Ceci montre que l'influence climatique du glacier a été importante localement et a peut-être contribué à la mort des arbres. D'autre part, les séries régionales disponibles montrent qu'il existe une très bonne correspondance avec la période de formation des moraines du glacier Athabasca aux XVIII^e et XIX^e siècles (fig. 15). Il semble donc raisonnable de supposer que les autres périodes d'avancée glaciaire ont eu lieu entre environ 1300 à 1700 ap. J.-C. Toutefois, ces récurrences n'ont pas laissé de bons témoins géomorphologiques.

Puisqu'il peut être difficile de dater de façon précise les avancées glaciaires en utilisant des arbres qui n'ont pas directement subi de dommages physiques par le glacier, il est plus sûr de restreindre l'identification des événements glaciaires à ceux pour lesquels il n'existe que des témoins irréfutables. Les séries dendrochronologiques issues d'arbres n'ayant subi

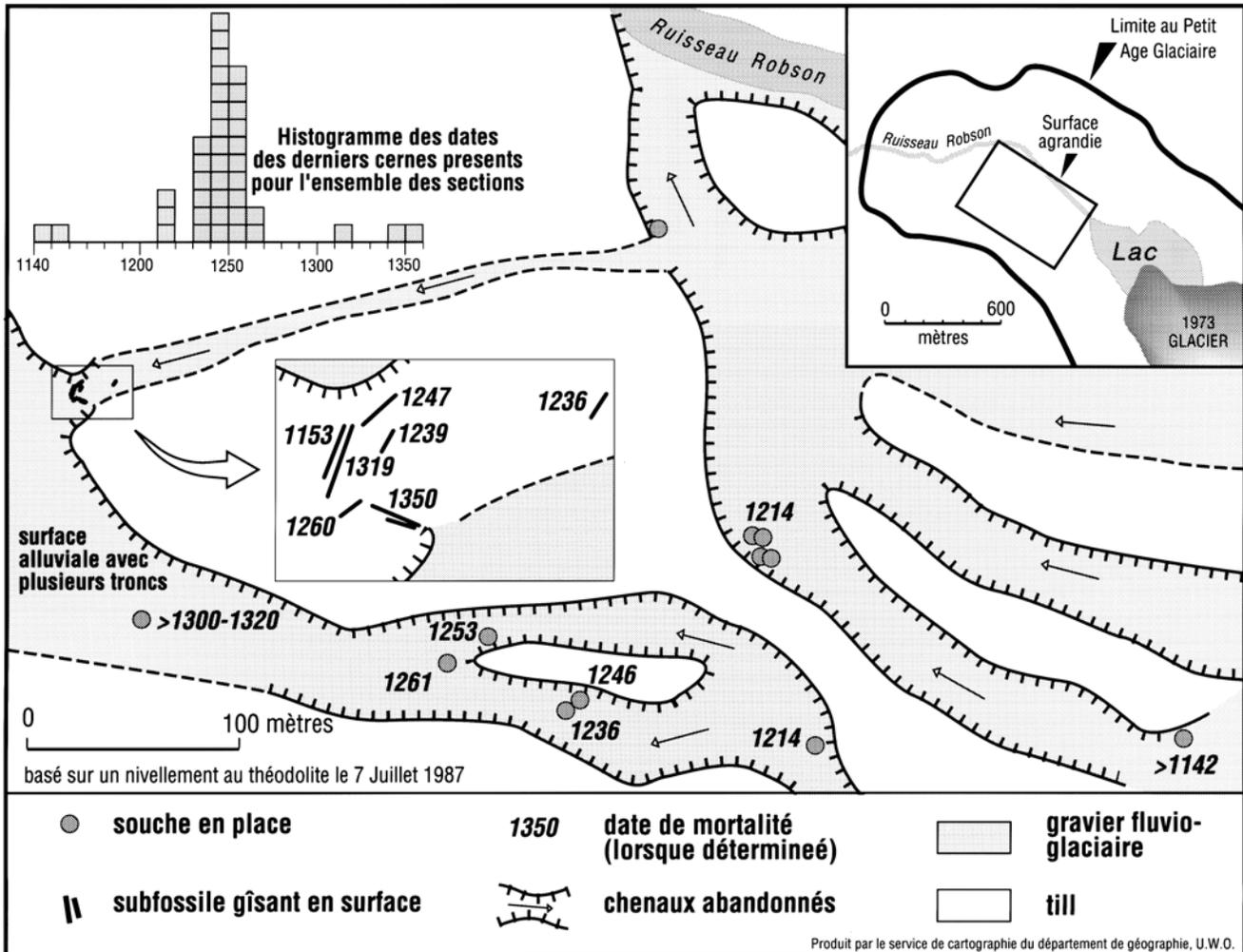


FIGURE 13. Répartition des souches *in situ* et des anciens chenaux d'eau de fonte au glacier Robson, en Colombie-Britannique. En avançant le glacier a tué les arbres sur son passage entre 1150 et 1350 ap. J.-C. environ. Au cours du XX^e siècle, ces souches ont à nouveau été exposées et parfois déplacées par les eaux de fonte. Les graphiques insérés en médaillon montrent (a) en haut à droite, la localisation des sites d'échantillonnage et (b) en haut à gauche, l'âge du dernier cerne de tous les échantillons retrouvés et datés (bois *in situ* et bois détritiques); (c) au centre, un croquis détaillé d'une accumulation de bois détritiques avec l'âge de leur dernier cerne (adapté de Luckman 1995, fig. 7).

Map of in-situ stumps and former meltwater channels at Robson Glacier, B.C. The glacier advanced across this area, killing the trees, between ca. 1150 and 1350 A.D. These stumps were later re-exposed (and sometimes reworked) by meltwater erosion during the present century. The inset diagrams show; (a) top right, location of the sample site; (b) top left, outer-ring dates of all samples recovered and dated (in-situ and detrital logs); (c) centre, detailed sketch of an accumulation of detrital logs with their outer ring dates (redrawn from Luckman 1995, Fig. 7).

aucun dommage en raison de la présence d'un glacier et les séries dendroclimatiques régionales s'avèrent toutefois d'excellents indicateurs des anciennes conditions climatiques qui peuvent avoir eu des conséquences sur les mouvements glaciaires. Le cadre d'interprétation qu'elles fournissent ne peut servir à la reconstitution des transferts de masse glaciaire, mais elles peuvent considérablement renforcer l'analyse des indicateurs directs de ces phénomènes.

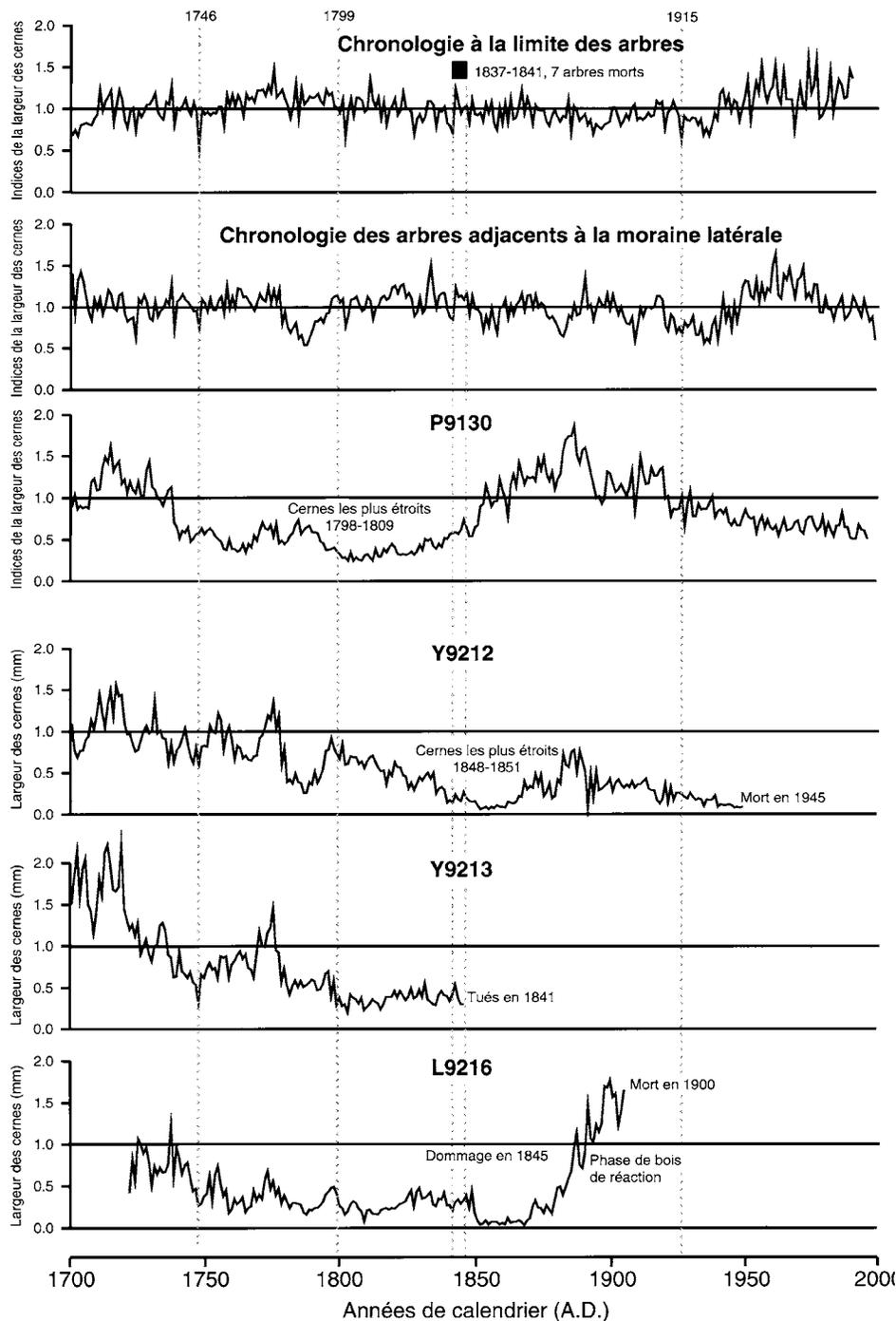
CONCLUSION

Cet essai apporte des exemples d'application des techniques dendroglaciologiques dans le contexte des Rocheuses du Canada. Rothlisberger (1976), Luckman (1988b) et Ryder et Thomson (1986) ont élaboré une méthodologie plus géné-

rale de l'interprétation glaciologique qui peut être tirée des bois recueillis en surface ou dans des coupes stratigraphiques des dépôts du domaine proglaciaire. L'interprétation dépend de la localisation, de l'âge et de la nature des échantillons (par ex., présence d'écorce, état de conservation du bois), du degré d'abrasion glaciaire, de la localisation du subfossile par rapport à la limite actuelle des arbres, etc. La véritable contribution de la dendroglaciologie est certainement l'attribution de dates précises aux événements, procurant ainsi une résolution annuelle au lieu d'un intervalle d'âges. La reconstitution des relations de détail entre les événements est ainsi rendue possible. Le succès de l'analyse dendroglaciologique repose aussi sur le développement d'un réseau dendrochronologique régional. Cela fournit un outil indispensable de datation en

FIGURE 14. Séries dendrochronologiques de *Picea engelmannii* établies aux environs des moraines du glacier Peyto, en Alberta. La courbe supérieure (fournie par F. H. Schweingruber, Institut fédéral suisse de recherche sur la forêt, la neige et le paysage), représente une chronologie basée sur des arbres situés à proximité de la limite des arbres. La seconde chronologie est fondée sur les carottes de cinq arbres situés à moins de 30 m de la marge glaciaire. La position des autres arbres est décrite dans le texte et est indiquée à la figure 11 (adapté de Luckman, 1996a).

Tree-ring series from Picea engelmannii growing adjacent to the moraines of Peyto Glacier, Alberta. The upper curve is a chronology from an adjacent treeline site provided by F. H. Schweingruber. The second chronology is based on cores from 5 trees growing <30m from the trimline. The sites of the other trees are shown on Figure 11 and described in the text (redrawn from Luckman, 1996a).



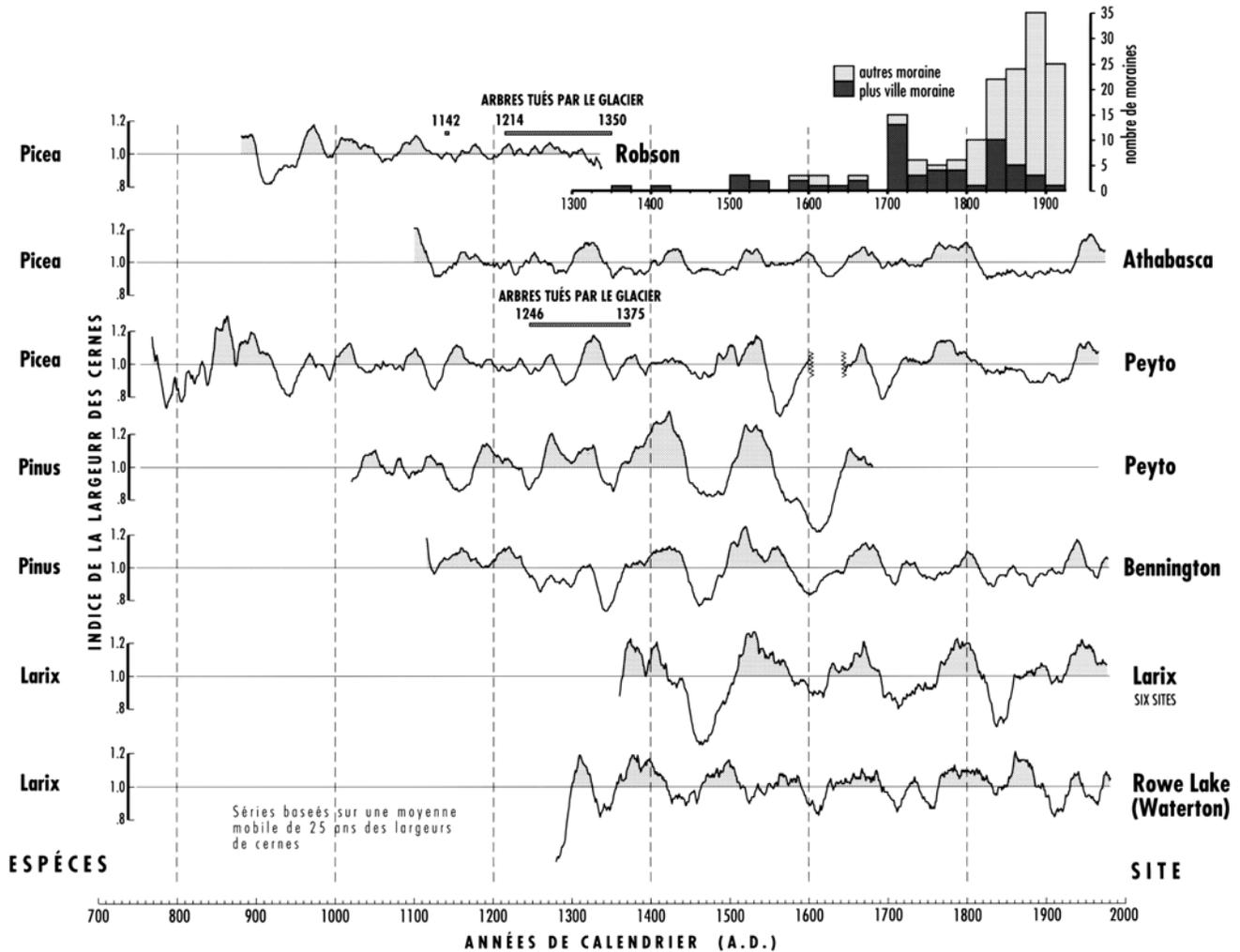
Produit par le service de cartographie et de géographie, U.W.O.

plus d'élargir le cadre d'analyse, en permettant de nouvelles applications et en facilitant l'interprétation du contexte climatique dans lequel les phénomènes se déroulent.

REMERCIEMENTS

L'auteur remercie Steve Guillemette, Martin Groleau, Robert Cecil et la rédaction de GpQ pour leur aide dans la traduction du texte en français et Yves Bégin (Université Laval)

et Bernard Héту (Université du Québec à Rimouski) pour leurs commentaires sur les versions antérieures. Cette synthèse a été réalisée grâce à la contribution de nombreux étudiants et collègues au fil des années. Les travaux ayant mené à cet essai ont été financés principalement par le Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada, par Parc Canada et par le parc provincial du Mont-Robson en Colombie Britannique. L'auteur remercie aussi le Centre de



Produit par le service de cartographie du département de géographie, U.W.O.

FIGURE 15. Longues séries dendrochronologiques et fluctuations glaciaires au cours du dernier millénaire dans les Rocheuses. Découlant de l'analyse des cernes, les sept chronologies sont lissées à l'aide d'une moyenne mobile de 25 ans. Elles sont fondées sur trois espèces différentes constituant la limite des arbres, laquelle s'étend sur 500 km le long des Rocheuses. L'âge des moraines du Petit Âge glaciaire est fondée sur l'étude de plusieurs séquences de moraines étudiées par plusieurs auteurs à la marge frontale de 60 glaciers (pour plus de détails voir Luckman, 1996b).

Long tree-ring chronologies and glacier fluctuations during the last millennium in the Canadian Rockies. The seven indexed ring-width chronologies are smoothed with a 25 year running mean and involve three different species growing at treeline sites that extend almost 500 km along the Rocky Mountains. The dated Little Ice Age moraines are based on studies of multiple moraine sequences at 60 glaciers by many authors (for details see Luckman, 1996b)

coopération interuniversitaire franco-québécois et les organisateurs québécois et français de l'atelier tenu à Aussois en juin 1994 pour avoir encouragé la rédaction de cet essai.

RÉFÉRENCES

- Bassinger, J.F., 1986. Our "tropical" Arctic. *Canadian Geographical Magazine*, Décembre 1986 : 28-37
- Christie, R.L. et McMillan, N. J. 1991. Tertiary Fossil Forests of the Geodetic Hills, Axel Heiberg Island, Arctic Archipelago. *Geological Survey of Canada Bulletin*, 403, 227 p.
- Colenutt, M.E. et Luckman, B.H. 1991. Dendrochronological studies of *Larix lyallii* at Larch Valley, Alberta. *Canadian Journal of Forest Research*, 21 : 1222-1233.
- _____. 1995. The dendrochronological characteristics of alpine larch. *Canadian Journal of Forest Research*, 27 : 777-789.
- Douglas, A.E., 1939. Crossdating in dendrochronology. *Journal of Forestry*, 39 : 825-831.
- Heusser, C.J., 1956. Postglacial environments in the Canadian Rocky Mountains. *Ecological Monographs*, 26 : 253-302.
- Holmes, R.W., 1992. Dendrochronology Program Library. Installation and Program Manual (January 1992 update). Tree-Ring Laboratory, University of Arizona, Tucson. 35 p. (non publié)
- Kaennel, M. et Schweingruber, F.H., 1995. Multilingual Glossary of Dendrochronology. Haupt, Berne, Stuttgart et Vienne, 467 p.
- Lamb, H.H., 1977. *Climate History and the Future*. Methuen, London.
- Luckman, B.H., 1986. Reconstruction of Little Ice Age events in the Canadian Rockies. *Géographie physique et Quaternaire*, 40 : 17-28.

- _____. 1988a. Dating the moraines and recession of Athabasca and Dome Glaciers, Alberta, Canada, *Arctic and Alpine Research*, 20 : 40-54.
- _____. 1988b. 8000-year-old wood from the Athabasca Glacier. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 25 : 148-151.
- _____. 1994. Evidence for climatic conditions between ca. 900-1300 A.D. in the Southern Canadian Rockies. *Climate Change*, 30 : 1-12.
- _____. 1995. Calendar-dated, early Little Ice Age glacier advance at Robson Glacier, British Columbia, Canada. *Holocene*, 5 : 149-159.
- _____. 1996a. Dendroglaciology at Peyto Glacier, Alberta, Canada, p. 679-688. *In* J. S., Dean, D.S. Meko, et T.W. Swetnam, édit., *Tree Rings, Environment and Humanity*. Radiocarbon.
- _____. 1996b. Reconciling the glacial and dendrochronological records of the last millennium in the Canadian Rockies, p. 85-108. *In* P.D. Jones, R.S. Bradley et J. Jouzel, édit., *Climatic Variations and Forcing Mechanisms of the last 2000 years*. Springer-Verlag, Berlin, NATO ASI Series, Series I : *Global Environmental Change*, 41.
- Luckman, B.H., Harding, K.A. et Hamilton, J.P., 1987. Recent glacier advances in the Premier Range, British Columbia. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 24 : 1149-61.
- Luckman, B.H., Holdsworth, G. et Osborn, G.D., 1993. Neoglacial glacier fluctuations in the Canadian Rockies. *Quaternary Research*, 39 : 144-53.
- Luckman, B.H. et Osborn, G.D., 1979. Holocene glacier fluctuations in the middle Canadian Rocky Mountains. *Quaternary Research*, 11 : 52-77.
- McCarthy, D.P. et 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.
- Ryder, J.R. et Thomson, 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.
- Rothlisberger, F., 1976. Gletscher-und-Klimaschwankungen im Raum Zermatt, Ferpele und Arolla. *Die Alpen*, 3/4 : 59-152.
- Schroder, J., 1980. Dendrogeomorphology : Review and new techniques of tree-ring dating. *Progress in Physical Geography*, 4 : 161-188.
- Schweingruber, F.H. 1993. Jahrringe und Umwelt Dendroökologie. Eidenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Birmensdorf, 474 p.
- Schweingruber, F.H., Eckstein, D., Serre-Bachet, F. et Bräker, O.U., 1990. Identification, presentation and interpretation of event years and pointer years in dendrochronology. *Dendrochronologia*, 8 : 9-38.
- Stuiver, M. et Becker, B., 1993. High Precision Decadal Calibration of the Radiocarbon Time-Scale, AD 1950-6000 BC. *Radiocarbon*, 35 : 35-65
- Vincent, J.-S., 1990. Late Tertiary and Early Pleistocene deposits and History of Banks Island, southwestern Canadian Arctic Archipelago. *Arctic*. 43 : 339-363.
- Zumbuhl, H.L., 1980. Die Schwankungen des Grindelwaldgletscher in den historischen Bild- und Schriftquellen des 12 bis 19 Jahrhunderts. Birkhauser Verlag, Basel, 296 p.