

## Note

---

« Analyse dendroclimatique d'un krummholz à la limite des arbres, lac Bush, Québec nordique »

Louise Filion, Serge Payette et Line Gauthier

*Géographie physique et Quaternaire*, vol. 39, n° 2, 1985, p. 221-226.

Pour citer cette note, utiliser l'information suivante :

URI: <http://id.erudit.org/iderudit/032604ar>

DOI: 10.7202/032604ar

Note : les règles d'écriture des références bibliographiques peuvent varier selon les différents domaines du savoir.

---

Ce document est protégé par la loi sur le droit d'auteur. L'utilisation des services d'Érudit (y compris la reproduction) est assujettie à sa politique d'utilisation que vous pouvez consulter à l'URI <https://apropos.erudit.org/fr/usagers/politique-dutilisation/>

---

Érudit est un consortium interuniversitaire sans but lucratif composé de l'Université de Montréal, l'Université Laval et l'Université du Québec à Montréal. Il a pour mission la promotion et la valorisation de la recherche. Érudit offre des services d'édition numérique de documents scientifiques depuis 1998.

Pour communiquer avec les responsables d'Érudit : [info@erudit.org](mailto:info@erudit.org)

# ANALYSE DENDROCLIMATIQUE D'UN KRUMMHOLZ À LA LIMITE DES ARBRES, LAC BUSH, QUÉBEC NORDIQUE

Louise FILION, Serge PAYETTE et Line GAUTHIER, Centre d'études nordiques, Université Laval, Sainte-Foy, Québec G1K 7P4.

**RÉSUMÉ** Les krummholz situés près de la limite des arbres dans le Nord québécois constituent généralement des formations âgées, non perturbées par les feux naturels depuis plusieurs siècles. L'analyse de l'un de ces krummholz révèle la présence d'un nombre élevé d'épinettes noires (*Picea mariana* (Mill.) BSP.) subfossiles qui ont pu être utilisées pour la reconstitution dendroclimatique du site. Ce krummholz empétrioïde est composé d'épinettes vivantes croissant principalement au ras du sol (moins de 30 cm de hauteur) et d'épinettes mortes se présentant sous forme fruticoides (mais de moins de 1 m de hauteur) et subarborescente (entre 1 et 3 m de hauteur). Grâce à l'interdatation des épinettes, l'histoire dendroclimatique du krummholz a été reconstituée pour les 500 dernières années. Les subfossiles subarborescents ont vécu entre la fin du XV<sup>e</sup> siècle et le début du XVII<sup>e</sup> siècle et leur présence indique une période climatique clémente entre ca 1500 et 1570 A.D. Ces petits arbres ont donné naissance par graines à une partie importante d'une population d'épinettes fruticoides qui a marqué l'essentiel de la période froide du Petit Âge glaciaire (ca 1570-1880 A.D.). La majorité de ces tiges fruticoides sont mortes avant le récent réchauffement climatique (XX<sup>e</sup> siècle); elles ont été remplacées par les branches de la partie inférieure de ces troncs qui ont formé des marcottes empétrioïdes physiologiquement indépendantes. L'absence de régénération sexuée au cours du XX<sup>e</sup> siècle est liée au manque d'épinettes de grande taille capables de produire des semences viables. Une courbe dendrochronologique couvrant les 500 dernières années a été confectionnée à partir de ces spécimens.

## INTRODUCTION

Les sites avoisinant la limite des arbres du Nord québécois sont souvent occupés par une végétation de krummholz (PAYETTE, 1983). Le terme krummholz s'applique aux formations conifériennes composées d'espèces arborescentes mais à port arbustif, dont les caractéristiques structurales constituent une réponse adaptative, phénotypique, aux conditions climatiques rigoureuses des milieux subarctiques et arctiques (ou de leurs équivalents en altitude) (LAMARCHE et MOONEY, 1972; PAYETTE, 1974; WARDLE, 1974). Toutefois, l'emploi généralisé du terme krummholz en Amérique du Nord a été récemment critiqué par HOLTMEIER (1981) qui le recommande pour qualifier seulement le port prostré d'espèces conifériennes génétiquement arbustives.

L'importance spatiale des krummholz à la limite des arbres est en grande partie redevable au régime des feux qui y prévaut depuis les deux derniers millénaires. En raison de la faible incidence et de l'étendue restreinte des feux dans ces

**ABSTRACT** *Dendroclimatic analysis from a krummholz site near the tree-line, Lake Bush, northern Québec.* Many krummholz sites found around the tree-line in northern Québec are composed of old-growth vegetation, free of fire disturbance for several centuries. The study of one of these krummholz indicated that the stand was dominated by prostrate black spruce (*Picea mariana* (Mill.) BSP.) (height of less than 30 cm) living between erect-shrubby (height less than 1 m) and tree-like (minimum height ranging from 1 to 3 m) dead spruce. Using cross-dating and tree-ring characteristics, the krummholz dendroclimatic sequence has been reconstructed for the last 500 years. The tree-like subfossils lived between the end of the XVth century and the beginning of the XVIIth century, an indication of a milder climatic period between ca 1500 and 1570 A.D. These small trees acted as seed-bearers in the establishment of an important proportion of the erect-shrubby spruce population that spanned the Little Ice Age period (ca 1570-1880). Most of these individuals died before the XXth century climatic warming; they were then replaced by low-growth layers originating from branches connected to the dying spruces. Sexual regeneration during the XXth century did not occur at this site because of the absence of spruce able to produce viable seeds. A krummholz dendrochronological curve covering about the last 500 years was built using both living and dead spruce.

sites, la végétation coniférienne, dominée par l'épinette noire, peut se développer en l'absence de perturbations et atteindre ainsi un âge avancé (PAYETTE et GAGNON, 1985). De tels krummholz montrent une suite ininterrompue du développement démographique des populations d'épinette noire se traduisant par une structure d'âge inéquienne, parfois marquée de petites cohortes associées à de brèves périodes de régénération par graines (PAYETTE *et al.*, 1985). Ces épinettes de tous âges, dont certaines peuvent avoir 200 à 300 ans, sinon davantage, croissent parmi de nombreux subfossiles blanchis, également d'âge variable, ce qui confère à ces formations une physionomie tout à fait particulière (fig. 1). L'intérêt scientifique de telles formations conifériennes réside dans la possibilité qu'elles offrent d'étudier, par l'analyse dendrochronologique, l'influence du climat sur leur développement au cours des derniers siècles, voire du dernier millénaire dans certains cas.

Cette recherche sur les aspects dendroclimatiques des krummholz de la limite des arbres fait suite à une étude

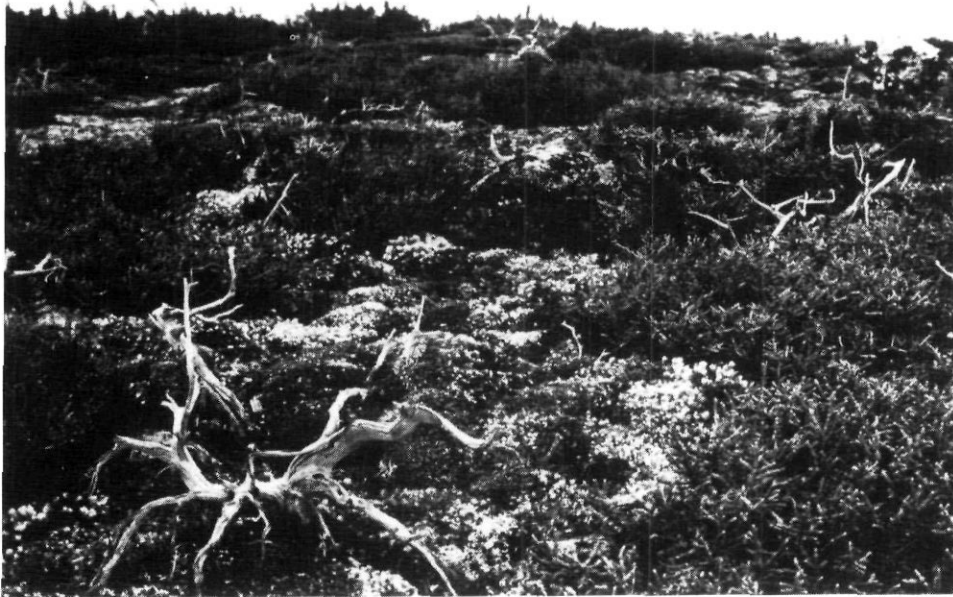


FIGURE 1. Vue générale du site étudié.  
A general view of the study site.

récente (PAYETTE *et al.*, 1985) sur l'évolution climatique d'une pessière à lichens au cours des 600 dernières années; cette étude a permis de mettre en évidence l'influence du climat sur le comportement écologique de l'épinette noire au cours du Petit Âge glaciaire (froid) et durant la période subactuelle, *i.e.* le dernier siècle (doux). Nous poursuivons ici cette reconstitution du climat contrasté des derniers siècles par l'étude des formes de croissance des épinettes noires vivantes et mortes d'un krummholz de la même région (le lac Bush : 57°47'N, 75°45'0). Le principal objectif de cette recherche est de démontrer l'existence d'un climat doux à la limite des arbres au cours du XVI<sup>e</sup> siècle et son changement qui a culminé en un refroidissement d'importance, celui du Petit Âge glaciaire. Un second objectif vise à expliquer l'absence de régénération par graines des krummholz au cours du réchauffement climatique du XX<sup>e</sup> siècle.

## MATÉRIEL ET MÉTHODES

Le krummholz étudié est représentatif des sites exposés de la limite des arbres. Il occupe le sommet (altitude de 150 m) d'une colline rocheuse recouverte d'une mince couche de till remanié parsemé de gros blocs. Le site est colonisé par un krummholz empétré d'épinettes noires et de lichens, alors que les épinettes mortes sont généralement de type fruticé (fig. 1). D'après la datation <sup>14</sup>C des charbons de bois situés sous le couvert lichénique, le dernier feu ayant affecté ce site est survenu vers 2000 ans BP (Beta-8936 : 2010 ± 60 BP).

Les épinettes empétrées poussent au ras du sol et proviennent de marcottes (branches) des tiges fruticé mortes (fig. 2). On trouve en certains endroits des tiges droites et relativement longues d'épinettes mortes qui reposent directement sur le sol, au sein du tapis de lichens. On dénombre

aussi quelques épinettes fruticé vivantes de taille variable, mais inférieure à 1 m de hauteur.

Afin de connaître l'histoire dendroclimatique de ce krummholz, on a procédé à l'échantillonnage de toutes les épinettes mortes situées au sommet de la colline, après avoir décrit leur forme de croissance. Une section transversale du tronc a été prélevée, généralement à une hauteur de 10 à 30 cm de la surface du sol, à cause de la pourriture du bois à la base. Sur certains échantillons, l'année de mortalité n'a pu être déterminée avec précision à cause du piètre état de conservation de la partie externe du tronc. Les quatre épinettes vivantes du site ont également été échantillonnées à la base du tronc afin de compléter la série dendrochronologique. Les 13 épinettes mortes et les 4 vivantes représentent l'ensemble des individus qui ont pu être échantillonnés; il n'a pas été possible d'augmenter leur nombre en raison de la petite superficie du site étudié. Par ailleurs, une marcotte empétrée d'épinette a été échantillonnée systématiquement depuis la partie vivante jusqu'au tronc fruticé mort.

Les sections échantillonnées ont été sablées et poncées en laboratoire. Sur chaque échantillon, la largeur des cernes annuels a été mesurée selon les techniques standard (FRITTS, 1976), à l'aide d'un micromètre Henson (précision de 0,01 mm), le long de deux rayons de direction opposée. Les échantillons étudiés présentaient très peu de bois de réaction (SCURFIELD, 1973), ce qui a facilité l'analyse des cernes annuels. Grâce à la présence d'anneaux diagnostiques, les cernes pâles (Filion *et al.*, 1985) caractérisés par l'absence de bois d'été ou la présence de seulement quelques rangées de cellules de bois d'été, et grâce au patron de croissance des arbres, il a été possible de dater les épinettes mortes par interdatation. Une courbe dendrochronologique a été confectionnée à partir des 17 échantillons (4 vivants et 13

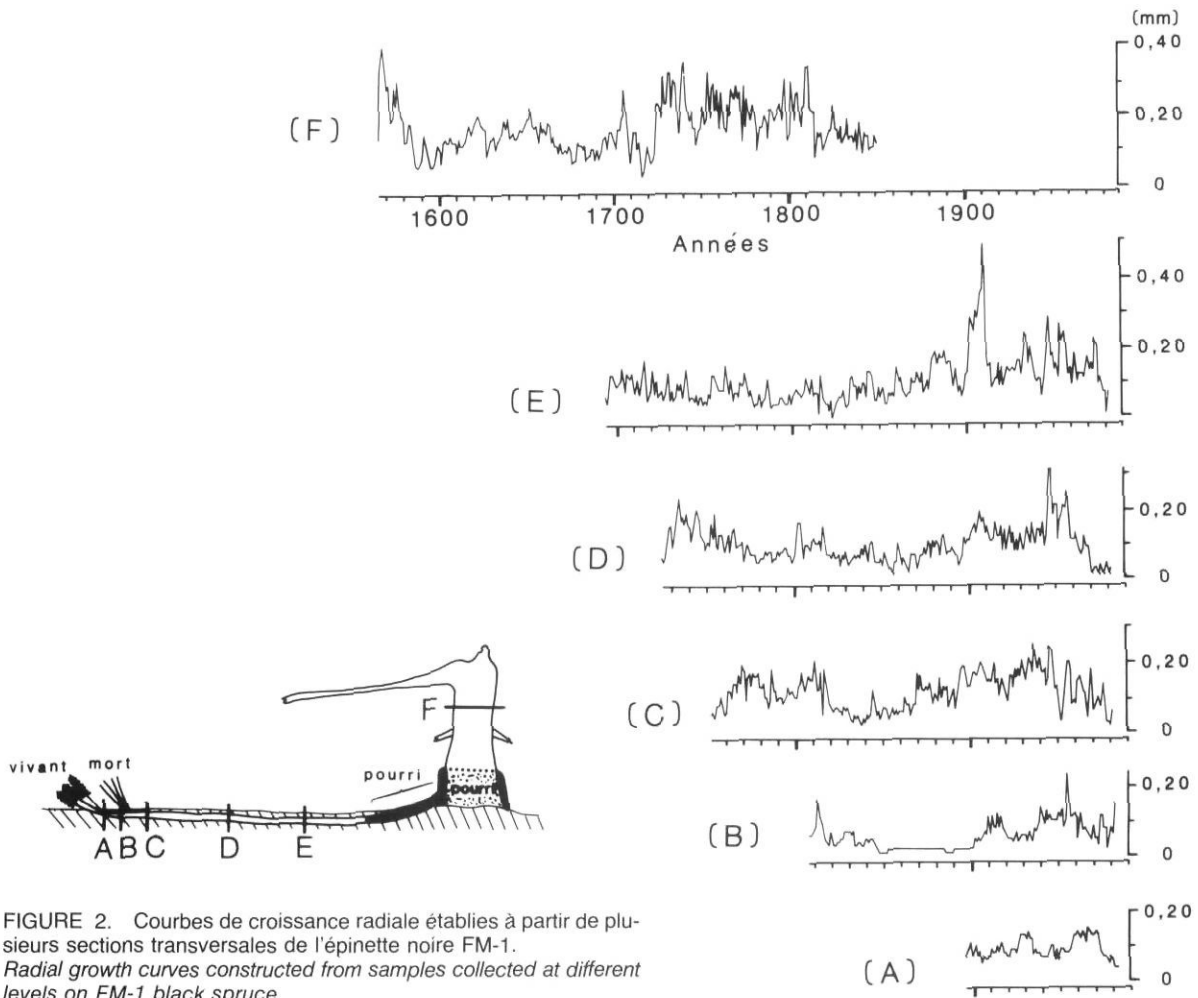


FIGURE 2. Courbes de croissance radiale établies à partir de plusieurs sections transversales de l'épinette noire FM-1.  
Radial growth curves constructed from samples collected at different levels on FM-1 black spruce.

subfossiles) et est basée sur la moyenne arithmétique de la largeur des cernes annuels de la série. À cause de la nature des épinettes échantillonnées et du site, nous n'avons pas jugé utile de standardiser les données et de produire une courbe indicée; l'intérêt de la courbe présentée dans ce travail réside plutôt dans la mise en évidence de la relation existant entre les formes de croissance, la largeur des cernes et le climat. L'aspect technique le plus important était de préciser, grâce à l'interdatation, les périodes où apparaissaient les diverses formes de croissance des épinettes du site et d'en déduire les caractéristiques principales.

## RÉSULTATS

Deux types différents de subfossiles d'épinette noire ont été observés lors de l'échantillonnage (tabl.1). Le premier type, le plus répandu, est classé dans la catégorie fruticoidé (PAYETTE, 1974) et se caractérise par la présence d'un tronc unique et dressé, ne dépassant pas un mètre de hauteur. Des marcottes empétricoïdes vivantes sont le plus souvent raccordées au tronc. L'exemple du spécimen FM-1 (fig. 2) montre que la marcotte prolonge de manière sensible la longévité des individus; cette épinette vit probablement depuis

la première moitié du XVI<sup>e</sup> siècle, sachant que l'échantillonnage a été fait dans la partie supérieure du tronc.

Le deuxième type comprend des tiges droites, dégarnies et minces, d'une longueur variant entre 1 m et 3 m, et reposant sur des cailloux et dans le couvert lichénique. Bien que leur forme de croissance originelle soit particulièrement difficile à déterminer, ces épinettes présentent dans leur ensemble une forme arborescente ou subarborescente; compte tenu du degré de décomposition avancé des tiges, il est fort probable qu'elles formaient à cette époque de petits arbres ou des verticilles. Alors que toutes les tiges subarborescentes sont apparues vers la fin du XV<sup>e</sup> siècle, les tiges fruticoides datent au moins du XVI<sup>e</sup> siècle. Quant aux épinettes fruticoides vivantes, elles sont apparues au XVII<sup>e</sup> et au XVIII<sup>e</sup> siècles (tabl.1).

Les cernes annuels des macrorestes subarborescents d'épinette noire sont de largeur très variable, mais ces dernières ont poussé plus vite que les épinettes noires fruticoides vivantes ou mortes. Une courbe dendrochronologique basée sur la largeur des cernes annuels a été confectionnée et elle s'étend sur une période d'un peu moins de 500 ans (fig.3). Pour fin de comparaison, nous avons aussi inclus dans cette figure la courbe dendrochronologique d'environ 600 ans construite

TABLEAU I

*Caractéristiques morphologiques des épinettes noires vivantes et subfossiles*

N° échantillon	Type	Période	Remarques
FV-1	Fruticöïde	Tronc: 1811-1983	Vivant
FV-2	Fruticöïde	Tronc: 1793-1983	Vivant
FV-3	Fruticöïde	Tronc: 1734-1983	Vivant
FV-6	Fruticöïde	Tronc: 1706-1983	Vivant
FM-1	Fruticöïde ca 50 cm de hauteur	Tronc: 1566-1852**	Marcottes empétröïdes vivantes, maintenant détachées du tronc fruticöïde Écorce à la base du tronc Tronc dressé, debout
FM-2	Fruticöïde ca 50-75 cm de hauteur	Tronc: ca* 1570-1810**	" "
FM-3	"	Tronc: 1618- ca 1889	" "
FM-4	Fruticöïde ca 50-75 cm de hauteur	Tronc: ca 1556-1784**	Pas de marcottes vivantes
FM-5	Subarborescent 2 m de longueur	Tronc: 1495-1636* Tête: ca 1515-1587 Chronologie se rendant à 1643	Pas de rejetons Uniquement entouré de lichens et d'éricacées Couché au sol
FM-6	Fruticöïde ca 50-75 cm de hauteur	Tronc: 1656-1889	Marcottes empétröïdes vivantes, maintenant détachées du tronc fruticöïde Écorce sur la moitié inférieure du tronc Tronc dressé debout
FM-7	Fruticöïde ca 1 m de hauteur	Tronc: 1544-1670**	Pas de rejetons Uniquement entouré de lichens et d'éricacées Tronc courbé, couché au sol
FM-8	Fruticöïde ca 75-100 cm	Tronc: 1521-1797** Tête: 1565-1779	Marcottes empétröïdes vivantes ayant tendance à se redresser, détachées du tronc fruticöïde Tronc non enraciné, dressé, debout
FM-9	Fruticöïde ca 1 m de hauteur	Tronc: 1798-1946	Marcottes empétröïdes vivantes reliées au tronc fruticöïde Écorce sur le tronc
FM-10	Subarborescent Au moins 2 m de longueur	Tronc: 1490-1579 Tête: 1495-1601**	Pas de rejetons Uniquement entouré de lichens et d'éricacées Couché au sol
FM-11	Fruticöïde ca 75-100 cm de hauteur	Tronc: <1594-1792** (cœur absent) Tête: 1563-1696	Pas de rejetons Tronc dressé, debout
FM-12	Subarborescent Au moins 3 m de longueur	Tronc: 1499-1585**	Pas de rejetons Uniquement entouré de lichens et d'éricacées Couché au sol
FM-13	Subarborescent Au moins 3 m de longueur	Tronc: 1494-1527**	" "

\*ca: moins de cinq années manquantes (au centre)

\*\*: âge minimal, nombre indéterminé d'années manquantes (vers l'extérieur)

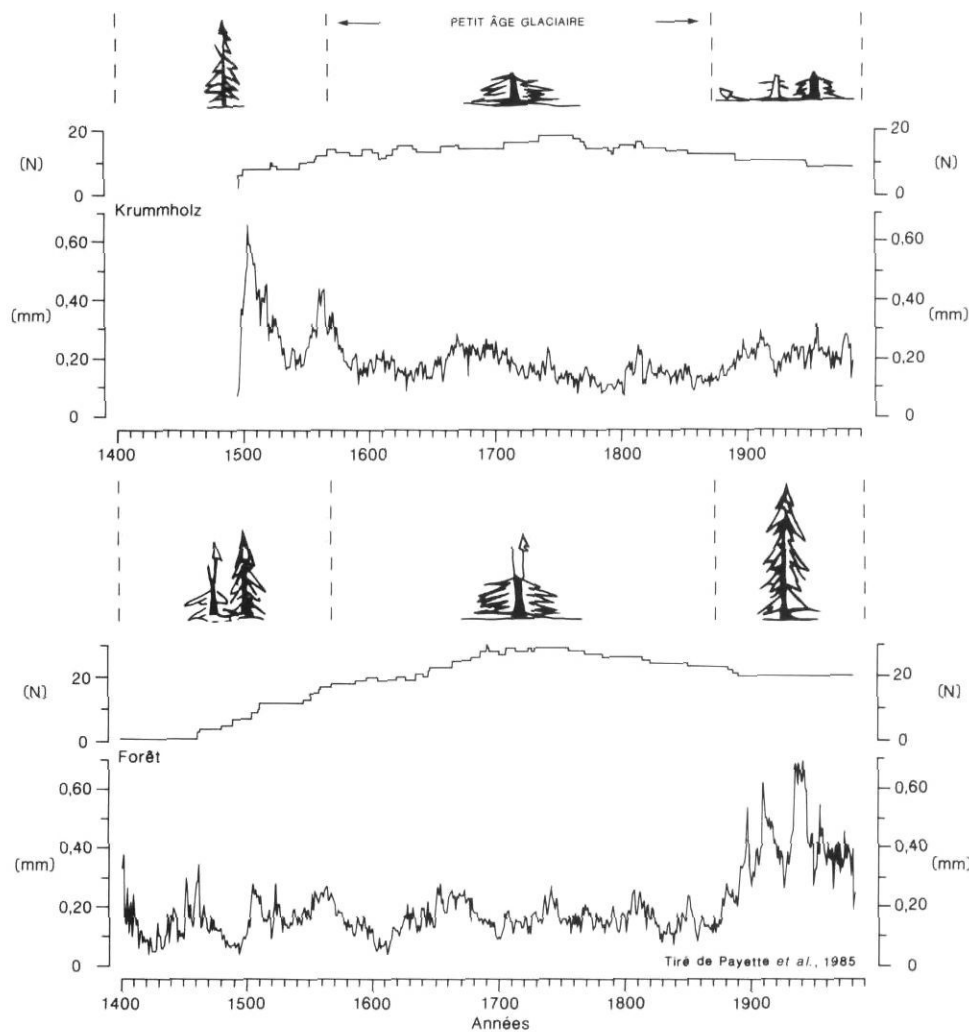


FIGURE 3. Courbe dendrochronologique établie à partir d'échantillons prélevés dans le krummholz étudié (1490-1982) et la courbe établie par PAYETTE *et al.* (1985) à partir d'échantillons forestiers (1398-1982). *Lake Bush tree-ring chronologies constructed respectively from the study krummholz (1490-1982) and a forested site (1398-1982, PAYETTE et al., 1985).*

à partir de 39 échantillons (largeur moyenne des cernes annuels) d'une pessière à lichens (forêt) de la même région (PAYETTE *et al.*, 1985).

## DISCUSSION

L'analyse dendrochronologique des formes de croissance du krummholz empétrioïde du lac Bush montre que l'épinette noire se caractérise par une grande longévité, bien au-delà des estimations déjà connues qui sont de l'ordre de 300 ans (FOWELLS, 1965), en raison de l'absence de perturbations comme les feux. La grande longévité des épinettes noires est principalement assurée par le marcottage des branches inférieures du tronc. L'exemple de l'épinette FM-1 est éloquent : cet individu a vécu à l'état fruticoïde pendant environ 300 ans (ca 1566-1851) (fig. 2F) et survit depuis le XIX<sup>e</sup> siècle sous forme empétrioïde grâce à la croissance très lente de petites marcottes issues de branches de la partie basale du tronc fruticoïde. La croissance radiale de la marcotte FM-1 a été particulièrement faible au cours du XIX<sup>e</sup> siècle (fig. 2A à E); c'est à cette époque qu'elle est devenue physiologiquement indépendante. Par ailleurs, la faible longévité des

épinettes subarborescentes, telle que suggérée par l'âge des tiges subfossiles, pourrait être due à l'absence de branches (pouvant former des marcottes) à la base du tronc (tabl. I).

La présence de trois types de forme de croissance dans le site étudié est avant tout indicatrice de conditions climatiques variables au cours des 500 dernières années. Chaque type a prédominé à des périodes différentes, soulignant ainsi l'incidence de changements climatiques sensibles. La croissance d'épinettes subarborescentes entre ca 1490 et la seconde moitié du XVI<sup>e</sup> siècle constitue une preuve directe de l'existence d'un climat clément à cette époque. À cause de l'état de décomposition avancé des spécimens, il est cependant impossible de préciser l'époque d'établissement (par graines), qui se situe vraisemblablement au cours de la deuxième moitié du XV<sup>e</sup> siècle (tabl. I). Ces épinettes n'auraient guère vécu plus d'une centaine d'années et sont mortes vers la fin du XVI<sup>e</sup> siècle ou au début du XVII<sup>e</sup> siècle. En l'absence de marcottes, les dommages causés par l'érosion aux feuilles et aux branches supranivales auraient précipité la mort des tiges au début du Petit Âge glaciaire. Ces épinettes ont pu se régénérer sporadiquement par voie sexuée au cours du

XVI<sup>e</sup> siècle, et probablement pendant la première partie du XVII<sup>e</sup> siècle, pour donner naissance aux épinettes fruticoïdes. La taille de ces épinettes n'a jamais dépassé 1 m de hauteur; cette hauteur maximale a du reste été atteinte dans quelques cas au cours de la période clémente du XVI<sup>e</sup> siècle (tabl.1). Ces individus se sont développés lentement au cours du Petit Âge glaciaire et la grande majorité d'entre eux ont vécu 200 à 300 ans avant de mourir au cours du XIX<sup>e</sup> siècle. La mort des tiges fruticoïdes ne fut pas soudaine; à l'exemple du patron de mortalité observé dans la même région (PAYETTE *et al.*, 1985), les parties exposées d'une épinette meurent avant les parties protégées par le couvert de neige. Ainsi, vers la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, seules les branches inférieures des tiges fruticoïdes de la plupart des individus présents dans le site étaient encore vivantes, vraisemblablement protégées par un très mince couvert nival. À l'aube du XX<sup>e</sup> siècle et jusqu'à aujourd'hui n'ont subsisté que quelques épinettes fruticoïdes et un nombre relativement élevé de marcottes prostrées. En raison de l'état passablement réduit de l'appareil chlorophyllien de ces épinettes et de leur petite taille, elles n'ont pu réagir positivement au réchauffement climatique. Malgré l'incidence de ce réchauffement, les conditions hivernales du site sont demeurées fort rigoureuses en l'absence de structures de végétation suffisamment hautes pour retenir la neige. Ces conditions ont maintenu les épinettes à l'état prostré, empêchant la production de cônes et de graines de taille normale. Il semble donc que l'absence de régénération pendant cette période clémente du dernier siècle soit due principalement au manque de semenciers arborescents ou subarborescents capables de produire des graines normales. Cette situation du krummholz empétrioïde du lac Bush caractérise sans doute l'ensemble des krummholz empétrioïdes du Nord québécois.

La courbe dendrochronologique du krummholz étudié représente la deuxième plus longue chronologie publiée à ce jour dans l'est de l'Amérique du Nord (fig.3); la plus longue provient de la même région, mais a été confectionnée à partir d'échantillons forestiers (PAYETTE *et al.*, 1985). La courbe provenant du krummholz met davantage en évidence la période clémente s'échelonnant entre ca 1500 et 1570 caractérisée par la croissance d'épinettes arborescentes ou subarborescentes. La longue période de refroidissement qu'est le Petit Âge glaciaire commence après 1570 et a duré 200 ou 300 ans selon les auteurs (LAMB, 1977; Le ROY LADURIE, 1967). La fin de cette période (vers 1880) apparaît clairement dans la courbe dendrochronologique de la forêt du lac Bush (PAYETTE *et al.*, 1985); elle est suivie d'un épisode de réchauffement à partir de la fin du XIX<sup>e</sup> siècle (JONES *et al.*, 1982; KELLY *et al.*, 1982). La courbe dendrochronologique du krummholz ne montre pas une tendance aussi nette en raison de la nature différente des formes de croissance.

#### REMERCIEMENTS

Nous remercions tout particulièrement Yves Boutin du Laboratoire de dendrochronologie du Centre d'études nordiques.

Paul Comtois a participé activement à la récolte des charbons de bois. Ann Delwaide et Ivan Grenier ont confectionné les figures. Ce travail a été financé par le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie (CRSNG) du Canada et le ministère de l'Éducation du Québec (programme FCAC). Nous remercions également le Dr. Bryan Luckman et un lecteur anonyme pour leurs commentaires fort utiles.

#### RÉFÉRENCES

- FILION, L., PAYETTE, S., GAUTHIER, L. et BOUTIN, Y. (1985) : Light rings in subarctic conifers as a new dendrochronological tool, manuscrit soumis pour publication.
- FOWELLS, H. A. (1965) : *Silvics of Forest Trees of the United States*, Agricultural Handbook No 271, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C. 762 p.
- FRITTS, H. C. (1976) : *Tree Rings and Climate*, Academic Press, Londres, 567 p.
- HOLTMEIER, F.-K. (1981) : What does the term « Krummholz » really mean? Observations with special reference to the Alps and the Colorado Front Range, *Mountain Research and Development*, vol. 1, p. 253-260.
- JONES, P. D., WIGLEY, M. L. et KELLY, P. M. (1982) : Variations in surface air temperature. Part 1. Northern Hemisphere, 1881-1980, *Monthly Weather Review*, 110, p. 59-70.
- KELLY, P. M., JONES, P. D., SEAR, C. B., CHERRY, B. S. G. et TAVAKOL, R. K. (1982) : Variations in surface air temperature. Part 2. Arctic regions, 1881-1980, *Monthly Weather Review*, 110, p. 71-83.
- LAMARCHE, V. C., Jr et MOONEY, H. A. (1972) : Recent climatic change and development of the bristlecone pine (*P. longeva* Bailey) krummholz zone, Mt. Washington, Nevada, *Arctic and Alpine Research*, 4, p. 61-72.
- LAMB, H. H. (1977) : *Climate, present, past and future. Vol.2 : climatic history and the future*. Methuen, Londres, 835 p.
- LeROY LADURIE, E. (1967) : *Histoire du climat depuis l'an mil*, Éd. Flammarion, Paris, 377 p.
- PAYETTE, S. (1974) : Classification écologique des formes de croissance de *Picea glauca* (Moench) Voss et de *Picea mariana* (Mill.) BSP. en milieux subarctiques et subalpins, *Le Naturaliste canadien*, 101, p. 893-903.
- (1983) : The forest tundra and present tree-lines of the northern Québec-Labrador Peninsula, dans *Tree-Line Ecology. Proceedings of the northern Québec Tree-Line Conference*, P. Morisset et S. Payette, édit., Nordicana, 47, p. 3-23.
- PAYETTE, S., FILION, L., GAUTHIER, L. et BOUTIN, Y. (1985) : Secular climate change in old-growth tree-line vegetation of northern Québec, *Nature*, 315, p. 135-138.
- PAYETTE, S. et GAGNON, R. (1985) : Late Holocene deforestation and tree regeneration in the forest-tundra of Québec, *Nature*, 313, p. 570-572.
- SCURFIELD, G. (1973) : Reaction wood, *Science*, 179, p. 647-655.
- WARDLE, P. (1974) : Alpine timberlines, dans *Arctic and Alpine Environments*, J. D. Ives et R. G. Barry, édit., Methuen, Londres, p. 371-402.