

Université du Québec
INRS (Eau, Terre, Environnement)

Utilisation des isotopes stables du carbone et de l'oxygène comme indicateurs climatiques
et hydrologiques dans le moyen nord du Québec, Canada

Par
Mathieu Gingras

Mémoire présenté
pour l'obtention
du grade de Maître ès science (M.Sc.)
en Sciences de la terre

Jury d'évaluation

Examineur interne
Directeur INRS-ETE

Yves Bégin Ph.D.

Examineur externe
Professeur UQAR

Dominique Arseneault Ph.D.

Directeur de recherche
Ressources naturelles Canada
Commission géologique du Canada

Christian Bégin Ph.D.

Codirectrice de recherche
Ressources naturelles Canada
Commission géologique du Canada

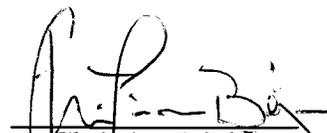
Martine Savard, Ph.D.



Résumé

Cette étude repose sur l'utilisation des isotopes stables de l'oxygène ($\delta^{18}\text{O}$) et du carbone ($\delta^{13}\text{C}$) des cernes de croissance d'arbres échantillonnés à la tête du complexe hydroélectrique La Grande (Jamésie), comme indicateurs des conditions hydro-climatiques passées. Cinq séries individuelles des valeurs $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{13}\text{C}$, couvrant la période de 1800 à 2004, ont été produites à une résolution annuelle entre 1940 et 2004 ou biannuelle entre 1800 et 1939. Afin d'identifier les variables climatiques ayant le plus d'influence sur les rapports isotopiques, nous avons comparés, à l'aide de statistiques, les rapports isotopiques à des données climatiques pour la période 1944-2003. Les résultats ont montré que les valeurs $\delta^{13}\text{C}$ reflètent surtout les températures maximales moyennes de juillet à août ($r=0,6$) et les apports d'eau moyens au système hydrique régional de juillet à novembre ($-0,59$). En ce qui a trait aux valeurs $\delta^{18}\text{O}$, elles sont aussi surtout le reflet des températures maximales moyennes de juin à août ($r=0,62$) et des apports d'eau moyens au système hydrique régional de juillet à novembre ($r=-0,54$). De plus, les rapports $\delta^{18}\text{O}$ et le $\delta^{13}\text{C}$ sont également corrélés significativement avec un indice climatique intégrant les températures et les précipitations estivales ($r=-0,55$ et $-0,58$, respectivement). Puisque les deux isotopes répondent généralement aux mêmes paramètres climatiques, ils ont été combinés et ce, de façon à accroître la sensibilité des séries isotopiques aux conditions climatiques. Sur la base du signal climatique qu'elles comportent, les séries dendroisotopiques ont été utilisées pour reconstituer les variables hydro-climatiques les mieux corrélées aux valeurs isotopiques à l'aide de fonctions de transfert intégrant les deux traceurs ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{13}\text{C}$). Ainsi, les températures, les apports d'eau au système hydrique régional et un indice climatique intégrant les précipitations et les températures des deux derniers siècles ont été reconstituées et confrontés à d'autres séries climatiques indépendantes, mesurées ou reconstituées. Les résultats de cette étude indiquent que les séries dendroisotopiques du carbone et de l'oxygène permettent de reconstituer le climat et les régimes hydriques anciens dans les régions boréales froides.


Mathieu Gingras


Christian Bégin

Remerciements

Je tiens en premier lieu à exprimer toute ma gratitude à M. Christian Bégin ainsi qu'à Mme Martine Savard, respectivement directeur et co-directrice des travaux de recherche qui ont conduit à ce mémoire, pour leurs conseils judicieux, leur appui accordé tout au long de cette étude et pour m'avoir généreusement communiqué leurs connaissances et leur rigueur scientifique. J'aimerais également remercier spécialement Mme Joëlle Marion, professionnelle de recherche à l'Institut National de Recherche Scientifique, pour son aide indispensable, tant au cours de la préparation des échantillons que lors de la compilation et de l'analyse des données. Je suis très reconnaissant envers Anna Smirnoff, technologue au DeltaLab de la Commission géologique du Canada, pour son encadrement lors de la préparation des échantillons et de l'analyse des isotopes stables. Je tiens à souligner la contribution de M. Yves Bégin responsable du projet dans lequel s'inscrit cette maîtrise. J'ai bénéficié de son enthousiasme et de ses connaissances lors de la campagne de terrain en 2005. Je remercie aussi Antoine Nicault, professionnel de recherche au Centre d'études nordiques, pour avoir généreusement communiqué ses connaissances et pour avoir contribué à la campagne de terrain 2004. Enfin, mes remerciements vont à M. Marc Luzincourt, technologue au DeltaLab de la Commission géologique du Canada, pour son soutien moral et son encouragement tout au long du projet. Cette étude a été possible grâce au support financier et technique : d'Hydro-Québec, du consortium Ouranos et du Centre d'études nordiques. Soulignons aussi les l'appuis financiers d'Articnet, de la localité de Radisson, et du Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie (CRSNG) dans le cadre de son programme de recherche et de développement coopératif (Y. Bégin *et al.*). L'étude a également bénéficié d'un financement provenant du programme "Renforcer la résilience face aux changements climatiques" du Secteur des sciences de la terre de Ressources naturelles Canada (C. Bégin *et al.*).

Table des matières

Résumé	ii
Remerciements.....	iii
Introduction générale du mémoire	1
Principes de la dendroisotopie	6
Problématique	9
Objectifs	10
Conclusion générale et perspectives	10
Article	12
Abstract.....	13
Résumé	14
1. Introduction.....	15
2. Région et site d'étude	17
3. Méthodes	19
3.1 Bases théoriques du fractionnement isotopique	19
3.2 Sélection des arbres et échantillonnage	21
3.3 Préparation des échantillons et analyses	22
4. Résultats	26
4.1 Séries dendroisotopiques du carbone.....	27
4.3 Relation entre les séries dendroisotopiques et les données hydroclimatiques.....	31
4.4 Complémentarité et combinaison des rapports isotopiques $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{18}\text{O}$	32
4.5 Reconstitution climatique et hydrologique basée sur une combinaison des rapports isotopiques $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{18}\text{O}$	34
5. Discussion	37
5.1 Rapports isotopiques du bois total et de la cellulose	37
5.2 Sensibilité du rapport $\delta^{18}\text{O}$ aux conditions hydroclimatiques	37
5.4 Variabilité et signification climatique des rapports isotopiques du carbone	40
5.5 Variations des conditions hydroclimatiques reconstituées de 1800 à 2005	45
Conclusion	49
Références bibliographiques	51

Liste des figures

- Figure 1.** Région étudiée montrant le site sélectionné (étoile), de même que les stations météorologiques (losanges). _____ 19
- Figure 2.** Tendence $\delta^{13}\text{C}$ du CO_2 atmosphérique (Feng, 1998). _____ 24
- Figure 3.** A - Relation entre le $\delta^{18}\text{O}$ du bois total (bt) et de la cellulose alpha (cell) chez deux individus (quinze échantillons par arbre (HM-14 en gris; $r=0,87$; HM1-26 en noir; $r=0,97$)). B Relation entre le $\delta^{13}\text{C}$ du bois total et de la cellulose chez deux individus (quinze échantillons par arbres ; HM-14 en noir; $r=0,24$; HM1-26 en gris; $r=0,83$). _____ 27
- Figure 4.** A- Séries individuelles corrigées et indicées des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ (HM1-14, HM1-26, HM1-04, HM1-21, HM1-19 respectivement, de la courbe la plus pâle à la plus foncée). B- Séries individuelles indicées et corrigées des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ des individus HM1-21 (trait fin) et HM1-04 (trait foncé). C- Série moyenne des rapports isotopiques du carbone de tous les individus indicée et corrigée. _____ 28
- Figure 5.** A- Séries individuelles des valeurs $\delta^{18}\text{O}$ indicées (HM1-14, HM1-26, HM1-04, HM1-21, HM1-19 respectivement, de la courbe la plus pâle à la plus foncée). B- Série moyenne des valeurs $\delta^{18}\text{O}$ indicées. 30
- Figure 6.** Série moyenne et standardisée des valeurs $\delta^{13}\text{C}$ des arbres HM1-21 et HM1-04. _____ 32
- Figure 7.** A - Série partielle indicées et corrigées des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ (ligne gris pâle) et série moyenne indicée des valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ (en noir). B- Moyenne de la série $\delta^{13}\text{C}$ partielle, indicées et corrigées, et de la série $\delta^{18}\text{O}$ moyenne indicée. _____ 34
- Figure 8.** A- Indice climatique moyen des mois de juillet et août. B- Températures maximales moyennes standardisées des mois de juin à août. C- Apports moyens standardisés au système hydrique régional des mois de juillet à novembre. Moyenne mobile sur trois ans des valeurs reconstituées à l'aide de fonctions de transfert calculées à partir de la série partielle de $\delta^{13}\text{C}$ et de la série moyenne de $\delta^{18}\text{O}$ (ligne noire); moyenne mobile sur 3 ans des valeurs mesurées (en gris pâle); la marge d'erreur de la reconstitution est illustrée par la ligne pointillée. _____ 36
- Figure 9.** Les valeurs standardisées des températures maximales moyennes de Juin-Juillet-Août reconstituées à l'aide de fonctions de transfert calculées à partir de la série partielle de $\delta^{13}\text{C}$ et de la série $\delta^{18}\text{O}$ moyenne (ligne en noir). La marge d'erreur de la reconstitution est illustrée par la ligne pointillée. Interpolations des températures (écart à la moyenne de la période 1961-90) de juin-juillet-août pour la région (point de grille de $5^\circ \times 5^\circ$) (HadCRUT2v; Jones et Moberg, 2003; ligne en gris). _____ 47

Introduction générale du mémoire

Les changements climatiques et leurs conséquences sur les régimes hydriques sont parmi les enjeux environnementaux majeurs du XXI^e siècle. L'étude approfondie des conditions climatiques et hydrologiques des derniers siècles permet de documenter leur variabilité naturelle réelle et de percevoir, dans une perspective à plus long terme, les tendances récentes mises en évidence par les données instrumentales. Elle permet également de rendre les prévisions climatiques issues des modèles numériques prévisionnels plus réalistes en fournissant une période de calibration beaucoup plus longue. Aussi, en raison d'un cadre de référence plus large, cette connaissance permet de mieux évaluer la part des changements climatiques récents attribuables à l'activité humaine.

Les récents modèles de reconstitution climatique montrent qu'à partir de la fin du XX^e siècle l'hémisphère Nord subit un réchauffement qui semble être sans précédent depuis au moins 2000 ans. Selon les reconstitutions à vaste échelle, le XX^e siècle a subi des changements de températures majeurs soit de 0.6°C à 0.9°C, comparés à $\pm 0.2^\circ\text{C}$ pour les 19 siècles précédents (Jones et Mann, 2004). Ce réchauffement est susceptible d'apporter de nombreuses conséquences sur les environnements physiques et écosystémiques, qui auront, à leur tour, des répercussions sur les populations humaines. Déjà, des impacts sont observés partout dans le monde. Dans le cas du Canada, citons par exemple l'augmentation du niveau de la mer qui affecte les villes maritimes en les exposant davantage aux ondes de tempête causant des inondations importantes et une érosion accélérée des côtes. Dans les régions arctiques, on observe une fonte accélérée de la glace de mer qui affecte les populations d'ours polaires. De plus, la glace étant une surface à fort albédo, sa fonte risque d'amplifier le réchauffement, puisque l'énergie solaire serait absorbée par l'eau plutôt que réfléchi par la surface de glace. Cette glace agit aussi comme une protection contre l'érosion côtière; en son absence, les côtes seraient davantage exposées aux vagues érosives. Aussi, dans l'ouest du pays, les glaciers et les champs de glace, ont diminué significativement en volume au cours du XX^e siècle. Cette fonte pourrait devenir problématique pour les agriculteurs étant donné que les

glaciers constituent la principale source d'eau pour l'irrigation de champs voués à l'agriculture. Enfin, certaines espèces d'animaux et d'insectes augmentent leurs aires de dispersion alors que d'autres espèces doivent migrer ou seront menacées d'extinction. Par ailleurs, la durée de la saison de croissance des végétaux augmente ce qui pourrait être bénéfique pour les agriculteurs mais pourrait, d'un autre côté, provoquer une augmentation du nombre d'insectes ravageurs. Il est aussi possible de constater une diminution des besoins en chauffage et une augmentation de ceux en climatisation (Canada council of Ministers of the Environnement, 2003).

Le Québec septentrional est caractérisé par un réseau hydrographique très bien développé, hérité de la dernière glaciation et qui constitue une réserve d'eau douce unique. Pour cette raison, plus de 80% des centrales hydroélectriques du Québec y ont été construites (Consortium Ouranos, 2007). L'hydroélectricité fournit 94% des besoins énergétiques de la province la rendant ainsi fortement dépendante de la ressource hydraulique. On comprend donc aisément que la tendance à la baisse des niveaux d'eaux des grands réservoirs de cette région depuis les années 1980 préoccupe les producteurs d'hydroélectricité (S.E.B.J., 1987, Bégin, 2000). Cette tendance est inquiétante, elle pourrait s'inscrire dans la foulée des impacts possibles des changements climatiques affectant le nord-est de l'Amérique du Nord (Schindler *et al.*, 1990).

Dans ce contexte, les modèles permettant les prévisions à long terme du régime hydroclimatique revêtent une grande importance. De façon générale, la qualité de ces modèles prévisionnels est directement liée à la qualité et à la quantité de données associées à la période de calibration. Malheureusement la partie nord du Québec compte sur très peu de séries climatiques et hydrologiques. Les quelques séries disponibles ne couvrent généralement que de très courtes périodes, excédant rarement 40 à 50 années. Il apparaît donc important d'allonger les séries de données climatologiques et hydrologiques servant à la calibration des modèles

L'importance d'utiliser de longues séries de référence pour définir adéquatement les ressources en eau a déjà été illustrée dans plusieurs études. Par exemple, aux États-Unis, des problèmes de disponibilité en eau sont survenus au début du XX^e siècle à la suite d'une surestimation des allocations d'eau pour les usagers du bassin de la rivière

Colorado à partir d'une série hydrologique qui, à l'époque, ne couvrait que 30 années de données (fin 1890 au début 1920; Mysak, 1993). En reconstituant les conditions hydrologiques des dernières 400 années en se basant sur les cernes de croissance d'arbres, Stockton et Jacoby (1976) ont montré que la série de données utilisées lors de l'estimation initiale des allocations en eau correspondait en fait à une période d'hydraulicité anormalement élevée, faussant ainsi les modèles prévisionnels (Gleick 1989).

Différents systèmes d'archives naturelles sensibles aux variations climatiques sont utilisés pour reconstituer et caractériser les conditions passées au-delà de la période couverte par les données instrumentales. Les carottes de glace, par exemple, offrent une bonne résolution temporelle (annuelle) et couvrent des périodes qui peuvent être très longues (~5000 ans). La poussière, les bulles d'air et les isotopes de l'hydrogène et de l'oxygène des couches annuelles de glace permettent des reconstitutions climatiques (NOAA Paleoclimatology Program, 2005). Par contre, ce système d'archive naturelle ne présente pas une large distribution géographique car il se limite aux régions polaires et alpines. Les principaux sites de forage se trouvent au Groenland, dans l'archipel arctique canadien, au Tibet, dans les Andes et en Antarctique.

Les spéléothèmes sont davantage répandus et peuvent fournir des reconstitutions couvrant de longues périodes (~5000 ans); ils offrent une résolution temporelle d'environ 100 ans. Le déséquilibre thorium-uranium (Th/U) permet l'estimation d'âges des carbonates. De ces carbonates datés, les rapports isotopiques $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{13}\text{C}$ sont analysés, ils permettent de faire ressortir un signal paléoclimatique correspondant notamment aux précipitations et aux températures (Centre national de la recherche scientifique, 2000).

Les sédiments de lacs, que l'on retrouve dans la plupart des environnements, permettent des reconstitutions couvrant des périodes d'environ 10000 – 1000000 ans et ayant une résolution d'environ 20 ans. Les reconstitutions sont basées sur le développement ontogénétique dans le temps de l'écosystème lacustre en faisant un lien avec le climat (Pagé, 1999).

Les sédiments marins sont également très étudiés; ils couvrent des périodes d'environ 10000000 ans et ont une résolution d'environ 500 ans (NOAA Paleoclimatology Program, 2005). Les sédiments marins sont étudiés en analysant la

composition isotopique de différents taxons et en analysant la succession des faunes et flores fossiles. Les foraminifères, diatomées, dinoflagellés sont des exemples d'organismes analysés dans ces sédiments (Pagé, 1999).

Les coraux ne sont pas très bien répartis géographiquement. Par contre, ils permettent une résolution annuelle et couvrent des périodes d'environ 10000 ans. Ceux-ci construisent leur squelette à partir de carbonate de calcium dont la source est l'eau de mer. Les isotopes de l'oxygène présent dans ces carbonates permettent de déterminer la température de l'eau au moment de la formation du squelette (NOAA Paleoclimatology Program, 2005).

Les reconstitutions climatiques basées sur les pollens permettent de remonter jusqu'à environ 100000 ans dans le passé avec une résolution temporelle d'environ 20 ans dépendamment du milieu, elles sont réalisées à plusieurs endroits sur la planète (National Geophysical Data Center, 2003). Une analyse de l'abondance des différents types de pollen emprisonnés dans les couches sédimentaires permet de déterminer les assemblages d'espèces végétales ayant occupé l'endroit étudié à différentes périodes de temps et ainsi d'en déduire une information climatique (NOAA Paleoclimatology Program, 2005; Pagé, 1999).

Les cernes de croissance des arbres sont parmi les indicateurs paléoclimatiques les plus utilisés en raison du caractère ubiquiste des arbres et de leur résolution temporelle annuelle, sinon saisonnière. À certains endroits du monde, les séries dendrochronologiques couvrent plusieurs milliers d'années. Par exemple, en Europe, certaines séries provenant de chênes excèdent les 8000 ans. La réalisation de ces séries est rendue possible par l'interdatation de chronologies d'arbres morts bien conservés avec des chronologies d'arbres vivants (McCarroll et Loader 2004).

La dendroisotopie est une application récente de la dendrochronologie; elle combine la géochimie isotopique et la dendrochronologie classique. Chaque cerne de croissance d'un arbre peut être comparé à un capteur des conditions qui prévalaient lors de sa formation étant donné que les conditions de l'environnement de l'arbre ont des répercussions sur ses caractéristiques physiques et chimiques. Le rapport isotopique de certains éléments, notamment l'oxygène, le carbone et l'hydrogène varient en fonction

des conditions climatiques et environnementales et permettent donc la réalisation de reconstitutions à résolution annuelle. Les isotopes environnementaux tel que ceux de l'hydrogène, du carbone et de l'oxygène, sont également utilisés pour le suivi temporel des changements de qualité de l'air (Savard *et al.*, 2004 et 2005).

Les variations isotopiques dans les cernes de croissance des arbres ont l'avantage d'être contrôlées par des mécanismes physiologiques relativement bien connus et simples comparativement aux indicateurs dendrochronologiques classiques qui reposent sur la croissance cambiale. En effet, la croissance des cernes peut être influencée par un nombre considérable de facteurs tel que la compétition, le régime nutritif, le climat, la maladie, la défoliation, l'âge, les dommages causés par des agents externes tel que le vent et les animaux, etc., rendant ainsi leur interprétation difficile. L'approche dendroisotopique présente cependant le désavantage d'être laborieuse exigeant un temps considérable d'analyse pour chaque arbre à caractériser. Toutefois, puisque que les rapports isotopiques sont moins brouillés par des facteurs externes, la dendroisotopie demande en général un nombre moins élevé d'arbres que la dendrochronologie classique pour reconstituer des séries climatiques.

Les isotopes stables du carbone et de l'oxygène dans les cernes de croissance annuels des arbres sont de plus en plus utilisés comme indicateurs des conditions climatiques en raison de l'influence du climat sur le fractionnement de ces isotopes avant et au moment de leur assimilation par l'arbre. En effet, plusieurs études ont déjà démontré que les rapports des isotopes stables du carbone $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ($\delta^{13}\text{C}$) ainsi que ceux de l'oxygène $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ($\delta^{18}\text{O}$) présents dans les cernes de croissance des arbres sont dépendants du climat et offrent la possibilité de produire des reconstitutions à haute résolution temporelle (Lipp *et al.*, 1991; Waterhouse *et al.*, 2000; Barbour *et al.*, 2002; McCarroll et Loader, 2004; Raffalli-Delcerce *et al.*, 2004).

La dendroisotopie nous est donc apparue une approche pertinente pour améliorer la connaissance du paléoclimat dans le secteur des grands réservoirs hydroélectriques du moyen nord québécois. De plus, puisque le climat et l'hydrologie sont étroitement liés (Waterhouse *et al.*, 2000), l'application de la méthode dendroisotopique dans le domaine de la gestion de l'eau revêt une grande importance et semble prometteuse.

Principes de la dendroisotopie

La rythmicité de la croissance des arbres en régions tempérées et tempérées-froides leur permet de former annuellement des cernes de croissance, chaque cerne correspondant à une saison de croissance cambiale dont la durée varie d'une région à l'autre en fonction du climat. La photosynthèse est le processus qui permet à l'arbre de générer les hydrates de carbone nécessaires à l'édification de sa structure. Au cours de ce processus complexe, l'arbre fera principalement usage de dioxyde de carbone, d'eau et du rayonnement solaire pour fabriquer les photosynthats (Kozlowski et Pallardy, 1997). L'eau utilisée par l'arbre provient des précipitations; elle est prélevée à partir des sols par le système racinaire de l'arbre et acheminée vers ses feuilles où s'opère la photosynthèse. Cette conduction est contrôlée par la différence de potentiel hydrique entre les systèmes sol, plante et atmosphère, ce processus interactif est nommé continuum sol-plante-atmosphère (Kozlowski et Pallardy, 1997). Une portion de l'eau puisée par l'arbre est utilisée au cours de la photosynthèse alors qu'une autre portion est retournée à l'atmosphère par l'évapotranspiration (Kozlowski et Pallardy, 1997).

Les échanges gazeux entre l'arbre et l'atmosphère s'opèrent par l'entremise de structures anatomiques ponctuant l'épiderme des feuilles, les stomates. C'est par ces structures que le CO₂ atmosphérique nécessaire à la photosynthèse s'introduit dans l'arbre. Les molécules d'eau (H₂O) passent aussi par ces ouvertures et sont partiellement évacuées sous forme de vapeur. Un important déficit en eau peut être fatal aux arbres. C'est pourquoi, afin de contrôler les pertes en eau, les arbres sont pourvus de cellules nommées « cellules de garde » qui se situent en bordure des stomates et qui en contrôlent l'ouverture. Ces cellules de garde s'ouvrent et se ferment selon la quantité d'eau disponible pour l'arbre, influençant ainsi les échanges gazeux (H₂O, CO₂ et autres; Kozlowski et Pallardy, 1997).

Le fractionnement des isotopes stables du carbone

Par convention, le rapport $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ est exprimé en notation 'delta' ($\delta^{13}\text{C}$). La valeur isotopique est établie à l'aide d'une référence pour laquelle le rapport isotopique est

connu et est souvent exprimée en ‰ (Barbour et *al.*, 2002). Dans le cas du carbone, la référence est le *Vienna Pee-Dee Belemnite* (VPDB). L'équation utilisée est la suivante :

$$\delta = (R_s / R_r - 1) \quad (\text{Équ. 1})$$

Où R_s et R_r sont respectivement les rapports isotopiques de l'échantillon et de la référence.

Le rapport $\delta^{13}\text{C}$ du CO_2 atmosphérique atteint actuellement une valeur de -7.99 ‰. Les feuilles et le bois des arbres (végétaux de type C3) ont des valeurs beaucoup plus basses, soit de -20 à -30 ‰. Cette chute du rapport $\delta^{13}\text{C}$ reflète une discrimination négative envers le ^{13}C faite par l'arbre (McCarroll et Loader, 2004).

Effectivement, le rapport $\delta^{13}\text{C}$ des cernes de croissance est déterminé au départ par le rapport $\delta^{13}\text{C}$ du CO_2 l'atmosphérique, ainsi que par une discrimination négative envers l'isotope le plus lourd, le ^{13}C .

Le rapport $\delta^{13}\text{C}$ des arbres est défini par l'équation :

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{plant}} = \delta^{13}\text{C}_{\text{atm}} - a + (b - a) (c_i / c_a) \quad (\text{Équ. 2})$$

Où a est la discrimination négative envers le ^{13}C lors de la diffusion (-4.4 ‰), b est la discrimination négative envers le ^{13}C associée à la carboxylation (-27 ‰) et où c_i et c_a sont respectivement la concentration intercellulaire en CO_2 et la concentration de l'air ambiant en CO_2 (Farquhar et *al.*, 1989).

De cette équation, qui s'applique aux premiers produits de la photosynthèse des plantes C3, découle l'équation du rapport $\delta^{13}\text{C}$ de la cellulose des arbres :

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{cell}} = \delta^{13}\text{C}_{\text{plant}} + \delta_{\text{c-p}} \quad (\text{Équ. 3})$$

où $\delta_{\text{c-p}}$ est la différence entre le $\delta^{13}\text{C}_{\text{cell}}$ et $\delta^{13}\text{C}_{\text{plant}}$, $\delta_{\text{c-p}}$ varie entre 1 et 3‰ dépendant de l'espèce et de la technique d'extraction de la cellulose (Wilson et Grinstead., 1977; Marion et *al.*, 2001). Les variations du rapport $\delta^{13}\text{C}$ sont principalement

influencées par le ratio c_i/c_a (Saurer *et al.*, 1995; Leavitt et Long, 1998; Treydte *et al.*, 2001; McCarroll et Loader, 2004). Par exemple, une faible conduction stomatale, provoquée par la fermeture partielle des stomates (ex. : lorsque l'environnement de l'arbre est plus sec), par rapport à un taux élevé de photosynthèse, entraîne une chute de la concentration de CO₂ interne. Cette chute entraîne à son tour une diminution de la discrimination négative envers le ¹³C, ce qui fera finalement augmenter la valeur $\delta^{13}\text{C}$ (McCarroll et Loader, 2004). Donc, la signature isotopique du carbone dans le bois est reliée directement au fonctionnement des stomates qui réagissent en grande partie aux conditions d'humidité entourant l'arbre. Les valeurs $\delta^{13}\text{C}$ des cernes de croissance devraient ainsi entre autres traduire les conditions d'humidité entourant l'arbre au moment de la formation du bois.

Le fractionnement des isotopes stables de l'oxygène

Comme pour le carbone, le rapport $\delta^{18}\text{O}$ est obtenu à partir de l'équation 1. Une référence internationale souvent utilisée est le *Vienna Standard Mean Ocean Water* (VSMOW). Le rapport $\delta^{18}\text{O}$ de la cellulose est défini par l'équation :

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{cell}} = \delta^{18}\text{O}_s + f[\varepsilon_k + \varepsilon_e + (\delta^{18}\text{O}_v - \delta^{18}\text{O}_s - \varepsilon_k) e_i/e_a] + \varepsilon_c \quad (\text{Équ. 4})$$

où $\delta^{18}\text{O}_{\text{cell}}$ est le $\delta^{18}\text{O}$ de la cellulose, $\delta^{18}\text{O}_s$ est la composition isotopique de l'eau du sol (source de l'eau), f ($0 < f < 1$) est l'effet tampon causé par l'hétérogénéité de l'eau de la feuille et l'échange d'atomes d'oxygène du sucrose avec l'eau du xylème, ε_e est le fractionnement provoqué par le changement de phases, liquide à vapeur, ε_k est le fractionnement cinétique provoqué par la diffusion de la vapeur dans une atmosphère non saturée, $\delta^{18}\text{O}_v$ est la composition isotopique de la vapeur d'eau de l'air, e_a et e_i sont respectivement la pression de vapeur atmosphérique et intercellulaire, ε_c correspond au fractionnement biochimique qui s'opère dans la tige (Saurer *et al.*, 1997). Il faut comprendre que les cernes de croissance des arbres auront une variation de leurs rapports isotopiques de l'oxygène qui dépendra surtout des conditions atmosphériques causant l'évapotranspiration ainsi que des températures ambiantes au moment de la formation des

précipitations modifiant subséquemment le rapport isotopique de l'eau du sol (McCarroll et Loader, 2004). Ce dernier phénomène est principalement associé au processus Reyleigh lors de la distillation des masses nuageuses (Clark et Fritz, 1997; Leuenberger et *al.*, 1998). Les autres causes de changements isotopiques liées au fractionnement biochimique seraient plus ou moins constantes (Leuenberger et *al.*, 1998). L'assimilation de l'eau par les racines n'aurait que très peu d'influence sur le fractionnement isotopique (Wershaw et *al.*, 1966).

Problématique

Les solutions aux enjeux reliés à la disponibilité de l'eau constituent des défis de taille pour la société qui doit s'adapter au changement climatique. Au Québec par exemple, plus de 3,5 millions de foyers dépendent directement d'Hydro-Québec (HQ) pour leur alimentation en électricité; or 93% de la production énergétique d'Hydro-Québec est d'origine hydroélectrique et près de la moitié de cette énergie provient du bassin hydrographique de la Grande Rivière, dans le moyen-nord. On comprend aisément que la pérennité de ces installations ainsi que la gestion adéquate des apports en eau dans les réservoirs soient des préoccupations centrales non seulement chez Hydro-Québec mais aussi pour toute la société qui en dépend. Ces préoccupations deviennent particulièrement importantes en raison du bas niveau des réservoirs observé au cours des dernières décennies et du changement climatique anticipé qui risque de modifier le régime de précipitations des régions nordiques. La société d'état (HQ) peut s'appuyer sur des modèles hydrologiques pour prévoir les tendances futures des régimes hydriques. Cependant, ces modèles ne peuvent tenir compte que des tendances climatiques récentes fournies par les enregistrements météorologiques pour en assurer la calibration. Dans la région de la Grande Rivière, par exemple, les enregistrements climatiques ne couvrent généralement pas plus que les 40 dernières années. La prédiction et la modélisation adéquates des apports en eau dans le secteur doivent donc pouvoir bénéficier d'un meilleur recul historique, basé sur une connaissance approfondie des cycles hydriques anciens, fourni par des indicateurs naturels sensibles au climat, pour en assurer le réalisme.

La présente recherche est basée sur l'utilisation des rapports isotopiques du carbone et de l'oxygène des cernes de croissance des arbres pour reconstituer l'évolution à long terme du régime hydroclimatique dans un secteur où la prévision des apports en eau devient un enjeu socio-économique majeur.

Objectifs

L'objectif premier de cette recherche est de produire des séries dendroisotopiques représentatives du secteur amont du bassin de la Grande Rivière et de les utiliser pour reconstituer les variations hydroclimatiques des deux derniers siècles dans la perspective d'une meilleure calibration des modèles hydrologiques prévisionnels. Ainsi, nous nous efforcerons de répondre aux questions suivantes :

1. Quel est le potentiel réel des valeurs isotopiques du carbone et de l'oxygène des cernes de croissance de l'épinette noire pour reconstituer l'historique des conditions hydroclimatiques dans les régions boréales?

2. Quelle sont les variations naturelles à long terme des régimes hydriques et des variables climatiques à la tête du bassin de la Grande Rivière?

Conclusion générale et perspectives

Les études dendroisotopiques réalisées dans les régions nordiques comportent un certain nombre de contraintes. Des contraintes d'abord financières en raison des coûts reliés à la logistique en région éloignée, et des contraintes de temps associées directement aux analyses isotopiques en laboratoire. En effet, plusieurs aspects techniques, reliés surtout à la préparation des échantillons, comme la séparation manuelle des cernes souvent très étroits en régions froides, rendent l'ensemble du travail assez fastidieux. Cependant, l'application plus généralisée de l'approche dendroisotopique ainsi que le développement technologique accéléreront et allègeront plusieurs étapes en laboratoire au cours des prochaines années.

Cette étude a montré que les résultats dendroisotopiques du carbone et de l'oxygène chez l'épinette noire de la Jamésie offrent un potentiel certain pour la reconstitution du paléoclimat et ce, particulièrement en ce qui concerne les températures estivales. Elles permettent également de poser un regard historique sur les conditions hydrologiques. Effectivement, des liens statistiques significatifs ont été observés entre les valeurs isotopiques et les paramètres reflétant les conditions hydriques régionales. Les séries $\delta^{13}\text{C}$ montrent une plus grande variabilité interindividuelle que celles du rapport $\delta^{18}\text{O}$, ce qui suggère une plus grande influence des conditions de micro-sites sur les isotopes du carbone. Il existe une plus faible relation entre les rapports isotopiques et le régime des précipitations comparativement à celles entre les rapports isotopiques et les autres variables climatiques. Cette constatation est probablement attribuable à la variabilité géographique des précipitations et aux conditions de drainage du site, considéré comme mésique. Puisque l'apport en eau des rivières et des réservoirs dépend tout d'abord des précipitations, la faible relation isotopes-précipitations influence certainement la relation entre les valeurs isotopiques et ceux d'apports d'eau au système hydrique régional. Nous pensons que l'analyse d'un plus grand nombre de sites sur le territoire aurait augmenté la représentativité régionale des valeurs isotopiques ainsi que leur lien avec le régime de précipitation.

Les séries isotopiques du site du Lac Hurault ont permis de reconstituer de façon valable les conditions hydroclimatiques estivales et printanières des deux derniers siècles et ce, en combinant les valeurs $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{18}\text{O}$. En effet, leur combinaison permet de réduire la portion de la réponse isotopique non reliée au climat de la région et ainsi d'accroître la signification climatique des dendroisotopes. Les séries reconstituées ont montré que les conditions des deux derniers siècles auraient été très contrastées, tant du point de vue des températures que de l'humidité. Parmi les faits les plus marquants, mentionnons les conditions estivales particulièrement froides et humides de la première moitié du XIX^e siècle et le changement rapide vers des conditions plus chaudes et plus sèches à partir du début de la décennie 1930. Enfin, soulignons que la trame climatique des derniers siècles, dégagée à partir des séries isotopiques, a été corroborée à l'aide de séries indépendantes, instrumentales ou reconstituées, disponibles pour la région.

Article

Utilisation des isotopes stables du carbone et de l'oxygène comme indicateurs climatiques et hydrologiques dans le moyen nord du Québec, Canada

Mathieu Gingras^{a1}, Christian Bégin^b, Martine M. Savard^b, Joëlle Marion^a & Anna Smirnoff^b

a Institut National de la recherche scientifique 490 de la Couronne, Québec, G1K 9A9, Canada

b Natural Resources Canada, Geological Survey of Canada, 490 de la Couronne, Québec, G1K 9A9, Canada

Abstract

Understanding climate and its feedback on water resources constitutes a priority issue of the 21st century for specific regions of the planet. In particular, 94 % of energy consumed in Québec province comes from hydroelectricity and 80% of Quebec hydroelectric plants are established above the 49 parallel in northern Quebec. Then this energy production is subjected to major water supply changes. It is therefore important to reconstruct the past climate variations in this region to assist modelling of future reservoir levels and help decision making relative to hydroelectric supply. Because climatic records for Northern Quebec are particularly scarce and of short duration. Annual growth rings of trees are potentially useful to prolong the available series. Indeed trees are sensitive to environmental conditions as expressed in their chemical growth-ring properties. In this study we use the stable isotopes of oxygen ($\delta^{18}\text{O}$) and carbon ($\delta^{13}\text{C}$) from growth rings sampled at the head of the hydroelectric La Grande complex in the James Bay area. The $\delta^{13}\text{C}$ values show significant correlations (Pearson $p < 0.01$) with the maximum temperature of July-August ($r = 0.60$), mean water supply from July to November ($r = -0.58$) and mean vapour pressure deficit from July to September ($r = 0.64$). The $\delta^{18}\text{O}$ values show significant correlations with mean precipitation from June to August ($r = -0.48$), mean water supply of July to November ($r = -0.54$), mean maximum temperature of June to August ($r = 0.62$) and mean vapour pressure deficit from June to August ($r = 0.65$). Furthermore the $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values show strong statistical links with a climate index reflecting both precipitation and temperature of July-August and June-July ($r = -0.55$ and -0.58) respectively. These results suggest that C and O dendroisotopic series can help reconstruct past climatic conditions, including hydric regimes through the development of transfer function.

¹ Corresponding author (E-mail : Mathieu_GINGRAS@ete.inrs.ca)

Résumé

La compréhension du climat et de ses impacts sur les ressources en eaux constitue un sujet prioritaire du XXI^e siècle pour certaines régions spécifiques de la planète. Par exemple 94 % de l'énergie produite au Québec est d'origine hydro-électrique. De plus, l'hydro-électricité produite au nord du 49^{ième} parallèle du Québec fournit environ 80% de l'électricité consommée. Comme les réservoirs qui y sont en production sont assujettis à des fluctuations d'apport en eau, il est important de connaître les variations passées du climat de cette région pour pouvoir modéliser les futurs niveaux d'eau des réservoirs et permettre une meilleure gestion de ces derniers. Les enregistrements climatiques pour le nord du Québec sont relativement rares et ne couvrent que de courtes périodes de temps. Pour prolonger les séries de données climatiques disponibles, il est nécessaire d'avoir recours à des archives naturelles sensibles aux conditions climatiques, tel que les cernes de croissance des arbres. En effet, les arbres sont sensibles aux conditions climatiques de leur environnement et cette sensibilité s'exprime entre autre dans les propriétés isotopiques de leurs cernes de croissance. Dans cette étude, nous utilisons les isotopes stables de l'oxygène ($\delta^{18}\text{O}$) et du carbone ($\delta^{13}\text{C}$) des cernes de croissance de tiges échantillonnées à la tête du complexe hydroélectrique La Grande, en Jamésie. Les résultats isotopiques ont été comparés aux données climatiques mesurées durant la période 1944-2003. Les valeurs $\delta^{13}\text{C}$ montrent des corrélations significatives avec les températures maximales moyennes de juillet à août ($r=0,6$), les apports d'eau moyen au système hydrique régional de juillet à novembre ($-0,58$), et le déficit de pression de vapeur diurne moyen de juillet à septembre ($0,64$). Les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ montrent des corrélations significatives avec les précipitations moyennes de juin à août ($-0,48$), les apports d'eau moyen au système hydrique régional de juillet à novembre ($r= -0,62$), les températures maximales moyennes de juin à août ($r=0,62$) et le déficit de pression de vapeur diurne de juin à août ($r=0,65$). De plus, les rapports $\delta^{18}\text{O}$ et le $\delta^{13}\text{C}$ montrent des corrélations significatives avec un indice climatique, qui reflète à la fois les températures et les précipitations respectivement de juillet à août et juin à août ($r= -0,55$ et $-0,58$). Des fonctions de transfert intégrant les deux traceurs isotopiques ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{13}\text{C}$) ont été réalisées. Cet exercice montre que la combinaison des deux traceurs augmente la capacité de reconstitution par rapport à l'utilisation des isotopes utilisés séparément.

1. Introduction

Les changements climatiques, et particulièrement les modifications futures du régime hydrique, sont parmi les enjeux majeurs du XXI^e siècle. Une connaissance approfondie des régimes climatiques et hydrologiques passés apporte une meilleure compréhension de leur variabilité naturelle et permet une meilleure prévision de leur évolution future. Elle permet également d'évaluer la part des changements climatiques récents attribuables à l'activité humaine.

Compte tenu du fait que les mesures instrumentales sont relativement récentes, différents systèmes d'archive naturelle sensibles aux variations climatiques sont utilisés pour reconstituer les conditions climatiques avant la période couverte par les mesures instrumentales. Parmi les systèmes d'archive les plus utilisés, citons les carottes de glace, les dépôts tourbeux, les spéléothèmes, les roches stratifiées, les sédiments océaniques et lacustres et les microfossiles qu'ils contiennent, les coraux, et les séries de cernes de croissance d'arbre. Ces archives naturelles révèlent des informations différentes, parfois complémentaires, mais comportent souvent des limites liées à l'étendue de leur distribution spatiale ou à leur résolution temporelle relativement faible. Les cernes de croissance des arbres sont parmi les plus utilisés de ces indicateurs car ils ont une résolution temporelle annuelle ou saisonnière et sont largement distribués sur tous les continents.

Parmi la gamme d'indicateurs dendrochronologiques, les variations isotopiques dans les cernes de croissances des arbres ont l'avantage d'être contrôlées par des mécanismes physiologiques relativement bien connus et simples, comparativement aux paramètres de croissance plus fréquemment utilisés qui reposent sur la croissance cambiale comme indicateur des conditions climatiques (McCarroll et Loader, 2004). En effet, la croissance des cernes peut être influencée par un nombre considérable de facteurs, tel que la compétition, la disponibilité en nutriments, les conditions climatiques, les maladies, les épidémies d'insecte, l'âge, les dommages causés par des agents externes tels que les vents et les animaux, etc. De son côté, l'approche dendroisotopique a le désavantage de demander plus de temps d'analyse pour chaque arbre étudié en comparaison avec les analyses dendrochronologiques classiques. Toutefois, la

dendroisotopie nécessite un nombre moins élevé d'arbres que la dendrochronologie classique pour arriver à des résultats satisfaisants. Cela est attribuable au fait que le signal climatique, présent dans les rapports isotopiques comporte moins de bruits de fond reliés à l'influence possible de facteurs externe, non climatiques.

Les isotopes stables du carbone et de l'oxygène des cernes de croissance annuels des arbres sont de plus en plus utilisés pour retracer les variations passées des conditions climatiques. Ceci s'explique par leur grande sensibilité reliée à l'influence directe du climat sur le fractionnement isotopique avant et au moment de leur assimilation par l'arbre. En effet, plusieurs travaux suggèrent que les rapports des isotopes stables du carbone ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, noté $\delta^{13}\text{C}$) ainsi que ceux de l'oxygène ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, noté $\delta^{18}\text{O}$) des cernes de croissance des arbres sont influencés par le climat et qu'ils offrent la possibilité de reconstituer, à haute résolution temporelle, les conditions climatiques passées (Barbour et *al.*, 2002., McCarroll et Loader, 2004, Waterhouse et *al.*, 2000, Lipp et *al.*, 1991, Raffalli-Delerce et *al.*, 2004)

Le Québec septentrional est caractérisé par un réseau hydrographique très bien développé, hérité de la dernière glaciation, qui constitue une réserve d'eau douce unique. Pour cette raison, plus de 80% des centrales hydroélectriques du Québec y ont été construites (Consortium Ouranos, 2007). L'hydroélectricité fournit 94% des besoins énergétiques de la Province. Le Québec est donc fortement dépendant de la ressource hydraulique. Or, depuis la décennie 1980, une tendance à la baisse des niveaux d'eaux des grands réservoirs du Nord québécois préoccupe les producteurs d'hydroélectricité (Bégin, 2000). La connaissance des régimes hydro-climatiques de cette vaste partie du territoire québécois repose sur un nombre restreint de stations météorologiques et hydrologiques. De plus, les périodes couvertes par les données instrumentales sont généralement très courtes, offrant une période de calibration trop limités (environ 40 à 50 ans selon la variable hydrologique ou climatique) pour les modèles de prévision. Il est donc important d'allonger les séries de données climatiques et hydrologiques afin de mieux comprendre les variations naturelles de l'hydrologie et de la climatologie régionale et d'optimiser la calibration des modèles hydroclimatiques, permettant la prévision des futures tendances. Dans ce contexte, la dendroisotopie nous apparaît comme une approche pertinente pour reconstituer le climat du Québec septentrional. De plus, comme le climat et l'hydrologie sont étroitement liés

(Waterhouse *et al.*, 2000), l'application de la dendroisotopie au domaine de la gestion de l'eau revêt une grande importance, et semble prometteuse. Très peu d'études dendroisotopiques axées sur le climat et l'hydrologie ont été réalisées avec l'épinette noire. De plus, elles ont rarement été appliquées dans un contexte environnemental nordique nord américain. La présente étude a donc pour objectif d'évaluer: (1) la sensibilité des isotopes du carbone et de l'oxygène des cernes de croissance de l'épinette noire aux différentes variables climatiques et hydrologiques dans un contexte nordique (température, déficit de pression de vapeur, précipitation, apports d'eau au système hydrique régional), et (2) Quelle sont les variations naturelles à long terme des régimes hydriques et des variables climatiques à la tête du bassin de la Grande Rivière?

D'un point de vue méthodologique, l'étude permettra également de vérifier s'il est nécessaire d'extraire la cellulose des sous-échantillons de bois ou s'il est simplement possible d'analyser les rapports isotopiques du bois total.

2. Région et site d'étude

La région étudiée fait partie du grand bassin hydrographique de La Grande Rivière situé sur la côte est de la Baie James, dans le moyen nord Québécois (Canada). Le bassin versant de La Grande rivière couvre environ 177 000 km², soit environ 12 % de la superficie du Québec. Le complexe hydroélectrique de La Grande Rivière aménagé à la fin des années 1970 est le plus productif du Québec. Sa production annuelle actuelle s'élève à environ 78,3 milliards de kWh, soit environ 50 % de l'électricité totale produite par Hydro-Québec (Société d'énergie de la Baie de James, 2006).

La région fait partie du bouclier précambrien constitué de roches granitiques et gneissiques; le relief est constitué de plateaux de faibles altitudes \approx 200- 400masl. Les formes de terrain dominantes sont héritées de la dernière glaciation; elles correspondent à des drumlins et des collines de roches recouvertes par une couche de till d'ablation (Payette *et al.*, 1989). La région est composée d'un nombre très élevé de lacs (entre 10 et 20% de la superficie du territoire) (Dyke *et al.*, 1989) et de terres humides. Le secteur ouest de la région est recouvert de dépôts fins provenant des lacs post-glaciaires Barlow

et Ojibway, ainsi que de la mer de Tyrrell qui a submergé les terres en dépression isostatique suite au retrait de l'inlandsis laurentien vers 6300 BP (Vincent, 1989). La région se situe dans la partie Nord du biome de la forêt boréale occupé en majeure partie par le domaine de la pessière à lichens (ministère des ressources naturelles du Québec, 2003) et de la pessière à mousses dans les milieux moins bien drainés (Payette, 1989), l'espèce d'arbre dominante est l'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) BSP).

Le climat de la région est de type subarctique (Gouvernement du Québec, 2006) pour lequel un réseau de sept stations météorologiques gérées par Environnement Canada constitue le registre (Environnement Canada, 2005). À l'échelle régionale, la température moyenne annuelle est d'environ -4°C alors que les précipitations annuelles moyennes sont d'environ 800mm. Les précipitations sont distribuées inégalement au sein du territoire comparativement aux températures qui sont plus homogènes.

Le site d'étude est localisé à la bordure nord du lac Hurault (54°15'00" N, 70° 46'12"O, Figure 1), à ~460km à l'est de Radisson et à ~180km au sud-ouest de la centrale LG4, dans le secteur amont du complexe hydroélectrique La Grande, soit à proximité du réservoir de tête du complexe (Caniapiscau), qui couvre une superficie de 4318km² (Hydro-Québec, 2006). Il occupe le versant ouest d'une colline recouverte d'un placage de till relativement bien drainé dans lequel un brunisol s'est développé. Les zones de till sont disposées inégalement sur le terrain rendant les conditions édaphiques plutôt hétérogènes. Ce dépôt est colonisé par une vieille pessière noire à lichen qui, de par sa position avancée sur le lac, a été probablement épargnée par les feux de forêt depuis plusieurs siècles.

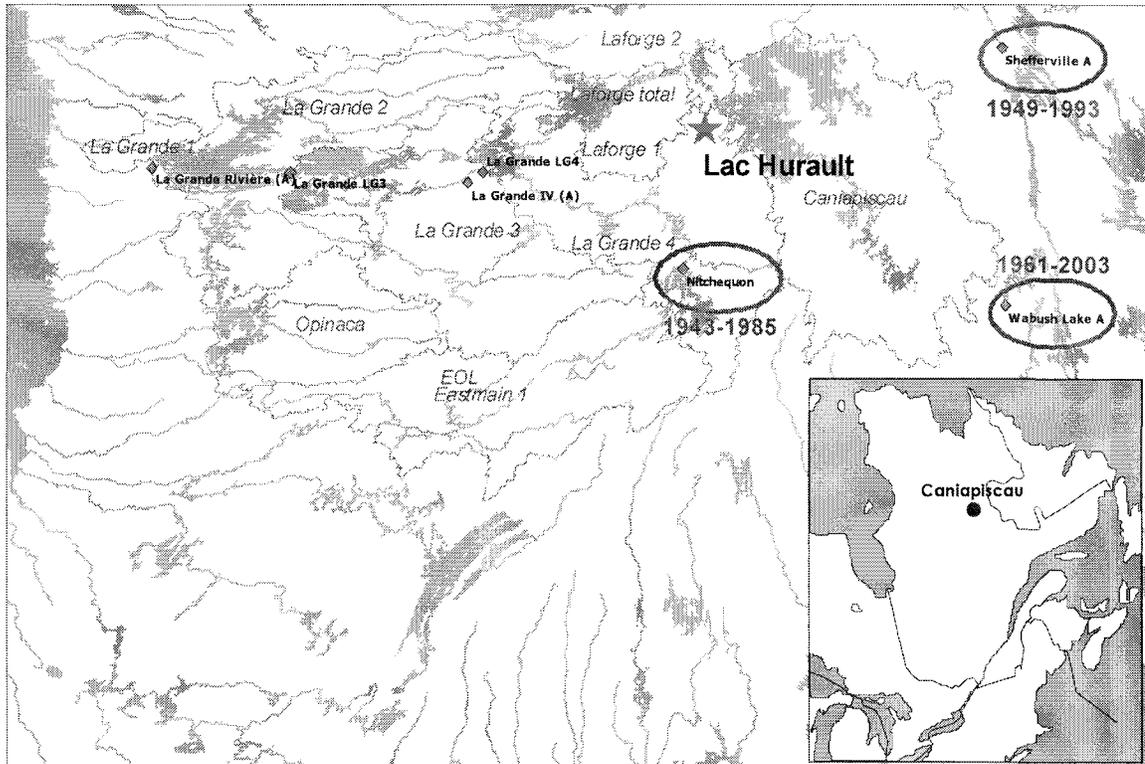


Figure 1. Région étudiée montrant le site sélectionné (étoile), de même que les stations météorologiques (losanges).

3. Méthodes

3.1 Bases théoriques du fractionnement isotopique

Le fractionnement des isotopes stables du carbone

Le rapport $\delta^{13}\text{C}$ des plantes en C3 est défini par l'équation ci-dessous :

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{plant}} = \delta^{13}\text{C}_{\text{atm}} - a + (b - a) (c_i/c_a) \quad (\text{Équ. 1})$$

où a est la discrimination négative envers le ^{13}C lors de la diffusion (-4.4‰), b est la discrimination négative envers le ^{13}C associée à la carboxylation (-27‰) et où c_i et c_a sont respectivement la concentration intercellulaire en CO_2 et la concentration en CO_2 de l'air ambiant (Farquhar et al., 1989). De cette équation, qui s'applique aux premiers produits de la photosynthèse, dérive l'équation du rapport $\delta^{13}\text{C}$ de la cellulose des arbres :

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{cell}} = \delta^{13}\text{C}_{\text{feuille}} + \Delta_{\text{c-p}} \quad (\text{Équ. 2})$$

où Δ_{c-p} est la différence entre les rapports de la cellulose et de la feuille. Cette différence varie entre 1-3 ‰, dépendamment de l'espèce et de la technique d'extraction de la cellulose utilisée (Wilson et Grinsted., 1977., Marion *et al.*, 2001). Les variations de $\delta^{13}\text{C}$ sont principalement influencées par le ratio c_i/c_a (McCarroll et Loader, 2004, Leavitt et Long, 1988, Saurer *et al.*, 1995, Treydte *et al.*, 2001). Par exemple, une faible conduction stomatale provoquée par la fermeture partielle des stomates (ex. : lorsque l'environnement de l'arbre est plus sec) par rapport à un taux élevé de photosynthèse, entraîne une chute de la concentration de CO_2 interne. Cette chute entraîne à son tour une diminution de la discrimination négative envers le ^{13}C , faisant finalement augmenter la valeur du $\delta^{13}\text{C}$ (McCarroll et Loader, 2004). La valeur isotopique du carbone dans le bois est donc reliée directement au fonctionnement des stomates qui réagissent en grande partie aux conditions d'humidité entourant l'arbre. Les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ des cernes de croissance devraient ainsi traduire les conditions d'humidité entourant l'arbre au moment de la formation du bois.

Le fractionnement des isotopes stables de l'oxygène

Le rapport $\delta^{18}\text{O}$ de la cellulose est défini par l'équation :

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{cell}} = \delta^{18}\text{O}_s + f[\varepsilon_k + \varepsilon_e + (\delta^{18}\text{O}_v - \delta^{18}\text{O}_s - \varepsilon_k) e_i/e_a] + \varepsilon_c \quad (\text{Équ. 3})$$

où $\delta^{18}\text{O}_{\text{cell}}$ est le $\delta^{18}\text{O}$ de la cellulose, $\delta^{18}\text{O}_s$ est la valeur isotopique de l'eau source, f ($0 < f < 1$) est l'effet tampon causé par l'hétérogénéité de l'eau de la feuille et l'échange d'atomes d'oxygène du sucrose avec l'eau du xylème, ε_e est le fractionnement provoqué par le changement de la phase liquide à la vapeur, ε_k est le fractionnement cinétique provoqué par la diffusion de la vapeur dans une atmosphère non saturée, $\delta^{18}\text{O}_v$ est la valeur isotopique de la vapeur d'eau de l'air, et où e_a et e_i sont respectivement la pression de vapeur atmosphérique et intercellulaire. Enfin, ε_c correspond au fractionnement biochimique qui s'opère dans la tige (Saurer *et al.*, 1997. a). Il faut comprendre que les cernes de croissance des arbres auront une variation de leurs rapports isotopiques de l'oxygène qui dépendra surtout des conditions atmosphériques causant

l'évapotranspiration ainsi que des températures ambiantes au moment des précipitations modifiant le rapport isotopique de l'eau source (McCarroll et Loader, 2004). Ce dernier phénomène est relié au processus Reyleigh lors de la distillation des masses nuageuses (Clark et Fritz, 1997; Leuenberger et *al.*, 1998). Les autres causes de changements isotopiques liées à la biosynthèse seraient plutôt constantes (Leuenberger et *al.*, 1998). L'assimilation de l'eau par les racines par ailleurs ne provoquerait pas de fractionnement (Wershaw et *al.*, 1966).

3.2 Sélection des arbres et échantillonnage

L'échantillonnage a été réalisé au cours de l'été 2004. Au total, seize épinettes noires ont été échantillonnées. Dans le but de minimiser les risques d'obtenir un signal de source non climatique pouvant être lié par exemple à un effet de canopée ou à la physiologie même de l'arbre, les spécimens échantillonnés sont tous adultes, dominants dans la formation, et ne présentant pas d'anomalie de croissance. Aussi, les arbres étaient situés sur un sol relativement bien drainé. Par conséquent, l'eau, qui est nécessaire à la photosynthèse et à la survie des arbres, devrait constituer un facteur limitant pour ces arbres. Les rapports dendroisotopiques devraient donc être sensibles aux fluctuations hydriques (voir équation 1 et 4). Les sites particulièrement secs n'ont pu être échantillonnés pour deux raisons. Premièrement, ces sites font régulièrement face à des feux de forêt, ainsi les arbres présents à ces endroits sont généralement trop jeunes. Deuxièmement, lorsqu'il est possible d'y trouver des arbres assez âgés, leurs cernes de croissance sont beaucoup trop étroits pour être découpés à résolution annuelle ou biennale. Ceci est dû à la combinaison des facteurs limitant : température et eau qui limitent fortement la croissance.

Une fois les arbres sélectionnés, deux sections transversales ont été prélevées sur chaque arbre à une hauteur d'environ un mètre par rapport au sol. La première servira aux analyses dendrochronologiques et agira comme échantillon de référence, alors que l'autre sera dédiée aux analyses isotopiques. Parmi les arbres échantillonnés, cinq ont été sélectionnés pour les analyses isotopiques. Puisque les conditions entourant chaque

individu peuvent influencer leur signature isotopique et en raison du nombre restreint d'arbres soumis aux analyses isotopiques, cette étape revêt une très grande importance. La sélection a été faite sur la base de l'âge (> 200 ans), de la représentativité du patron de croissance radiale qui devait refléter la croissance moyenne observée sur ce site ainsi que de la largeur minimale des cernes dans la séquence permettant leur découpage mécanique.

3.3 Préparation des échantillons et analyses

Les séquences de cernes de croissance ont été datées selon les techniques standards (Stokes et Smiley, 1968, Pilcher, 1990). Elles ont ensuite été mesurées à l'aide d'un micromètre Velmex™ (précision 0,001mm). Les courbes de croissance ont ensuite été vérifiées statistiquement à l'aide du module COFECHA (Holmes, 1983). Sur chacune des sections transversales sélectionnées, quatre rayons d'orientations opposées ont été prélevés de façon à ce que les analyses tiennent compte de la variabilité radiale des rapports isotopiques. Par la suite, les cernes de croissance de ces rayons ont été découpés manuellement à l'aide de fines lames d'acier, du dernier cerne de croissance complet, soit celui de 2003, jusqu'à celui produit au cours de 1800. Les cernes de croissance correspondant à la période couverte par les données instrumentales (1940 à 2003) ont été découpés à résolution annuelle, afin d'établir une comparaison statistique entre les données isotopiques et les données hydroclimatiques. Le reste de la séquence (1800 à 1940) a été découpé à une résolution biannuelle, afin de réduire les coûts analytiques.

Le bois final et le bois initial n'ont pas été traités séparément, étant donné que les cernes de croissance étaient trop étroits pour réaliser un tel exercice. Comme l'arbre peut utiliser des réserves d'hydrates de carbone de la saison de croissance précédente pour former une portion de son bois initial (Roden *et al.*, 2000), nous sommes conscients que la découpe des cernes complets puisse provoquer un léger biais. La préparation des échantillons et les analyses dendrochronologiques ont été effectuées au laboratoire de dendrochronologie et de dendrogéochimie de la Commission géologique du Canada (CGC-Québec).

La cellulose alpha des échantillons de bois a été extraite systématiquement en laboratoire selon le protocole modifié de Browning (1952), Green (1963), Epstein *et al.* (1976), et Sternberg Da Silveira Lobo (1989). Une partie des échantillons a été analysée sans extraction puis avec extraction de la cellulose pour comparer les rapports isotopiques de ces deux matrices. Les échantillons ont été par la suite analysés pour leurs rapports $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{18}\text{O}$ à l'aide de périphériques permettant respectivement la combustion et la pyrolyse de façon automatique. Cette analyse en mode dynamique des gaz produits a été faite à l'aide de deux spectromètres de masse de type IRMS (*isotope ratio mass spectrometry*) attitrés aux périphériques mentionnés (EA-IRMS et TC/EA-IRMS). Toutes les analyses isotopiques ont été effectuées au Delta-Lab de la Commission géologique du Canada (CGC-Québec).

Traitement des séries dendroisotopiques

Tel qu'indiqué plus tôt, le dioxyde de carbone de l'atmosphère a une influence importante sur le rapport isotopique $\delta^{13}\text{C}$ dans les cernes de croissance des arbres. En raison de la consommation grandissante de combustibles fossiles, le $\delta^{13}\text{C}$ du CO_2 atmosphérique a diminué d'environ 1,66‰ depuis 1850 puisque les combustibles fossiles ont un rapport isotopique moyen (-25 ‰) nettement inférieur (Hoefs, 1976) à celui du CO_2 atmosphérique (-6,41‰ en 1850 et -7,99 ‰ en 2003, MCaroll et Loader, 2004). Cette diminution du $\delta^{13}\text{C}$ atmosphérique se reflète dans les cernes de croissance des arbres. La Figure 2 illustre la tendance atmosphérique du $\delta^{13}\text{C}$ depuis l'an 1800. Cette tendance atmosphérique du $\delta^{13}\text{C}$ a été établie à partir de mesures effectuées directement dans l'atmosphère et de données provenant de carottes de glace pour la portion la plus vieille de la série (pour plus de détails voir Feng, 1998). À partir de cette tendance exponentielle de $\delta^{13}\text{C}_{\text{atm}}$ documentée par Friedli *et al.* (1986), Feng (1998) a développé une équation permettant de faire une bonne approximation de cette tendance. Puisque notre recherche vise à dégager des relations hydroclimatiques exclusivement, nous avons corrigé chaque série dendroisotopique du carbone en soustrayant la tendance atmosphérique des valeurs analysées en laboratoire.

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{atm}} = -6,43 - 0.006 \exp(0,0217(t-1740)) \quad (\text{Équ. 4})$$

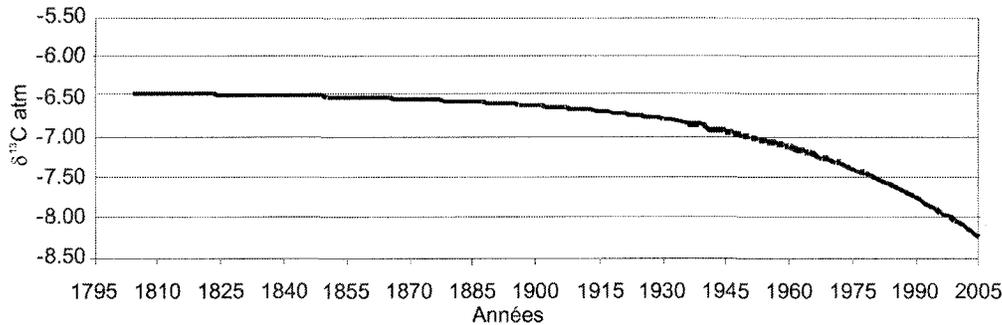


Figure 2. Tendence $\delta^{13}\text{C}$ du CO_2 atmosphérique (Feng, 1998).

Dans un second temps, afin d'enlever les effets métaboliques, les valeurs isotopiques du carbone de chaque individu ont été indicées par rapport à leur moyenne en soustrayant la moyenne de la série entière de chaque valeur annuelle. Le même exercice a été appliqué aux valeurs isotopiques de l'oxygène. Enfin, une série moyenne du carbone et de l'oxygène pour le site d'échantillonnage a été constituée en calculant la moyenne des séries de chaque arbre analysé.

Traitement des séries hydrologiques et météorologiques

Trois stations météorologiques situées à proximité du site étudié dont les données couvrent des périodes différentes, ont été retenues et amalgamées pour comparer les données isotopiques aux données climatiques sur un intervalle de temps le plus long possible (Figure 1). Ces stations sont celles de Nichequon (~115km du site, 1943-1985), de Shefferville (~250km du site, 1949-1993) et de Wabush (~300km du site, 1961-2003). L'objectif étant aussi de produire des séries climatiques régionales. Pour ce faire, chaque série a été standardisée par rapport à la moyenne et l'écart type de la période commune ($(X_i - \bar{X})/\sigma$). Ensuite, la moyenne des valeurs provenant des 3 séries standardisées a été calculée. Les plus anciennes données de température et de précipitation disponibles remontent à 1944 alors que celles d'humidité relative et donc de déficit de pression de vapeur (DPV), remontent à 1953. Des données d'interpolation climatique de la région qui

couvrent la période de 1870 à 2002 pour les mois de juin à août et provenant de la grille d'interpolation climatique HadCRUT2V (Jones et Moberg, 2003) ont aussi été utilisées. En plus, des données hydrologiques du réservoir Caniapiscou, différentes rivières de la région pourvues de stations de jaugeage offrant des données remontant à l'an 1955 ont été retenues et combinées de la même façon que pour les données climatiques. Comme dans le cas des données météorologiques, les données hydrologiques ont été utilisées à des fins de comparaison avec les séries isotopiques. Les données météorologiques et hydrologiques proviennent du ministère de l'Environnement du Canada et de la société Hydro-Québec (apport au bassin Caniapiscou).

Un indice climatique, inspiré de celui proposé par Barber *et al.* (2000) a également été utilisé. Contrairement à la technique de Barber *et al.* (2000), les données climatiques de l'année précédente n'ont pas été utilisées dans l'équation pour calculer l'indice climatique de l'année en cours puisque qu'après vérification, leur prise en compte dans le calcul s'est avérée inutile. Cet indice intègre les précipitations et les températures, deux paramètres auxquels les isotopes du carbone et de l'oxygène sont théoriquement sensibles. Les indices climatiques ont été calculés comme suit :

$$I.C. = P_{stand} - T_{stand} \quad \text{(Équ. 5)}$$

où *I.C.* est l'indice climatique, P_{stand} est la valeur de précipitation de la série régionale standardisée et T_{stand} est la température de la série régionale standardisée. Ainsi, un indice climatique faible traduit des conditions chaudes et sèches alors qu'un indice élevé, reflète plutôt des conditions froides et humides. Des tests statistiques (corrélation de Pearson) visant à déterminer les relations entre les séries dendroisotopiques et les variables hydroclimatiques ont par la suite été réalisés.

Finalement, des fonctions de transfert permettant des reconstitutions par régressions multiples, ont été réalisées à l'aide du programme CALROB et de PPPhallos (Guiot, 1991a.). Dans le cas de notre étude, les régresseurs du modèle sont les séries isotopiques du $\delta^{13}\text{C}$ et du $\delta^{18}\text{O}$ individuelles. Les fonctions de transfert calculées

transforment, dans un premier temps, les variables explicatives en composantes principales qui ont l'avantage de fournir la même information que les données d'origine sans toutefois être corrélées entre elles puisque l'application de la régression multiple présuppose que les régresseurs sont indépendants les uns des autres (Nicault, 1999). Pour tester la fiabilité de la fonction de transfert sans utiliser les tests d'hypothèses classiques, nous avons utilisé la méthode *bootstrap* (Efron, 1979; Guiot, 1991b; Nicault, 1999). Cette méthode permet de vérifier la fiabilité de la fonction de transfert sur des données indépendantes, sans avoir à partager la série en deux séquences successives qui pourraient représenter des situations climatiques différentes (Nicault, 1999). En effet, un ensemble de données tirées au hasard constitue les données de calibration servant au calcul de la régression qui fournit alors un coefficient de corrélation multiple entre les données modélisées et réelles. Le reste des données sert à la validation du modèle à partir de laquelle nous obtenons un coefficient de vérification entre les données modélisées et les données de validation. Donc, cette méthode permet de constituer des échantillons simulés et ainsi répéter le calcul de la régression multiple plusieurs fois (200 fois dans notre cas). Pour plus de détails sur les méthodes de calcul du programme le lecteur peut consulter Guiot (1991 a et b) et Nicault (1999).

4. Résultats

Comparaison entre le bois total et la cellulose

L'extraction de la cellulose des échantillons de bois en vue de leur analyse isotopique est une étape de préparation qui peut être fastidieuse par rapport à l'analyse directe du bois total. Cette extraction s'impose en raison du risque de voir apparaître des changements isotopiques artificiels reliés aux variations dans la proportion des composés du bois total, chacun de ses constituants ayant un rapport isotopique propre (Ferrio et Voltas, 2005, Saurer *et al.*, 1997a, Borella *et al.*, 1998, Borella et Leuenberger, 1999).

Afin de vérifier la pertinence de cette étape dans le contexte de la présente étude, des tests visant à comparer les valeurs isotopiques du bois total et celles de la cellulose alpha de deux arbres ont été réalisés. Dans le cas de l'oxygène, les variations isotopiques

pour le bois total et la cellulose sont pratiquement identiques. Par contre, les résultats montrent des écarts de tendance isotopique importants dans le cas du carbone, indiquant que l'extraction de la cellulose est nécessaire dans le cadre de notre étude (Figure 3).

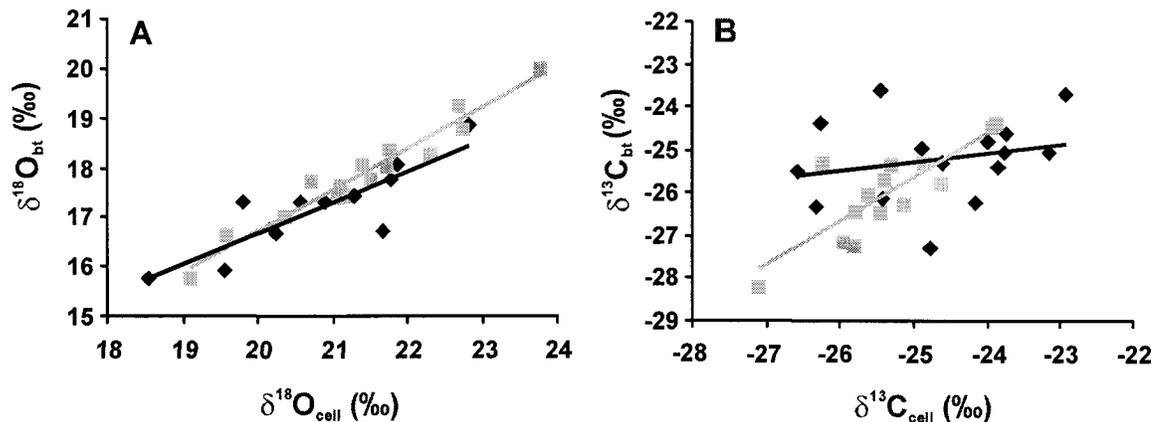


Figure 3. A - Relation entre le $\delta^{18}\text{O}$ du bois total (bt) et de la cellulose alpha (cell) chez deux individus (quinze échantillons par arbre (HM-14 en gris; $r=0,87$; HM1-26 en noir; $r=0,97$)). B Relation entre le $\delta^{13}\text{C}$ du bois total et de la cellulose chez deux individus (quinze échantillons par arbres ; HM-14 en noir; $r=0,24$; HM1-26 en gris; $r=0,83$).

4.1 Séries dendroisotopiques du carbone

Les cinq séries individuelles du carbone produites sont présentées à la Figure 4A. Toutes les séries couvrent la période de 1800 à 2004, à l'exception de la série Hm1-14 qui couvre la période de 1800 à 1914 étant donné que les cernes de croissance des années plus récentes étaient trop étroits pour être séparés à une résolution annuelle. Les valeurs oscillent de part et d'autre de l'indice moyen (0‰), avec une amplitude maximale de 4,4‰. Les valeurs maximales atteignent 1,5‰ alors que les plus faibles sont de -2,9‰.

Les séries dendroisotopiques du carbone montrent une variabilité interindividuelle importante (Figure 4A). Cependant, certaines séries ont des tendances à court et long termes très comparables (Tableau 1, Figure 4B). C'est le cas notamment des séries HM1-04 et HM1-21. Les séries HM1-26 et HM1-14 sont similaires entre elles, même si la dernière série couvre une période plus courte. La série moyenne du carbone (Figure 4C) est caractérisée par un écart-type et une variance relative à la moyenne de 0,38‰ et

0,15‰ respectivement. La tendance à moyen et à long terme de la courbe moyenne du carbone est caractérisée par une succession de périodes de valeurs isotopiques élevées et de périodes où elles sont faibles. Les périodes et les années au cours desquelles les rapports isotopiques sont les plus élevés sont : 1808, 1844-1848, 1856-1858, 1862, 1876, 1916, 1938-1992 et 2000-2003 alors que celles où les rapports sont les plus faibles sont : 1816-1828, 1842, 1852-1854, 1890, 1894, 1918-1928 et 1994-1999.

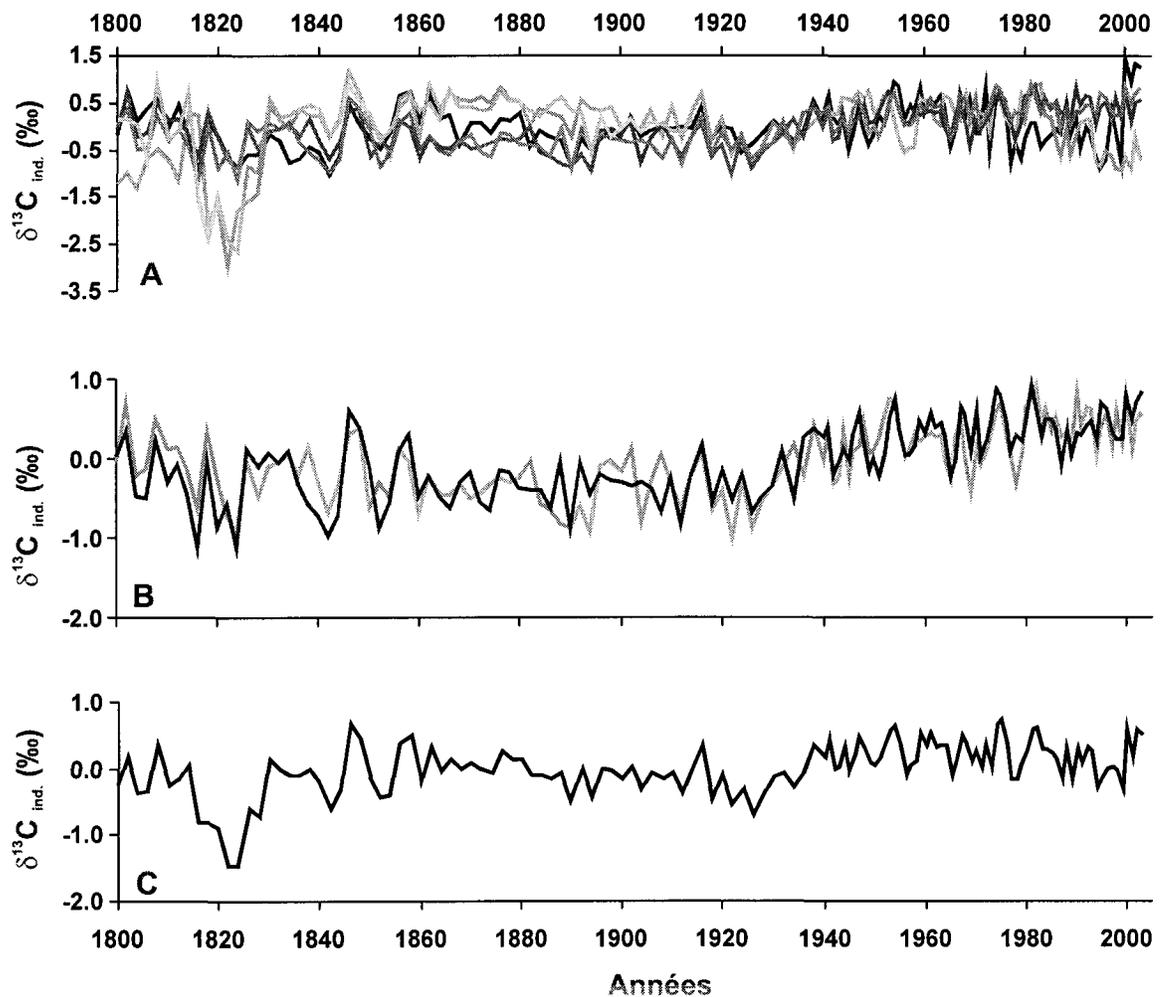


Figure 4. A- Séries individuelles corrigées et indicées des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ (HM1-14, HM1-26, HM1-04, HM1-21, HM1-19 respectivement, de la courbe la plus pâle à la plus foncée). B- Séries individuelles indicées et corrigées des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ des individus HM1-21 (trait fin) et HM1-04 (trait foncé). C- Série moyenne des rapports isotopiques du carbone de tous les individus indicée et corrigée.

Tableau 1 : Statistiques comparatives des séries isotopiques du carbone pour les cinq arbres étudiés.

	Série moyenne	HM1-19	HM1-26	HM1-21	HM1-04	HM1-14
ÉCART-TYPE (‰)	0.38	0.49	0.67	0.44	0.46	0.77
VARIANCE(‰)	0.15	0.24	0.45	0.19	0.21	0.59
HM1-26 p Pearson	-	0.17	-	-	-	-
HM1-21 p Pearson	-	0.44*	0.12	-	-	-
HM1-04 p Pearson	-	0.50*	0.20	0.79*	-	-
HM1-14 p Pearson	-	0.40*	0.77*	0.22	0.38	-
Age minimal (années)	-	218	226	215	213	224
Nombre d'échantillons analysés	594	134	134	134	134	58

4.2 Séries dendroisotopiques de l'oxygène

Les cinq séries individuelles de l'oxygène sont présentées à la Figure 5A. Toutes les séries couvrent la période de 1800 à 2004 à l'exception de la série Hm1-14 qui couvre la période de 1800 à 1914 pour la raison évoquée plus haut. L'ensemble des valeurs montrent une amplitude maximale de 5,2‰, avec des valeurs maximales atteignant 3‰ et des valeurs minimales de -2,2‰ par rapport à la moyenne de la série. Comparativement à celles du carbone, les séries individuelles de l'oxygène montrent une meilleure covariation, autant dans les tendances de hautes fréquence que celles de basse fréquence (Figure 5A). Effectivement, les séries sont similaires, à l'exception de la série HM1-21 qui montre de faibles coefficients de corrélation avec les séries HM1 26 et HM1-14 (Tableau 2). La série moyenne de l'oxygène (Figure 5B) est caractérisée par un écart-type (0,77) et une variance (0,59) plus élevés que dans le cas du carbone (Tableaux 1 et 2). Les tendances à moyen et à long terme de la courbe moyenne de l'oxygène sont aussi caractérisées par une succession de périodes de valeurs isotopiques élevées et de périodes où elles sont faibles. Les périodes au cours desquelles les rapports isotopiques sont les plus élevés sont : 1800-1812, 1846-1850, 1856-1866, 1878, 1914-1920, 1938-1942, 1953-1955, 1962-1963, 1973-1983 et 1988-2000. Celles où les rapports sont les plus faibles

sont : 1814-1844, 1852, 1870-1874, 1882-1912, 1922-1928, 1943-1944, 1965-1960, 1965-1973 et 1986 (Figure 5B).

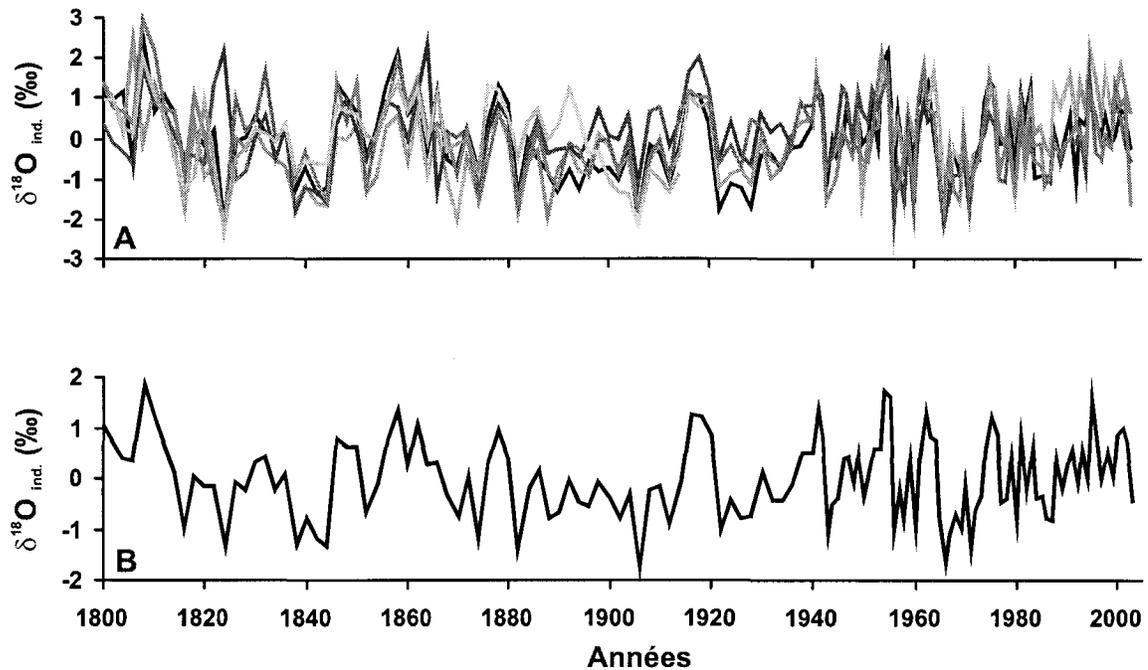


Figure 5. A- Séries individuelles des valeurs $\delta^{18}\text{O}$ indicées (HM1-14, HM1-26, HM1-04, HM1-21, HM1-19 respectivement, de la courbe la plus pâle à la plus foncée). B- Série moyenne des valeurs $\delta^{18}\text{O}$ indicées.

Tableau 2. Statistiques comparatives des séries isotopiques de l'oxygène pour les cinq arbres analysés.

	Série moyenne	HM1-19	HM1-26	HM1-21	HM1-04	HM1-14
ÉCART-TYPE (‰)	0.77	0.92	0.96	0.91	0.96	0.90
VARIANCE(‰)	0.59	0.85	0.91	0.82	0.92	0.82
HM1-26 p Pearson	-	0.66*	-	-	-	-
HM1-21 p Pearson	-	0.55*	0.35	-	-	-
HM1-04 p Pearson	-	0.75*	0.61*	0.58*	-	-
HM1-14 p Pearson	-	0.73*	0.56*	0.22	0.65*	-
Age minimal (année)	-	218	226	215	213	224
Nombre d'échantillons analysés	594	134	134	134	134	58

4.3 Relation entre les séries dendroisotopiques et les données hydroclimatiques

Des tests statistiques ont été réalisés dans le but d'étudier la signification climatique des signaux isotopiques. À l'aide de tests de corrélation Pearson, les rapports isotopiques ont été comparés aux variables climatiques et hydrologiques mesurées directement pour leurs périodes de suivi instrumentales (température (1944-2003), précipitations (1944-2003), conditions hydriques (1955-2003)) , puis ils ont aussi été comparés à un certain nombre de variables dérivées pouvant influencer les rapports isotopiques (ex. : indice climatique de Barber (1944-2003), D.P.V. (1955-2003)). Au total, 10 variables climatiques et hydrologiques, simples ou combinées, ont été testées : L'évapotranspiration potentielle, humidité relative, déficit hydrique, indice climatique de Barber, pluie, neige, température, déficit de pression de vapeur, débit de rivières et apport d'eau au bassin Caniapiscau. Le Tableau 3 présente les variables climatiques les mieux corrélées aux rapports isotopiques. Dans le cas de l'oxygène, les rapports isotopiques reflètent principalement les températures (moyennes maximales de juin, juillet et août; $r=0,62$, $p=0.001$) et le déficit de pression de vapeur (DPV) diurne estivale (moyenne de juin, juillet et août; $r=0,65$, $p=0.001$). Les rapports isotopiques de l'oxygène sont aussi bien corrélés à plusieurs autres variables testées, mais de façon moins importante. En ce qui a trait aux valeurs de $\delta^{13}\text{C}$, elles sont, aussi, fortement corrélées aux températures maximales de juillet ($r=0,45$, $p=0,001$). Les relations les autres variables sont aussi hautement significatives à $p=0,001$ et à $p=0,01$. Mis à part le cas des précipitations, qui étaient une variable déjà plus faiblement corrélée aux rapports $\delta^{13}\text{C}$, il y a une augmentation significative des corrélations lorsqu'uniquement la série moyenne des rapports $\delta^{13}\text{C}$ des arbres HM1-21 et HM1-04 est considérée. Tel que mentionné plus haut, ce sont les deux séries $\delta^{13}\text{C}$ les mieux corrélées entre elles. Dans un but de clarté, cette série moyenne de $\delta^{13}\text{C}$ impliquant seulement deux séries individuelles (Figure 6) sera dénommée «série partielle» dans le reste du texte.

Tableau 3. Corrélations Pearson entre les séries dendroisotopiques et les variables climatiques et hydrologiques. a=mois 6-7 b= mois 6-7-8, c=mois 6-7-8-9, d=mois7-8, e=mois7, f=mois 7-8-9-10-11, g=8-9-10-11 h=mois7-8-9.

	Températures maximales (1944-2003)	Pluie (1944-2003)	I.C (1944-2003)	V.P.D (1953-2003)	Apports (1955-2003)
$\delta^{18}\text{O}$ moyen	0.62* ^b	0.48* ^c	-0.58* ^b	0.65* ^b	-0.54* ^f
$\delta^{13}\text{C}$ moyen	0.45* ^e	0.4** ^d	-0.52* ^e	0.38** ^e	-0.3 ^g
$\delta^{13}\text{C}$ "série partielle"	0.6* ^d	0.32 ^b	-0.55* ^d	0.64* ^h	-0.58* ^f
Moyenne ($\delta^{18}\text{O}$ moyen)-($\delta^{13}\text{C}$ "série partielle")	0.67* ^b	0.49* ^c	0.63* ^b	0.71* ^b	-0.70* ^f

* p= 0.001

**p= 0.01

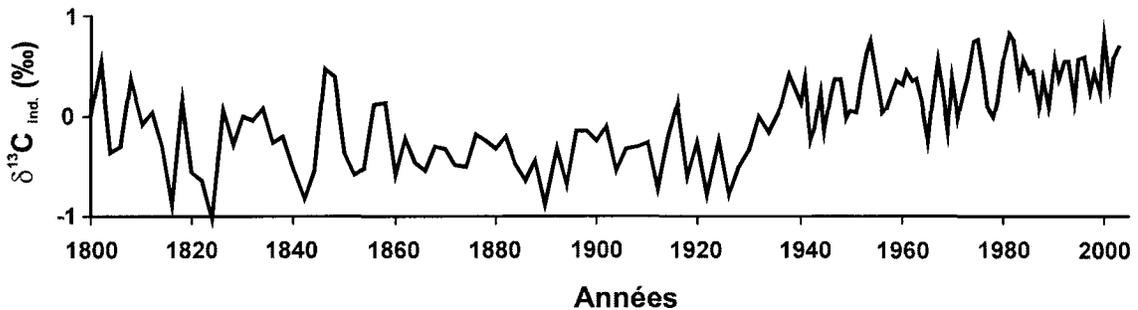


Figure 6. Série moyenne et standardisée des valeurs $\delta^{13}\text{C}$ des arbres HM1-21 et HM1-04.

4.4 Complémentarité et combinaison des rapports isotopiques $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{18}\text{O}$

Nous avons montré plus haut que les valeurs $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{13}\text{C}$ des cernes de croissance des arbres du site du Lac Hurault sont généralement influencées par les mêmes variables hydroclimatiques ou par des variables complémentaires et/ou reliées entre elles mais ce, à des degrés différents. Cette réponse similaire des deux rapports isotopiques a aussi été

notée par plusieurs autres auteurs qui ont alors évoqué la possibilité et la pertinence de combiner les deux isotopes pour accroître leur signification climatique (ie. Ferrio et Voltas, 2005; Raffalli-Delerce et *al.*, 2004; McCarroll et Loader, 2004; Saurer et *al.*, 1997a). Certains de ces auteurs soulignent, en effet, que la prise en compte intégrée des deux isotopes permet de minimiser la portion non climatique des signaux isotopiques (McCarroll et Loader, 2004).

Dans la présente étude, la complémentarité des deux signaux isotopiques apparaît évidente par la comparaison de la série moyenne de $\delta^{18}\text{O}$ à la série partielle des valeurs $\delta^{13}\text{C}$ ($r= 0.42$, $p < 0.0001$) (Figure. 7A). Comme dans le cas des études citées plus haut, la combinaison de leurs valeurs moyennes (moyenne des séries $\delta^{18}\text{O}$ et moyenne de la série partielle du $\delta^{13}\text{C}$; Figure 7B) permet d'augmenter de façon importante la signification climatique. En effet, les coefficients de corrélation obtenus avec les différentes variables hydroclimatiques sont généralement plus élevés dans le cas de la série combinée qu'ils ne le sont sur la base des indicateurs isotopiques pris séparément (Tableau 3).

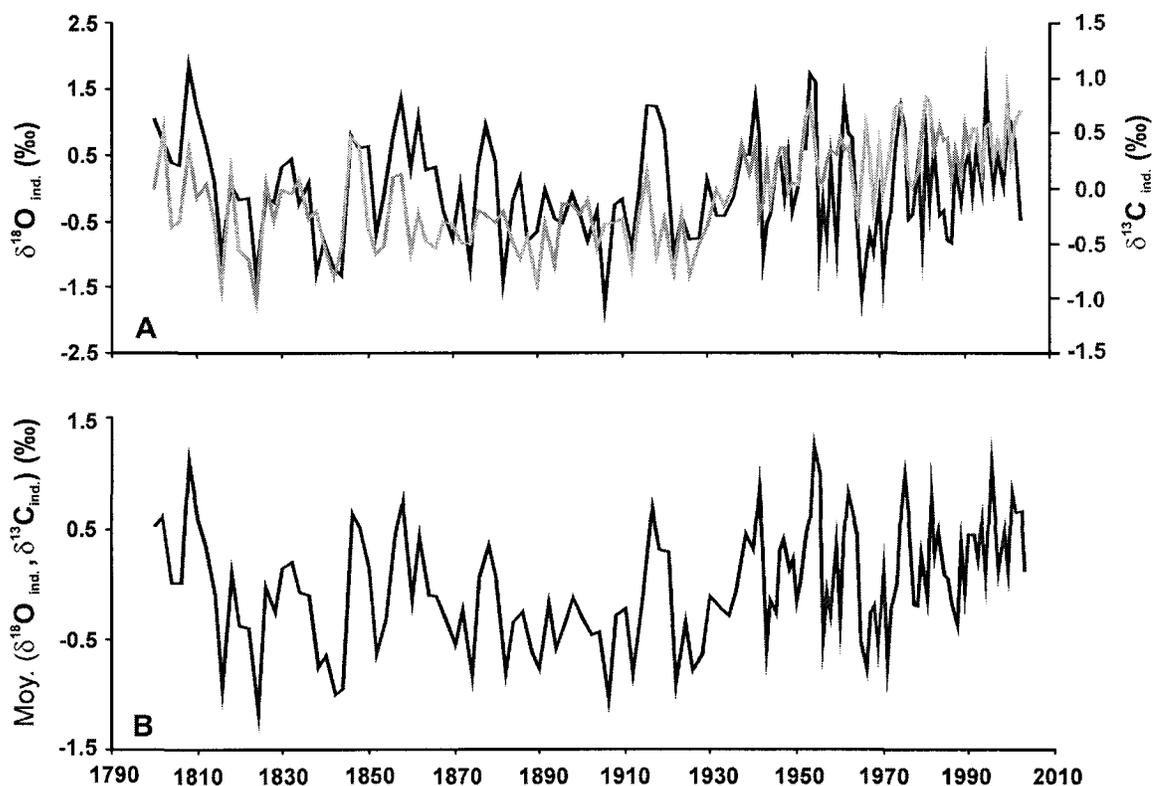


Figure 7. A - Série partielle indicées et corrigées des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ (ligne gris pale) et série moyenne indicée des valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ (en noir). B- Moyenne de la série $\delta^{13}\text{C}$ partielle, indicées et corrigées, et de la série $\delta^{18}\text{O}$ moyenne indicée.

4.5 Reconstitution climatique et hydrologique basée sur une combinaison des rapports isotopiques $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{18}\text{O}$

Les résultats précédents ont montré qu'une large part des rapports $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{13}\text{C}$ des cernes de croissance des arbres à la tête du bassin de la Grande Rivière sont corrélés aux températures maximales estivales, ainsi qu'aux débits des rivières à l'échelle régionale. Cette sensibilité des rapports isotopiques aux conditions climatiques en fait de bons indicateurs paléoclimatiques et ouvre la possibilité de réaliser des reconstitutions hydroclimatiques basées sur des fonctions de transfert réalisées à l'aide du programme CALROB et de son "package" PPPhallos (voir section méthodologie). Les fonctions de transfert reposent sur des régressions multiples intégrant la série partielle du rapport $\delta^{13}\text{C}$ et la série moyenne du rapport $\delta^{18}\text{O}$. Les résultats des régressions multiples confirment la complémentarité des valeurs $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{18}\text{O}$ et indiquent que leur combinaison permet

d'augmenter les coefficients de corrélation avec les données instrumentales (Tableau 4). La Figure 8 illustre les reconstitutions des variables climatiques les mieux corrélées aux séries isotopiques moyennes pour la période de 1800 à 2004.

Tableau 4. Coefficients de corrélation multiple (r) entre les variables climatiques et les reconstitutions réalisées à partir de fonctions de transfert intégrant la série partielle du rapport $\delta^{13}\text{C}$ et la série moyenne du rapport $\delta^{18}\text{O}$. Coefficients de corrélation multiple lorsqu'une moyenne mobile sur 3 ans est appliquée (r_{mm3}). Coefficients de vérification du modèle ($r_{\text{vérification}}$).

	r	r (mm3)	r vérification
Températures maximales (1944-2003) mois 6-7-8	0.68	0.79	0.61
Précipitations (1944-2003) mois 6-7-8-9	-0.49	-0.44	-0.46
I.C. (1944-2003) mois 7-8	0.64	0.68	0.58
Série hydrologique (1955-2003)	-0.72	-0.72	-0.70
V.P.D. (1953-2003) mois 6-7-8	0.73	0.76	0.67

L'indice climatique des mois de juillet et août (Figure 8A), les reconstitutions des températures maximales estivales de juin à août (Figure 8B), et les apports d'eau moyen au système hydrique régionale de juillet à novembre (Figure 8C) mettent en évidence des conditions de température et d'humidité très contrastées au cours des 200 dernières années. Elles montrent que la première moitié du XIX^e siècle aurait d'abord été marquée par une courte période chaude et sèche (1800-1814) puis par les trois années les plus froides et les plus humides des 200 dernières années (1816, 1824 et 1842). Les conditions se seraient par la suite améliorées (plus chaud et sec) entre 1846-1848 puis entre 1856-1858, avant de redevenir froides et humides pour le reste du XIX^e siècle, et ce, jusqu'à 1938. Seule l'année 1916 semble avoir été plus chaude et plus sèche à l'intérieur de cette longue période fraîche et humide. À partir de 1938, les conditions climatiques auraient changé de façon importante; elles seraient devenues plus chaudes et sèches jusqu'en 2003. La tendance à la hausse des températures jusqu'en 2003 auraient cependant été ponctuée d'un épisode plus froid et plus humide entre 1965 et 1971.

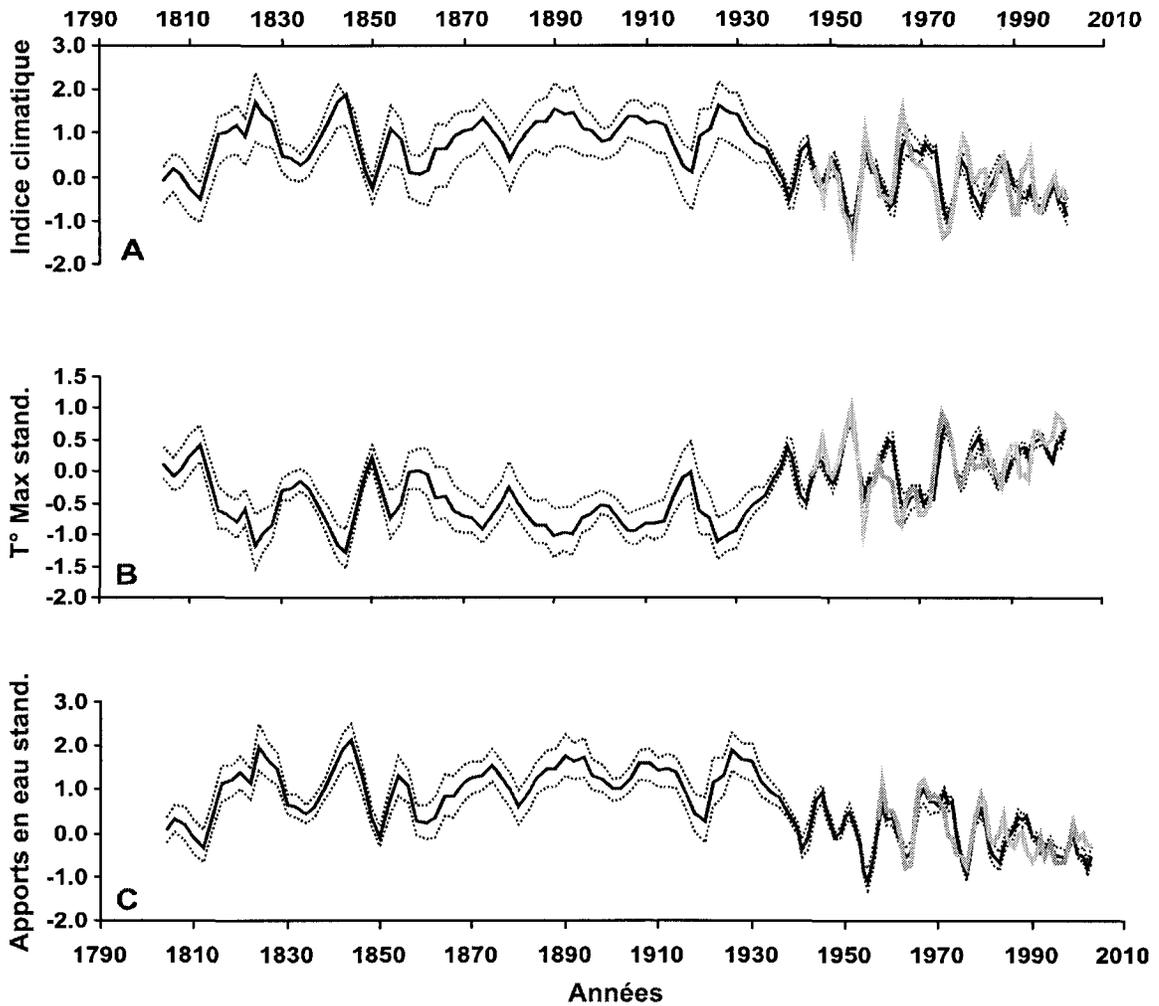


Figure 8. A- Indice climatique moyen des mois de juillet et août. B- Températures maximales moyennes standardisées des mois de juin à août. C- Apports moyens standardisés au système hydrique régional des mois de juillet à novembre. Moyenne mobile sur trois ans des valeurs reconstituées à l'aide de fonctions de transfert calculées à partir de la série partielle de $\delta^{13}\text{C}$ et de la série moyenne de $\delta^{18}\text{O}$ (ligne noire); moyenne mobile sur 3 ans des valeurs mesurées (en gris pâle); la marge d'erreur de la reconstitution est illustrée par la ligne pointillée.

5. Discussion

5.1 Rapports isotopiques du bois total et de la cellulose

Les tests visant à comparer les valeurs isotopiques du bois total et de la cellulose ont montré que les fluctuations des rapports $\delta^{18}\text{O}$ sont pratiquement identiques pour les deux matrices, mais que des différences notables existent dans le cas des rapports $\delta^{13}\text{C}$ (Figure 3). Ces différences sont probablement attribuables à la grande quantité de résine ($\text{C}_{20}\text{H}_{30}\text{O}_2$) présente dans le bois des conifères qui varie de 0,8 à 25 % (Kozłowski et Pallardy, 1997). La proportion de résine dans le bois peut varier et en plus être mobile dans la tige ce qui influence les valeurs $\delta^{13}\text{C}$ du bois total s'il est analysé. De plus, puisque la résine a une quantité de carbone beaucoup plus élevée que celle de l'oxygène, il est probable que le rapport isotopique du carbone soit davantage affecté que celui de l'oxygène. Cette hypothèse est en accord avec les conclusions tirées par Borella *et al.* (1998) qui concluent qu'il n'était pas nécessaire d'extraire la cellulose du chêne et du hêtre pour faire ressortir l'influence climatique sur leurs rapports $\delta^{13}\text{C}$. Ils ajoutent toutefois qu'il faut procéder à l'extraction de la cellulose dans le cas des conifères puisqu'ils contiennent une grande quantité de résine (0.8 à 25 % comparativement à 0.7 à 3 % dans le cas des feuillus (Kozłowski et Pallardy, 1997)).

5.2 Sensibilité du rapport $\delta^{18}\text{O}$ aux conditions hydroclimatiques

Les analyses statistiques ont clairement montré qu'une partie importante des valeurs isotopiques de l'oxygène de la cellulose des arbres refléterait les températures maximales estivales (juin à août), mais aussi que les précipitations et quelques variables associées jouent un rôle non-négligeable. La corrélation observée entre le rapport $\delta^{18}\text{O}$ et les températures apparaît conforme à la théorie expliquant le fractionnement des isotopes de l'oxygène (voir section 3, Méthodologie). En effet, les rapports des isotopes de l'eau des précipitations varient en fonction des températures au moment de la formation des gouttes d'eau dans les masses nuageuses (Clark et Fritz, 1997). Cette variation est enregistrée par l'arbre lorsque celui-ci utilise l'eau du sol pour la fabrication des hydrates

de carbone. Il semble qu'aucun fractionnement ne se produise chez les isotopes de l'oxygène contenus dans l'eau lors de l'assimilation par le système racinaire (Wershaw *et al.*, 1966). Cependant, le processus d'évapotranspiration chez la feuille entraîne un fractionnement important et ce, au détriment de l'isotope le plus léger qui s'évapore plus aisément. Les facteurs climatiques ayant une incidence directe sur le fonctionnement stomatal (température et humidité) influenceront donc la valeur isotopique de l'oxygène dans les cernes de l'arbre (McCarroll et Loader, 2004, Saurer *et al.*, 1997a). Dans le cadre de notre étude, les tests statistiques ont montré que ces deux facteurs influencent effectivement le $\delta^{18}\text{O}$ des cernes de croissance. Il n'est donc pas étonnant que nous obtenions une relation étroite entre le $\delta^{18}\text{O}$ et l'indice climatique des mois d'été, puisque le calcul de ce dernier considère à la fois la température et les précipitations (voir section Méthodologie).

Par ailleurs, nos analyses montrent une corrélation entre le rapport $\delta^{18}\text{O}$ et le DPV diurne (8 à 18 h). Cette relation s'explique aisément en raison du lien étroit entre le DPV et les températures qui influencent directement le rapport $\delta^{18}\text{O}_s$ de l'équation 4. Aussi, le DPV est considéré comme étant le moteur de l'évapotranspiration (Ferrio et Voltas, 2004), qui a un impact direct sur le fractionnement des isotopes de l'oxygène (Saurer *et al.*, 1997, Leuenberger *et al.*, 1998).

La période de l'année pour laquelle les corrélations entre le rapport $\delta^{18}\text{O}$ et les variables climatiques sont les meilleurs correspond à la saison de croissance des épinettes noires à la latitude de notre site d'étude, tel que mise en évidence par des séries de mesures à l'aide de dendromètres installés à proximité (Bégin Y., communication personnelle). Ces derniers ont enregistré une croissance cambiale s'étendant de la fin juin au début septembre. Le début de la croissance à la fin du mois de juin est cependant une donnée conservatrice puisque de 6 à 12 assises de cellules étaient déjà formées au moment où les appareils ont été installés le 20 juin (Bégin *et al.*, 1998). Donc, bien qu'il soit possible qu'une petite partie du signal isotopique soit liée à l'année précédant la formation du cerne (McCarroll et Loader, 2004), les résultats statistiques montrent clairement que le signal obtenu est surtout lié aux conditions prévalant pendant la saison de croissance de l'année même de la formation du cerne.

Enfin, une corrélation significative a été observée entre le $\delta^{18}\text{O}$ et les apports d'eau moyens au système hydrique régional des mois de juillet à novembre (Tableau 2). Cette période excède largement la période de croissance cambiale qui, tel qu'indiqué plus haut, ne s'étendrait pas au-delà du mois de septembre dans cette région boréale froide. À notre avis, ce phénomène peut s'expliquer par le temps de réponse des systèmes hydriques (débit de rivière, apport d'eau dans les réservoirs et les lacs, migration de l'eau souterraine etc.) par rapport aux événements climatiques qui en déterminent l'intensité et qui ont aussi un impact direct sur les rapports isotopiques. Nous observons effectivement des coefficients de corrélation très significatifs ($p=0.001$) entre la moyennes des apports en eau des mois de juillet à novembre et différentes variables climatiques, notamment les températures maximales moyennes de juin à août ($r=-0.65$), l'indice climatique moyen de juin à août ($r=0.73$), et le DPV diurne de juin à août ($r=-0.73$).

Contrairement au rapport $\delta^{13}\text{C}$, les plus fortes corrélations entre les variables climatiques (température, VPD, IC,) et le rapport $\delta^{18}\text{O}$ sont obtenues lorsque les valeurs du mois de juin sont considérées dans la période explicative. On peut expliquer ce phénomène par la grande disponibilité en eau au début de l'été provoquée par la fonte de la neige dans la région. Dans un tel contexte, les arbres sont rarement soumis à des conditions de stress hydrique, même lorsque les températures et les valeurs du DPV sont élevées, puisque l'eau est présente en quantité suffisante dans le sol pour combler les pertes par évapotranspiration. Ainsi, nous pensons qu'en juin la discrimination négative envers le ^{13}C serait moindre puisque les stomates ne seraient pas partiellement fermés et ce, en dépit des températures souvent élevées. Ce dernier phénomène rendrait le signal climatique du mois de juin moins perceptible pour le rapport $\delta^{13}\text{C}$. Par contre, le rapport $\delta^{18}\text{O}$ de l'eau présente dans l'arbre est affecté au moment de son évaporation et non lors de son assimilation comme c'est le cas pour le carbone. Pour cette raison, l'oxygène pourrait refléter des conditions atmosphériques chaudes et sèches (températures et DPV élevé) même dans une période de forte humidité des sols, puisque la force de l'évapotranspiration qui est associée aux conditions atmosphériques influence l'enrichissement en isotopes lourds de l'eau des feuilles. Enfin, rappelons que le rapport $\delta^{18}\text{O}$ de la cellulose est aussi lié aux valeurs $\delta^{18}\text{O}$ des précipitations (eau source de l'arbre) et que ces dernières sont préalablement influencées par les températures au

moment de la formation des gouttelettes d'eau. Comme l'eau des précipitations en juin est probablement utilisée par les arbres au moment de la photosynthèse, la combinaison de ces deux facteurs (évapotranspiration et températures au moment des précipitations) pourrait expliquer la réaction plus prompte de l'oxygène que celle du carbone aux changements de température et aux variations climatiques associées à la température. De plus, nous devons envisager qu'il puisse se produire un certain brouillage du signal climatique chez les valeurs $\delta^{18}\text{O}$ si les arbres utilisent, en début de saison de croissance, un mélange d'eau de fonte de la neige et de précipitations récentes. Malgré cela, les relations statistiques montrent que le rapport isotopique de l'oxygène épouse essentiellement les variations climatiques de la période s'étendant de juin à août.

5.4 Variabilité et signification climatique des rapports isotopiques du carbone

Nos résultats ont montré que les rapports isotopiques du carbone ont une plus grande variabilité interindividuelle que ceux de l'oxygène. Cette importante variabilité entre les séries individuelles du carbone a été observée par plusieurs auteurs (Masson-Delmotte *et al.*, 2004; Raffalli-Delcerce *et al.*, 2004 et Saurer *et al.*, 1997b), notamment dans le cas du chêne. Ce phénomène suggère une sensibilité des isotopes du carbone aux conditions environnementales entourant chacun des arbres échantillonnés. McCarroll et Loader (2004) soulèvent la possibilité que cette variabilité du rapport $\delta^{13}\text{C}$ puisse aussi s'expliquer par une certaine influence du bagage génétique sur l'efficacité de l'utilisation de l'eau par l'arbre. D'autre part, Ferrio et Voltas (2004) avancent que, contrairement au rapport $\delta^{18}\text{O}$, celui du $\delta^{13}\text{C}$ dans les cernes des arbres peut aussi être affecté par des changements de l'activité photosynthétique en réponse à différents facteurs comme la radiation solaire et le stress nutritionnel. Dans le cas de notre étude, il est probable que l'hétérogénéité des conditions écologiques et édaphiques ait aussi pu jouer un rôle dans la variabilité des séries individuelles. En effet, la topographie du site (petite colline) ainsi que le substrat sur lequel s'est développé la pessière à lichen (till d'ablation) imposent une variabilité de conditions écologiques et édaphiques qui peuvent être propres à chaque individu. Par exemple, des différences locales dans la texture et la profondeur du dépôt,

ainsi que la position de l'individu par rapport à la pente peuvent changer les conditions de drainage et d'humidité à l'échelle de chaque système racinaire et ainsi affecter la valeur $\delta^{13}\text{C}$. Dans un tel contexte, il apparaît évident que l'analyse d'un nombre plus élevé d'arbres aurait permis d'établir une série isotopique moyenne qui aurait atténué ces variations individuelles et donné une image plus régionale.

La série partielle du carbone est nettement mieux corrélée aux paramètres climatiques que ne l'est la série moyenne de tous les arbres, notamment en ce qui a trait aux températures, au DPV et aux données hydrologiques. En plus de présenter des corrélations plus élevées avec les paramètres climatiques, la série partielle montre des variations comparables à celles observées chez d'autres séries $\delta^{13}\text{C}$ produites dans le même secteur (Bégin *et al.*, travaux en cours).

La série partielle (Figure 6) montre des différences importantes par rapport à la série moyenne de tous les arbres. Par exemple, la hausse soutenue des valeurs $\delta^{13}\text{C}$ à partir de 1928 (Figures 6 et 8) est plus marquée dans la série partielle qu'elle ne l'est dans la série moyenne. Cette hausse en paliers des valeurs $\delta^{13}\text{C}$ soulève plusieurs questions. Elle pourrait correspondre à une modification importante du régime climatique, marqué par des températures estivales plus élevées et des conditions plus sèches comme le suggèrent les liens statistiques étroits entre ces variables hydroclimatiques et le rapport $\delta^{13}\text{C}$. Elle pourrait aussi avoir été influencée ou exacerbée par l'effet des polluants atmosphériques d'origine lointaine et diffuse sur le fractionnement des isotopes du carbone comme cela a été montré récemment dans une étude portant sur l'impact d'une source ponctuelle de pollution sur la forêt boréale (Savard *et al.*, 2004). Les auteurs ont montré que la hausse subite des valeurs $\delta^{13}\text{C}$ était reliée à la présence de polluants affectant directement le fonctionnement des stomates. D'autre part, il a aussi été montré que les précipitations acides pourraient avoir un impact sur la photosynthèse (Howard et Perley, 1982, Mayo *et al.*, 1992) et perturber le régime nutritionnel de l'arbre (Denison *et al.*, 1977). Dans le contexte géographique à l'étude, l'acidification des sols peut entraîner le lessivage rapide des éléments nutritifs en raison de la faible capacité tampon des sols nordiques, reliée à la faible épaisseur des couches de matières organiques et à la nature du substrat rocheux de la région. Or, il est documenté que les déficiences et les stress

nutritionnels peuvent avoir un impact sur le rapport $\delta^{13}\text{C}$ des arbres (Ferrio et Voltas, 2005). Il est donc possible d'envisager que la pollution diffuse provenant de diverses sources situées plus au sud ait contribué à modifier les valeurs $\delta^{13}\text{C}$ des arbres du bassin de la Grande Rivière à un moment où les températures étaient déjà à la hausse.

Afin de vérifier la signification du changement marqué dans la tendance des valeurs $\delta^{13}\text{C}$ à partir de 1928, la série isotopique du carbone a été comparée à différentes séries climatiques déjà publiées et bien acceptées dans la communauté scientifique. Par exemple, la longue série de températures moyennes de juin à août de la région à l'étude, estimées à partir des points de grille du CRU (HadCRUT2v) et couvrant la période de 1870 à 2002 (Jones et Moberg, 2003, Figure 9), montre également une hausse subite des valeurs autour de la même période. Anderson *et al.* (1998) ont aussi observé un changement en palier dans leurs séries de $\delta^{13}\text{C}$ et ont suggéré qu'il résultait d'un effet d'âge des individus analysés et à la canopée. Or, dans notre cas, il serait étonnant que de tels effets aient pu jouer un rôle important dans la mesure où les arbres analysés étaient déjà âgés d'un minimum de 130 ans au moment de ce changement isotopique et que la structure ouverte de la pessière à lichen stable dynamique depuis plusieurs siècles comme en témoigne l'absence de débris ligneux dans les zones ouvertes. Il est donc difficile d'imaginer un effet de canopée important dans un tel contexte forestier. Un autre fait marquant des séries isotopiques du carbone est l'importante chute des valeurs initiée en 1816 et qui se poursuit jusqu'en 1828 (Figure 4). Cette période de faibles valeurs isotopiques apparaît clairement sur la série moyenne totale, mais dans une moindre mesure sur la série partielle. La diminution abrupte des valeurs isotopiques en 1816 correspond à une chute des températures rapportée dans d'autres reconstitutions paléoclimatiques, notamment dans celle de Mann *et al.*, (1998) pour l'Amérique du Nord, réalisée à l'aide de différents traceurs naturels dont la croissance des arbres. Les auteurs attribuent cette chute des températures à l'effet combiné de l'éruption du volcan Tambora en 1815 et du cycle de l'oscillation Nord Atlantique. Dans le nord du Québec, les effets du Tambora se manifestent par une fréquence particulièrement élevée de cernes pâles aux années 1816 et 1817 (> 80 %). Ces cernes pâles témoigneraient du maintien de conditions fraîches, printanières, tout au long de la saison de croissance (Filion, 1986; Wang *et*

al.,2001). Ici encore, ces auteurs réfèrent aux effets des éruptions volcaniques et à une activité solaire inhabituelle pour expliquer les conditions estivales froides qui ont caractérisé le début du XIX^{ième} siècle. Il est en effet bien établi que les éruptions volcaniques émettent d'importants nuages d'aérosols stratosphériques qui reflètent en partie le rayonnement solaire et qui entraînent un refroidissement de la surface planétaire (Robock, 2005). L'année 1816 est connue sous l'appellation de «l'année sans été» et ses impacts dans l'Est de l'Amérique du Nord sont bien documentés dans la littérature (Wang *et al.*, 2001; Robock 2005) soutient que le refroidissement hémisphérique de 0,6 °C qui a suivi l'éruption du Tambora a perduré pendant une décennie, ce qui correspond à la période de faibles valeurs $\delta^{13}\text{C}$ enregistrées par la série moyenne de 1816 à 1928. En revanche, d'autres éruptions importantes, notamment celles d'un volcan inconnu en 1809 et du Krakatau en 1883 (Robock, 2005) ne sont pas enregistrées dans la série isotopique du carbone; elles apparaissent d'ailleurs très faiblement dans la reconstitution de températures de l'Amérique du Nord réalisée par Mann *et al.* (1998). Il est vraisemblable que les impacts de ces éruptions aient été moins importants que ceux du Tambora, à tout le moins en Amérique du Nord.

Liens statistiques entre les rapports $\delta^{13}\text{C}$ et les données instrumentales

La relation entre le rapport $\delta^{13}\text{C}$ et les précipitations est significative ($r= 0.4$) ($p = 0.01$) mais faible relativement aux résultats obtenus par plusieurs auteurs qui ont mis en évidence de fortes corrélations entre le rapport $\delta^{13}\text{C}$ et les précipitations (Ferrio et Voltas, 2005, Liu *et al.*, 2004, Saurer *et al.*, 1995). Cette faible corrélation pourrait s'expliquer par la forte variabilité régionale des précipitations. En effet, à l'instar des températures de l'air, qui sont homogènes à l'échelle régionale, les quantités de précipitations au site d'échantillonnage peuvent être fort différentes de celles enregistrées aux stations météorologiques relativement éloignées compte tenu de la dynamique et du caractère fragmentaire des systèmes nuageux. Saurer *et al.* (2004) ainsi que Warren *et al.* (2001) ont également observé de faibles relations entre les précipitations et les isotopes du carbone. Ils évoquent la possibilité que les rapports isotopiques du carbone n'enregistrent pas bien les différences de précipitations dans les régions non arides, étant donné que

dans ce type de milieu, les conditions d'humidité ne sont pas le facteur limitant principal. Par conséquent, les précipitations ont un impact de moins grande ampleur sur les rapports isotopiques. Il est évident qu'avec ses quelques 800mm de précipitations annuelles, la région d'étude est loin d'être un secteur aride. Nous pensons que l'étude d'un plus grand nombre de sites sur un territoire plus grand, couvrant les disparités régionales des précipitations, pourrait mettre en évidence le potentiel paléoclimatique réel du rapport $\delta^{13}\text{C}$ des cernes de croissance, notamment en ce qui a trait aux précipitations.

Nos résultats montrent également que les températures maximales des mois de juillet et août influencent grandement les rapports isotopiques du carbone. Tel que mentionné plus tôt, la température de l'air est un facteur majeur agissant sur les conditions hydriques de l'arbre et sur l'évapotranspiration. Des conditions chaudes et sèches provoquent une diminution de la conduction stomatale qui aura pour effet de diminuer la valeur du c_i (voir équation 2), provoquant ainsi une augmentation des valeurs $\delta^{13}\text{C}$ (Leuenberger *et al.*, 1998).

En ce qui concerne le déficit de pression de vapeur (DPV), il est fortement lié aux températures et à l'humidité relative ; il aura donc un impact direct sur la conduction stomatale (Bowling *et al.*, 2001). Puisque les rapports isotopiques du carbone dans les arbres sont grandement influencés par les conditions faisant fluctuer la conductance stomatale (Saurer *et al.*, 2004), il n'est guère surprenant d'observer une relation significative entre le DPV et le rapport $\delta^{13}\text{C}$.

L'indice climatique, qui constitue une variable intégrant les températures et les précipitations, est lié significativement aux rapports isotopiques du carbone. Puisqu'il existe un lien statistique entre le rapport $\delta^{13}\text{C}$ et chacune de ces variables considérées séparément (bien que plus faible dans le cas des précipitations), il apparaît logique d'observer un lien avec cet indice dont les valeurs fluctuent en fonction de conditions climatiques (température et humidité) qui ont un impact direct sur les conditions de l'environnement de l'arbre ainsi que sur ses besoins en eau.

La relation statistique entre le rapport $\delta^{13}\text{C}$ et les données hydrologiques (ex. : apports d'eau régional) n'est pas très forte dans le cas de la série moyenne. Ici encore, la représentativité des conditions spécifiques du site d'étude à l'intérieur d'un territoire aussi vaste que le bassin versant du réservoir (177 000km²), peut certainement être mise en

cause. Il est clair que les conditions hydriques locales entourant les arbres étudiés peuvent difficilement être considérées représentatives des conditions hydrologiques régionales. La variabilité interindividuelle des séries $\delta^{13}\text{C}$ témoigne d'ailleurs de l'importance des conditions locales dans le fractionnement des isotopes du carbone. La relation entre la série partielle du $\delta^{13}\text{C}$ et les données hydrologiques est toutefois nettement plus forte, ce qui justifie le choix des séries individuelles qui y sont intégrées pour refléter les conditions régionales.

5.5 Variations des conditions hydroclimatiques reconstituées de 1800 à 2005

Les valeurs hydroclimatiques modélisées à partir des données $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{18}\text{O}$ montrent d'importantes fluctuations conformes à celles observées dans les séries de données instrumentales. Pour la période récente les valeurs isotopiques et climatiques extrêmes, maximum ou minimum, sont enregistrées aux mêmes années, soient: 1948, 1950, 1954, 1957, 1962, 1965, 1975, 1978 et 1987.

La comparaison des séries reconstituées avec les données instrumentales semble montrer une perte de sensibilité des rapports isotopiques à partir du début des années 1980, et particulièrement en ce qui concerne les apports d'eau moyens au système hydrique régional et à l'indice climatique. Nous pensons que cette faible réponse des arbres pourrait être reliée à la moins grande variabilité des paramètres hydrologiques et climatiques pendant cette période. Elle pourrait également être liée au fait que les indices climatiques et les conditions hydriques sont influencés par les précipitations qui, tel que souligné plus haut, ne sont pas homogènes sur l'ensemble du territoire. Les données instrumentales utilisées dans l'élaboration des modèles peuvent donc ne pas être représentatives des conditions au site d'étude. Un autre biais a pu être induit lors du sous-échantillonnage des cernes de croissance. En effet, les cernes correspondant aux années où la sensibilité est moindre, sont généralement très étroits et il est possible qu'une légère contamination par les cernes adjacents ait pu se produire lors de la séparation des cernes, créant ainsi une forme d'homogénéisation de la réponse isotopique.

Les températures maximales reconstituées à partir des valeurs isotopiques ont été comparées à la longue série de températures de la région interpolées à partir des données du CRU HadCRUT2V, couvrant la période de 1870 à 2005 (Jones et Moberg, 2003) (données disponibles : National Climatic Data Center) et ce, dans l'optique de valider les tendances à moyen et à long termes de la série reconstituée à l'aide d'une série indépendante (Figure 9). Dans le cadre de cet exercice, les variations de hautes fréquences ont moins d'intérêt puisque la série du CRU couvre une région beaucoup grande et qu'elle intègre un plus grand nombre de stations. De façon générale, la série instrumentale du CRU conforte notre reconstitution des grandes variations de température. On y retrouve les mêmes tendances, à savoir: une longue période froide s'étendant de 1870 à 1938, suivie d'un réchauffement marqué des températures entre 1938 et 1947. Les températures resteraient alors élevées jusqu'en 1963, puis baisseraient légèrement jusqu'en 1972. Depuis cette date, la tendance des températures serait nettement à la hausse. À la lumière des données de températures régionales standardisées utilisées dans le cadre de cette étude (voir section Méthodologie), il apparaît que la plus récente hausse des températures entre 1986 et 2002 dans la série HadCruT2V est surestimée.

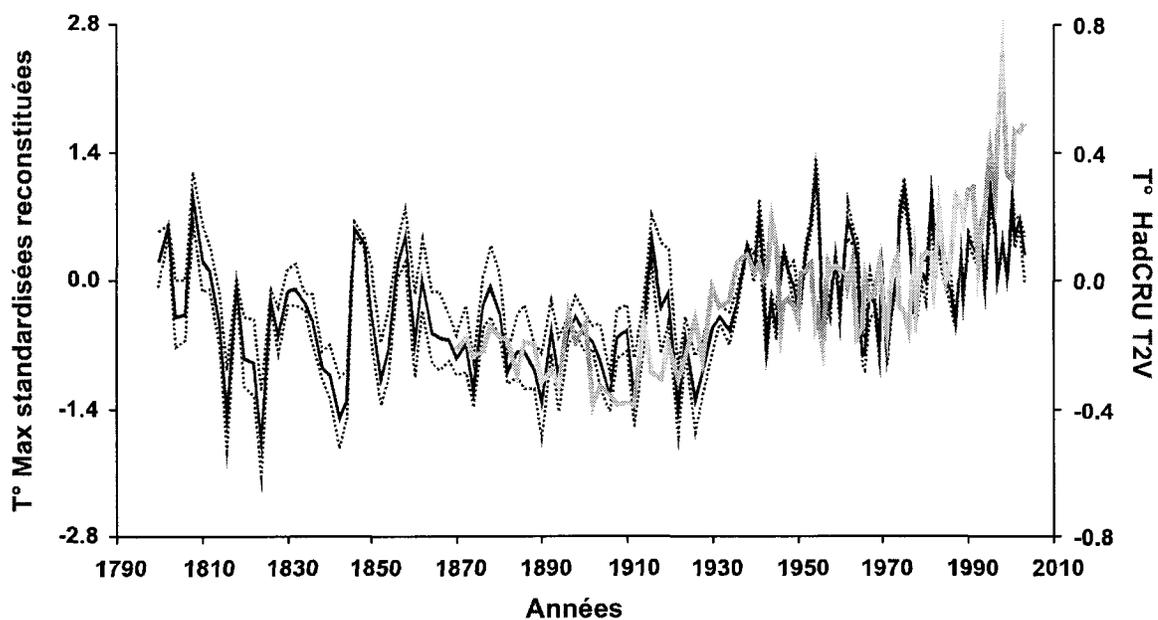


Figure 9. Les valeurs standardisées des températures maximales moyennes de Juin-Juillet-Août reconstituées à l'aide de fonctions de transfert calculées à partir de la série partielle de $\delta^{13}\text{C}$ et de la série $\delta^{18}\text{O}$ moyenne (ligne en noir). La marge d'erreur de la reconstitution est illustrée par la ligne pointillée. Interpolations des températures (écart à la moyenne de la période 1961-90) de juin-juillet-août pour la région (point de grille de $5^\circ \times 5^\circ$) (HadCRUT2v; Jones et Moberg, 2003; ligne en gris).

Enfin, les reconstitutions climatiques produites dans le cadre du présent travail ont aussi été confrontées à d'autres séries reconstituées disponibles pour la région. Guiot (1987) a par exemple montré, à l'aide de la largeur et de la densité des cernes de croissance, que le centre et l'est du Canada ont connu des conditions froides au cours du XIX^{ième} siècle et que ces conditions se sont réchauffées à partir de la seconde moitié du XX^e siècle, ce qui, dans l'ensemble, concorde avec nos résultats. Cependant, l'auteur indique que le réchauffement dans la partie est de la Baie d'Hudson a été initié à la fin de la décennie 1940 alors que nos données reconstituées montre plutôt que la hausse des températures aurait débuté autour de 1930 (Figure 7B).

D'autre part, dans un travail fastidieux et monastique, Wilson (1992) a dépouillé l'ensemble des documents d'archives des postes de traite de la Compagnie de la Baie d'Hudson de la côte est de la Baie d'Hudson et de la baie de James dans le but d'y extraire l'information paléoclimatique pour la période de 1800 à 1900. Les séries de températures et de précipitations estivales reconstituées qui en résultent montrent de grandes similitudes avec les valeurs reconstituées à partir des rapports $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{18}\text{O}$ des cernes des arbres. En effet, dans les deux cas, les données indiquent que le début du XIX^e siècle (1800 à 1810) a été caractérisé par des conditions chaudes et sèches, comparables à ce que l'on connaît aujourd'hui. Les conditions se sont ensuite rapidement détériorées au cours de la période de 1811 à 1820. Cependant, les étés 1816 et 1817 ont été particulièrement froids et humides, avec des écarts à la moyenne de $-5,5^{\circ}\text{C}$ et $-4,0^{\circ}\text{C}$ respectivement (période de référence 1941-1970). Les conditions seraient demeurées plus froides et plus humides que les valeurs normales pour le reste de la première moitié du XIX^e siècle (Wilson, 1992). En excluant les étés 1816 et 1817, qui font figure d'exception dans la série, les étés entre 1836 et 1843 ont été les plus froids de cette période alors que les étés 1842 et 1843 ont été les plus humides. Les conditions estivales les plus sèches ont été enregistrées aux années 1807, 1809 et 1878. En dépit d'un certain nombre d'écarts entre les deux séries reconstituées, probablement surtout reliées aux délimitations différentes de la période estivales, les grandes variations et événements climatiques qui ont marqué le XIX^{ième} siècle tel que mis en évidence par Wilson (1992), apparaissent fidèlement dans les reconstitutions basées sur les séries dendroisotopiques (Figure 8).

Conclusion

Nos résultats montrent que les isotopes du carbone et de l'oxygène dans les cernes de croissance des épinettes noires nordiques ont un fort potentiel pour la reconstitution du climat et des conditions hydriques du passé. La variabilité observée entre les séries isotopiques individuelles du carbone suggère que cet isotope peut refléter davantage les conditions de microsites comparativement à celui de l'oxygène dont la signature semble plus régionale. Pour cette raison, nous croyons que l'analyse d'un nombre plus élevé d'échantillons aurait certainement augmenté la représentativité des valeurs $\delta^{13}\text{C}$ à l'échelle régionale et leur potentiel paléoclimatique. De plus, la combinaison des valeurs isotopiques du carbone et de l'oxygène semble être une méthode plus performante que l'utilisation des deux isotopes considérés séparément pour reconstituer les conditions hydroclimatiques. Il semble que dans la région étudiée, où la température est le facteur limitant principal pour la croissance des arbres, les variations isotopiques de l'oxygène et du carbone sont surtout influencées par les températures estivales. Cependant, d'autres variables climatiques dérivées, intégrant notamment les températures (DPV, IC), sont également corrélées significativement avec les valeurs dendroisotopiques. Aussi, une relation significative a été notée entre les rapports isotopiques et les précipitations; cette relation est toutefois plus faible que dans le cas des températures. La variabilité spatiale du patron des précipitations à l'échelle régionale peut être évoquée pour expliquer la sensibilité moins élevée des rapports $\delta^{13}\text{C}$ au régime des précipitations comparativement à ce qui est souvent noté dans la littérature. Nous croyons donc que la production de plusieurs séries dendroisotopiques, réparties sur un territoire plus grand, aurait permis, à notre avis, d'obtenir de meilleures relations entre les rapports isotopiques du carbone et le régime des précipitations. Il en va de même de la possibilité de reconstituer les variables hydrologiques (débits, apports au bassin) à partir des données isotopiques qui aurait été grandement accrue en augmentant la couverture spatiale des séries dendroisotopiques.

Les reconstitutions hydroclimatiques provenant des analyses dendroisotopiques effectuées à un seul site du secteur amont du bassin de la Grande Rivière ont pu être

confrontées et validées positivement à l'aide de séries indépendantes et représentatives du territoire des Baies de James et d'Hudson. Les tendances du XX^e siècle ont été corroborées à l'aide des données climatiques interpolées sur point de grille du CRU, alors que les conditions reconstituées pour le XIX^e siècle ont été validées à l'aide d'autres séries reconstituées pour la région mais indépendantes des nôtres. Cet exercice a permis de confirmer que l'approche utilisée dans ce travail, valorisant à la fois la grande sensibilité des rapports isotopiques et la résolution annuelle des cernes de croissance, est une des plus pertinentes et performantes pour documenter la variabilité des conditions climatiques passées et ainsi permettre de poser un regard historique réaliste sur les tendances hydroclimatiques récentes.

Références bibliographiques

Anderson, W.T., Bernasconi, S.M., McKenzie, J.A., 1998. Oxygen and carbon isotopic record of climatic variability in tree ring cellulose (*Picea abies*): an exemple from central Switzerland (1913-1995). *Journal of Geophysical Research*, 103, D24, 625-636.

Barber, V.A., Juday, G.A., Finney, B.P., 2000. Reduced growth of Alaskan white spruce in the twentieth century from temperature-induced drought stress. *Nature*, 405, 668-672.

Barbour, M.M., Walcroft, A.S., Farquhar, G.D., 2002. Seasonal variation in $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ of cellulose from growth rings of *Pinus radiata*. *Plant, Cell and Environment* 25, 1483-1499.

Bégin, Y., 2000. Reconstruction of Subartic Lake levels over Past Centuries using Tree Rings. *Journal of Cold Regions Engineering*, 14, 192-211.

Borella, S., Leuenberger, M., Saurer, M., Siegwolf, R., 1998. Reducing uncertainties in $\delta^{13}\text{C}$ analysis of tree rings: Pooling, milling, and cellulose extraction. *Journal of Geophysical Research*, 103, D16, 19519-19526.

Borella, S., Leuenberger, M., 1999. Analysis of $\delta^{18}\text{O}$ in tree rings: Wood-Cellulose comparaison and method dependent sensitivity. *Journal of Geophysical Research*, 104, D16, 19267-19273.

Bowling, D.R., McDowell, N.G., Bond, J.B., Law, B.E., Ehleringer, J.R., 2001. ^{13}C content of ecosystem respiration is linked to precipitation and vapor pressure deficit. *Oecologia*, 131, 113-124.

Browning, B.L., 1952. The isolation and determination of cellulose polysaccharide fraction of wood. P. 1138-1158. *In* L.E. Wise and E.C. John (ed) *Wood chemistry*. ACS monograph series. Reinhold Publ., New York.

Clark, I.D., Fritz, P., 1997. *Environmental isotopes in hydrogeology*, CRC press LLC, Boca Raton, Florida, 328p.

Canada Council of minister of the Environment, 2003. *Le climat, la nature, les gens: Indicateurs d'évolutions du climat au Canada*, 45p

Centre national de la recherche scientifique, . disponible [En ligne] , <http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosclim/rechfran/4theme/paleo/speleotheses.html>, La Lettre du Changement global, vol 10.

Consortium Ourano, 2007, [En ligne] disponible à : http://www.ouranos.ca/programmation/hydro_f.html, vérifié le 28 juillet 2007.

Denison, R., Caldwell, B., Bormann, B., Eldred, D., Swanberg, C., Anderson, S., 1977. The effect of acid rain on nitrogen fixation in Western Washington Coniferous forest, *Water, Air and Soil Pollution*, 8, 21-34.

Dyke, A.S., Vincent, J.S., Andrews, L.A., Dredge, L.A., Cowam, W.R., 1989. L'inlandsis Laurentidien: introduction à la géologie quaternaire du bouclier Canadien. Le quaternaire du Canada et du Groenland, chap. 3, Commission géologique du Canada, Ottawa, Canada, 188-202.

Environnement Canada, 2005 [En ligne] disponible à : http://www.climate.weatheroffice.ec.gc.ca/prods_servs/cdcd_iso_f.html , Verified 10 November 2006.

Efron, B., 1979. Bootstrap Methods: Another Look at the Jackknife. *The Annals of Statistics*, 7, 1-26.

Epstein, S., Yapp, C.J., Hall, J.H., 1976. The determination of the D/H ratio of non-exchangeable hydrogen in cellulose extracted from aquatic and land plants. *Earth and Planet Science Letter*. 30, 241-251.

Farquhar, G.D., Ehleringer, J.R., Hubick, K.T., 1989. Carbon isotopes discrimination and photosynthesis. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* 40, 503-537.

Farquhar, G.D., O'Leary, M.H., Berry, J.A., 1982. On the relationship between Carbon Isotope Discrimination and the Intercellular Carbon Dioxide Concentration in Leaves. *Australian Journal of Plant Physiology.*, 9, 121-137

Feng, X., 1998. Long term ci/ca response of trees in western North America to atmospheric CO₂ concentration derived from carbon isotope chronologies. *Oecologia*, 117, 19-25.

Filion, L., Payette, S., Gauthier, L., Boutin, Y., 1986. Light Rings in Subarctic Conifer as a dendrochronological Tool. *Quaternary Research*, 26, 272-279.

Ferrio, J.P., Voltas, J., 2005. Carbon and Oxygen isotope ratios in wood constituents of *Pinus halepensis* as indicators of precipitation, temperature and vapour pressure deficit. *Tellus*, 57B, 164-173.

Friedli, H., Lotcher, H., Oeschger, H., Sciegenthaler, U., Stauffer, B., 1986. Ice core record of the $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ of atmospheric CO_2 in the past two centuries. *Nature*, 324,237-238.

Gleick, P.H., 1989. Climate change, hydrology, and water resources. *Reviews of Geophysics*, 27, 329-344.

Government du Québec, 2006. [En ligne] disponible à :
<http://www.gouv.qc.ca/portail/quebec/pgs/commun/portrait?lang=fr>

Green, J.W. 1963. Wood cellulose. p. 9–20. *Methods in carbohydrate chemistry*. Vol. III. Academic Press, New York.

Guiot, J., 1987. Reconstruction of seasonal temperatures in Central Canada since A.D. 1700 and detection of the 18.6- and 22-year signals. *Climatic Change*, 10, 249-268.

Guiot, J., 1991a. Methods and programs of statistics for paleoclimatology and paleoecology. Quantification des changements climatiques. Méthodes et programmes: monographie n°1. Institut national des sciences de l'Univers, Programme national d'Études des Climats, 258 p.

Guiot J., 1991b. The bootstrapped response function, *Tree-Ring Bull.* 51, 39-41.

Hoefs, J., Frey, M., 1976. The isotopic composition of carbonaceous matter in a metamorphic profile from the Swiss Alps. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 40, 945-951.

Hydro Québec, 2006. [En ligne] <http://www.hydroquebec.com/sebj/fr/lagrande.html>

Holmes, R.L., 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 43 : 69-78.

Howard, R., Perley, M., 1982. *Pluie Acides, Québec/Amerique*, Montreal, 214 p.

Jones, P.D., Moberg, A., 2003. Hemispheric and large-scale surface air temperature variation: An extensive revision and an update to 2001. *Journal of Climate*, 16, 206-233.

Kozlowski, T.T., Pallardy, S.G., 1997. *Physiology of woody plants*. Academic Press, (2e édition) N.Y., 411 pp.

Leavitt, S.W., Long, A., 1988. Stable carbon isotope chronologies from trees in the southwestern United States. *Global Biological Cycles*, 2, 189-198.

Leuenberger, M., Borella, S., Stocker, T., Saurer, M., Siegwolf, R., Schweingruber, F., Matyssek, R., 1998. Stable isotopes in tree rings as climate and stress indicators. Final Report, NRP 31, VDF, Zurich, 200 p.

Lipp, J., Trimborn, P., Fritz, P., Moser, H., Becker, B., Frenzel, B., 1991. Stable isotopes in tree ring and climatic change. *Tellus*, 43B, 322-330.

Liu, Y., Ma, L., Leavitt, S.W., Cai, Q., Liu, W., 2004. A preliminary seasonal precipitation reconstruction from tree-ring stable carbon isotopes at Mt. Helan, China, since AD 1804. *Global and Planetary Change*, 41, 229-239.

Mann, M.E., Bradley, R.S., Hughes, M.K., 1998. Global-scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries. *Nature*, 392, 779-797.

Marion, J., Savard, M.M., Bégin, C., Parent M., 2001. Assimilation du carbone, des nutriments et des métaux lourds par l'épinette noire à proximité de la fonderie Horne, Rouyn-Noranda (Québec). *Geological Survey of Canada, Current Research 2001-E*, 8 p.

Masson-Delmotte, V., Raffalli-Delercq, G., Danis, P.A., Yiou, P., Stievenard, M., Guibal, F., Mestre, O., Bernard, V., Goosse, H., Hoffmann, G., Jouzel, J., 2004. Change in European precipitation seasonality and in drought frequencies revealed by a four-century-long tree-ring isotopic record from Brittany, western France. *Climate Dynamics*, 24, 57-69.

Mayo, J.M., Legge, A.H., Yeung, E.C., Krupa, S.V., Bogner, J.C., 1992. The effect of sulphur gas and elemental sulphur dust deposition on *Pinus contorta* x *Pinus banksiana*: Cell walls and water relations. *Environmental Pollution*, 76, 43-50

McCarroll, D., Loader, N.J., 2004. Stable isotopes in tree rings. *Quaternary Science Reviews*, 23, 771-801.

Ministère des ressources naturelles du Québec, 2003. [En ligne]
<http://www.mrn.gouv.qc.ca/forets/connaissances/connaissances-inventaire-zones-carte.jsp>

Mysak, L.A., 1993. variabilité et changement climatiques et les aménagements hydroélectriques dans le nord du Québec, Montréal. Bureau de soutien de l'examen public du projet Grande Baleine, 98 p.

National Geophysical Data Center, National climatic Data Center Paleoclimatology Program, [En ligne] last updated 7-oct-2005.
<http://www.ngdc.noaa.gov/paleo/ctl/about2.html#proxies>

National Climatic Data Center , [En ligne] Dernière consultation le 17-décembre-2007.
Disponible à : <http://www.ncdc.noaa.gov/gcag/gcag.html#HERE>

Nicault A., Analyse de l'influence du climat sur les variations inter- et intra-annuelles de la croissance radiale du pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) en Provence calcaire. Thèse doctoral de l'Université d'Aix-Marseille III, 1999. 254 p.

Pagé, P., 1999. Les grandes glaciations : l'histoire et la stratigraphie des glaciations continentales dans l'hémisphère Nord, 2e édition, Montréal : Guérin, 492p.

- Payette, S., Morneau, C., Sirois, L., Desponts, M., 1989. Recent fire history of the northern Québec biomes. *Ecology*, 70, 656-673.
- Pilcher, J.R., 1990. Sample Preparation, Cross-dating and Measurement. In: *Methods of Dendrochronology. Application in the Environmental Sciences* (éd. : COOK E.R. & KAIRIUKSTIS L.A.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, p. 40-51.
- Raffalli-Delerce, G., Masson-Delmotte, V., Dupouey, J.-L., Stievenard, M., Breda, N., Moisselin, J.M., 2004. Reconstruction of summer droughts using tree-rings cellulose isotopes: a calibration study with living oaks from Brittany (western France), *Tellus*, 56B, 160-174.
- Robock, A., 2005. Cooling following large volcanic eruptions corrected for the effect of diffuse radiation on tree rings. *Geophysical research letters*, 32, L06702, doi:10.1029/2004GL022116.
- Roden, J.S., Lin, G., Ehleringer, J.R., 2000. A mechanistic model for interpretation of hydrogen and oxygen isotope ratios in tree-ring cellulose, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64, 21-35.
- Saurer, M., Aellen, K., Siegwolf, R., 1997 a. Correlating $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ in cellulose of trees. *Plant, Cell and Environment*, 20, 1543-1550.
- Saurer, M., Borella, S., Schweingruber, F., Siegwolf, R., 1997 b. Stable carbon isotopes in tree rings of beech: climatic versus site-related influences. *Trees*, 11, 291-297.
- Saurer, M., Siegenthaler, U., Schweingruber, F., 1995. The climate-carbon isotope relationship in tree-rings and the significance of site condition. *Tellus*, 47, 320-330.
- Saurer, M., Siegwolf, R.T.W., Fritz, H.S., 2004. Carbon isotope discrimination indicates improving water-use efficiency of trees in northern Eurasia over the last 100 years. *Global change Biology*, 10, 2209-2120.
- Savard, M., Bégin, C., Parent, M., Smirnoff, A., Marion, J., 2004. Effect of Smelter Sulfure Dioxide Emissions: A Spatiotemporal Perspective Using Carbon Isotopes in Tree Rings. *Journal of Environmental Quality*, 33, 13-26.
- Savard, M.M., Bégin, C., Smirnoff, A., Marion, J., Parent, M., Sharp, Z., 2005. Fractionation change of Hydrogen isotopes in trees due to the effects of atmospheric pollutants. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69, 3723-3731.
- Sternberg Da Silveira Lobo, L., 1989. Oxygen and hydrogen isotope measurements. Plant cellulose analysis. P89-99. In H.F. Linskens and J.F. Jackson (ed.) *Modern methods of plant analysis*. Vol.10. New series. Springer, Berlin.

Stockton, C.W., Jacoby, G.C.Jr., 1976. Long-term surface-water supply and streamflow trends in the upper Colorado River Basin based on tree-ring analyses. Lake Powell Res. Proj. Bull. 18, Univ. of Arizona, Tucson, 70 p.

S.E.B.J., 1987. Le complexe hydroélectrique de La Grande Rivière. Société d'Exploitation de la Baie James. Montréal, Chenelière, 496 p.

Société d'énergie de la baie James, [En ligne], complexe La Grande, disponible à : <http://www.hydroquebec.com/sebj/fr/lagrande.html> , (Verifié le 10 Novembre 2006).

Stokes, M.A., Smiley, T.L., 1968. An introduction to Tree Ring Dating, University of Chicago Press, Chicago, USA 73 pp.

Treydte, K., Schleser, G.H., Scheingruber, F.H., 2001. The climatic significance of $\delta^{13}\text{C}$ in subalpine spruce (Lötschental, Swiss Alps) a case study with respect to altitude, exposure and soil moisture. Tellus serie B Chemical and Physical Meteorology, 53, 593-611.

Vincent, J.S., 1989. Le quaternaire du sud-est du Bouclier Canadien. Le quaternaire du Canada et du Groenland, chap. 3, Commission géologique du Canada, Ottawa, 266-295.

Wang, L., Payette, S., Bégin, Y., 2001. 1300-year tree-ring width and density series based on living, dead and subfossil black spruce at tree-line in subarctic Québec, Canada. A Holocene, 11, 333-341.

Warren, C.R., McGrath, J.F., Adams, M.A., 2001. Water availability and carbon isotopes discrimination in conifers. Oecologia, 127, 476-486.

Waterhouse, J.S., Barker, A.C., Carter, A.H.C., 2000. Stable isotopes in Scots pine tree rings preserve a record of flow of the river Ob. Geophysical Research Letters, 27, 3529-3532.

Wershaw, R.L., Friedman, I., Heller, S.J., 1966. Hydrogen isotope fractionation in water passing through trees. In: Hobson, F., Speers, M. (Eds.), Advances in Organic Geochemistry, Pergamon, New York, pp. 55-67.

Wilson, A.T., Grinsted, M.J., 1977. $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ in cellulose and lignin as paleothermometers. Nature (London) 265, 133-135.

Wilson, C., 1992. 'Climate in Canada, 1809-1820: Three Approaches to the Hudson's Bay Company, Archives as an Historical Database', in Harington, C. R. (ed.), The Year Without a Summer? World Climate in 1816, Natl. Museum of Science, Ottawa, Canada, pp. 162-184.