



Ressources naturelles  
Canada

Natural Resources  
Canada

**COMMISSION GÉOLOGIQUE DU CANADA  
DOSSIER PUBLIC 8768**

**Utilisation des archives naturelles pour la reconstitution  
du passé hydro-climatique**

**Sous la direction de**

**C. Bégin, A. Nicault et Y. Bégin**

**2021**

**Canada**



## COMMISSION GÉOLOGIQUE DU CANADA DOSSIER PUBLIC 8768

# Utilisation des archives naturelles pour la reconstitution du passé hydro-climatique

Sous la direction de

**C. Bégin<sup>1</sup>, A. Nicault<sup>2</sup> et Y. Bégin<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Commission géologique du Canada, 490, rue de la Couronne, Québec (Québec) G1K 9A9

<sup>2</sup>Association pour l'Innovation et la Recherche au service du Climat, AIR Climat, Marseille, France

<sup>3</sup>Institut national de la recherche scientifique, 490, rue de la Couronne, Québec (Québec) G1K 9A9

**2021**

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2021

Le contenu de cette publication ou de ce produit peut être reproduit en tout ou en partie, et par quelque moyen que ce soit, sous réserve que la reproduction soit effectuée uniquement à des fins personnelles ou publiques mais non commerciales, sans frais ni autre permission, à moins d'avis contraire.

On demande seulement :

- de faire preuve de diligence raisonnable en assurant l'exactitude du matériel reproduit;
- d'indiquer le titre complet du matériel reproduit et le nom de l'organisation qui en est l'auteur;
- d'indiquer que la reproduction est une copie d'un document officiel publié par Ressources naturelles Canada (RNCAN) et que la reproduction n'a pas été faite en association avec RNCAN ni avec l'appui de celui-ci.

La reproduction et la distribution à des fins commerciales sont interdites, sauf avec la permission écrite de RNCAN. Pour de plus amples renseignements, veuillez communiquer avec RNCAN à [nrcan.copyrightdroitdauteur.rncan@canada.ca](mailto:nrcan.copyrightdroitdauteur.rncan@canada.ca).

Lien permanent : <https://doi.org/10.4095/328045>

On peut télécharger cette publication gratuitement à partir de GEOSCAN (<https://geoscan.rncan.gc.ca/>).

### Notation bibliographique conseillée

Bégin, C., Nicault, A. et Bégin, Y. (éd.), 2021. Utilisation des archives naturelles pour la reconstitution du passé hydro-climatique; Commission géologique du Canada, Dossier public 8768, 211 p.  
<https://doi.org/10.4095/328045>

Les publications de cette série ne sont pas révisées; elles sont publiées telles que soumises par l'auteur



# Utilisation des archives naturelles pour la reconstitution du passé hydro-climatique

Sous la direction de  
**Christian Bégin, Antoine Nicault et Yves Bégin**

Projet ARCHIVES : Synthèse

**Photo en couverture : Pessière à lichens ouverte dans le secteur de La Grande-4.  
Photo de A. Nicault**

# Table des matières

<b>Préface</b>	<b>10</b>
<b>Remerciements</b>	<b>12</b>
<b>Sommaire</b>	<b>14</b>
<b>Overview</b>	<b>17</b>
<b>Introduction</b>	<b>20</b>
L'évolution des conditions climatiques	20
L'hydraulité, le fondement énergétique du Québec	20
Estimation de la tendance des apports en eau, une question d'échelle temporelle	22
Origine du projet ARCHIVES	22
Mise en place de l'équipe ARCHIVES, phase 1	23
Le projet ARCHIVES, phase 2	24
Les objectifs du projet ARCHIVES	25
<b>Première partie : Les données et les indicateurs permettant de reconstituer le passé</b>	<b>26</b>
<b>1. La dendrochronologie au service de l'hydrologie</b>	<b>27</b>
Résumé	27
Abstract	27
Les cernes des arbres : anatomie, structure et composition	27
Les caractéristiques du bois donnant des informations hydroclimatiques	31
Les facteurs de croissance : principe des facteurs limitants	32
Approches en dendrohydrologie	34
<b>2. La dendroisotopie</b>	<b>39</b>
Résumé	39
Abstract	39
Les isotopes stables du carbone et de l'oxygène, et les processus naturels	39
Le traitement et l'analyse isotopique des cernes de croissance	41
La dendroisotopie, une archive des changements environnementaux	42
<b>3. Les séries dendroisotopiques et leur signification climatique</b>	<b>45</b>
Résumé	45
Abstract	45
Introduction - Les avantages de l'analyse dendroisotopique	46
La production des séries dendroisotopiques	46
Les séries $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{18}\text{O}$	47
La relation entre les rapports isotopiques et les paramètres climatiques	48
Interprétation et conclusion	51
<b>4. L'analyse des sédiments lacustres</b>	<b>53</b>
Résumé	53
Abstract	53
Introduction	53
Les sédiments varvés (annuellement laminés)	54
À la recherche des varves	54
Les laminations sont-elles des varves ?	56
Construire des séries sédimentologiques	56
Lier les propriétés des varves aux conditions environnementales	56

Les reconstructions paléo-environnementales _____	57
Perspectives _____	58
Conclusion _____	58
<b>5. Données climatologiques et nivométriques du projet ARCHIVES _____</b>	<b>60</b>
Résumé _____	60
Abstract _____	60
Les données météorologiques aux stations _____	60
Les données aux points de grilles _____	60
Les observations : les lignes de neige _____	61
Les données ÉEN aux points de grilles _____	62
Conclusion _____	63
<b>Deuxième partie : Le traitement et la signification des données et des indicateurs _____</b>	<b>64</b>
<b>6. Établissement de la base de données de référence ARCHIVES _____</b>	<b>65</b>
Résumé _____	65
Abstract _____	65
Sélection des peuplements en vue du développement d'un réseau dendrochronologique _____	66
Aire d'échantillonnage du réseau ARCHIVES _____	68
Réseau de lacs pour la construction des dendroséries millénaires _____	69
Séquences de sédiments lacustres laminés _____	69
Données hydro-climatiques disponibles _____	70
<b>7. Le climat et les très grands feux à la Baie de James _____</b>	<b>71</b>
Résumé _____	71
Abstract _____	71
Problématique des feux dans la région de la Baie de James _____	71
Une méthode originale pour reconstituer les chevauchements de feux _____	73
La taille des feux et le climat depuis le début du XIX <sup>e</sup> siècle _____	76
Le risque de grands feux _____	76
<b>8. Analyse des relations entre le climat et les séries temporelles de densité de cerne _____</b>	<b>78</b>
Résumé _____	78
Abstract _____	78
Introduction _____	78
Bilan des données densitométriques disponibles sur la région d'étude _____	79
Construction des séries temporelles de densité des cernes _____	79
Analyse des relations entre la densité des cernes et le climat _____	80
Faible dépendance des densités minimales à la variabilité climatique _____	81
Forte sensibilité des densités maximales aux températures estivales _____	81
Observation d'un phénomène de divergence pour certains sites _____	84
Recherche d'un déterminisme environnemental de la variabilité interstationnelle de la relation entre la densité maximale des cernes et la température estivale _____	85
Conclusion _____	86
<b>9. Influence des variations interannuelles du climat sur la croissance radiale des épinettes noires _____</b>	<b>88</b>
Résumé _____	88
Abstract _____	88
Introduction _____	88
Données dendrochronologiques et climatologiques _____	89
Affinité régionale entre les séries dendrochronologiques _____	90
Influence du climat sur la variabilité interannuelle de la croissance _____	91
Analyse spatiale – les relations cernes-climat varient selon les patrons climatiques du Nord québécois _____	94
Conclusion _____	95

<b>10. Des arbres virtuels pour reconstituer les variations climatiques : une approche basée sur les processus écophysologiques</b>	<b>97</b>
Résumé	97
Abstract	97
Introduction	97
Modélisation des échanges gazeux à l'interface canopée-atmosphère	98
La modélisation écophysologique de la croissance de l'épinette noire	100
L'inversion des modèles écophysologiques : un nouvel outil de reconstitution	104
Conclusion	106
<b>11. Développement d'un modèle hiérarchique Bayésien appliqué aux épaisseurs de cernes</b>	<b>108</b>
Résumé	108
Abstract	108
Introduction	108
Qu'est-ce qu'un modèle statistique ?	109
Complexité, modularité, efficacité	109
Le modèle DENDRO-AR(1)	110
Le modèle de processus	110
Le modèle de régression	111
Le modèle d'échantillonnage	111
Exemple : application aux arbres du site TS	111
Application aux séries temporelles de cernes du projet ARCHIVES	112
Analyse spatiale du signal Z(t)	114
Conclusion	114
<b>12. Contexte paléoenvironnemental d'un lac à troncs subfossiles</b>	<b>116</b>
Résumé	116
Abstract	116
Introduction	116
Site d'étude	116
Analyse pédoanthracologique	117
Analyse des sédiments lacustres	118
Conclusion	119
<b>Troisième partie : Analyse rétrospective de l'hydro-climat des derniers siècles</b>	<b>121</b>
<b>13. Reconstitution de l'amplitude des crues printanières passées dans le bassin versant de La Grande Rivière</b>	<b>122</b>
Résumé	122
Abstract	122
Introduction	122
Les crues glacielles et leur enregistrement par la végétation riveraine	123
La rivière Nécopastic	124
Le lac de la Corvette	125
Reconstitution des crues printanières au réservoir Caniapiscau	126
Vers une reconstitution des crues printanières à l'échelle régionale	128
Conclusion	128
<b>14. Analyse des changements de régimes dans les séries temporelles issues de la dendrochronologie</b>	<b>130</b>
Résumé	130
Abstract	130
Le passé hydrométéorologique est-il garant de l'avenir ?	131
Mélanges de lois avec structure de dépendance temporelle	132
Application aux températures estivales et aux apports en eau reconstitués	134

Spécification des lois <i>a priori</i> , échantillonnage de Gibbs et sélection de modèle	135
Longue série de températures estivales reconstituées	135
Séries d'apports en eau annuels reconstitués	138
Conclusion et perspectives	141
<b>15. Reconstitutions hydroclimatiques basées sur les séries dendroisotopiques</b>	<b>143</b>
Résumé	143
Abstract	143
Introduction	143
Reconstituer les conditions du passé à partir des dendroisotopes	144
Conditions hydroclimatiques des deux derniers siècles	145
Validation des séries reconstituées	147
Conclusion	150
<b>16. Reconstitution des apports en eau des deux derniers siècles : approche méthodologique.</b>	
<b>Application au réservoir Caniapiscou (Complexe La Grande, Québec)</b>	<b>152</b>
Résumé	152
Abstract	152
Introduction	153
Les données dendrochronologiques	154
Chronologies des épaisseurs de cernes	155
Chronologies issues de l'analyse densitométrique	155
Chronologies issues de l'analyse dendroisotopique	155
Les données hydrologiques	155
Méthode de reconstitution hydrologique	155
Évaluation des reconstructions	157
Évaluation des reconstitutions intermédiaires	157
Évaluation des reconstructions composites finales	158
Variabilité hydrologique au cours des deux derniers siècles	159
Conclusion	160
<b>17. Reconstitution des apports en eau et influence de la circulation atmosphérique sur la variabilité spatiotemporelle de l'hydrologie</b>	<b>162</b>
Résumé	162
Abstract	162
Introduction	162
Reconstitution des apports annuels et estivaux pour les bassins de LG2, LG4, Caniapiscou et Churchill Falls	163
Analyse de la variabilité inter-bassins	164
Recherche de l'influence de la circulation atmosphérique sur la variabilité spatiotemporelle de l'hydrologie	166
Les relations entre indices atmosphériques et variabilité hydrologique varient dans l'espace	167
Les relations entre indices atmosphériques et variabilité hydrologique varient dans le temps	168
Conclusion	169
<b>18. Longues séries dendrochronologiques établies à partir de troncs subfossiles</b>	<b>172</b>
Résumé	172
Abstract	172
Les longues séries dendrochronologiques	172
Les longues séries dendrochronologiques dans le monde	173
Le réseau de longues séries dendrochronologiques du projet ARCHIVES	174
Les arbres vivants dans les séries	175
L'effet du niveau des lacs sur les séries	176
L'influence des incendies du passé sur les séries	176
Dendroséries et températures estivales du dernier siècle	177
Dendroséries et climat du dernier millénaire	178
Les séries et le volcanisme	180

<b>19. Traitement et production d'une série dendroisotopique millénaire</b>	<b>183</b>
Résumé	183
Abstract	183
Introduction	184
Échantillonnage et traitement des échantillons	184
Sélection d'une méthode de découpe pour les tiges subfossiles	185
Traitement en laboratoire	185
Reconstitution climatique millénaire	186
Conclusion	187
<b>20. Les archives paléo-hydrologiques de Grand Lake, Labrador</b>	<b>188</b>
Résumé	188
Abstract	188
Introduction	188
Grand Lake, un lac aux conditions limnologiques exceptionnelles	189
Du fond du lac au laboratoire	189
Interpréter les données du passé à la lumière des données récentes	191
Un déclin des débits de crue depuis 150 ans?	191
Perspectives	192
Conclusion	192
<b>21. Comparaison entre les apports hydrologiques naturels observés, reconstitués et simulés</b>	<b>194</b>
Résumé	194
Abstract	194
Introduction	194
Descriptions des simulations régionales et globales	195
Évaluation sur la période 1960-2000	196
Évaluation sur la période 1850-2000	199
Conclusion	200
<b>Conclusion et perspectives</b>	<b>202</b>
Un vaste territoire à l'étude	202
Les feux : d'incontournables perturbations limitant les travaux de reconstitution dendrochronologique	202
Un historique hydrologique	202
Nouvelles approches : des modèles écophysiologiques inversés	203
Premières séries dendroisotopiques	203
Des reconstitutions « multi-proxies »	203
Des téléconnexions atmosphériques influentes	204
Détection des grands gradients et des zones climatiques	204
De nouvelles approches pour tester la robustesse temporelle des séries dendrochronologiques	205
Des dendroséries millénaires mises à jour	205
Première série dendroisotopique millénaire	205
Séquences sédimentaires varvées en appui aux reconstitutions dendrochronologiques	206
Des séries reconstituées versus simulées	206
Détection des changements de régime	206
ARCHIVES aura constitué un premier réseau dendrochronologique boréal dans l'Est canadien	207
Perspectives	207
<b>Liste des auteurs</b>	<b>211</b>

Le climat conditionne la vie et contribue à façonner le paysage, alors que ses nombreux aléas affectent de manière significative l'Homme et son environnement. De tout temps nous avons déployé des efforts importants pour comprendre les mécanismes régissant les phénomènes atmosphériques observés. La communauté scientifique s'accorde aujourd'hui pour reconnaître que l'évolution récente du climat ainsi ses caractéristiques projetées pourraient se distinguer singulièrement de toute observation historique. À l'échelle millénaire cette affirmation s'appuie sur des indicateurs indirects qui permettent d'étendre le registre des observations bien au-delà des séries obtenues au moyen de stations météorologiques telles que nous les connaissons aujourd'hui.

Une meilleure connaissance des conditions climatiques passées, actuelles et projetées permet de caractériser et d'anticiper les impacts potentiels du climat dans différents secteurs d'activités et de déployer des mesures d'adaptation afin d'en limiter les effets négatifs. À cause de ses conséquences malheureusement trop souvent délétères, on s'intéresse particulièrement aux événements météorologiques extrêmes dont l'occurrence augmente avec le temps. Bien que globalement négatifs, les impacts des changements climatiques peuvent aussi procurer des opportunités dans certains secteurs d'activités, c'est notamment le cas pour l'industrie hydro-électrique au nord-est du continent nord-américain là où l'eau pourrait être plus abondante au cours des prochaines décennies. Or, là où le Québec produit la majorité de son énergie depuis maintenant plus de 50 ans en exploitant la force vive de l'eau, on ne dispose pas de registres instrumentaux à long terme nous permettant d'inscrire la séquence climatique observée durant ce demi-siècle dans un contexte temporel plus étendu. Le projet ARCHIVES a donc été conçu de manière à reconstituer, par le biais de différents indicateurs sensibles au climat, la variabilité naturelle à long terme de nombreuses variables hydro-climatiques. Ces précieuses archives naturelles issues de la dendrochronologie, de la dendroisotopie et de l'analyse de sédiments lacustres auront permis aux chercheurs ayant contribué à cet innovant projet de recherche de reconstituer les conditions hydro-climatiques ayant prévalu au cours des deux derniers siècles dans le Haut-Boréal québécois.

Les efforts concertés de l'équipe de recherche multidisciplinaire regroupant climatologues, hydrologues, dendrochronologues, géographes, géomaticiens, statisticiens et ingénieurs aura permis de réaliser un travail colossal au gré des amitiés pérennes qu'il a vu naître. Le présent ouvrage présente une synthèse de cette importante contribution scientifique allant de l'échantillonnage de données en milieu parfois hostile jusqu'à la reconstitution du climat sur deux siècles, en passant par un traitement exhaustif des échantillons prélevés sur le terrain et l'établissement de modèles empiriques et statistiques reliant climat et indicateurs naturels multiples.

Les connaissances acquises à travers les travaux de l'équipe de projet ARCHIVES permettent maintenant aux gestionnaires de cette précieuse ressource qu'est l'eau de mieux situer la période d'observation dans un contexte multi séculaire, et par conséquent de mieux exploiter les ouvrages hydrauliques existants et les besoins en équipements futurs. Je salue cette magistrale contribution à l'avancement des connaissances et vous souhaite une bonne lecture.

**René Roy**

Directeur de la programmation scientifique  
Ouranos (au moment de réaliser le projet ARCHIVES)



**Barrage principal au réservoir Robert-Bourassa (LG-2).**  
Photo de C. Bégin. Photo RNCAN 2021-125

## Remerciements

Le projet ARCHIVES a été réalisé par une équipe pluridisciplinaire de chercheurs constituée pour explorer de façon originale la possibilité d'étendre vers le passé la connaissance de l'hydraulité nordique. Ce projet a forcé l'interdisciplinarité et a nécessité la définition de nouveaux paradigmes dans l'étude des apports hydrauliques. L'équipe comprenait des biologistes, géographes, physiciens, forestiers et statisticiens, travaillant ensemble à la construction d'un savoir combiné en écologie, en paléoclimatologie, en hydrologie et en climatologie, tout en innovant au plan méthodologique (dendroisotopie, dendrohydrologie, modélisation, etc.). Au cours des années, l'équipe s'est enrichie de la participation de nombreux experts provenant du milieu universitaire, d'Hydro-Québec, d'Ouranos, de la Commission géologique du Canada et d'Environnement et Changement climatique Canada. D'ailleurs tous se sont collectivement investis dans la formation de nombreux étudiants à la maîtrise, au doctorat et de nombreux stagiaires doctoraux et post-doctoraux. Les principales universités de provenance des chercheurs ont été : l'Institut national de la recherche scientifique (INRS), l'Université du Québec à Rimouski (UQAR), l'Université du Québec à Montréal (GEOTOP-UQAM), l'Université Laval (Centre d'études nordiques), l'Université Aix-Marseille et le CEREGE en France, l'Université de Liège en Belgique et l'Université d'Helsinki en Finlande.

Le projet ARCHIVES a bénéficié de l'appui financier de plusieurs organismes :

Le Consortium OURANOS (Consortium sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques) et Hydro-Québec ont été partenaires de l'équipe de recherche en cofinçant le projet dans le cadre du programme de Recherche et Développement Coopératif du CRSNG (Conseil de recherche en sciences et génie du Canada). Cet appui a débuté par un projet financé sur deux cycles de trois ans et poursuivi sur un terme de cinq années supplémentaires.

Ressources naturelles Canada, par l'entremise de la Commission géologique du Canada (CGC), a été partenaire de tous les niveaux dans le projet ARCHIVES en contribuant par l'implication de chercheurs, en participant à la formation d'étudiants aux cycles supérieurs, en donnant accès et en appuyant activement le projet par ses laboratoires de Québec et en finançant une large part des travaux, à la fois sur le terrain et en laboratoire dans le cadre de son Programme sur la géoscience du changement climatique.

En plus de son indéfectible appui financier, Hydro-Québec par l'Institut de recherche d'Hydro-Québec, a contribué en affectant plusieurs chercheurs au projet, en facilitant la logistique sur le terrain dans le Nord par l'accès à ses infrastructures, ses aéronefs et ses indispensables données.

Par un sous-projet visant à reconstituer les ambiances climatiques pour l'avifaune boréale, Environnement-Canada (Service canadien de la faune) a permis d'étendre la banque de données dendrochronologiques au Labrador.

Ce projet a aussi bénéficié de l'appui financier du réseau de centres d'excellences ArcticNet, de l'appui logistique du Centre d'études nordiques, de l'accès à ses stations nordiques, et du soutien de la mobilité nordique des étudiants par le Programme de formation scientifique dans le Nord du ministère des Affaires indiennes et du Nord du Canada.

Cet ouvrage synthèse est maintenant disponible grâce au Programme sur la géoscience du changement climatique de la Commission géologique du Canada qui en a financé l'édition et la publication. Non seulement cet ouvrage valorise l'indispensable participation de ses équipes au projet ARCHIVES, mais permet à tous ses membres de faire enfin valoir l'enrichissante expérience qu'il a constituée pour tous ses participants.

L'Équipe ARCHIVES remercie les nombreuses personnes qui ont contribué de près ou de loin au projet. Les étudiants, les stagiaires, les professionnels de recherche et les collaborateurs ont été si nombreux qu'il serait difficile d'en rendre ici une liste exhaustive.

Enfin, notons que la finalisation éditoriale du travail, donnant lieu au présent document, a été menée de mains de maître par Lauriane Dinis de la CGC et que la révision interne de l'ensemble du manuscrit a été réalisée par Michel Parent, également de la CGC. Nous leur en sommes très reconnaissants.



Natural Resources  
Canada

Ressources naturelles  
Canada



Environnement et  
Changement climatique Canada

Environment and  
Climate Change Canada



UQAR UQÀM



Institut national  
de la recherche  
scientifique



Institut de recherche



Le Québec boréal est une des régions du globe où les changements climatiques ont été les plus marqués au cours des trente dernières années. Le climat s’y est réchauffé, mais aussi asséché avec une chute de plus de 15% des précipitations annuelles. La situation pourrait avoir des conséquences socio-économiques importantes dans la mesure où près de 50% de la production hydroélectrique de la province provient précisément de cette région. Pour situer la tendance récente des conditions hydro-climatiques dans une perspective à plus long terme que ne le permettent les courts registres climatologiques disponibles, le projet ARCHIVES a été lancé. Il a consisté à développer des moyens en vue de reconstituer la variabilité naturelle à long terme des paramètres hydro-climatiques intervenant dans le calcul et la prévision des apports en eau dans les bassins d’intérêt pour la production hydroélectrique. Ces moyens sont un ensemble d’indicateurs naturels (archives naturelles) sensibles au climat. Au terme de ce projet, les gestionnaires des ressources hydroélectriques ainsi que les autorités préoccupées par les changements climatiques peuvent profiter d’une meilleure connaissance de l’évolution dans le temps et dans l’espace des conditions hydro-climatiques qui pourra faciliter l’élaboration de scénarios hydrologiques appropriés pour cette région sensible à bien des égards aux changements climatiques.

L’équipe ARCHIVES a réalisé un projet quinquennal couvrant l’ensemble de la zone boréale du Québec et d’une partie du Labrador à l’emplacement des complexes de production hydroélectrique. Le projet aura permis de produire près de deux cents séries dendrochronologiques de référence d’arbres vivants (2200 arbres) dont environ la moitié couvrent près de 200 ans, six séries plus que millénaires à partir de plus de 2500 troncs subfossiles, quatre séries dendroisotopiques du carbone et de l’oxygène (4-5 séries individuelles par site) couvrant les deux derniers siècles et une couvrant l’ensemble du dernier millénaire ainsi que deux longues séquences sédimentaires varvées. L’étendue du réseau devait permettre la comparaison et la covalidation des registres interpolés sur points de grille avec les projections des modèles climatiques régionaux et globaux. Les objectifs spécifiques étaient :

- 1) de reconstituer, sur les deux derniers siècles et à haute résolution temporelle, les paramètres hydro-climatiques qui déterminent les apports en eau dans les bassins d’intérêt pour la production hydroélectrique dans le Haut-Boréal québécois,
- 2) d’analyser la variabilité spatiale et temporelle du climat boréal québécois i) en produisant des valeurs reconstituées pour les mêmes points de grille que ceux utilisés par les simulateurs climatiques et ii) en étendant l’échelle temporelle considérée au dernier millénaire grâce à l’utilisation des troncs d’arbres subfossiles dans les lacs boréaux et de longues séries sédimentaires, et
- 3) de confronter ces reconstitutions aux sorties du Modèle Régional Canadien du Climat (MRCC), soit les séries temporelles reconstituées sur la période instrumentale de référence de 50 ans et les statistiques de distribution modélisées sur les 150 dernières années, afin de tester la fiabilité des modèles climatiques et de comprendre les forçages agissant sur les variations hydro-climatiques de la région d’étude.



Cet ouvrage synthèse est structuré en trois parties. La première partie regroupe cinq chapitres présentant des notions fondamentales et prérequis pour la lecture des autres sections de l'ouvrage. Les principes de la dendrohydrologie, de la dendroisotopie et de la construction des séries sont présentés respectivement aux chapitres 1 à 3. Outre les indicateurs indirects (« proxies ») fournis par les cernes annuels des arbres, ARCHIVES a aussi exploré les laminations sédimentaires annuelles de lacs comme indicateur indépendant des variations hydro-climatiques passées (Chapitre 4). Enfin, les données climatologiques et nivométriques utilisées dans l'ensemble des chapitres sont présentées au chapitre 5.

La deuxième partie de cette synthèse présente le traitement et la signification des indicateurs. D'abord, l'effort d'échantillonnage sur le vaste territoire boréal allant de la baie de James au Labrador est détaillé au chapitre 6. Cette région est soumise à de grands incendies forestiers; une dimension se trouvant en filigrane de toute reconstitution paléoenvironnementale (Chapitre 7). Selon les indicateurs étudiés, comme la densité des tissus ligneux (Chapitre 8) et la largeur des cernes annuels (Chapitre 9), la signature des facteurs hydro-climatiques est différente et offre des informations complémentaires sur les conditions passées. Les chapitres 10 et 11 présentent deux approches originales pour l'interprétation de la signature dendrochronologique des conditions passées. La première (Chapitre 10) se fonde sur la connaissance des processus écophysologiques permettant de modéliser la réponse des arbres aux conditions hydro-climatiques. La deuxième (Chapitre 11) expose les principes d'une approche Bayésienne dans le traitement du signal constituant la réponse des arbres aux conditions passées. Enfin, la combinaison d'indicateurs paléoenvironnementaux dans les longues séquences sédimentaires est explorée au chapitre 12.

La troisième partie de l'ouvrage propose une analyse rétrospective de l'hydro-climat au cours des derniers siècles, voire des millénaires selon les indicateurs. Le chapitre 13 propose une application des principes permettant d'utiliser la réaction des arbres pour identifier des événements hydro-géomorphologiques extrêmes, en particulier les crues glacielles printanières. Les changements de régime sont étudiés au moyen de modèles bayésiens de mélanges de lois statistiques et de processus markoviens cachés; une dimension exploitée chez Hydro-Québec pour la connaissance fine des changements hydrologiques influant sur l'hydraulicité (Chapitre 14). Les chapitres 15 et 16 présentent respectivement des reconstitutions d'apports en eau et de variables associées au moyen de la dendroisotopie et de la combinaison de différents proxies. Les forçages atmosphériques sont connus pour influencer les régimes de précipitations et de températures et sont des variables explicatives dans plusieurs modèles de prévision. Ils sont examinés au chapitre 17 dans une perspective spatio-temporelle au moyen de la dendrochronologie. L'extension des séries à l'échelle millénaire est détaillée aux chapitres 18 et 19, par l'interdation de bois subfossiles et l'exploitation de différents proxies comme les largeurs de cernes et les isotopes stables de l'oxygène. Au chapitre 20, les longues séries sédimentaires laminées du Grand Lake au Labrador offrent une nouvelle perspective pour l'exploitation d'indicateurs indépendants de la dendrochronologie. Enfin, le chapitre 21 répond à l'objectif final du projet ARCHIVES à savoir l'exploitation combinée des données mesurées, qu'elles soient directes (données hydro-climatologiques) ou indirectes (dendrochronologie), et des données modélisées (utilisation des modèles régionaux et globaux).

Les résultats du projet ARCHIVES ont permis de délimiter quatre zones d'influence climatique sur le territoire et de mettre en évidence les gradients écoclimatiques altitudinaux, latitudinaux et de



continentalité. L'influence marquée de forçages, comme les éruptions volcaniques, sur les températures a été mise en évidence. De telles éruptions ont des effets sur plus de deux décennies à chaque événement. Les apports en eau sont en augmentation de façon générale, mais leur variabilité intra-annuelle augmente. L'hydro-climat est sous la dépendance des grands patrons de circulation atmosphériques bien exprimés par les indices de télé-connexion de l'oscillation Nord-Atlantique et de l'Oscillation Arctique. Les écarts interannuels de l'hydraulicité des réservoirs du Nord se situent dans l'amplitude des variations naturelles et ne définissent pas la tendance à long terme. C'est plutôt le contraire, car même si les dernières décennies ont été marquées par de relativement faibles apports en eau, la tendance séculaire est plutôt à la hausse. Le projet ARCHIVES a permis de combler le vide apparent de données paléo-climatiques détaillées dans le Nord-Est de l'Amérique, et ainsi de fournir de nouvelles données à la communauté scientifique pour mieux anticiper l'évolution future du climat dans le contexte des travaux du Groupe Intergouvernemental pour l'Étude du Climat (GIEC). Hydro-Québec et Ouranos ont largement contribué aux travaux de l'équipe universitaire et de la Commission géologique du Canada, et ils sont utilisateurs des nombreux outils et données issus du projet ARCHIVES.

Boreal Québec is one of the regions of the world where climate change has been the most marked over the past thirty years. The climate has warmed up, but also dried up, with a drop of more than 15% in annual precipitation. The situation could have serious socio-economic consequences as nearly 50% of the province's hydroelectric production comes precisely from this region. To situate the recent trend in hydro-climatic conditions in a longer perspective than that allowed by the short climatological records available, the ARCHIVES project was launched. It consisted in developing a new methodological approach aimed at reconstituting the long-term natural variability of the hydro-climatic parameters used in the modeling of water inputs in basins of interest for hydroelectric production. These resources are a set of natural indicators (natural archives) sensitive to climate. Following this project, the managers of hydroelectric resources as well as the authorities concerned about climate change can benefit from a better knowledge of the evolution in time and space of the hydro-climatic conditions that could facilitate the development of appropriate hydrological scenarios for this region sensitive in many respects to climate change.

The ARCHIVES team completed a five-year project covering the entire boreal zone of Quebec and part of Labrador at the location of the hydroelectric production complexes. The project has produced nearly two hundred tree-ring reference chronologies from living trees (2200 trees), half of which cover nearly 200 years, six millennial series built from 2500 subfossil trunks, four carbon and oxygen dendroisotopic series (4-5 individual series per site) covering the last two centuries and one covering the last millennium, as well as two long varved sediment sequences. The scope of the network was to allow comparison and covalidation of grid interpolated registers with projections from regional and global climate models. The specific objectives were:

- 1) to reconstruct, over the last two centuries and at high temporal resolution, the hydro-climatic parameters involved in the modeling of water inputs in basins of interest for hydroelectric production in Québec's Boreal zone,
- 2) to analyze the spatial and temporal variability of the Québec boreal climate i) by producing reconstituted values for the same grid points as those used by climate simulators, and ii) by extending the temporal scale to the last millennium based on subfossil materials drowned in boreal lakes, and
- 3) to compare these reconstructions with the outputs of the CRCM (Canadian Regional Climate Model). It consists in the time series reconstructed over the reference instrumental period of 50 years and the statistical distributions modeled over the last 150 years, in order to test the reliability of the climate models and to understand the forcings that act on hydro-climatic variations in the study region.

This summary report is structured in three parts. The first part gathers five chapters presenting basic concepts and prerequisites for reading the other sections of the book. The principles of dendrohydrology, dendroisotopy and the construction of time series are presented in chapters 1 to 3 respectively. In addition to the “proxies” provided by the annual rings of trees, ARCHIVES also exploited the annual sedimentary laminations of lakes as an independent indicator of past hydro-



climatic variations (Chapter 4). Finally, the climatological and snowfall data used in all the chapters are presented in Chapter 5.

The second part of this report presents the treatment and meaning of the indicators. First, the sampling effort over the vast boreal territory stretching from James Bay to Labrador is detailed in Chapter 6. This region is subject to major forest fires; a dimension that lies behind any paleoenvironmental reconstruction (Chapter 7). Depending on the indicator, such as the density of woody tissues (Chapter 8) and the width of annual rings (Chapter 9), the signature of the hydro-climatic factors is different and provides additional information on past conditions. Chapters 10 and 11 present two original approaches for interpreting the dendrochronological signature of past conditions. The first (Chapter 10) is based on the knowledge of ecophysiological processes allowing modelling the response of trees to hydro-climatic conditions. The second (Chapter 11) presents the principles of a Bayesian approach in the processing of the signal constituting the response of trees to past conditions. Finally, the combination of paleoenvironmental indicators in long sedimentary sequences is explored in Chapter 12.

The third part of the synthesis offers a retrospective analysis of the hydro-climate over the past centuries, and even over the millennia, depending on the indicators. Chapter 13 proposes an application of the principles guiding the detection of the reaction of trees to extreme hydrogeomorphological events, in particular spring ice floods. Regime changes are studied by means of mixtures of probability distributions and hidden Markov models; a dimension exploited by Hydro-Québec for detailed knowledge of hydrological changes influencing the hydraulicity (Chapter 14). Chapters 15 and 16 present respectively reconstructions of water supply and associated variables by means of dendroisotopy, and by using the combination of different proxies. Atmospheric forcings are known to influence precipitation and temperature regimes and are an explanatory variable in several forecasting models. They are examined in Chapter 17 from a spatiotemporal perspective using dendrochronology. The extension of the series to the millennial scale is detailed in Chapters 18 and 19, through the analyses of subfossil woods and the exploitation of various proxies such as ring widths and oxygen stable isotopes. In Chapter 20, the long laminated sediment series of Grand Lake in Labrador offer a new perspective for the exploitation of independent indicators of dendrochronology. Finally, chapter 21 responds to the final objective of the ARCHIVES project, that is the combined use of measured data, whether direct (hydro-climatological data) or indirect (dendrochronology) and modeled data (use of regional and global models).

The results of the ARCHIVES project made it possible to delimit four zones of climatic influence over the territory and to highlight the altitudinal, latitudinal and continental ecoclimatic gradients. The marked influence of forcings, such as volcanic eruptions, on temperatures has been highlighted. The effects of such eruptions are felt over more than two decades each time. Water supplies are generally increasing, but their intra-annual variability is increasing. The hydro-climate is dependent on the great atmospheric circulation patterns well expressed by the North Atlantic Oscillation and the Arctic Oscillation tele-connection indices. The interannual variations in the hydraulicity of northern reservoirs are within the range of natural variations and do not define the long-term trend. Conversely, because even if the last decades have been marked by relatively low water supplies, the secular trend is rather upward. The ARCHIVES project made it possible to fulfill the apparent gap of detailed paleo-climatic data in North-Eastern America, and thus to provide new data to the scientific community to better anticipate future climate change in the context of

the work of the Intergovernmental Group of experts on Climate Change (IPCC). Hydro-Québec and Ouranos have largely contributed to the work of the university and GSC team and they are users of the many tools and data resulting from the ARCHIVES project.



**Station météorologique du Centre d'études nordiques (CEN)  
sur une île du réservoir Robert-Bourassa.  
Photo de C. Bégin. Photo RNCan 2021-126**

**Yves Bégin, Christian Bégin et Antoine Nicault**

## L'évolution des conditions climatiques

Des observations intéressantes motivant nos recherches ont été soulevées par le rapport synthèse du GIEC (Fifth Assessment report (AR5), 2014) et dans les rapports spéciaux sur le changement climatique publiés en vue de préparer l'AR6 dont la synthèse est attendue en 2022. Le GIEC insiste sur le caractère exceptionnel des conditions actuelles dans l'histoire de la planète. On mentionne par exemple que les concentrations de CO<sub>2</sub> provenant à 80% de la combustion fossile et à 20% de la déforestation, de même que les apports massifs de CH<sub>4</sub> et de N<sub>2</sub>O par l'agriculture, présentent des maxima inégalés depuis 650 000 ans. On estime par ailleurs que depuis 1995, les conditions n'ont jamais été aussi chaudes depuis plus de 1000 ans. En ce qui a trait au passé plus rapproché, de récentes données de l'Agence américaine pour l'océanographie et l'atmosphère (NOAA, 2015), indiquent que les sept premiers mois de l'année 2015 ont été aussi les plus chauds jamais enregistrés. Évidemment, comme les registres instrumentaux à l'échelle planétaire ne couvrent pas plus de 150 ans, voire bien moins dans plusieurs régions, on ne peut qu'avoir recours à des données indirectes pour établir une comparaison entre la période récente et la période préindustrielle. La fonte des glaces pérennes de l'Arctique, des glaciers continentaux et du pergélisol et la hausse du niveau marin sont autant d'indications inéluctables d'une tendance planétaire au réchauffement. Mais, à l'image du passé, les modifications récentes du climat ne s'opèrent pas de façon uniforme à l'échelle du globe; certaines régions sont touchées plus sévèrement que d'autres. Il est

d'ores et déjà connu que les régions froides, notamment celles du continent nord-américain, ont connu récemment et continueront de connaître au cours des prochaines décennies une hausse plus marquée des températures. À cause de la sensibilité de ces régions marginales, les effets physiques, écologiques et économiques du changement climatique y sont nombreux. Au Québec, depuis maintenant plus d'une décennie, le consortium OURANOS sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques se penche sur la science du climat, les incidences du changement climatique et les mesures d'adaptation qui devraient être mises en oeuvre pour faire en sorte que si la tendance mondiale ne peut être inversée, le Québec puisse être suffisamment résilient pour maintenir la qualité de vie et la sécurité de la population, sa vitalité économique et la durabilité de ses ressources.

## L'hydraulité, le fondement énergétique du Québec

L'énergie est un secteur dans lequel le Québec a su investir en convertissant sa production initialement fondée sur les combustibles fossiles vers l'utilisation des forces hydrauliques pour produire de l'énergie. L'hydroélectricité est alors devenue un secteur fleuron du Québec en lui conférant une grande autonomie énergétique et en le plaçant au rang des leaders mondiaux de la production d'énergie propre. Alors que la majorité des centrales de la vallée du Saint-Laurent turbinent les apports hydrologiques au fil de l'eau, celles du Nord (Baie de James principalement) sont alimentées à la demande par l'eau retenue dans de vastes réservoirs aménagés (Figure 1). La gestion des

eaux est non seulement facilitée en étant plus indépendante des aléas à court terme des apports, mais elle est conservatrice de la ressource en la réservant entièrement à des fins productives.

Au moment de la conception des grands ouvrages hydroélectriques, on ne disposait que de très peu de données permettant l'évaluation des apports en eau.

Le réseau hydrométrique du Québec a été construit progressivement depuis le début des années 1960, si bien qu'au milieu des années 1970, alors que débutait la construction du complexe hydroélectrique jamésien de la Grande Rivière, il a fallu densifier le réseau et procéder à des études techniques pour estimer les apports (SEBJ, 1987). Les risques liés à la construction d'ouvrages sous ou surdimensionnés étaient amoindris

par le fait qu'il s'agissait d'ouvrages de retenue et que l'écoulement devenait entièrement sous contrôle. L'estimation des apports devint alors un exercice à incidence davantage économique, en confortant l'aménagement et la gestion des ouvrages pour assurer une desserte suffisante pour satisfaire la demande. L'évaluation du risque est alors un exercice complexe prenant en compte à la fois des considérations purement climatiques (moyenne et variations des apports traduits en térawatts-heure, et ultimement en revenus), comme d'autres reliées au marché concurrent d'autres sources d'énergie. Ainsi, l'avènement de l'exploitation des gaz de schistes aux USA a placé le Québec en surplus d'énergie et a fait baisser la valeur de l'hydroélectricité (et de l'énergie de source éolienne) sur le marché nord-américain. Mais l'hydraulité même

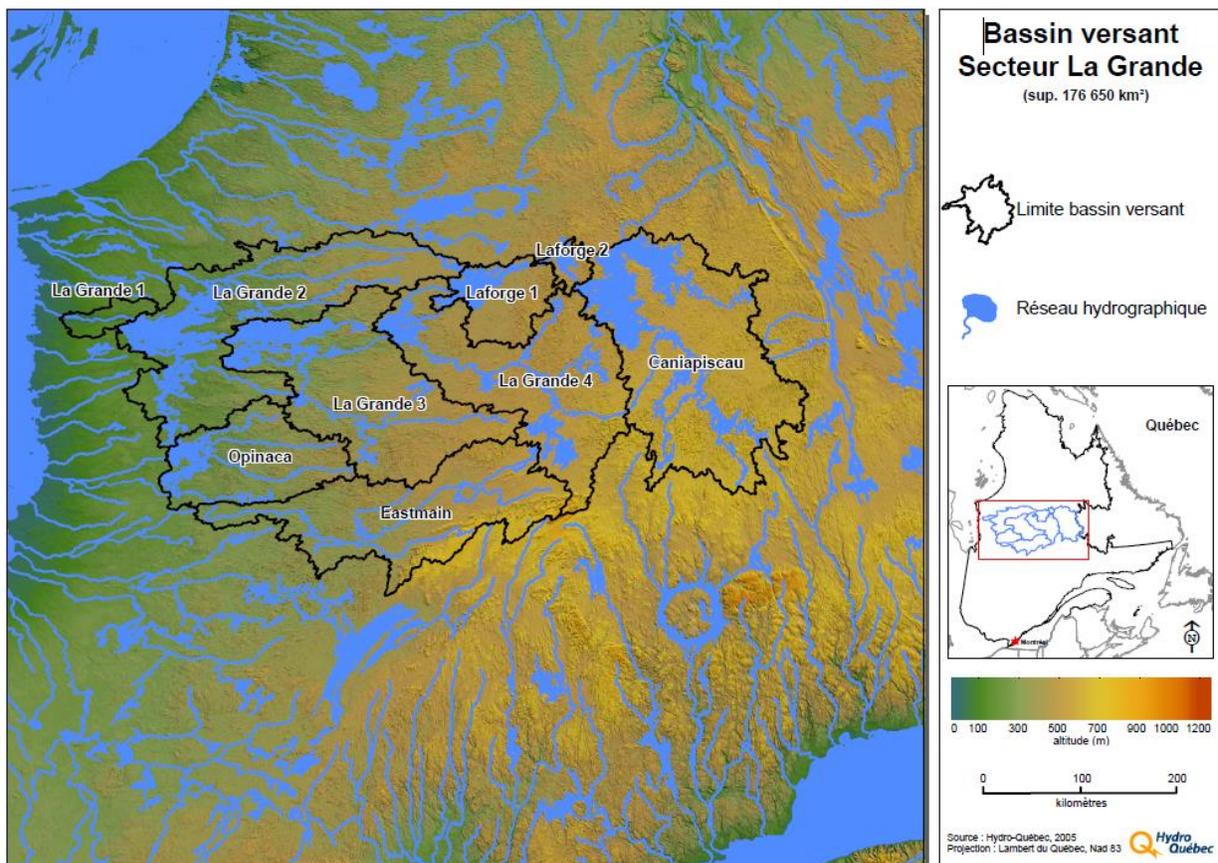


Figure 1. Le complexe hydroélectrique de la Grande Rivière en Jamésie québécoise et ses sous-bassins versants (Figure produite par Frédéric Guay (Hydro-Québec)).

(transformation de l'énergie potentielle de l'eau en énergie électrique) connaît une variabilité inter-saisonnière et interannuelle qui compte pour une part importante du risque financier auquel est confronté Hydro-Québec.

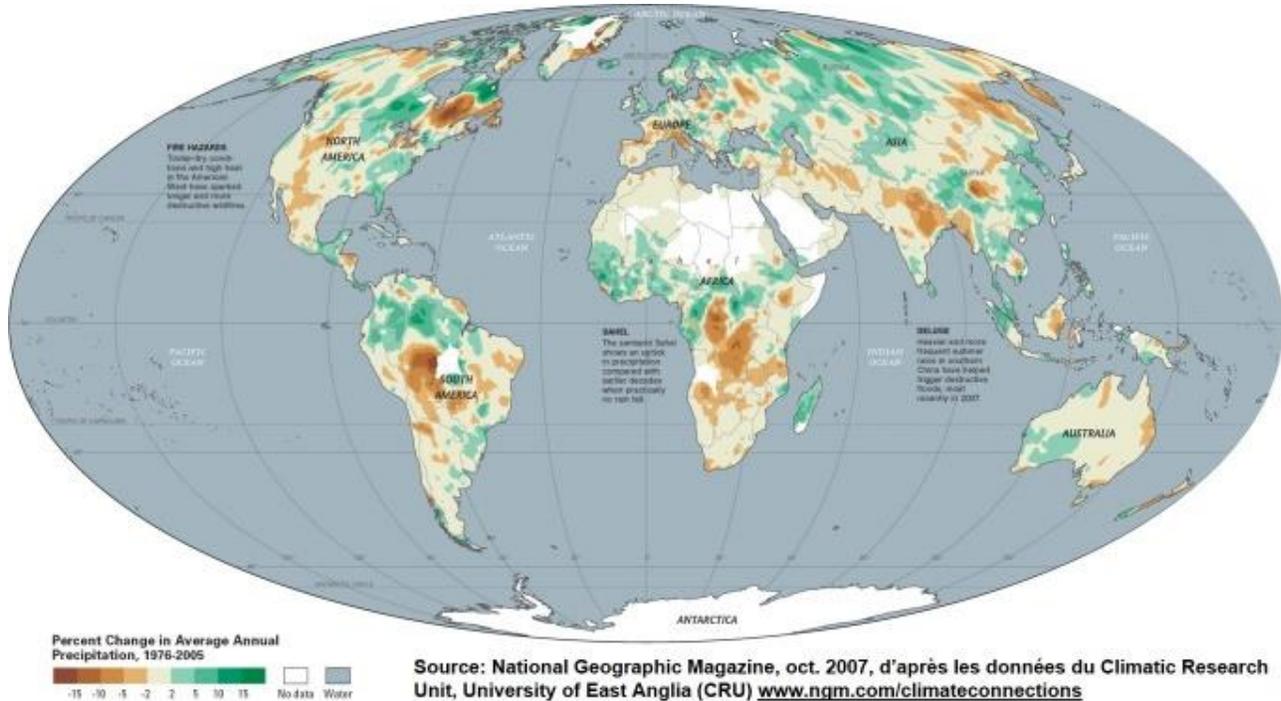
### Estimation de la tendance des apports en eau, une question d'échelle temporelle

Les changements du patron spatio-temporel des précipitations sont difficiles à cerner en raison de la grande variabilité spatiale des facteurs qui les contrôlent. Cependant, une compilation récente et mondiale des données du Climatic Research Unit (CRU) réalisée par la National Geographic Society (2007) montre de façon éloquent que l'Abitibi et le bassin québécois de la Baie de James constituent un des trois secteurs à l'échelle planétaire où la diminution des précipitations annuelles a été la plus marquée au cours des trente années allant de 1976 à 2007 avec un déficit de plus de 15% (Figure 2). Ce bilan négatif des précipitations n'est pas sans inquiéter les gestionnaires des ressources hydriques dans ce secteur aussi névralgique pour la production hydroélectrique au Québec. Il apparaît donc crucial d'inscrire cette incursion négative du régime hydrique dans une perspective spatiotemporelle beaucoup plus large. La couverture de données instrumentales qui permet de suivre les conditions météorologiques et les régimes hydrologiques est sporadique dans l'espace et discontinue dans le temps. Un laborieux traitement de données est donc nécessaire pour réhabiliter des séries en vue de les rendre utilisables pour étalonner les scénarios tirés des simulateurs du climat régional. Le recours aux indicateurs paléoclimatiques

(« proxies » : variables indicatrices remplaçant les variables mesurées) apparaît donc comme une voie incontournable pour compléter les registres instrumentaux dans le temps et dans l'espace.

### Origine du projet ARCHIVES

Le projet ARCHIVES a été mis en place afin de développer des moyens permettant de reconstituer la variabilité naturelle à long terme des paramètres hydro-climatiques qui déterminent les apports en eau dans les bassins d'intérêt pour la production hydroélectrique. Ces moyens sont un ensemble d'indicateurs naturels (archives naturelles) sensibles au climat. La recherche visait aussi à connaître la variabilité spatiale de ces paramètres sur une aire suffisamment grande pour permettre la comparaison des résultats à ceux que livrent les modèles régionaux du climat, comme le Modèle Régional Canadien du Climat (MRCC). Les données reconstituées sont d'ailleurs confrontées aux sorties de ces modèles pour en vérifier la validité et l'applicabilité. Enfin, pour certains secteurs clés, l'analyse de la variabilité temporelle des conditions hydro-climatiques est étendue au dernier millénaire en valorisant le matériel ligneux subfossile dans les lacs et les séquences d'apports sédimentaires sous le contrôle du débit des affluents. Au terme de ce projet, les gestionnaires des ressources hydroélectriques ainsi que les autorités préoccupées par les changements climatiques peuvent profiter d'une meilleure connaissance de l'évolution dans le temps et dans l'espace des conditions hydro-climatiques qui pourra faciliter l'élaboration de scénarios hydrologiques futurs appropriés pour les régions sensibles au changement climatique.



**Figure 2. Tendances des précipitations durant trois décennies à l'échelle planétaire.**

### Mise en place de l'équipe ARCHIVES, phase 1

En s'appuyant sur tout le potentiel qu'offrent les archives naturelles, l'équipe ARCHIVES a réalisé un premier projet exploratoire financé au programme Recherche et Développement Coopératif du Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et en Génie du Canada (2004-2007). L'objectif était de déterminer des indicateurs dendrochronologiques des variations hydro-climatiques au complexe hydroélectrique de La Grande Rivière dans le Moyen-Nord du Québec. Ce projet a permis de démarrer la constitution d'un réseau dendrochronologique de référence, de mettre en place un dispositif expérimental sur le terrain pour modéliser la relation entre les facteurs ambiants et la croissance des arbres, et de développer un cadre méthodologique en vue de la reconstitution des conditions hydro-climatiques passées. Les partenaires de l'équipe multidisciplinaire, Hydro-Québec et Ouranos, ont activement participé à toutes les étapes du projet. Ces

travaux préliminaires ont permis de faire la démonstration qu'un réseau dense de séries dendrochronologiques ainsi que l'utilisation combinée de plusieurs paramètres de cernes de croissance permet de reconstituer des variables comme les apports annuels au bassin, les apports estivaux et automnaux, les températures estivales, le volume de crue, le déficit de pression de vapeur, des indices de sécheresse estivale et des variables-indices permettant d'estimer les ambiances climatiques dans le temps, soit les phases chaudes et sèches, versus les phases fraîches et humides.

L'étude a aussi soulevé l'intérêt d'utiliser des approches différentes pour extraire le signal commun aux séries (construction de modèles de statistique Bayésienne avec variable latente, développement et application de modèles de croissance réversibles basés sur les processus modulés par les ambiances hydro-climatiques, et modèles de régression avec fonctions de réponse et de transfert). Cette combinaison d'approches permet aussi

d'étalonner les reconstitutions au moyen de séries instrumentales variées et indépendantes (registres climatologiques et hydrologiques). Enfin, une attention particulière a été portée à l'utilisation de « proxies » différents issus des cernes de croissance (largeurs de cernes, densités, isotopes stables). Il fallait notamment viser la quantification de l'erreur des reconstitutions. Ce travail a permis de démontrer que la dendrochronologie est une approche performante pour étendre dans le temps et dans l'espace les séries hydro-climatiques et qu'il est d'un grand intérêt d'affiner cette exploration en vue de produire de longues chronologies validées et utilisables chez Hydro-Québec. L'analyse rétrospective du climat antérieur à la période instrumentale est aussi d'intérêt chez Ouranos.

### Le projet ARCHIVES, phase 2

La seconde phase du projet ARCHIVES a débuté en 2008 (Figure 3). Elle s'inscrivait

dans la suite logique de l'approche scientifique et des résultats obtenus dans le projet initial. Les indicateurs dendrochronologiques les plus performants pour reconstituer les conditions hydro-climatiques étaient alors connus à l'emplacement de la zone principale de production hydro-électrique au Québec, soit le bassin de La Grande Rivière à la baie de James. Il fallait alors les valider, les utiliser pour reconstituer l'hydroclimat à l'échelle du Québec boréal, étendre les registres le plus loin possible dans le temps en tirant le meilleur profit des bois subfossiles et mettre à contribution les données de la dendrochronologie dans l'effort de modélisation du climat et de l'hydrologie dans les secteurs d'intérêt. On a aussi documenté le potentiel d'autres « proxies », notamment les séquences sédimentaires lacustres, en combinant leur interprétation à celle de la dendrochronologie dans une optique de co-validation.

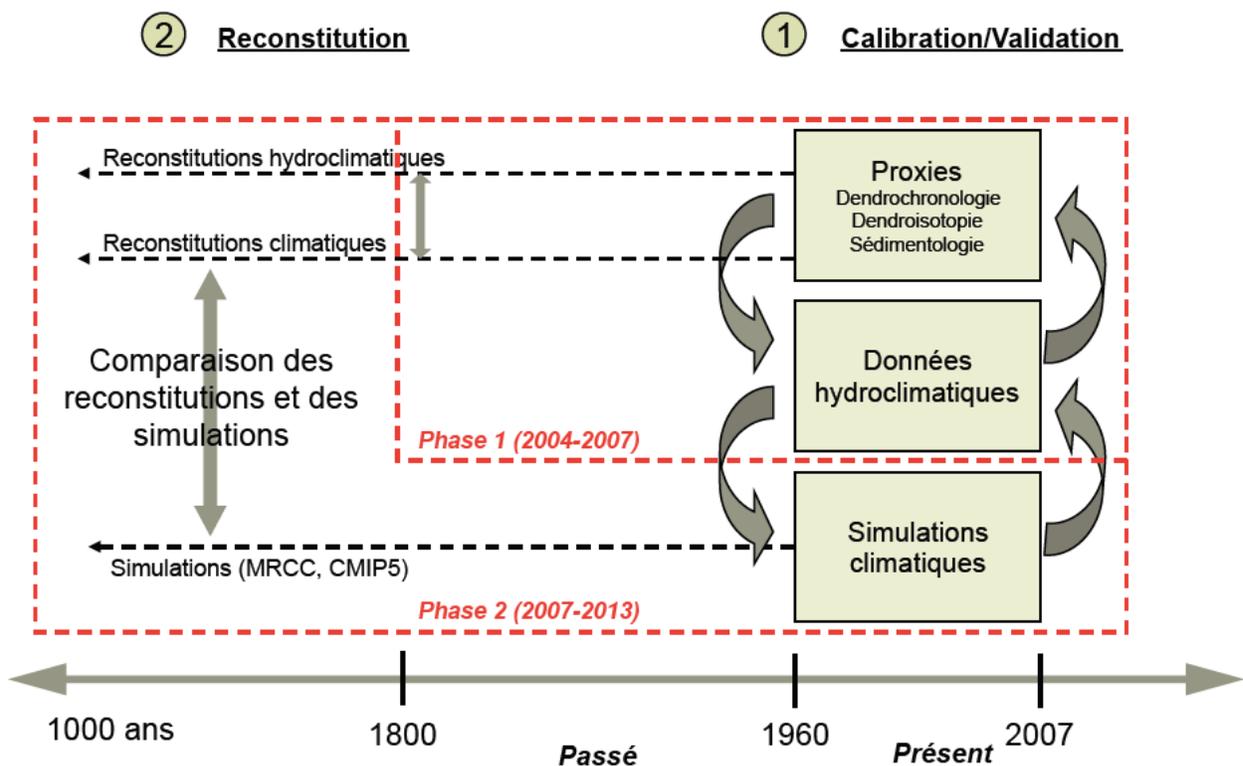


Figure 3. Schéma conceptuel des deux phases du projet ARCHIVES.

## Les objectifs du projet ARCHIVES

La phase 1 du projet ARCHIVES avait plus précisément pour objectifs de 1) construire un vaste réseau de séries dendrochronologiques de référence pour l'ensemble du territoire à l'étude, 2) identifier des sous-régions au sein de ce réseau au moyen de la détection du signal commun aux dendroséries, 3) produire des séries multiproxies dans chacune des sous-régions, 4) tester la sensibilité de chacun de ces proxies à des variables hydrologiques et climatiques saisonnières et annuelles, 5) développer des méthodes différentes de reconstitution (utilisation d'approches statistiques, fréquentistes et bayésiennes, et de modèles écophysiologiques réversibles), 6) produire des reconstitutions, et 7) tester leur robustesse par une calibration au moyen de données instrumentales indépendantes. La démonstration du potentiel de reconstitution qu'offre la dendrochronologie dans le Haut-Boréal a été faite au moyen d'une espèce arborescente, l'épinette noire, dont l'écologie est bien connue, mais dont la grande plasticité vis-à-vis des facteurs environnementaux rend complexe l'interprétation de ses réactions aux variations hydro-climatiques. Le mode opératoire des travaux de dendrochronologie a été bien établi.

La phase 2 de la recherche avait comme objectifs spécifiques 1) de reconstituer, sur les deux derniers siècles et à haute résolution temporelle, les paramètres hydro-climatiques impliqués dans le calcul et la modélisation des apports en eau dans les bassins d'intérêt pour la production hydroélectrique dans le Haut-Boréal québécois (Figure 3), 2)

d'analyser la variabilité spatiale et temporelle du climat boréal québécois i) en produisant des valeurs reconstituées pour les mêmes points de grille que ceux utilisés par les simulateurs climatiques et ii) en étendant l'échelle temporelle considérée au dernier millénaire grâce à l'utilisation des troncs d'arbres sub-fossiles dans les lacs boréaux et de longues séries sédimentaires, et 3) de confronter ces reconstitutions aux simulations climatiques correspondantes produites à partir du MRCC, afin d'analyser la fiabilité des modèles climatiques et de mieux comprendre les forçages agissant sur les variations hydro-climatiques de la région d'étude.

<https://doi.org/10.4095/328046>

## Références

- IPCC, 2014. Summary for policymakers. *In*: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1-32.
- NAAO (National Oceanographic and Atmospheric Administration), 2015. State of the Climate Reports, Global Summary Information – July. <https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/summary-info>.
- National Geographic Society (édition d'octobre 2007) <http://ngm.nationalgeographic.com/climate-connections/climate-map>.
- SEBJ, 1987. Le complexe hydroélectrique de la Grande rivière, réalisation de la première phase. Société d'Exploitation de la Baie James, 496 p.

# Première partie

---

Les données et les  
indicateurs permettant  
de reconstituer le passé

# 1. La dendrochronologie au service de l'hydrologie

Yves Bégin, Étienne Boucher et Antoine Nicault

## Résumé

Ce chapitre présente les fondements de la dendrohydrologie utilisés dans le projet ARCHIVES. Le développement du cerne chez les arbres soumis à la saisonnalité est tributaire de processus physiologiques amenant des changements dans les propriétés physiques, biologiques et chimiques des tissus ligneux. Les cernes formés, par leur largeur, leur densité et les rapports des isotopes des éléments qui les composent (oxygène et carbone) livrent des informations sur les conditions qui entourent la croissance des arbres. Les processus métaboliques conduisant à la production de tissus ligneux (le bois) sont régis par des facteurs dits limitants que la dendrochronologie cherche à reconstituer. L'application de la dendrochronologie à l'hydrologie (dendrohydrologie) est soutenue par trois approches : 1) la recherche d'indicateurs des stress que causent l'excès ou la carence d'eau du sol sur la croissance, 2) la datation des actions directes de l'eau ou de la glace sur les arbres bordant les plans d'eau, et 3) l'étude des concordances entre les variations hydro-climatiques d'une région (précipitations et températures) et les caractéristiques des cernes des arbres affectés. Le projet ARCHIVES a consisté à explorer ces avenues sur un vaste territoire au Québec-Labrador boréal.

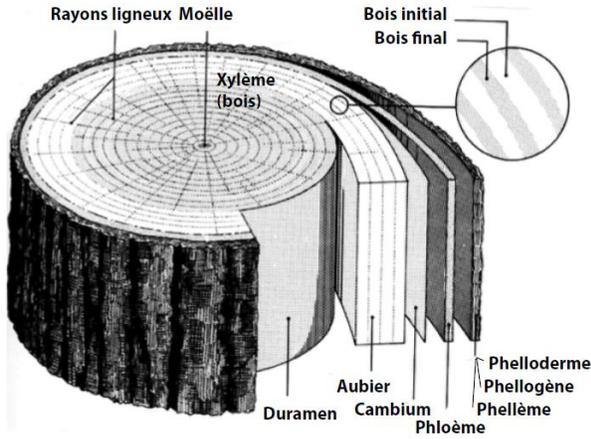
## Abstract

This chapter presents the foundations of dendrohydrology as employed in the ARCHIVES project. The development of annual rings in trees subject to seasonality is de-

pendent on physiological processes leading to changes in the physical, biological and chemical properties of woody tissues. The rings formed, by their width, density and isotopic ratios of their elements (oxygen and carbon) provide information on the tree growth conditions. The metabolic processes leading to the production of woody tissue (wood) are governed by so-called limiting factors that dendrochronology seeks to reconstitute. The application of dendrochronology to hydrology (dendrohydrology) is supported by three approaches: 1) the search for indicators of the stresses caused by excess or lack of soil water for growth, 2) the dating of the direct actions of water or ice on trees bordering water bodies, and 3) the study of concordances between the hydro-climatic variations of a region (precipitation and temperature) and the characteristics of the rings of affected trees. The ARCHIVES project consisted in exploring these avenues over a vast territory in northern Quebec-Labrador.

## Les cernes des arbres : anatomie, structure et composition

Les cernes de croissance des arbres sont une représentation des contrastes que produisent les assemblages annulaires des cellules de bois, tel que vus en coupe transversale (vue en coupe d'un tronc d'arbre perpendiculaire à son axe de croissance; Figure 1). En réalité, il s'agit de changements dans les tissus ligneux (bois) produits soit par un contraste de la taille des cellules et de leur densité et/ou de types cellulaires différents.



**Figure 1. Nomenclature du bois tel que vu en coupe transversale.**

Il peut paraître étonnant de qualifier un arbre comme étant un organisme formé surtout de tissus morts. En effet, un arbre est un organisme accumulateur de tissus, ceux-ci ne comportant que très peu de cellules vivantes. La vie cellulaire dans un arbre est courte (quelques mois à peine pour les cellules de bois), si bien que pour se maintenir en vie, les divisions cellulaires doivent être fort actives et constantes; ainsi l'arbre est en croissance constante. La croissance « primaire » de l'arbre est une différenciation des tissus créant des organes (tige, branches, rameaux, racines) et prenant diverses fonctions maintenant l'organisme en vie (exploration et captation de la lumière, soutien, support des organes de reproduction, conduction de la sève brute provenant du sol ou de la sève élaborée provenant des feuilles). La croissance secondaire accumule des tissus dans les organes créés (bois du tronc, des branches et des racines, suber de l'écorce). Dans l'arbre se trouvent deux zones de division cellulaire (appelées zones méristématiques ou méristèmes). L'une, le phellogène, est située dans l'écorce. Il produit du phellème vers l'intérieur et du phelloderme vers l'extérieur qui se compressent avec le temps. L'autre, le cambium, produit du phloème vers l'extérieur du tronc (tissu mou compressible

sous l'écorce) et du xylème (tissu rigide, le bois) vers l'intérieur. Ce sont des enveloppes de bois qui se recouvrent année après année sur une surface croissante avec l'augmentation du volume de l'arbre.

L'activité cambiale, produisant le xylème, est la zone d'intérêt de la dendrochronologie. Les divisions cellulaires sont rythmées par les saisons. Il s'agit probablement d'une adaptation apparue vers la fin du Mésozoïque quand l'orogénèse des grandes chaînes de montagnes que sont les Alpes, l'Himalaya et la cordillère pan-américaine a modifié la circulation atmosphérique et plongé les latitudes tempérées et froides des continents dans un hiver périodique. Le gel de l'eau du sol privait ainsi les plantes d'eau et l'adaptation à la sécheresse résultante a amené les plantes à entrer en dormance prolongée. L'aoûtement est la préparation saisonnière des plantes à cette dormance (emmagasinage des sucres, modification tissulaires, formation de bourgeons, fonction décidue, etc.). Lors de cet aoûtement, un changement se produit dans le cambium, amenant une diminution du rythme des divisions cellulaires, une diminution de la taille des cellules produites et un épaississement de leurs parois. Ce bois dit « final » complète le bois « initial » formé plus tôt en saison et qui est composé de grosses cellules aux parois minces. C'est ce contraste qui produit des cernes annuels concentriques.

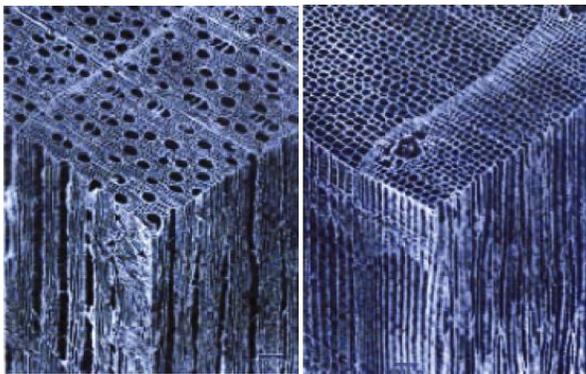
Les plantes ligneuses (plantes pérennes qui fabriquent du bois) appartiennent à deux groupes définis par leur sexualité: les gymnospermes (dont les ovules sont à nu) et les angiospermes (ovules compris dans un ovaire). Mais ces deux groupes ont aussi des bois caractéristiques; les gymnospermes sont généralement homoxylés (bois composé d'un seul type cellulaire, surtout des trachéides). Ce sont surtout des conifères sempervirents

(qui gardent leur feuillage en hiver, outre quelques exceptions comme le mélèze et le ginkgo). Les angiospermes sont hétéroxylés (plusieurs types de cellules de bois : fibres, vaisseaux, parenchyme, trachéides). Ils sont aussi caducifoliés (feuillage décliné en hiver; Figure 2a). Ce sont les gymnospermes qui ont été les plus utilisés en dendrochronologie (pins, épinettes, épicéa, mélèzes, sapins), outre certains angiospermes comme les chênes et les frênes qui ont des cernes bien marqués par la concentration de pores (vaisseaux) dans leur bois initial, rendant les cernes bien distincts (Figure 2b).

Dans le cadre du projet ARCHIVES, les travaux ont surtout porté sur l'épinette noire (*Picea mariana* Mill. BSP) qui est l'espèce

a: Angiosperme

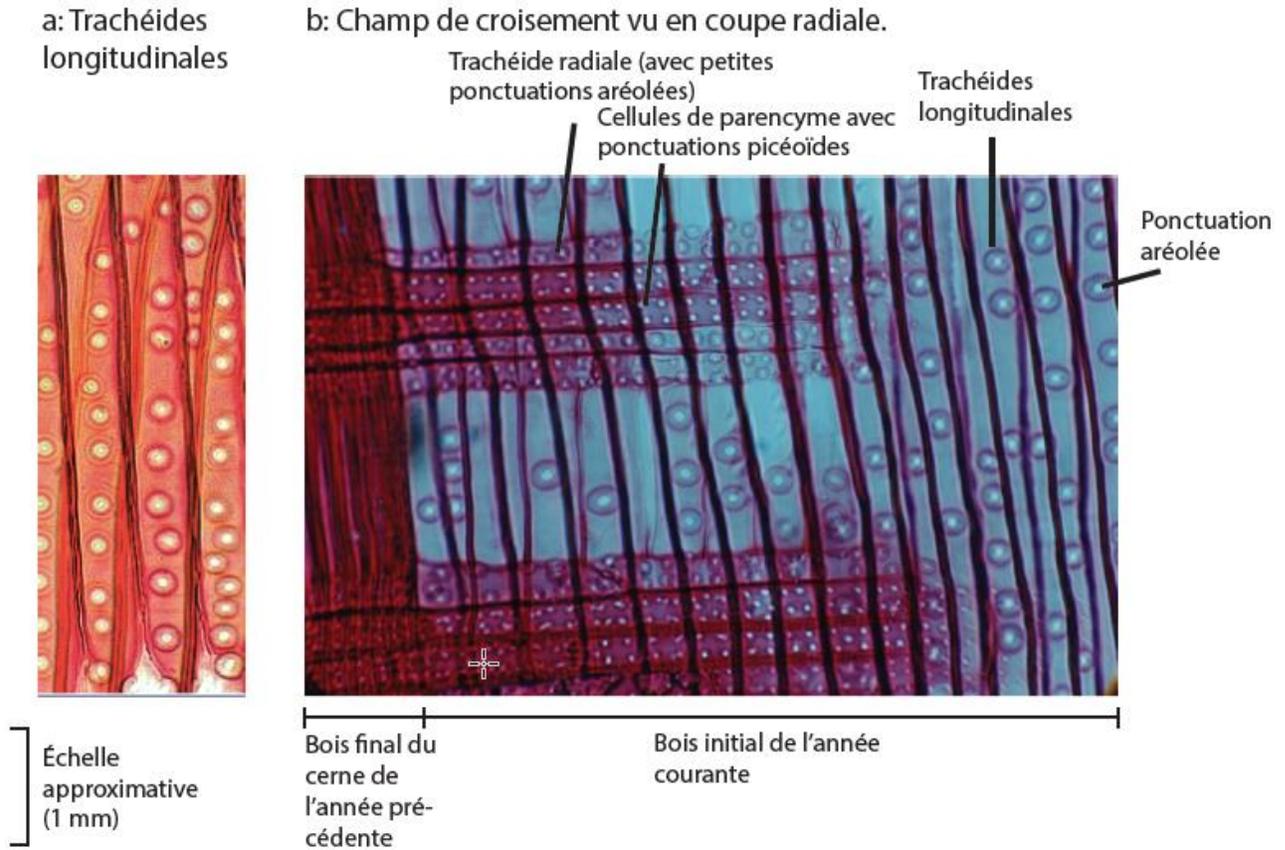
b: Gymnosperme



**Figure 2. Structure anatomique-type des angiospermes (a) et des gymnospermes (b), vue selon les trois plans ligneux (en coupe transversale, radiale et tangentielle), présentée ici sur des charbons de bois photographiés sous un microscope électronique à balayage.**

dominant la forêt boréale du Québec. Cela présente l'avantage de permettre la comparaison de populations présentant les mêmes affinités écologiques. Le pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.) a été aussi considéré par endroits pour comparaison. Sous de hautes latitudes, l'épinette noire a par ailleurs l'avantage d'être très peu affectée par des maladies et des insectes. Elle est ubiquiste dans l'aire d'étude et omniprésente dans tous les environnements, qu'ils soient exposés ou abrités, humides ou secs, stables ou instables.

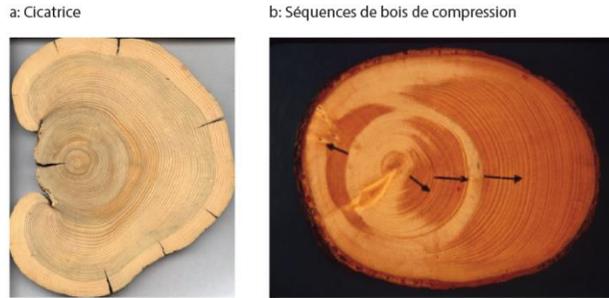
Le bois de l'épinette noire est composé de trachéides longitudinales (formant le tronc dans son axe principal; Figure 3a). Il s'agit de cellules fusiformes de 3 à 5 mm de longueur et d'au plus 300  $\mu\text{m}$  de diamètre dans le bois initial. Le diamètre des cellules du bois final est plutôt inférieur à 50  $\mu\text{m}$  et les parois cellulaires sont au moins cinq fois plus épaisses que dans le bois initial. Les trachéides sont munies de perforations (les ponctuations, petites sur les trachéides radiales et grandes sur les trachéides longitudinales) aréolées (en forme d'auréoles), qui permettent la circulation de la sève entre les cellules (Figure 3b). Le centre des ponctuations est tapissé d'une membrane (le torus) qui filtre la sève qui circule par pression osmotique.



**Figure 3. Structure anatomique du bois de l'épinette noire. a : Trachéides longitudinales chez l'épinette, b : Champ de croisement des trachéides radiales (horizontales sur cette photo) et longitudinales (verticales). Les trachéides sont munies de perforations (ponctuations) aréolées qui sont plus petites sur les cellules du plan radial que sur celles de l'axe longitudinal du tronc.**

Certaines caractéristiques du bois de l'arbre sont considérées en dendrochronologie. L'arbre a la capacité de réagir à des stress et des perturbations en produisant des réactions conséquentes. Ces réactions ou réponses s'inscrivent à la fois dans sa morphologie et sa croissance, si bien qu'il est possible d'extraire une information hydroclimatique des chroniques de cernes, tout en attribuant à cette information une datation absolue. Par exemple, un dommage au cambium (abrasion du tronc de l'arbre par un agent comme des glaces de lac ou de rivière sous la poussée du vent) peut engendrer la formation d'une cicatrice (Figure 4a). Les bourrelets cicatriciels qui se développent en marge de la blessure comportent des cernes dont le dénombrement permet de situer

l'événement dans le temps. Un arbre basculé par le vent ou l'érosion de son substrat produit du bois de compression qui consiste en une surlignification des parois cellulaires conférant au bois plus de résistance. Bien que les tissus ligneux soient flexibles, généralement le tronc de l'arbre ne peut se redresser au-delà de cette élasticité des tissus et le bois de réaction (dit de compression chez les gymnospermes et de tension chez les angiospermes) se formera tant qu'un stress gravimétrique persistera dans la tige (Scurfield, 1973; Figure 4b). L'épinette noire est une espèce extrêmement « plastique », c'est-à-dire qu'elle adapte sa forme à l'environnement. Le géotropisme négatif qui amène l'arbre à pousser toujours verticalement est un trait caractéristique de



**Figure 4. Réactions de l'arbre à des perturbations, tel que vues en coupe transversale. a : cicatrice due à l'abrasion du cambium et la construction conséquente d'une calle en marge de la blessure, b : séquences de bois de compression marquant le basculement de la tige dans des directions successives.**

l'épinière. La dominance apicale (prépondérance de l'apex du tronc) est phénoménale, si bien qu'un tronc basculé produira du bois de compression. L'année de formation de tels cernes « anormaux » marque le basculement de l'arbre. La concordance des données permettant d'authentifier et de situer les événements dans le temps est fort utile en dendrogéomorphologie et en dendrohydrologie, pour reconstituer les crues notamment.

### Les caractéristiques du bois donnant des informations hydroclimatiques

La principale caractéristique des cernes qui est utile en dendrochronologie est leur largeur. Il s'agit de la plus simple représentation du bilan annuel de la croissance qui permet de comparer une année sur l'autre. Ce bilan est en fait le volume de l'enveloppe de bois produite dans l'ensemble de l'arbre (enveloppe ligneuse du tronc, des branches et des racines). Depuis son établissement jusqu'à sa mort, l'arbre construit son architecture en trois phases. La première est la phase juvénile au cours de laquelle l'appareil foliaire de l'arbre se construit sur ses ramifications. Les cernes sont larges car le bois produit est réparti sur une petite surface. Vient ensuite une phase mature au cours de laquelle l'appareil foliaire a une taille opti-

male. La biomasse de xylème produit annuellement est répartie sur une surface croissante, si bien que la largeur des cernes est une fonction exponentielle inverse de l'âge. Enfin, la phase de sénescence est celle correspondant au dépérissement graduel de l'arbre. Les cernes sont étroits et leurs variations sont sous l'étroite dépendance de l'état de santé (capacité photosynthétique) de l'arbre. Vus en coupe transversale, pour comparer la largeur des cernes entre eux au sein d'un même arbre et entre les arbres, il devient impératif de standardiser les mesures en fonction de l'âge cambial. Les cernes sont mesurés en coupe transversale au moyen d'un micromètre relié à un ordinateur ou au moyen de logiciels d'analyse d'images prélevées au moyen d'un numériseur (*scanner*) de haute résolution.

La deuxième caractéristique des cernes utilisée en dendrochronologie est la densité. Il s'agit du ratio de la masse de bois formé par unité de volume. Un bois poreux (*p. ex.* bois initial) aura une faible densité, alors qu'un bois dont les cellules sont petites et surlignifiées (parois cellulaires épaisses, *p. ex.* bois final) sera dense. Annuellement, l'arbre produit des cernes décrivant un profil densitométrique caractéristique (Figure 5). La mesure de la densité se fait traditionnellement par une méthode indirecte fondée sur la transparence d'un fil rayons X ou, plus récemment, en utilisant un microdensitomètre aux rayons X à mesure directe. Dans les deux cas, le travail est exigeant ou bien en manipulation pour la première technique ou en traitement de données pour la seconde. Les variables densitométriques peuvent être déclinées ainsi : densité moyenne, minimale ou maximale du cerne, densité moyenne du bois initial ou du bois final, ratio de la densité moyenne du bois final et de la densité moyenne du bois initial, etc. Généralement, la densité maximale est la variable la plus

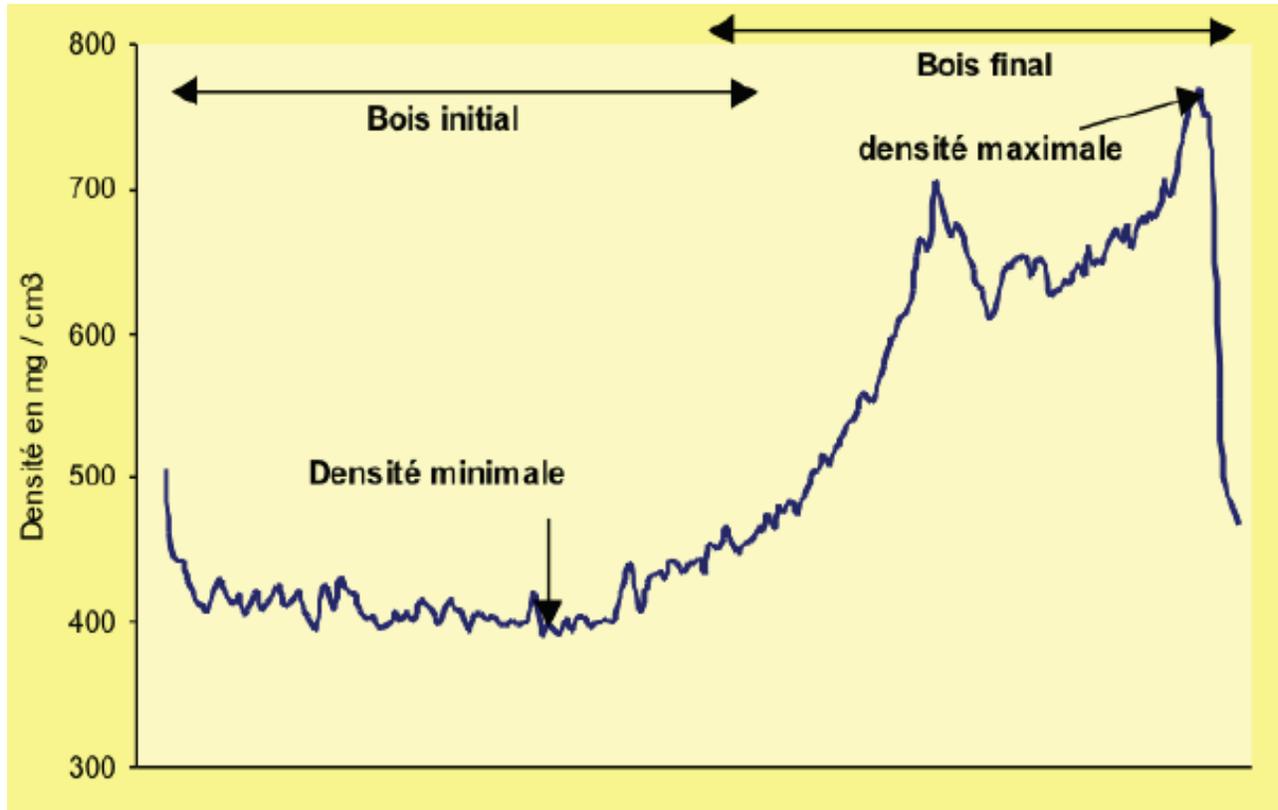


Figure 5. Profil densitométrique d'un cerne annuel.

intégratrice des conditions de croissance de l'arbre et c'est la variable la plus fréquemment utilisée dans la littérature de dendrochronologie.

Le bois est composé de chaînes de carbone avec des liens hydroxyles. Les rapports isotopiques des éléments composant la cellulose sont utilisés en dendrochronologie pour documenter les mécanismes physiologiques de la réponse de l'arbre aux conditions ambiantes. Les rapports isotopiques sont les indicateurs les plus intégrateurs de la physiologie de l'arbre en prenant en compte les processus photosynthétiques, la respiration, l'évapotranspiration, l'assimilation et les flux hydriques dans l'arbre. Dans le cadre du projet ARCHIVES, l'équipe de dendroisotopistes a concentré ses travaux sur les rapports des isotopes stables de l'oxygène ( $\delta^{18}\text{O}$ ) et du carbone ( $\delta^{13}\text{C}$ ).

Enfin, la dendrochronologie devient une méthode rigoureuse lorsque fondée sur des principes d'échantillonnage bien fondés. La réplication des observations, leur concordance dans le temps et leur interprétation spatiale ont une grande importance. L'échantillonnage se fonde sur un choix minutieux de sites, de milieux, d'espèces, d'individus et aussi de position sur l'arbre. L'analyse est fondée sur une sélection ou une combinaison de bons indicateurs (épaisseurs de cernes, densité, isotopes). Le traitement des séries doit être basé sur une datation précise (dénombrer les cernes n'équivaut pas à les dater) et un traitement statistique judicieux des mesures.

#### Les facteurs de croissance : principe des facteurs limitants

Comme organisme vivant, l'arbre cumule le produit net de la photosynthèse au fil des années en accroissant sa masse ligneuse sous

la forme d'enveloppes annuelles de bois apparaissant comme des cernes concentriques dans les tiges et les branches telles que vues en coupe transversale. La croissance périodique de l'arbre est régie par des processus métaboliques influencés par des facteurs externes comme la luminosité, le régime nutritif, la température et l'humidité de l'air et du sol. Un facteur externe est dit limitatif quand ses variations d'intensité produisent une réaction métabolique chez un individu donné. L'arbre réagit aussi quand les facteurs limitatifs franchissent certains seuils et produisent un stress (limite de réaction). Il meurt si des seuils létaux (mortels) sont franchis (limite de tolérance). Les seuils de réaction doivent être connus pour établir une relation quantitative entre un paramètre de la croissance (*p. ex.* la largeur des cernes annuels de bois) et le facteur limitatif relié à un habitat donné (*p. ex.* arbres épisodiquement immergés). La relation quantitative entre la réaction d'un arbre (*p. ex.* mesurée par la largeur de ses cernes annuels) et le facteur limitatif (*p. ex.* la disponibilité de l'eau) est simple dans les environnements où ce seul facteur de stress agit. Par exemple, la croissance de l'arbre en région semi-aride est stimulée par tout apport en eau. Hors de ces environnements, plusieurs conditions complexifient la relation :

*i.* L'arbre ne réagit que rarement à un seul facteur. Par exemple, l'effet du manque d'eau peut être accentué en présence de hautes températures. On ne peut alors séparer ces variables que par trois approches : l'une empirique en analysant la réaction des arbres en des sites où l'un des deux facteurs n'a peu ou pas d'influence. Dans le cas présent, il ne peut s'agir des températures, car l'ambiance thermique est égale pour des arbres d'une même région, mais plutôt de l'humidité en comparant la croissance des arbres en milieu sec versus en milieu humide.

La seconde approche est expérimentale : en serre pour contrôler le facteur température (il est difficile de transporter des arbres en milieu artificiel!) ou en imperméabilisant le sol. Enfin, la pratique courante en dendrochronologie est d'utiliser une approche rétrospective en établissant la relation statistique entre la croissance de l'arbre (la variable réponse) et les facteurs environnementaux (les variables explicatives). Un arsenal de techniques est alors utilisé pour uniformiser les séries temporelles que présentent les cernes de croissance et pour établir les fonctions de réponse et les fonctions de transfert permettant de traduire quantitativement la relation en produisant des séries indicatrices (Fritts, 1976; Cook et Kairiukstis, 1990).

*ii.* De plus, un même facteur environnemental peut comporter des effets paradoxaux traduits dans la réaction de l'arbre. Par exemple, l'excès d'eau peut produire un effet physiologique comparable à celui engendré par le manque d'eau. L'étendue entre le seuil de réaction et le seuil de tolérance peut aussi différer selon les espèces. Les espèces à spectre étroit de réaction face à un facteur comme l'eau sont dites sténohydriques; un terme qui s'oppose à euryhydriques, lequel qualifie les espèces à spectre large. La sensibilité des individus peut aussi varier selon leur âge (stades de croissance juvénile, mature ou sénescence). Entre ces extrêmes, l'arbre pourrait aussi ne pas être sensible à l'humidité, mais plutôt à un autre facteur comme la température.

Dans toute utilisation de l'arbre comme marqueur de phénomènes allogènes (influence des agents ou des facteurs externes sur son métabolisme), il importe donc de saisir les véritables facteurs limitants. L'analyse dendrochronologique s'appuie alors sur un choix adéquat i) d'espèces sensibles ii) de

peuplements exposés devant être comparés à des peuplements de référence non exposés et iii) d'arbres qui, en raison de leur position sur la rive, ne sont pas perturbés par d'autres facteurs produisant un effet limitatif. Ces principes sont présentés dans plusieurs ouvrages de base de dendrochronologie (Fritts, 1976; Schweingruber, 1988; 1996; Payette et Fillion, 2010).

### Approches en dendrohydrologie

La reconnaissance de la tendance à long terme des apports en eau peut provenir d'une approche d'écologie dynamique consistant à relier la présence ou l'absence d'arbres à des conditions hydrodynamiques. L'expansion et le retrait des arbres en milieu riverain sous l'influence de la baisse ou de la hausse du niveau des eaux marquent des épisodes bien inscrits dans la structure démographique des populations ligneuses. Cette expansion d'une bordure forestière en marge d'un lac ou au sein de la partie habituellement humide d'une tourbière ou près d'une rivière est possible si les facteurs qui l'inhibent ne sont plus opérants. Ainsi, l'élimination des stress (excès d'eau dans ce cas) facilite l'expansion des espèces arborescentes en milieu humide. La mortalité des arbres indique un renversement de situation. Dans les milieux où les changements hydrologiques sont persistants (changements d'état durant plusieurs années), la démographie des populations devient indicatrice de la tendance de fond dans les variations de basse fréquence du niveau des eaux. La période de vie des arbres trouvés dans cette zone de battement des eaux est révélatrice de bas niveaux d'eau. Les variations de croissance des arbres dans cette zone charnière entre le milieu aquatique et le milieu terrestre peuvent aussi révéler les variations de haute fréquence du plan d'eau. La durée requise du bas niveau d'eau permettant

l'expansion des populations arborescentes sur une rive n'est peut-être pas la même que la durée des événements de haut niveau menant à leur exclusion. Il faut aussi retenir que l'établissement des arbres sur un rivage n'est possible qu'en l'absence de processus géomorphologiques perturbant le substrat. En effet, un certain degré de stabilité du milieu est nécessaire pour permettre cette expansion épisodique des peuplements. L'expansion de la forêt est possible en marge de lacs de petite dimension, soit là où les glaces ne bougent pas et où les vagues ne dépassent pas l'amplitude d'un clapotis. Sans variation de plan d'eau, la forêt dense jouxte la rive et avec des perturbations trop fréquentes ou intenses, les arbres laissent leur place à des espèces végétales mieux adaptées à la submersion ou l'abrasion par l'eau et la glace. Dans les cas extrêmes (rives fortement exposées des grands lacs), tout type de végétation peut être exclu par une activité trop intense des glaces et des vagues.

Une deuxième approche en dendrohydrologie consiste en l'exploitation de l'information tirée d'arbres assujettis à l'action directe de l'eau ou des glaces flottantes. L'eau et la glace en mouvement peuvent endommager les arbres en minant leur substrat ou en brisant mécaniquement des organes formés antérieurement. L'analyse dendrochronologique de ces perturbations riveraines fournit des marqueurs de hauts niveaux d'eau très précis pour plusieurs raisons. Dans le cas de dommages mécaniques au cambium, la réaction de l'arbre est spontanée. Il produira des tissus colmatant la blessure ou remplacera les axes de croissance morts par des relais (reprise de dominance apicale par des branches existantes ou nouvelles tiges développées à partir de bourgeons latents). Bien que la réaction puisse être de longue durée, elle marque précisément les événements et un simple dénom-

brement des cernes anormaux dans le bois ajouté depuis la blessure permettra une datation absolue. Cette datation est précise dans la mesure où les cernes de bois ajoutés sont bien interdatés avec des arbres vivants (Figure 6). L'inscription des niveaux d'eau passe alors par un processus géomorphologique (érosion par les courants, les vagues ou les poussées glacielles) qui, lui-même, lorsque récurrent, peut avoir une influence sur la probabilité d'enregistrement d'événements ultérieurs. La dendrogéomorphologie constitue ainsi une approche utile en hydrologie (Shroder, 1980; Hupp, 1988).



**Figure 6. Principe de l'interdatation des cernes annuels.**

Pour établir le lien entre les processus géomorphologiques et la réaction des arbres, la définition des paramètres du régime des perturbations est essentielle. C'est par ce régime que s'expriment les variations hydrologiques. Dennerer *et al.* (2000) définissent la limite inférieure de la zone occupée par les arbres comme étant une limite mécanique. Selon Bégin (2000b), elle est fixée par la fréquence, l'intensité, la durée et le moment de l'année où interviennent les agents de perturbation. Ceux-ci peuvent agir seuls ou successivement au cours d'une même année. Par exemple, au lendemain de crues nivales de grande amplitude sur des grands lacs subarctiques (Bégin, 2001), les arbres fortement endommagés par l'activité glacielle peuvent être déstabilisés à nouveau par les vagues si les niveaux d'eau demeurent élevés au début de la période sans glace. On attribue cette activité à l'abondance de la neige impliquée dans la crue des eaux et à de forts apports estivaux subséquentement (Bégin et Payette, 1988).

La connaissance des processus géomorphologiques permet d'interpréter les réactions des arbres sur une base intrasaisonnière. Par exemple, les cicatrices glacielles sur les troncs d'arbres riverains permettent de marquer les crues glacielles printanières (Bégin et Payette, 1988). La hauteur des marques sur les troncs d'arbres indique l'ampleur de la crue et, dépendant du contexte hydrographique (taux d'évacuation des eaux de crue), elle peut indiquer l'abondance des précipitations de l'hiver précédent ou la vitesse de la fonte, selon le cas (Tardif et Bergeron, 1997; Bégin, 2000a). Les hauts niveaux estivaux, en absence de glace, sont marqués par la déstabilisation des arbres riverains sous l'effet des vagues ou des courants. En effet, les arbres partiellement déracinés par l'érosion de leur substrat, basculent et forment du bois de compression pour compenser les tensions mécaniques dans le bois. La datation du premier cerne formé dans les séquences nettes de bois de compression indique le moment où sont survenus les hauts niveaux d'eau (Alestalo, 1971). Les laisses minérales des hautes eaux près de l'arbre marquent l'amplitude du débordement (Hupp, 1988). En utilisant ces repères, il est possible de distinguer les printemps et les étés au cours desquels des hauts niveaux d'eau sont survenus. Par l'analyse de séries dendrochronologiques issues d'arbres non soumis à l'influence des fluctuations hydrologiques, on peut obtenir une reconstitution des températures. On est donc en mesure de dresser le registre des étés frais doublés de conditions ou bien sèches, ou bien humides. Considérant cette approche, les indicateurs dendrochronologiques permettent de déterminer la tendance dans la fréquence et l'étendue spatiale des stress produits par l'excès ou, paradoxalement, le manque d'eau.

Considérée comme facteur limitatif, l'eau en excès ou en déficience produit des stress hydriques s'inscrivant dans les processus métaboliques de la croissance et se répercutant par l'inhibition des divisions cellulaires du cambium. Un arbre soumis à un excès ou un manque d'eau prolongé produira ainsi des cernes étroits. L'atténuation du stress, respectivement par un bon drainage du sol ou un meilleur apport d'eau, l'amènera à produire un cerne de largeur « normale », mais tout en subissant l'influence d'autres facteurs limitatifs. Sur la base d'un tel principe, l'analyse dendroclimatique en région semi-aride permet de faire l'histoire des sécheresses et, indirectement, de retracer l'historique des épisodes de déficit d'écoulement des eaux (Stockton et Boggess, 1980; Stockton, 1990). Par opposition, il n'a toutefois pas encore été démontré que l'excès d'eau en région tempérée humide et boréale pouvait produire des stress de façon suffisamment généralisée chez les arbres pour livrer des indicateurs dendrohydrologiques. Ces principes ont été développés par Shulman (1945) et ont grandement été affinés depuis. Les interprétations audacieuses, comme celle de Mitchell *et al.* (1979) montrant un cycle de 22 ans dans la fréquence des sécheresses en relation avec le cycle de l'activité solaire, ont fait place à la recherche d'un signal des anomalies thermiques des océans dans la signature dendrochronologique des précipitations de pluie et de neige (Dettinger *et al.*, 1998).

Une autre façon de tirer profit de ces manifestations de l'excès ou du manque d'eau est de sélectionner des sites où les fluctuations de la nappe phréatique accusent une grande amplitude. Ce principe a été appliqué avec succès par Stockton et Fritts (1973) au lac Athabaska dans le Nord-Ouest canadien. Une hausse de la nappe phréatique, corrélative des hauts niveaux lacustres, limite la croissance des arbres. Des séries de

largeurs de cernes indiquent clairement l'alternance d'épisodes de stress et de stimulus de la croissance sous l'influence inverse de la disponibilité de l'eau (l'excès d'eau y étant limitatif). Par une sélection appropriée de sites, il est possible d'étalonner la variance des séries dendrochronologiques due à l'excès d'eau et non à d'autres facteurs limitatifs; ceci, à condition d'avoir à sa disposition un registre instrumental de durée suffisante (en général d'une trentaine d'années). Le manque d'eau dans les sites xériques procure inversement un enregistrement des sécheresses estivales d'une sévérité suffisante pour provoquer un abaissement des plans d'eau. Les stress qui affectent à la fois les arbres riverains et les arbres des milieux xériques sont, par exclusion, probablement d'origine thermique. Ils masquent alors tout signal hydrique, ce qui donne un enregistrement discontinu des conditions hydroclimatiques. La densitométrie offre cependant la possibilité de découper les parties des cernes selon le moment de la saison où le bois a été formé. La comparaison de données sur le bois initial et sur le bois final offre une résolution intrasaisonnière des conditions de croissance.

L'application des principes de base de la dendroclimatologie en hydrologie est surtout fondée sur le repérage d'années ou de groupes d'années favorables ou non à la croissance. Il serait simpliste d'imaginer que l'on puisse ainsi reconstituer les précipitations et produire des séries hydrologiques à la manière dont nombre d'auteurs l'ont fait dans les régions semi-arides. La relation entre les précipitations et la croissance n'est pas nécessairement linéaire, ni unifactorielle dans nos régions. La réaction des arbres est aussi complexe. La démonstration mathématique de la relation de cause à effet (part de la variance expliquée par tel ou tel facteur) n'exclut pas l'incidence de relations fortuites

en présence de diverses combinaisons de facteurs environnementaux. Par exemple, comme mentionné précédemment, un climat chaud et sec pourrait être tout aussi limitatif que la persistance de conditions fraîches et humides. Ainsi, cette situation nous force à constater que l'application des grands principes de la dendrochronologie dans les milieux froids et bien approvisionnés en eau doit s'asseoir sur une connaissance approfondie des mécanismes par lesquels l'arbre, qui est un organisme vivant et complexe, utilise ou subit des stress reliés aux variations des réserves en eau du sol. Ainsi, il s'avère crucial de documenter l'ensemble des facettes de la réponse hydrologique des populations ligneuses et ce tant à l'échelle de l'arbre qu'à l'échelle des peuplements et du paysage. Il importe également de préciser l'impact des fluctuations de l'approvisionnement en eau sur les divers indicateurs communément utilisés en dendrochronologie (largeurs de cerne, rapports isotopiques, densité du bois) tout en distinguant les mécanismes qui agissent aux échelles de temps journalières, interannuelles, décennales et interdécennales. Ce n'est qu'en intégrant ces échelles de temps et d'espace que l'arbre pourra demeurer le meilleur témoin des variations hydrologiques passées.

<https://doi.org/10.4095/328047>

## Références

- Alestalo, J., 1971. Dendrochronological interpretation of geomorphic processes. *Fennia*, 105: 1-140.
- Bégin, Y. et Payette, S., 1988. Dendroecological evidence of lake-level changes during the last three centuries in subarctic Québec. *Quaternary Research*, 30: 210-220.
- Bégin, Y., 2000a. Reconstruction of subarctic lake levels over past centuries using tree rings. *Journal of Cold Region Engineering*, 14(4): 192-212.
- Bégin, Y., 2000b. Ice-push disturbances in High-Boreal and Subarctic lakeshore ecosystems since AD 1830, Northern Québec, Canada. *The Holocene*, 10(2): 179-189.
- Bégin, Y., 2001. Tree-ring dating of extreme lake levels at the subarctic-boreal interface. *Quaternary Research*, 55: 133-139.
- Cook, E. et Kairiukstis, L., 1990. *Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences*. Kluwer Academic Publishers. Boston, Massachusetts. 288 p.
- Denneler, B., Bergeron, Y. et Bégin, Y., 1999. An attempt to explain the distribution of the tree species composing the riparian forests of Lake Duparquet, southern boreal region of Québec, Canada. *Canadian Journal of Botany*, 77: 1744-1755.
- Dettinger, M.D., Cayan, D.R., Diaz, H.F. et Meko, D.M., 1998. North-South precipitation patterns in western North America on interannual-to-decadal timescales. *Journal of Climate*, 11: 3095-3111.
- Fritts, H.C., 1976. *Tree Rings and Climate*. Academic Press, New York. 567 p.
- Hupp, C.R., 1988. Plant ecological aspects of flood geomorphology and paleoflood history. Pages 335-356 in V.R. Baker, R.C. Kochel et P.C. Patton (eds), *Flood Geomorphology*. John Wiley & Sons, New York, New York.
- Mitchell, J.M. Jr., Stockton, C.W. et Meko, D.M., 1979. Evidence of a 22-year rhythm of drought in the Western United States related to the hale solar cycle since the 17th century. In *Solar-Terrestrial Influences on Weather and Climate*. McCormac, B.M. et Seliga, T.A. (Ed.) Dordrecht, Reidel, Holland, 125-143.
- Schweingruber, F.H., 1988. *Tree rings: Basics and applications of dendrochronology*. Kluwer, Dordrecht, Netherlands. 276 p.
- Schweingruber, F.H., 1996. *Tree Rings and Environment. Dendroecology*. Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research, Birmensdorf.
- Scurfield, G., 1973. Reaction wood, its structure and function. *Science*, 16: 647-655.
- Shroder, J.F., 1980. Dendrogeomorphology: Review and new techniques of tree-ring dating. *Progress in Physical Geography*, 4: 161-188.
- Schulman, E., 1945. Tree-rings and runoff in the South Platte River Basin. *Tree-Ring Bulletin*, 11: 18-24.
- Stockton, C.W., 1990. Climatic, hydrologic inferences from tree rings. *Civil Engineering Practice*, 5: 37-52.

## 1. La dendrochronologie au service de l'hydrologie

Stockton, C.W. et Boggess, W., 1980. Tree rings: a proxy data source for hydrologic forecasting. Unified river basin management. American Water Resources Association. Symposium proceedings, May 4-7, Gatlinburg, Tennessee, pp. 609-624.

Stockton, C.W. et Fritts, H.C., 1973. Long-term reconstruction of water level changes for Lake Athabasca by analysis of tree rings. *Journal of the American Water Resources Association*, 9: 1006-1027.

Tardif, J. et Bergeron, Y., 1997. Ice-flood history reconstructed with tree-rings from the southern boreal forest limit, western Québec. *The Holocene*, 7: 291-300.



**Survol des forêts riveraines au lac DA-1.  
Photo de A. Nicault.**

## 2. La dendroisotopie

Martine M. Savard et Christian Bégin

### Résumé

L'arbre est tel un registre naturel d'information environnementale précieuse qui permet de remonter le temps si ses cernes de croissance sont datés précisément et que les indicateurs indirects ou 'proxies' qu'ils renferment sont bien compris. La dendroisotopie, un judicieux mariage de la dendrochronologie et de la géochimie isotopique, s'inscrit dans cette démarche car elle permet de porter un regard fort instructif sur les conditions biogéochimiques du passé, et éventuellement, de reconstituer le climat. Il en est ainsi puisque les mécanismes qui régissent la distribution des isotopes chez l'arbre sont de mieux en mieux connus. Le présent chapitre résume de façon succincte comment la dendroisotopie du carbone et de l'oxygène peut refléter les changements environnementaux comprenant l'impact de la pollution atmosphérique, les variations écologiques et notamment les conditions climatiques.

### Abstract

A tree is as a natural archive of valuable environmental information that allows going back in time if its growth rings are precisely dated, and the indirect indicators or proxies they contain are well understood. Dendroisotopy, a clever combination of dendrochronology and isotope geochemistry, is part of this process because it can provide a very informative look at the biogeochemical conditions of the past, and eventually help reconstructing climate. This possibility exists because the mechanisms that govern the distribution of isotopes in trees are increasingly better known. This section briefly summarizes how dendroisotopy of carbon and

oxygen may reflect environmental changes such as the impact of atmospheric pollution, ecological changes, and particularly climatic conditions.

### Les isotopes stables du carbone et de l'oxygène, et les processus naturels

Il existe, pour la plupart des éléments, des atomes dont le numéro atomique 'z' est le même, mais dont les masses atomiques 'A' (nombre de protons 'z' et de neutrons) diffèrent. Leur différence de masse atomique étant simplement associée à un nombre distinct de neutrons dans leur noyau. Ces atomes occupent la 'même' (*iso*) 'place' (*topos*) dans le tableau périodique. Ce sont des 'isotopes' de l'élément. En d'autres termes, ils ont le même comportement chimique, mais se distinguent principalement de par leur comportement physique. La *dendroisotopie* tire avantage des spécificités des divers comportements physiques.

Il existe trois types d'isotopes. Les isotopes *radioactifs* dont le noyau se désintègre et génère un isotope fils d'un autre élément. Les isotopes fils constituent le deuxième type d'isotopes dit *radiogéniques*. Les isotopes père et fils ont ainsi des quantités qui varient en fonction du taux de désintégration de l'élément radioactif. Le troisième type regroupe les atomes dont le noyau est stable. Il s'agit des isotopes *stables*. C'est de ce type d'isotopes dont il sera question ici, et nous discuterons exclusivement des isotopes stables du carbone ( $z=6$ ) et de l'oxygène ( $z=8$ ), deux éléments essentiels pour l'arbre (Figure 1).

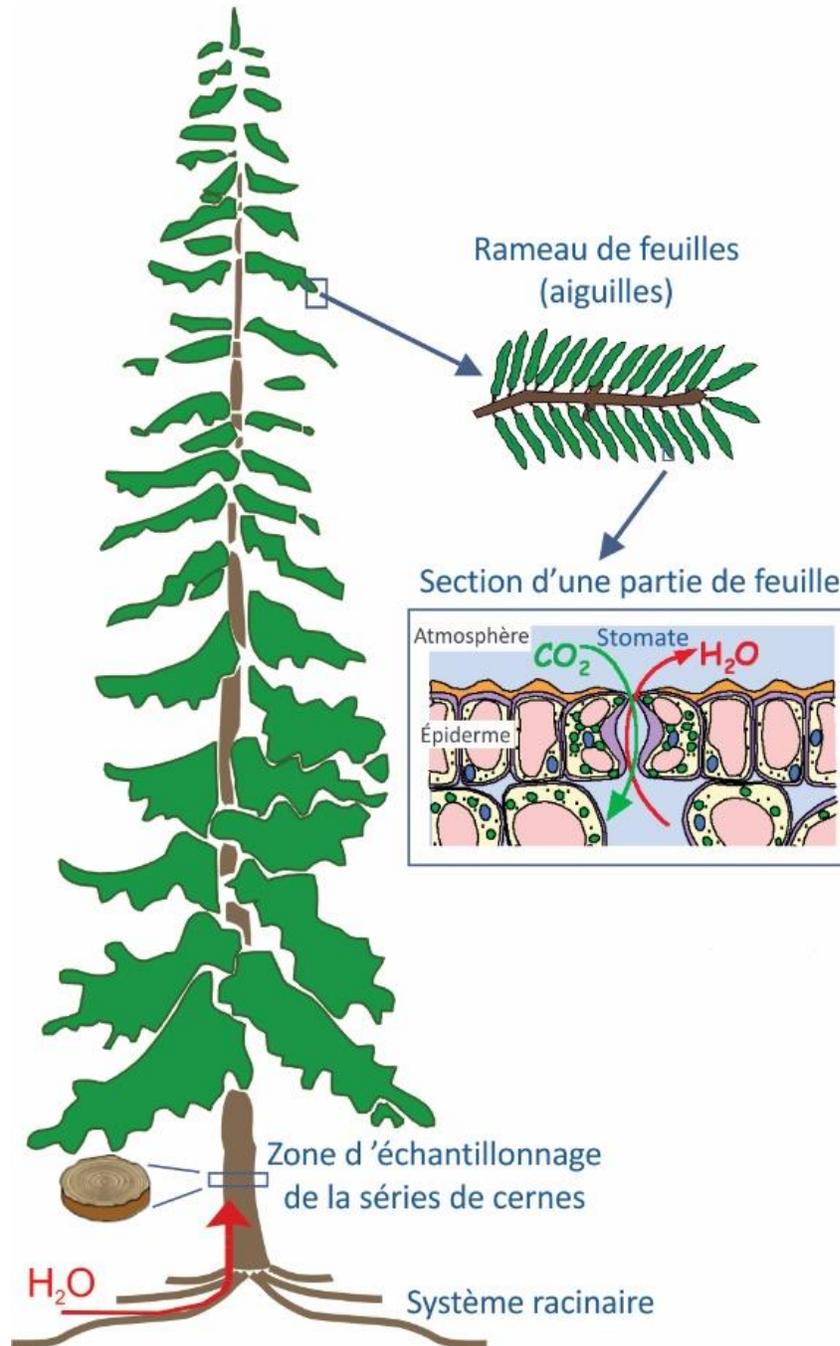


Figure 1. Représentation de l'arbre (épinette) et des voies d'assimilation du carbone et de l'oxygène. La section d'une partie de la feuille montre son épiderme et un stomate, régulateur des échanges gazeux entre l'intérieur de la feuille et l'atmosphère. Le  $CO_2$  ainsi absorbé est essentiel à la photosynthèse. L'assimilation de l'eau (et de l'oxygène utilisé lors de la photosynthèse) se fait entièrement par le système racinaire, depuis les interstices du sol; subséquentment, l'évapotranspiration libère par les stomates de la vapeur d'eau vers l'atmosphère. Les échantillons utilisés en dendroisotopie sont généralement prélevés entre 1 et 1,5 m depuis la base du tronc. Les séries dendroisotopiques du carbone et de l'oxygène renferment ainsi une information précieuse sur les conditions climatiques qui prévalaient principalement au moment où les processus mentionnés étaient actifs.

Les isotopes stables existent dans les matières naturelles en des quantités (poids) qui varient en fonction des processus qui produisent ces matières. Nous verrons plus loin que la spectrométrie de masse à rapport isotopique autorise la fine mesure de très petites différences de poids moléculaires. Les quantités d'isotopes peuvent être prédites par les lois du fractionnement<sup>1</sup> dépendant de la masse ou de l'effet isotopique<sup>2</sup>. Cet effet est mesurable et il est d'autant plus grand que la différence de masse est grande entre les isotopes lourds (généralement les plus rares) et les légers (généralement les plus abondants) d'un élément. Brièvement, il faut rappeler que l'effet dû à la différence de masse est pratiquement inexistant (actuellement non mesurable) pour les éléments lourds tel le plomb ( $z=82$ ), qui possède des isotopes dont les masses sont de 204, 206, 207 et 208, et pour lesquelles les différences sont très petites ( $\Delta m=1/206$  à  $4/204$ ). La distribution naturelle des trois derniers isotopes de cet élément est plutôt régie par la radioactivité et la désintégration des atomes d'uranium et de thorium. Quant à eux, les isotopes stables des éléments légers montrent des différences de masse relativement grandes; les nombres de masse sont de 13 et 12 ( $\Delta m=1/12$ ) pour le carbone, et de 18 et 16 ( $\Delta m=2/16$ ), pour l'oxygène. Par conséquent, les processus naturels comme la diffusion

gazeuse, la photosynthèse et l'évapotranspiration influenceront la distribution des isotopes stables du carbone et de l'oxygène.

### Le traitement et l'analyse isotopique des cerne de croissance

Les principaux constituants du bois, la cellulose, l'hémicellulose, la lignine et les résines, ont des proportions qui varient d'un cerne de croissance à un autre, et à l'intérieur d'un même cerne. Or, chaque constituant a un rapport isotopique qui lui est propre. Voilà pourquoi la pratique répandue en dendroisotopie est de n'analyser que la cellulose. De cette façon, les rapports isotopiques générés seront représentatifs des conditions environnementales, c'est-à-dire qu'ils ne seront pas modifiés par les effets non-désirés qu'entraînent les changements de proportion des constituants du bois. Il arrive tout de même que certains chercheurs décident de procéder à l'analyse de l'ensemble du bois pour produire des séries isotopiques. Ce choix dépend simplement de l'espèce d'arbre étudiée et des buts de la recherche dendroisotopique.

L'analyse de la cellulose se fait à l'aide d'un analyseur élémentaire (AE) à combustion, couplé en mode dynamique (MD) à un spectromètre de masse à rapport isotopique (SMRI) pour mesurer les valeurs  $\delta^{13}\text{C}$ , alors qu'elle se fait avec un AE à pyrolyse-MD-SMRI, pour les rapports  $\delta^{18}\text{O}$  (détails dans Savard, 2010). Les précisions analytiques sont généralement de 0,1‰ sur les deux systèmes.

Par convention, on représente toujours les mesures de l'abondance des isotopes stables d'un élément léger de façon relative, en calculant la quantité de l'isotope lourd (rare) sur la quantité de l'isotope le plus léger (abondant), et de façon standardisée, c'est-à-dire par rapport à une matière de référence, analysée au même moment que l'échantillon

<sup>1</sup> Le fractionnement représente tout simplement la distribution des isotopes de l'élément d'intérêt au cours d'une réaction. On peut mesurer le facteur de fractionnement  $\alpha$  en mesurant les rapports isotopiques des réactifs et des produits de cette réaction :  $\alpha = \frac{[^{13}\text{C}/^{12}\text{C}]_{\text{réactifs}}}{[^{13}\text{C}/^{12}\text{C}]_{\text{produits}}}$ .

<sup>2</sup> Il existe aussi un fractionnement des isotopes stables dit 'indépendant de la masse', mais il n'est observable que dans des cas très particuliers, comme celui de certains processus atmosphériques impliquant l'oxygène. Ces processus n'interviennent pas dans la zone critique, lieu des échanges d'oxygène entre l'atmosphère, l'hydrosphère et la biosphère.

d'intérêt. Cette convention s'appelle la notation 'delta', d'après la lettre grecque 'δ', et calculée ainsi :

$$\delta^{13}\text{C} = ({}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}(\text{é}) - {}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}(\text{r})) / ({}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}(\text{r}))$$

où 'é' désigne l'échantillon et 'r', la référence. La valeur  $\delta$  étant très petite, elle est fréquemment multipliée par mille afin de permettre de rapporter les résultats de façon pratique, la valeur finale étant indiquée en pour mille (‰).

### La dendroisotopie, une archive des changements environnementaux

L'oxygène utilisé par l'arbre provient essentiellement de l'eau du sol puisée par les racines (Figure 1) et migrant jusqu'au système foliaire sous l'effet d'une force de tension créée l'évapotranspiration. Il n'existe pas d'équation universelle simple pour décrire l'assimilation de l'oxygène, car les conditions écologiques et hydriques varient grandement avec les populations d'arbres et les régimes hydrologiques des écosystèmes où elles croissent. Pour les fins du présent ouvrage, rappelons simplement que mis à part les perturbations écologiques naturelles, les valeurs  $\delta^{18}\text{O}$  des cernes de croissance sont principalement contrôlées par la composition isotopique de l'eau du sol à l'endroit du peuplement, le rapport isotopique de l'eau intra-feuille après évapotranspiration et rétrodiffusion d'eau du xylème, la proportion dans les feuilles d'eau assimilée par les racines, l'humidité relative, le rapport isotopique de la vapeur d'eau (Barbour, 2007), et la pollution de l'air et du sol qui constitue un axe de recherche en lui-même (Savard, 2010; Savard *et al.*, 2020; Savard et Daux, 2020). Les perturbations écologiques et l'impact de la pollution qui sont écartés en sélectionnant des sites épargnés par ces phénomènes, les autres facteurs d'influence sont tous principalement tributaires des conditions climatiques. D'ailleurs, plusieurs études ont no-

tamment montré les liens de cause à effet entre les paramètres climatiques et les réponses isotopiques des arbres. À titre d'exemple, les valeurs  $\delta^{18}\text{O}$  de la cellulose de cernes produits chez des épinettes (*Picea abies* Karst.) entre 1970 et 1995 montrent des variations qui épousent celles des précipitations estivales au cours de la même période (Anderson *et al.*, 2002). De la même façon, les valeurs  $\delta^{18}\text{O}$  de cernes de la période 1938-1986 chez des hêtres corrélaient positivement avec les températures moyennes d'avril, mai et juin, à Berne en Suisse (Saurer *et al.*, 1997). Dans ces cas précis, les précipitations estivales et la température printanière modifient la disponibilité en eau dans le sol et l'évaporation, respectivement, qui à leur tour augmentent le rapport  $\delta^{18}\text{O}$  de l'eau assimilée par l'arbre.

Les arbres utilisent le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) atmosphérique pour tirer tout le carbone nécessaire à leurs fonctions vitales. L'assimilation du  $\text{CO}_2$  se fait par le système foliaire (Figure 1), où de petites ouvertures appelées 'stomates' permettent la diffusion des gaz vers les sites de la photosynthèse opérée par des enzymes. La séquence de ces processus et les fractionnements isotopiques qui leur sont associés chez les plantes de type C3 sont résumés par l'équation suivante (Farquhar *et al.*, 1989):

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{arbre}} = \delta^{13}\text{C}_{\text{atm}} - [a + (b - a) \times p_i/p_e],$$

où 'a' est le fractionnement (ou facteur d'enrichissement)<sup>3</sup> au cours de la diffusion du  $\text{CO}_2$  de l'atmosphère vers l'intérieur de la feuille; 'b', le fractionnement pendant la fixation du carbone par les enzymes (carboxylation); 'p<sub>i</sub>'= la pression partielle de  $\text{CO}_2$  à l'intérieur de la feuille; et 'p<sub>e</sub>', la pression externe de  $\text{CO}_2$  (pression atmosphérique). Au fil de saisons de croissance successives, tout

<sup>3</sup>  $(\alpha - 1) \times 1000$

processus modifiant 'b' ou 'pi' aura un effet direct sur la valeur  $\delta^{13}\text{C}$  finale du carbone incorporé dans les cernes de croissance. Avant de discuter des mécanismes contrôlant les rapports  $\delta^{13}\text{C}$ , il faut souligner que les valeurs  $\delta^{13}\text{C}$  du  $\text{CO}_2$  atmosphérique, la source du carbone pour l'arbre, ont été modifiées à l'échelle planétaire depuis le début de l'ère industrielle en raison de l'accumulation de  $\text{CO}_2$  produit par la combustion des hydrocarbures. C'est 'l'effet Sues', indéniablement plus important après la première moitié du XXe siècle. Des équations ont été développées afin de retirer cet effet des séries isotopique du carbone et permettre de mieux identifier les autres facteurs d'influence sur les rapports  $\delta^{13}\text{C}$  (Loader *et al.*, 2007).

Ainsi, mis à part la valeur isotopique du  $\text{CO}_2$  et sa pression atmosphérique, les facteurs qui influencent 'b' ou 'pi' et en conséquence la valeur  $\delta^{13}\text{C}$  finale d'un cerne de croissance sont : l'ouverture stomatique (Figure 1) et le taux photosynthétique, eux-mêmes dépendant de l'âge, la santé de l'arbre, l'humidité relative, la température ambiante, la disponibilité en eau et la qualité de l'air (pollution; Savard, 2010). Encore une fois, si l'on exclut l'impact de la pollution et les effets d'âge et de santé de par une sélection de spécimens sains de sites non exposés, tout en retirant les cernes de la période juvénile, les paramètres climatiques et l'ensoleillement (rayonnement solaire) deviennent les principaux facteurs d'influence sur la valeur  $\delta^{13}\text{C}$  finale d'une série de cernes. Spécifiquement, une température ambiante plus élevée peut augmenter le taux de photosynthèse, ce qui diminue la discrimination contre le  $^{13}\text{C}$  par les enzymes et augmente le rapport  $\delta^{13}\text{C}$ . Une restriction hydrique peut entraîner chez l'arbre une fermeture des stomates et générer le même type d'effet. Des études ont montré par exemple des liens entre le rapport  $\delta^{13}\text{C}$  de la cellulose des

cernes et l'humidité relative, la température, les précipitations et la disponibilité en eau dans le sol (voir la revue par Loader *et al.*, 2007). Par ailleurs, le débit d'une rivière dont le bassin de drainage est d'envergure représente un intégrateur des conditions climatiques régionales, de sorte que plusieurs études ont documenté des populations d'arbres pour lesquelles les séries  $\delta^{13}\text{C}$  corrélaient fortement avec ce paramètre (*p. ex.* Hemming *et al.*, 1998; voir aussi les chapitres 15 et 19 du présent ouvrage).

L'arbre constitue un système vivant très sensible aux conditions de son environnement. En réponse à ces conditions, il modifie les processus d'assimilation des éléments vitaux que sont l'oxygène et le carbone, ce qui marque leurs rapports isotopiques. Plusieurs processus internes et externes peuvent être modifiés au même moment et il est parfois difficile de tirer l'information climatique d'une série dendroisotopique. On peut considérer que la sensibilité de l'arbre et ses effets isotopiques subtils à bien des égards représentent à la fois la force et la complexité de la dendroisotopie. En conséquence, par rigueur et pour des raisons pratiques, l'utilisation des isotopes stables pour des fins de reconstitution climatique est étroitement associée aux traitements statistiques (Chapitres 15 et 19). Ce type de traitement permet d'identifier les principaux paramètres de contrôle des réponses isotopiques d'une population d'arbres soumis à des conditions climatiques au cours d'une période dont les conditions sont connues, et de reconstituer pour le passé les variations soit d'un seul paramètre (*p. ex.* température estivale maximale) ou d'un indice reflétant des ambiances climatiques.

En somme, les rapports isotopiques du carbone et de l'oxygène des cernes de croissance représentent des proxies des change-

ments environnementaux. La dendroisotopie appliquée à l'étude des changements du rayonnement solaire et des conditions climatiques anciens est en essor. Combinée aux autres proxies et archives naturelles, elle pourra permettre d'élucider des questions clés quant aux cycles climatiques du passé et aux causes du récent changement climatique.

<https://doi.org/10.4095/328048>

### Références

- Anderson, W.T., Bernasconi, S.M., Mckenzie, J.A., Saurer, M. et Schweingruber, F.H., 2002. Model evaluation for reconstructing the oxygen isotopic composition in precipitation from tree ring cellulose over the last century. *Chemical Geology*, 182: 121-137.
- Barbour, M.M., 2007. Stable oxygen isotope composition in plant tissue: a review. *Functional Plant Biology*, 34: 83-94.
- Farquhar, G.D., Ehleringer, R.H. et Hubick, K.T., 1989. Carbon isotope discrimination and photosynthesis. *Annual Review in Plant Physiology. Plant Molecular Biology*, 40: 503-537.
- Hemming, D.I., Switsur, J.S., Heaton, T.H.E. et Carter, A.H.C., 1998. Climate variation and the stable carbon isotope composition of tree ring cellulose: an intercomparison of *Quercus robur*, *Fagus sylvatica* and *Pinus silvestris*. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 50(1): 25-33, DOI: 10.3402/tellusb.v50i1.16019.
- Loader, N.J., McCarroll, D., Gagen, M., Robertson, I. et Jalkanen, R., 2007. Extracting climatic information from stable isotopes in tree rings. *Terrestrial Ecology*, 1: 27-48.
- Savard, M.M., 2010. Tree-ring stable isotopes and historical perspectives on pollution - an overview. *Environmental Pollution*, 158: 2007-2013.
- Savard, M.M, Bégin, C. et Marion, J., 2020. Response strategies of boreal spruce trees to anthropogenic changes in air quality and rising pCO<sub>2</sub>. *Environmental Pollution*, 261, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114209>
- Savard, M.M. et Daux, V., 2020. An Overview on Isotopic Divergence – Causes for instability of Tree-Ring Isotopes and Climate Correlations. Overview article, *Climate of the Past*, 16: 1223-1243, [doi.org/10.5194/cp-16-1223-2020](https://doi.org/10.5194/cp-16-1223-2020).
- Saurer, M., Borella, S. et Leuenberger, M., 1997.  $\delta^{18}\text{O}$  of tree rings of beech (*Fagus sylvatica*) as a record of  $\delta^{18}\text{O}$  of the growing season precipitation, *Tellus, Serie B*, 49: 80-92.

### 3. Les séries dendroisotopiques et leur signification climatique

Christian Bégin, Martine M. Savard, Joëlle Marion et Mathieu Gingras

#### Résumé

Trois séries dendroisotopiques du carbone et de l'oxygène représentatives du secteur amont du bassin versant de la Grande Rivière et couvrant la période de 1800 à 2005, ont été produites dans le cadre du projet ARCHIVES. Dans l'optique d'utiliser les rapports isotopiques des cernes de croissance pour reconstituer les conditions climatiques des derniers siècles, leur signification climatique a d'abord été évaluée par l'analyse de leurs liens statistiques avec les séries hydrométéorologiques disponibles pour la région. Les résultats montrent que les deux types de rapports isotopiques de la cellulose du bois ( $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{18}\text{O}$ ) sont globalement sensibles aux mêmes paramètres climatiques, mais à des degrés différents, et que cette sensibilité augmente lorsque les deux indicateurs isotopiques sont combinés (moyenne des valeurs  $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{18}\text{O}$ ). Ils répondent à la température maximale et aux précipitations totales de la période estivale (juin à août), et aussi à certains paramètres intégrant plusieurs aspects du climat régional tels qu'un indice climatique combinant les températures et précipitations, le déficit de pression de vapeur (DPV) et les débits des cours d'eau régionaux. C'est d'ailleurs le DPV qui est le plus fortement corrélé aux valeurs isotopiques en raison de son influence directe sur les processus de fractionnement isotopique reliés au fonctionnement des stomates. À la lumière des résultats présentés dans ce chapitre, les rapports isotopiques de l'épinette noire apparaissent comme d'excellents indicateurs climatiques pour le secteur boréal du Nord-est américain.

#### Abstract

Three carbon and oxygen dendroisotopic series representative of the upstream sector of the La Grande River watershed and covering the period between 1800 and 2005 were produced under the ARCHIVES project. In order to use tree-ring isotopic ratios to reconstruct climatic conditions of the last centuries, we first assessed their climatic significance by conducting a statistical study of their relationship with hydrometeorological series available for the region. The results show that the two types of isotopic ratios in wood cellulose ( $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$ ) are generally sensitive to the same climatic parameters, but at varying degrees, and that this sensitivity increases when the two isotopic indicators are combined (mean  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  values). They respond to the maximum temperature and total precipitation of the summer season (June to August), and also to some parameters integrating several aspects of the regional climate such as a climate index combining temperatures and precipitations, the vapor pressure deficit (VPD) and regional River discharge. VPD is the parameter that most strongly correlates with the isotopic values, due to its direct influence on isotope fractionation processes related to stomatal functioning. The results presented in this chapter, clearly show that isotopic ratios of black spruce trees can be considered as excellent climate indicators for the boreal sector of northeastern America.

#### Introduction - Les avantages de l'analyse dendroisotopique

Parallèlement à l'étude des paramètres physiques des cernes de croissance (largeur et densité des cernes), les rapports isotopiques du carbone et de l'oxygène ( $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{18}\text{O}$ ) des cernes ont été analysés et utilisés pour reconstituer les conditions hydro-climatiques des deux derniers siècles. Le recours aux isotopes stables des cernes de croissance des arbres dans les études paléoclimatiques présente plusieurs avantages. D'abord, les mécanismes régissant l'assimilation du carbone atmosphérique par l'arbre et le fractionnement des isotopes  $^{13}\text{C}$  et  $^{12}\text{C}$  qui lui est associé sont maintenant bien documentés depuis les travaux de Farquhar *et al.* (1989). On comprend aussi relativement bien le fractionnement des isotopes de l'eau (O et H), depuis la formation des précipitations dans les masses nuageuses jusqu'à leur absorption par les racines des arbres et leur évaporation au niveau du système foliaire (voir chapitre 2 sur la dendroisotopie). Les travaux sur le fractionnement isotopique dans les arbres ont mis en évidence l'influence directe des variations des conditions climatiques sur les rapports isotopiques mesurés dans les cernes, ce qui en font de puissants indicateurs climatiques (McCarroll et Loader, 2004). De plus, contrairement aux séries de largeurs de cernes, les séries dendroisotopiques n'ont pas à être standardisées (*detrended*) puisque les valeurs isotopiques ne sont pas influencées par les facteurs biologiques tels l'effet de l'âge et de la compétition. Les variations isotopiques à moyen et long terme sont préservées et peuvent donc être interprétées en termes climatiques. Pour toutes ces raisons, les rapports isotopiques de cernes de croissance sont de plus en plus utilisés, et avec succès, comme indicateurs des conditions climatiques passées. L'approche dendroisotopique requiert ce-

pendant un effort analytique considérable pour chaque arbre étudié en comparaison aux analyses dendrochronologiques classiques. Par ailleurs, en raison de l'intensité du signal climatique que renferment les rapports isotopiques, de la forte réplication des valeurs obtenues d'un arbre à l'autre et de l'influence minimale des autres facteurs externes, l'approche a l'avantage de nécessiter l'analyse d'un nombre restreint d'arbres pour obtenir des résultats satisfaisants.

#### La production des séries dendroisotopiques

Parmi la centaine de sites forestiers faisant partie du réseau dendrochronologique du bassin de la Grande Rivière, trois ont été retenus pour les analyses isotopiques. Ils sont tous situés dans le secteur amont du bassin. Des efforts ont été faits pour que les conditions écologiques, géographiques et géologiques de chacun des sites soient comparables, dans ce cas-ci de vieilles pessières noires épargnées par les incendies et développées sur des versants en pente douce, généralement bien drainés. À chacun des sites, quatre ou cinq arbres ont été minutieusement sélectionnés et échantillonnés pour les analyses dendroisotopiques. Les sections de troncs prélevées ont été redécoupées en atelier de façon à en extraire quatre rayons de 8 x 8 mm d'orientations opposées. Les cernes de croissance complets ont ensuite été séparés manuellement le long de ces rayons. Il a en effet été établi que pour cette région (nord-est de l'Amérique du Nord) il n'était pas nécessaire de séparer et d'analyser le bois final des cernes afin d'accroître le signal climatique des valeurs isotopiques (Alvarez *et al.*, 2018). La séparation des cernes a été faite à une résolution biannuelle pour la période 1800 à 1939 afin de réduire l'effort analytique tout en maintenant une résolution temporelle élevée et à une résolution annuelle pour la portion ré-

cente de la séquence (1940 à 2005) de façon à permettre les comparaisons statistiques entre les valeurs isotopiques et les données météorologiques disponibles dans la région. Les quatre échantillons de bois appartenant à la même année ou paire d'années sont regroupés et broyés afin d'homogénéiser le matériel avant d'en extraire la cellulose. Cette étape consiste à isoler cette composante du bois en éliminant la lignine et les résines qui peuvent altérer le signal isotopique. Les valeurs  $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{18}\text{O}$  ont été mesurées sur des spectromètres de masse à rapports isotopiques et leurs périphériques à combustion et à pyrolyse, respectivement (voir chapitre 2 sur la dendroisotopie). Au total, pour les trois sites, 1799 analyses  $\delta^{13}\text{C}$  et 1798 analyses  $\delta^{18}\text{O}$  ont été produites.

#### Les séries $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{18}\text{O}$

Bien que les séries dendroisotopiques n'aient pas à être standardisées, elles requièrent cependant certaines corrections, dont celle de l'effet Suess dû à la présence de  $\text{CO}_2$  anthropique dans l'atmosphère (voir chapitre 2 sur la dendroisotopie). Les courbes individuelles ainsi corrigées sont ensuite normalisées afin de ramener les courbes à la même échelle de valeurs et de réduire ainsi l'influence de l'activité métabolique propre à chaque individu. Enfin, les valeurs isotopiques moyennes sont calculées pour chaque site et pour chaque isotope analysé (C et O; Figure 1).

Les trois courbes moyennes du  $\delta^{18}\text{O}$  montrent une très forte covariation tant au niveau interannuel qu'au niveau des tendances à moyen et long termes. Une telle similarité indique clairement qu'une part importante des variations des valeurs  $\delta^{18}\text{O}$  contient un signal régional puisque la distance entre les sites étudiés est de plus de 400 kilomètres. Les valeurs  $\delta^{18}\text{O}$  ne montrent pas de tendance claire à l'échelle de toute la période étudiée. Elles exhibent cependant d'importantes variations à court terme (inter-annuelles) et à moyen terme (de l'ordre de 40 ans). Les courbes du  $\delta^{13}\text{C}$  montrent également d'importantes covariations entre elles et ce, à différentes échelles temporelles. Elles présentent notamment toutes la même tendance à long terme à la hausse. La concordance des valeurs à court terme est également très élevée. Des différences dans les tendances à moyen terme des trois sites sont cependant notables; les écarts de la portion la plus récente de la période 1992-2003 en sont de bons exemples. Ils reflètent l'influence des conditions locales, à l'échelle de chaque site et même de chaque arbre, sur le fractionnement des isotopes du carbone. Les nombreuses similitudes entre les trois courbes isotopiques suggèrent néanmoins que les conditions à l'échelle régionale jouent également un rôle important sur les variations du  $\delta^{13}\text{C}$  des cernes de croissance.

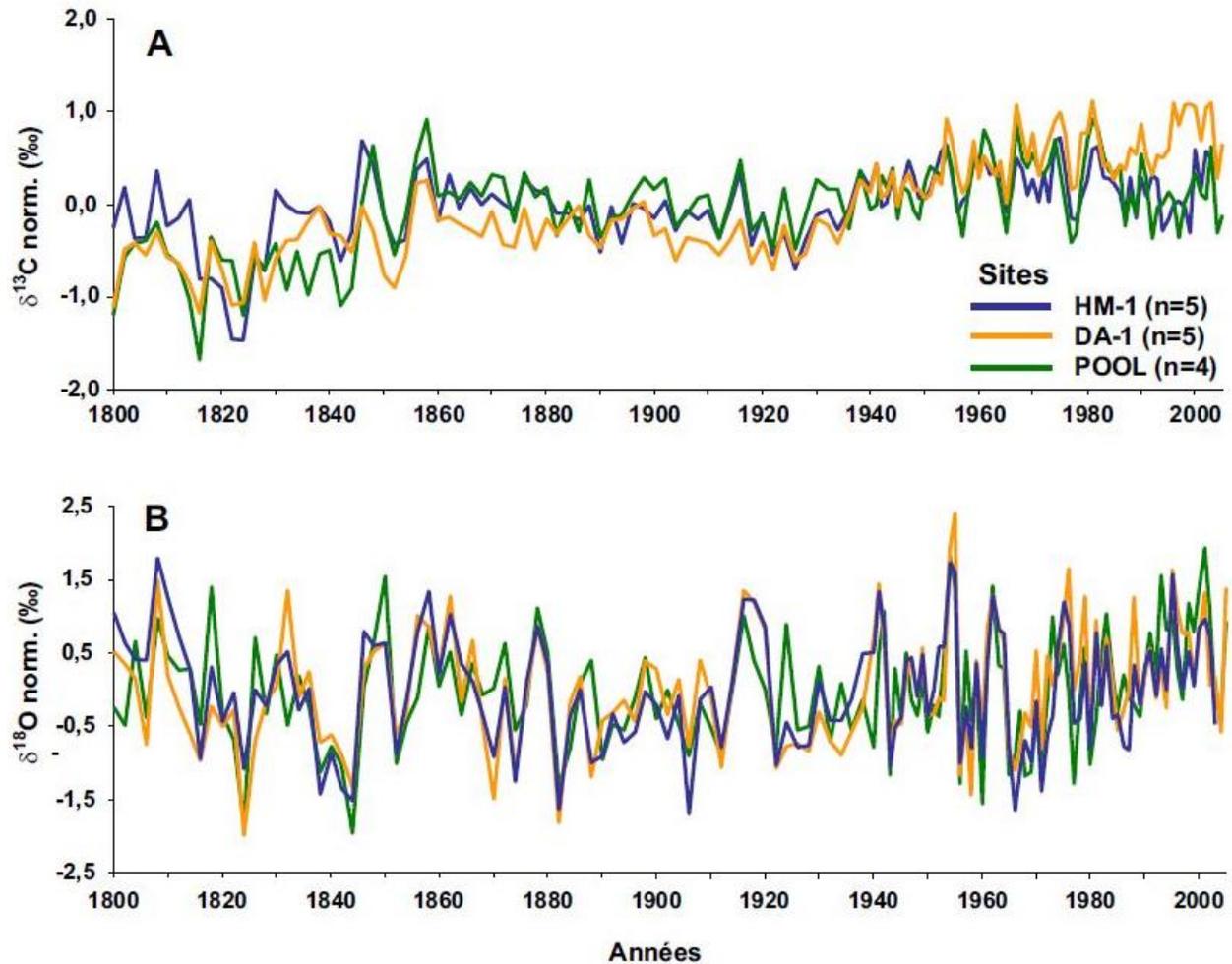


Figure 1. Séries dendroisotopiques moyennes pour le carbone (A) et l'oxygène (B) des sites HM1, DA-1 et POOL. n = nombre d'arbres.

### La relation entre les rapports isotopiques et les paramètres climatiques

Les rapports du  $\delta^{13}\text{C}$  et du  $\delta^{18}\text{O}$  des arbres reflètent généralement les conditions naturelles prévalant au cours de la période de formation des cernes. Les valeurs isotopiques du carbone sont liées aux conditions d'humidité et de température entourant l'arbre en raison de l'influence directe de ces conditions sur le taux de photosynthèse ainsi que sur l'ouverture et la fermeture des stomates (petites ouvertures dans l'épiderme des feuilles qui s'ouvrent ou se ferment selon la température et l'humidité) qui contrôlent l'ensemble des échanges gazeux, incluant

l'évapotranspiration. Le niveau d'ouverture des stomates détermine l'intensité de la diffusion et la concentration du  $\text{CO}_2$  dans la feuille, ainsi que l'évaporation des molécules d'eau. Par ailleurs, le rapport isotopique de l'oxygène de la cellulose reflète la signature  $\delta^{18}\text{O}$  des précipitations, laquelle varie en fonction des températures de l'air au moment de la formation des masses nuageuses. Cependant, une partie du fractionnement des isotopes de l'oxygène sera associée aux conditions de température et d'humidité régissant l'évaporation des molécules d'eau par les stomates ponctuant la surface des feuilles.

De façon à évaluer la signification climatique des rapports isotopiques des cernes de croissance spécifiquement dans le contexte de la forêt boréale de l'est du Canada, nous avons comparé statistiquement les courbes isotopiques moyennes du  $\delta^{13}\text{C}$  et du  $\delta^{18}\text{O}$  (moyenne des trois sites) à un ensemble de paramètres hydroclimatiques régionaux. Les liens statistiques entre les valeurs moyennes des deux séries isotopiques ( $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{18}\text{O}$ ) et les mêmes paramètres climatiques ont également été évalués. Les séries climatiques utilisées dans les tests statistiques sont les moyennes mensuelles des températures (minimum, maximum et moyenne) et les totaux mensuels des précipitations calculés pour les stations météorologiques d'Environnement Canada les plus proches des sites analysés (Wabush Lake, Nitchequon et Schefferville). Les valeurs mensuelles des trois stations ont été normalisées puis jumelées afin de produire des séries climatiques régionales de température et de précipitations représentant des écarts à la moyenne pour la période de 1943 à 2005. À partir de ces séries régionales, un certain nombre de paramètres dérivés tels le déficit de pression de vapeur (DPV) et l'évapotranspiration potentielle (ETP) ont été calculés. On a aussi calculé un indice climatique (I.C.) en soustrayant les températures normalisées ( $T_{norm.}$ ) des précipitations norma-

lisées ( $P_{norm.}$ ). Un tel indice permet de caractériser des ambiances climatiques typiquement associées au secteur nord de la forêt québécoise (conditions chaude et sèches vs. froides et humides). De plus, une série hydrologique régionale normalisée couvrant la période de 1950 à 2005 a été calculée en jumelant les séries de la rivière Ashuanipi, de la Churchill, de même que la série des apports à la Caniapiscou établie par Hydro-Québec. Enfin, les séries isotopiques ont aussi été comparées aux données de température sur points de grille spatiale ( $0,5^\circ$  lat. x  $0,5^\circ$  long.) du Climate Research Unit (CRU TS 3.1).

Les plus fortes corrélations obtenues entre les valeurs isotopiques et les paramètres hydroclimatiques illustrent clairement qu'en milieu naturel boréal, les rapports  $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{18}\text{O}$  sont influencés, à des degrés différents, par les mêmes paramètres ou par des paramètres souvent reliés entre eux ou complémentaires (Tableau 1; Bégin *et al.*, 2015).

C'est d'ailleurs ce qui explique leur covariation dans le temps. Cependant, dans presque tous les cas, les coefficients de corrélation sont plus élevés avec la série moyenne de l'oxygène, témoignant de sa plus grande sensibilité au climat. Les tests statistiques montrent que les rapports isotopiques de l'oxygène sont en grande partie contrôlés par les températures maximales et

**Tableau 1. Coefficients de corrélations Pearson (r) entre les séries isotopiques (moyenne des sites Pool et HM1 et DA1) et les paramètres hydroclimatiques régionaux.**

	Températures maximum (1943-2005)	Précipitations (1943-2005)	I.C. (1943-2005)	D.P.V. (1954-2005)	Apports (1950-2005)	Température max. <sup>1</sup> (1940-2005)
$\delta^{18}\text{O}$ moyen	0,65*	-0,46*	-0,59*	0,67*	-0,59****	0,57*
$\delta^{13}\text{C}$ moyen	0,59**	-0,36*	-0,53*	0,64**	-0,50†	0,61***
Moy. combinée normalisée	0,73*	-0,50*	-0,67*	0,76*	-0,64****	0,68*

<sup>1</sup> Valeurs CRU TS 3.1

\* Moy. juin-août \*\*Moy. juillet-sept. \*\*\* Moy. juillet-août \*\*\*\* Moy. juin-novembre † juillet-sept.

le déficit de pression de vapeur diurne des mois de juin à août ( $r = 0,65$  et  $0,67$ , respectivement), alors que ceux du carbone répondent surtout aux deux mêmes paramètres, mais pour la période de juillet à septembre ( $r = 0,59$  et  $0,64$ ). Les deux isotopes sont aussi corrélés significativement à d'autres paramètres intégrateurs tels que l'indice climatique et la série hydrologique régionale (apports). Enfin, il existe aussi une corrélation inverse entre les valeurs isotopiques de l'oxygène et du carbone et les précipitations totales de la période de juin à août. Ce lien est cependant plus faible qu'avec tous les autres paramètres apparaissant au tableau 1 ( $r = -0,46$  pour l'oxygène et  $-0,36$  pour le carbone). D'autre part, dans tous les cas, les

rapports combinés (moyenne des valeurs normalisées de l'oxygène et du carbone) montrent les liens statistiques les plus forts (Tableau 1, Figure 2). Les coefficients de corrélation atteignent alors  $0,73$  dans le cas des températures maximales des mois de juin à août et  $-0,5$  dans le cas des précipitations totales des mêmes mois (Tableau 1). En effet, sous des conditions naturelles, et particulièrement dans un contexte boréal où le régime climatique estival oscille généralement entre des conditions fraîches et pluvieuses et des conditions chaudes et sèches, les effets isotopiques sont souvent complémentaires et présentent, dans l'ensemble, les mêmes tendances contrôlées par les mêmes paramètres climatiques. En combinant les deux isotopes,

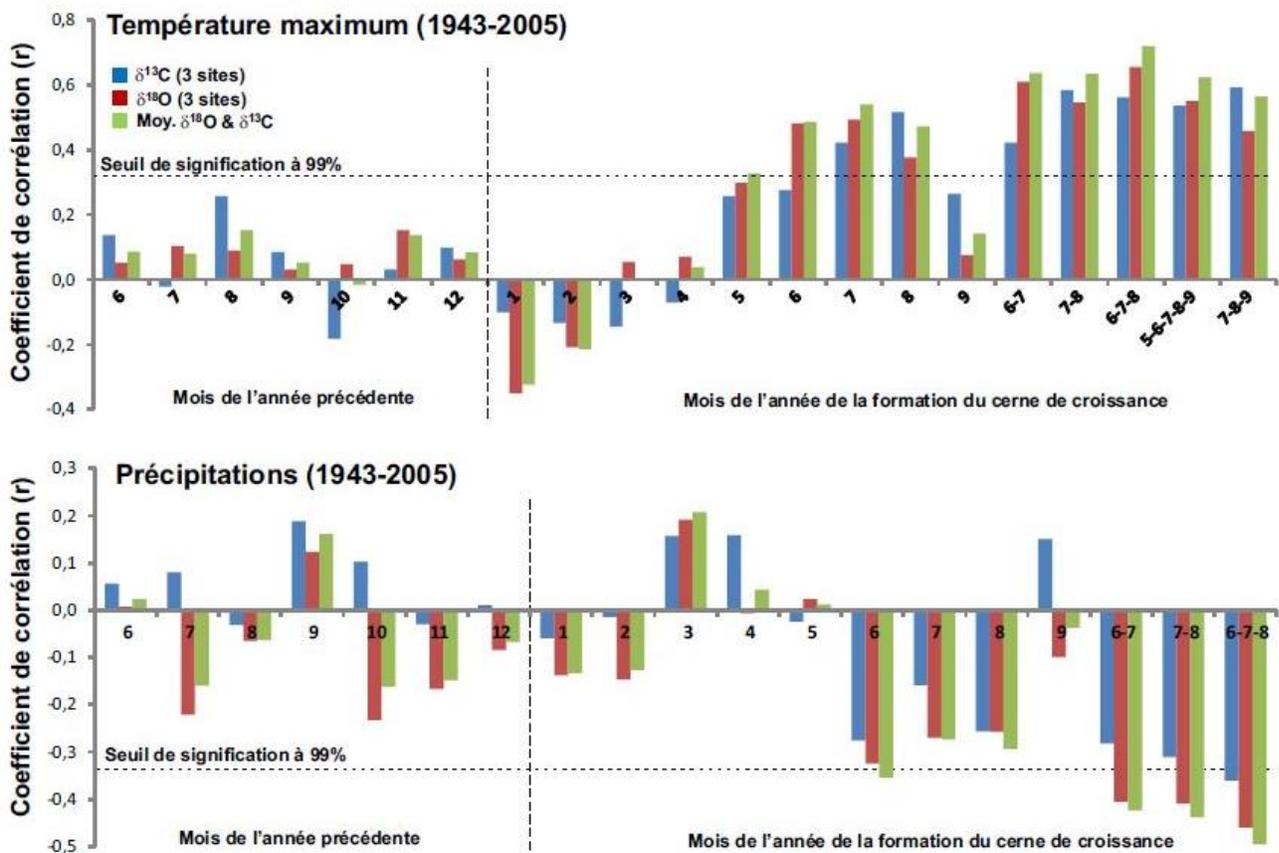


Figure 2. Coefficients de corrélation entre les signaux isotopiques ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$  et moyenne des deux rapports isotopiques) et les températures maximums et les précipitations totales mensuelles du mois de juin de l'année précédente jusqu'au mois de septembre de l'année courante (les numéros de mois apparaissent sous les axes des abscisses).

on réduit le bruit de fond de leur réponse respective reliée aux facteurs non climatiques et on accroît la part du signal isotopique moyen contrôlé directement par le climat. La figure 2 illustre graphiquement, à titre d'exemple, les coefficients de corrélation entre les séries isotopiques et les températures maximales et les précipitations totales mensuelles du mois de juin de l'année précédente jusqu'au mois de septembre de l'année courante (celle correspondant à la formation du cerne de croissance). On y voit d'abord que les valeurs isotopiques sont contrôlées par les conditions climatiques des mois d'été de l'année en cours et que cette relation devient plus forte lorsque les valeurs de plusieurs mois d'été sont regroupées. Cette observation confirme que les conditions prévalant sur l'ensemble de la saison de croissance ont une incidence sur les rapports isotopiques finaux des cernes de croissance.

#### Interprétation et conclusion

Les résultats présentés ici indiquent que les dendroisotopes de l'épinette noire sont contrôlés par plus d'un paramètre climatique (notamment la température et les précipitations) pendant la même période de l'année quoique les températures maximales jouent un rôle dominant. Pour cette raison, les valeurs isotopiques sont fortement corrélées aux paramètres intégrant plusieurs aspects du climat régional tels que l'indice climatique, le DPV et les débits régionaux. Leur influence rend compte de l'ensemble des sources de fractionnement isotopique chez les conifères boréaux, lesquels sont rarement soumis à des stress hydriques. Dans un tel

contexte, les valeurs  $\delta^{13}\text{C}$ , par exemple, seront surtout contrôlées par les facteurs climatiques régissant le taux de photosynthèse (température) mais aussi, dans une moindre mesure, par ceux influençant la conductance stomatique. Le rôle prédominant du DPV sur le fractionnement isotopique illustre bien ces influences combinées. Le DPV dépend directement de la température, mais aussi de l'humidité relative. Il reflète, en somme, le pouvoir évaporatif de l'air; un DPV élevé, par exemple, fera augmenter la demande d'évaporation pour les arbres dont le contrôle est assuré par les stomates. Comme ceux-ci contrôlent l'assimilation du  $\text{CO}_2$  atmosphérique et l'évaporation de l'eau dans les feuilles et comme ils sont très sensibles à la température et à l'humidité de l'air, leur ouverture ou leur fermeture aura un impact direct sur le fractionnement isotopique du carbone et de l'oxygène. Dans le cas du carbone, par exemple, lorsque le DPV est élevé, les stomates se referment pour limiter les pertes en eau; il en résulte une réduction de la conductance stomatique, de la concentration interne en  $\text{CO}_2$  et de la discrimination à l'encontre du  $^{13}\text{C}$ , entraînant, conformément au modèle de fractionnement isotopique du carbone défini par Farquhar *et al.* (1989), une augmentation de la valeur  $\delta^{13}\text{C}$ . Le graphique présenté à la figure 3 illustre cette relation très étroite entre le DPV estival et les valeurs isotopiques combinées. Ce lien, qui s'explique donc par les processus de fractionnement, peut s'observer aussi bien dans les variations à court terme que dans celles à long terme.

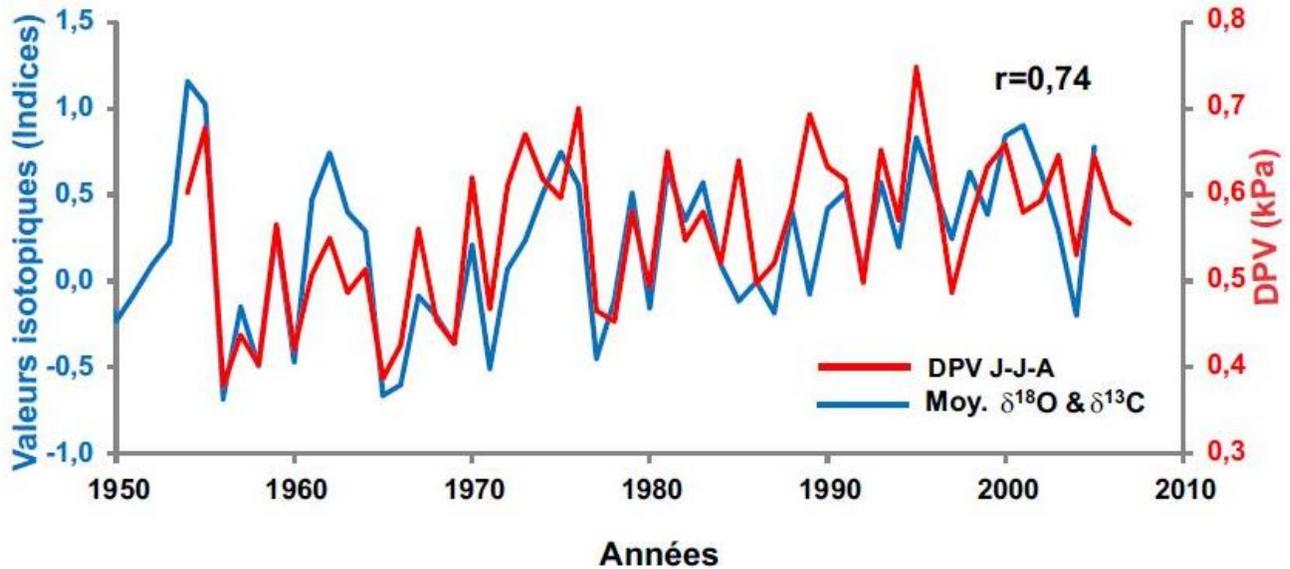


Figure 3. Relation entre les valeurs isotopiques moyennes ( $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{18}\text{O}$ ) et les valeurs moyennes du déficit de pression de vapeur diurne de juin à août pour la période couverte par les données instrumentales.

Les résultats statistiques présentés dans ce chapitre mettent en évidence la forte sensibilité des isotopes stables du carbone et de l'oxygène des cernes de croissance de l'épinette noire aux conditions climatiques régionales. Les rapports isotopiques de cette espèce apparaissent donc comme d'excellents indicateurs climatiques pour le secteur boréal du Nord-est américain qui peuvent être utilisés, à l'aide de fonctions statistiques, pour reconstituer les variations des conditions climatiques des derniers siècles, sinon des derniers millénaires, à une très haute résolution temporelle.

<https://doi.org/10.4095/328068>

### Références

Alvarez, C., Bégin, C., Savard, M.M., Dinis, L., Marion, J., Smirnoff, A. et Bégin, Y., 2018. Relevance of using whole-ring stable isotopes of black spruce trees in the perspective of climate reconstruction. *Dendrochronologia*, 50: 64-69.

Bégin, C., Gingras, M., Savard, M.M., Marion, J., Nicault, A. et Bégin, Y., 2015. Assessing tree-ring carbon and oxygen stable isotopes for climate reconstruction in the Canadian north-eastern boreal forest. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 423: 91-101

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

McCarroll, D., Gagen, M.H., Loader, N.J., Robertson, I., Anchukaitis, K.J., Los, S., Young, G.H.F., Jalakanen, R., Kirchhefer, A. et Waterhouse, J.S., 2009. Correction of tree ring stable carbon isotope chronologies for changes in the carbon dioxide content of the atmosphere. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73 (6): 1539-1547.

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

## 4. L'analyse des sédiments lacustres

Pierre Francus et David Fortin

### Résumé

Les séquences sédimentaires lacustres représentent, en plus des cernes des arbres, une autre source indirecte d'informations sur les conditions hydro-climatiques passées. Les séquences laminées annuellement (les varves) sont dites lithogéniques ou clastiques lorsqu'elles sont le produit de l'accumulation de sédiments terrigènes liés aux variations saisonnières des apports en eau. L'équipe ARCHIVES s'est dotée d'une procédure pour la prospection de lacs susceptibles d'avoir des séquences de sédiments varvés, pour l'échantillonnage, le prélèvement, la conservation et le traitement des échantillons, et pour la construction de séries sédimentologiques « composites ». Les caractéristiques mesurées de ces dernières, dont l'épaisseur des varves, sont comparées aux registres de données hydroclimatiques et aussi aux autres reconstitutions établies par dendrochronologie.

### Abstract

Lacustrine sedimentary sequences represent, in addition to tree rings, another indirect source of information on past hydroclimatic conditions. The laminated sequences of sediments stands as "varves" when being established to be annual. They are lithogenic or clastic when they originate from the accumulation of terrigenous sediments related to seasonal variations of hydrologic run-off. The ARCHIVES experts has adopted a procedure for prospecting lakes likely to have varved sediment sequences, for sampling, collecting, conserving and processing sediments samples, and for the construction of "composite" sedimentological series. The measured characteristics of the latter (thick-

ness of the varves) are compared with the hydroclimatic data registers and also with the other reconstructions established by dendrochronology.

### Introduction

Des enregistrements du climat du passé sont conservés dans divers types d'archives naturelles (Bradley, 1999). Celles qui existent dans la région d'étude du projet ARCHIVES sont les cernes des arbres, les tourbières et les sédiments lacustres. Si les cernes des arbres constituent la source principale d'information du projet ARCHIVES pour reconstruire les conditions hydroclimatiques de la forêt boréale québécoise, il est cependant apparu important de comparer des indicateurs dendroclimatiques à d'autres, indépendants. L'objectif est donc d'introduire dans ce projet un nouvel indicateur basé sur l'étude des sédiments lacustres susceptibles de fournir des reconstructions comparables à celles des cernes d'arbres. L'intérêt principal de cet indicateur est son lien direct avec l'hydrologie des bassins versants. En effet, les sédiments transportés par les rivières et qui s'accumulent au fond des lacs contiennent une manne d'informations sur les conditions hydrologiques passées du bassin versant.

Ainsi, le volet « sédimentologie » du projet ARCHIVES s'est tout d'abord attardé à rechercher des sites lacustres qui contiennent des laminations annuelles ou varves, qui sont les seules autres archives naturelles que les cernes annuels des arbres qui sont théoriquement susceptibles de fournir des reconstructions hydro-climatiques de résolution annuelle (O'Sullivan, 1983). Une fois les varves découvertes, il a fallu ensuite cons-

truire des séries sédimentologiques, déterminer les corrélations entre les propriétés sédimentaires et les observations hydro-climatiques dans la région, établir, en utilisant ces corrélations, des reconstructions hydroclimatiques à partir des propriétés des sédiments, et enfin comparer ces reconstructions avec celles établies par les autres indicateurs, c'est-à-dire les cernes des arbres. Ce chapitre passe en revue les diverses étapes mises en œuvre par ARCHIVES pour obtenir les résultats présentés dans les chapitres suivants et plus particulièrement celui sur Grand Lake (Chapitre 20).

#### Les sédiments varvés (annuellement laminés)

Les archives sédimentaires en général sont une source d'information pour les études portant sur les fluctuations du climat et des environnements du passé. Elles peuvent contenir de longues séries continues d'indicateurs basés sur des propriétés physiques, chimiques et biologiques. Dans certaines circonstances favorables, elles peuvent présenter une structure varvée qui reflète un cycle de dépôt annuel (Sturm, 1979; Renberg, 1982; Kemp, 1996). La formation et la composition des varves sont contrôlées par divers processus climatiques, hydrologiques et biologiques. Cependant, deux facteurs semblent prépondérants pour trouver des varves : (i) avoir une saisonnalité bien marquée, et (ii) avoir des conditions qui préservent la structure originale des sédiments déposés. Dans les lacs, on trouve des varves clastiques, biogéniques et évaporitiques (Zolitschka, 2003; Zolitschka *et al.*, 2015), ou une combinaison de ces divers types. Les sédiments lacustres varvés sont rares et ont une épaisseur comprise entre 0,1 et 27 mm, avec une médiane de 1 mm (Ojala *et al.*, 2012). Les sédiments varvés sont des archives précieuses parce

que leur résolution annuelle ou saisonnière permet des comparaisons directes avec des données issues des cernes des arbres ou avec des données hydro-climatiques instrumentales. Leur étude requiert cependant un travail long et minutieux. Dans le cadre du projet ARCHIVES, nous nous sommes particulièrement intéressés à la présence de varves lithogéniques (ou clastiques) sur le territoire québécois. Les varves lithogéniques étant principalement composées de sédiments minéraux fins transportés par les rivières, elles constituent le type de sédiment le plus propice aux reconstitutions des conditions hydrologiques du passé.

#### À la recherche des varves

Avant le projet ARCHIVES, aucun lac contenant des sédiments varvés récents n'était répertorié dans la région d'étude. Si les lacs sont pléthoriques dans la forêt boréale, les conditions de formation et de préservation des varves y sont peu propices. En effet, les lacs du Bouclier canadien sont en général peu profonds, ce qui favorise le mélange complet de la colonne d'eau et la perturbation des sédiments. De plus, l'accumulation annuelle de sédiment y est trop faible pour préserver des laminations distinguables et mesurables : en moyenne de l'ordre de 0,2 mm par an. En nous basant sur les travaux en Finlande de Ojala *et al.* (2000), les efforts de prospection se sont focalisés sur des lacs profonds et protégés des vents dominants, et sur ceux ayant un grand bassin versant caractérisé par une géologie et des formations de surface susceptibles de contenir des sédiments fins non-consolidés. Sur les 50 lacs visités au cours des deux premières années du projet, 27 ont été échantillonnés et 8 seulement contenaient des laminations (Figure 1).

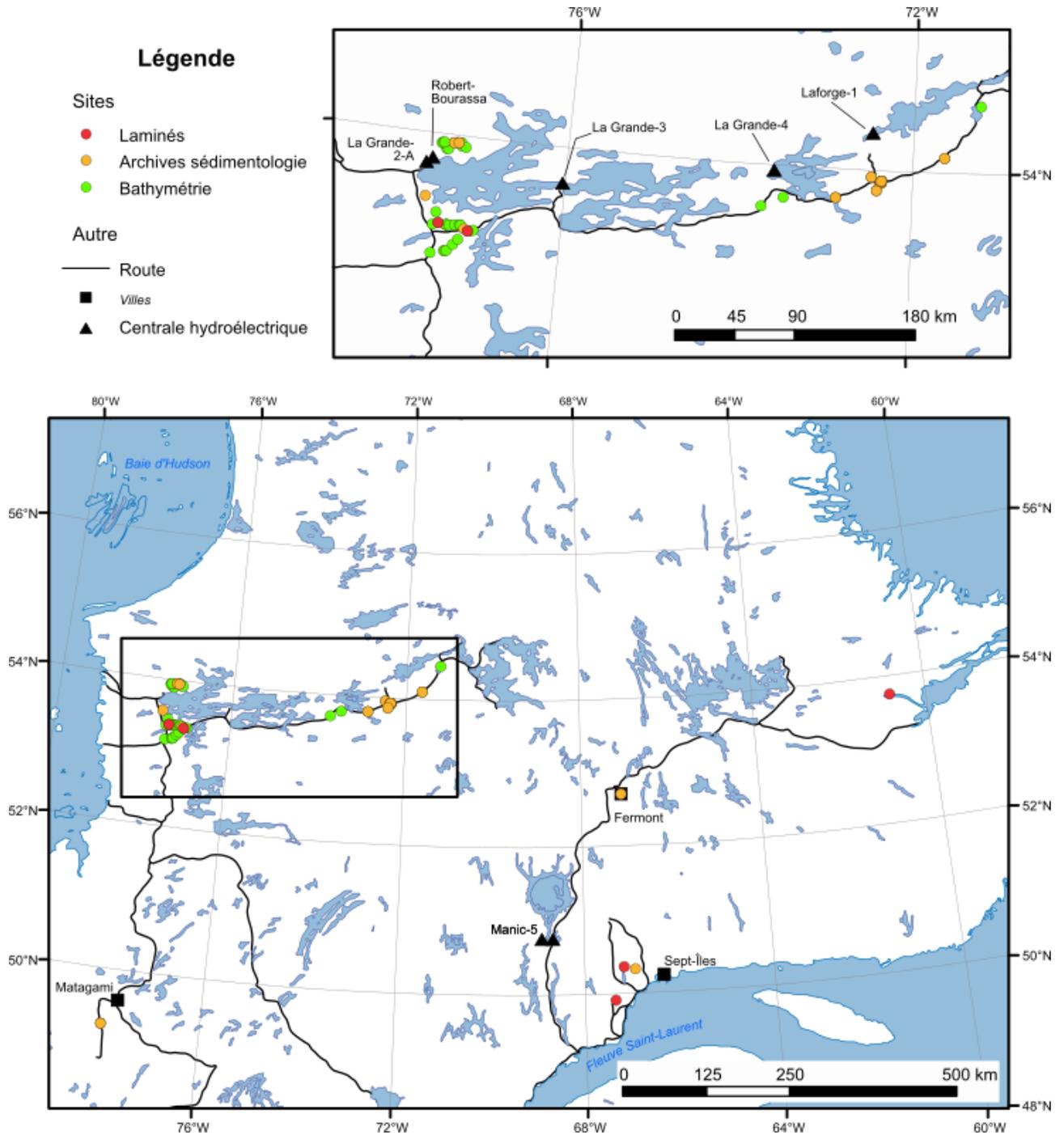


Figure 1. Localisation des lacs visités dans le cadre d'ARCHIVES. Les points jaunes sont les sites non-échantillonnés, les points verts indiquent un carottage, et les points rouges, la présence de sédiments laminés.

### Les laminations sont-elles des varves ?

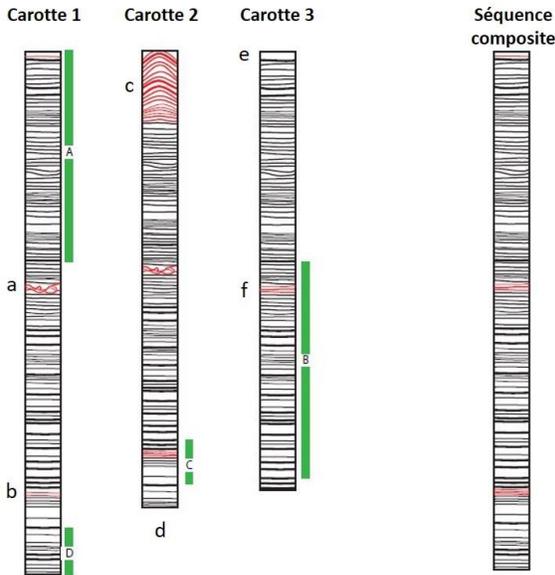
Les sédiments lacustres sont échantillonnés par carottage : on enfonce un tube ouvert dans les sédiments que l'on remonte en surface, plein d'une colonne sédimentaire intacte. Si la carotte contient des laminations, on doit alors rassembler plusieurs indices pour prouver que celles-ci sont bien annuelles, c'est-à-dire des varves. Premièrement, tout comme pour les cernes des arbres, des carottes parallèles récoltées dans le même site doivent contenir le même patron général de laminations. Ensuite, le comptage des varves doit correspondre aux résultats de datations faites par des techniques indépendantes, comme celle du  $^{210}\text{Pb}$  et du  $^{137}\text{Cs}$ . Enfin, il est essentiel d'identifier les processus responsables de la formation de chaque élément des laminations et d'identifier la saison au cours de laquelle ces éléments sont formés. Cette identification se fait en examinant le sédiment au microscope, de préférence en lames minces (Chapitre 20). On peut également examiner le contenu de pièges à sédiments installés dans la colonne d'eau à proximité du site de carottage, mais cette technique exige une présence sur le site pendant plusieurs saisons et plusieurs années. Il est également possible de comparer le nombre de laminations dans des carottes prises à plusieurs années d'intervalles. En bref, on peut donc parler de varves seulement si la succession des éléments qui la compose correspond à une année, que les processus de formation sont bien compris, et

que des datations indépendantes confirment les comptages.

### Construire des séries sédimentologiques

De nombreuses différences peuvent affecter l'aspect et les propriétés des séries de varves récoltées à divers endroits d'un lac. Tout d'abord, les varves lithogéniques sont souvent plus épaisses à proximité de la source de sédiments, c'est-à-dire de l'affluent principal du lac. Ensuite, des varves peuvent manquer dans certaines séries, car elles ont été affectées par une érosion locale, ou une perte de matériel lors du carottage. Enfin, des perturbations lors du carottage peuvent affecter la qualité du matériel récolté. En échantillonnant plusieurs carottes à divers endroits au sein d'un même lac, il est possible de détecter les varves manquantes (Lamoureux, 1999), et de choisir les sections les mieux préservées et les plus propices pour la mesure des propriétés des varves. Ensuite, on assemble les séries sélectionnées dans les diverses carottes pour construire une *série composite* (Figure 2). Cette dernière est virtuelle, et est idéalement continue, sans hiatus ni perturbation. Pour la mesure des épaisseurs, on aura pris soin de normaliser au préalable chaque série individuellement. C'est donc sur les sections de carottes de sédiment qui composent cette *série composite*, que sont effectuées toutes les mesures et analyses qui sont utilisées pour les reconstructions hydro-climatiques.

### Lier les propriétés des varves aux conditions environnementales



**Figure 2.** Schéma d'établissement d'une séquence composite. Dans cet exemple, 3 carottes varvées d'un même lac sont mises côte à côte. Leur patron est presque identique, mais les différences sont indiquées en rouge. Les intervalles sélectionnés pour faire partie de la séquence composite sont indiqués en vert. La carotte 1 contient la plus longue séquence sédimentaire, mais comprend un intervalle perturbé (a) et deux varves manquantes (b). La carotte 2 est perturbée au sommet par le carottage (c), contient des varves 10% plus fines que les deux autres, une séquence plus courte de 5 varves par rapport à la carotte 1 (d), mais une série de varve plus complète dans l'intervalle C. La carotte 3 contient la séquence la plus courte. Une varve est manquante au sommet (e), mais une section perturbée dans les deux autres carottes est intacte (f). La séquence composite consiste en la juxtaposition des meilleures sections (de A à D) des 3 carottes.

L'analyse microscopique et les observations de terrain permettent de comprendre les processus responsables de la formation des varves. On peut alors orienter la recherche de relations statistiques entre les propriétés des varves et les séries de mesures instrumentales des conditions environnementales, telles que celles fournies par les stations météorologiques ou les hydro-

graphes. Or, ces relations sont rarement linéaires, ce qui ajoute à la complexité du problème. Cependant, la plus grande difficulté réside dans le fait que les processus étudiés sont régis par régimes différents qui sont séparés par des seuils : par exemple, les lois régissant le transport de particules sédimentaires sont différentes selon que l'on a faire de la décantation, à des courants de turbidité, ou encore des courants de densité. Il n'est donc pas étonnant de trouver des corrélations statistiques faibles *a priori*, de l'ordre de  $R^2 = 0,5$ . Ces modèles statistiques sont cependant une amélioration importante par rapport aux modèles qualitatifs qui ne permettent que des diagnostics vagues (*p. ex.* plus chaud, plus humide). Les propriétés des varves les plus utilisées pour ce genre d'étude sont les épaisseurs d'éléments de varves, ou l'épaisseur totale, mais d'autres mesures sont parfois plus appropriées comme la granulométrie (Lapointe *et al.*, 2012), la composition chimique (Cuven, 2009) ou minéralogique (Trachsel *et al.*, 2010) ou encore la densité (Ojala *et al.*, 2004). Toutes ces mesures sont ou seront utilisées dans le cadre du projet ARCHIVES.

### Les reconstructions paléo-environnementales

Les reconstructions paléo-environnementales sont établies à partir des mesures des propriétés des varves transformées en paramètres hydro-climatiques à l'aide d'un modèle statistique établi selon les protocoles décrits plus haut. Une même archive sédimentaire peut, dans certains cas, servir de source pour la reconstruction de plusieurs paramètres environnementaux. Par exemple, un paramètre physique, comme l'épaisseur des varves permettra de reconstruire les apports hydriques totaux d'une rivière, tandis que les assemblages de diatomées (algues unicellulaires) préservés dans les sédiments

permettront de reconstruire le pH du lac dans lequel les carottes ont été prises. D'autre part, deux indicateurs différents analysés sur une même carotte, par exemple les assemblages de chironomes (insectes) et les pigments (molécules organiques résidus de la dégradation de certains organismes), sont susceptibles de fournir deux reconstructions différentes du même paramètre climatique, dans ce cas-ci la température (Birks *et al.*, 2000). Cet exercice est très instructif de la qualité des reconstructions. Comparer les reconstructions d'un même facteur climatique à partir de différents sites permet de distinguer les tendances régionales des variations dues à des facteurs purement locaux, comme la géomorphologie (Lewis *et al.*, 2012). Enfin, et c'est le but du projet ARCHIVES, comparer des reconstructions issues de deux types d'archives paléoclimatiques naturelles fournit des résultats suffisamment robustes pour servir de point de référence pour des modèles régionaux du climat et, dans notre cas plus particulier, de l'hydroclimat. Cela permet aussi de combler un manque de connaissance dans le contexte global des reconstructions climatiques de résolution annuelle (PAGES 2k Network, 2013).

### Perspectives

Seuls huit lacs sur les 50 visités contiennent des laminations. À ce jour, seuls les sédiments de Grand Lake, Labrador, sont prouvés être des varves. Les sédiments de deux autres lacs sont très probablement des varves (Nzekwe *et al.*, 2018). Des projets futurs s'attèleront à améliorer et allonger les reconstructions faites à Grand Lake Labrador (Chapitre 20), tandis que d'autres séries sédimentologiques varvées seront développées.

### Conclusion

Les sédiments varvés de lacs de la forêt boréale sont rares, mais ils existent. Leur analyse est longue, mais permet d'obtenir de longues reconstructions paléoenvironnementales (> 1000 ans) et de reconstruire plusieurs facteurs climatiques. Elles renforcent et affinent les reconstructions établies par les cernes des arbres.

<https://doi.org/10.4095/328069>

### Références

- Birks, H., Battarbee, R. et Birks, H., 2000. The development of the aquatic ecosystem at Krakenes Lake, western Norway, during the late glacial and early Holocene - a synthesis. *Journal of Paleolimnology*, 23 : 91-114.
- Bradley, R.S., 1999. *Paleoclimatology: Reconstructing Climates of the Quaternary*. Academic Press, San Diego, 610 p.
- Cuven, S., 2009. Validation et utilisation de la microfluorescence X pour caractériser des varves clastiques et quantification des paléoclimats de l'Holocène récent dans le Haut Arctique canadien. Thèse de doctorat de l'Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique, 328 p.
- Kemp, A.E.S. (ed.), 1996. *Palaeoclimatology and Palaeoceanography from Laminated Sediments*. Geological Society Special Publication 116, London, 258 p.
- Lamoureux, S., 1999. Spatial and interannual variations in sedimentation patterns recorded in nonglacial varved sediments from the Canadian High Arctic. *Journal of Paleolimnology*, 21: 73-84.
- Lapointe, F., Francus, P., Lamoureux, S., Said, M. et Cuven, S., 2012. 1750 years of large rainfall events inferred from particle size at East Lake, Cape Bounty, Melville Island, Canada. *Journal of Paleolimnology*, 48: 159-173.
- Lewis, T., Lafrenière, M. et Lamoureux, S., 2012. Hydrochemical and sedimentary responses of paired High Arctic watersheds to unusual climate and permafrost disturbance, Cape Bounty, Melville Island, Canada. *Hydrological Processes*, 26 : 2003-2018.
- Nzekwe, O., Francus, P., St-Onge, G., Lajeunesse, P., Fortin, D., Gagnon-Poiré, A., Philippe, É. et Normandeau, A., 2018. Recent sedimentation

- in three adjacent fjord-lakes on the Québec North Shore (Eastern Canada): facies analysis, laminae preservation and potential for varve formation. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 55 (2): 138-153.
- Ojala, A., Saarinen, T. et Salonen, V., 2000. Preconditions for the formation of annually laminated lake sediments in southern and central Finland. *Boreal Environment Research*, 5 : 243-255.
- Ojala, A., 2004. Application of X-Ray radiography and densitometry in varve analysis. In: *Image Analysis, Sediments and Paleoenvironments* (Ed P. Francus), Developments in Paleoenvironmental Research, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 187-202.
- Ojala, A., Francus, P., Zolitschka, B., Besonen, M. et Lamoureux, S., 2012. Characteristics of sedimentary varve chronologies – A review. *Quaternary Science Reviews*, 43 : 45-60.
- O'Sullivan, P.E., 1983. Annually-laminated lake sediments and the study of Quaternary environmental changes - a review. *Quaternary Science Reviews*, 1 : 245-313.
- PAGES 2k Network, 2013. Continental-scale temperature variability during the past two millennia. *Nature Geoscience* 6: 339–346.
- Renberg, I., 1981. Formation, structure and visual appearance of iron-rich, varved lake sediments. *Verhandlungen der Internationalen Vereinigung für Limnologie*: 94-101.
- Sturm, M., 1979. Origin and composition of clastic varves. In: (Schlüchter C., ed.) *Moraines and Varves: Origin, Genesis, Classification*. A.A. Balkema, Rotterdam, 281-285.
- Trachsel, M., Grosjean, M., Schnyder, D., Kamenik, C. et Rein, B., 2010. Scanning reflectance spectroscopy (380–730 nm): a novel method for quantitative high-resolution climate reconstructions from minerogenic lake sediments. *Journal of Paleolimnology*, 44: 979-994.
- Zolitschka, B., 2003. Dating based on freshwater and marine laminated sediments. In: (Mackay A, Battarbee R, Birks J, Oldfield F, eds.) *Global Change in the Holocene*. Edward Arnold Publishers, London, 92-106.
- Zolitschka, B., Francus, P., Ojala, A. et Schimmelmann, A., 2015. Varves in lake sediments – A review. *Quaternary Sciences Reviews*, 117: 1- 41.



**D. Fortin montrant une carotte de sédiment prélevée au fond du lac Carheil, au sud de Fermont. Photo de A. Nicault.**

## 5. Données climatologiques et nivométriques du projet ARCHIVES

Dominique Tapsoba et Frédéric Guay

### Résumé

Les variables climatologiques (températures minimales et maximales, précipitations) et nivométriques (équivalents en eau de la neige) sont observées à divers sites distribués en quelques endroits sur le domaine d'étude du projet. Sur la base de ces mesures ponctuelles dispersées, on applique des algorithmes qui permettent d'estimer les valeurs de ces différentes variables en tous points ou nœuds d'une grille régulière superposée à ce domaine. Les algorithmes utilisés sont ceux du krigeage. Ils permettent d'intégrer le comportement spatial de chaque variable, les effets de données auxiliaires comme par exemple le relief et enfin de fournir un baromètre de quantification des erreurs associées aux estimations. On construit ainsi des cartes de la répartition spatiale des variables climatologiques et nivométriques qui sont ensuite mises en relation avec des données dendrométriques.

### Abstract

The climatological (minimum and maximum temperatures, precipitation) and nivometric (water equivalents of snow) variables are observed at various sites distributed over the ARCHIVES project study area. On the basis of these scattered point measurements, algorithms are applied which make it possible to estimate the values of these different variables at all points or nodes of a regular grid superimposed on this domain. The algorithms used are those of kriging. They make it possible to integrate the spatial behavior of each variable, the effects of auxiliary data such as topography, and finally to provide a barometer for quantifying the errors associated with the estimations. In this way, maps of the spatial distribution of

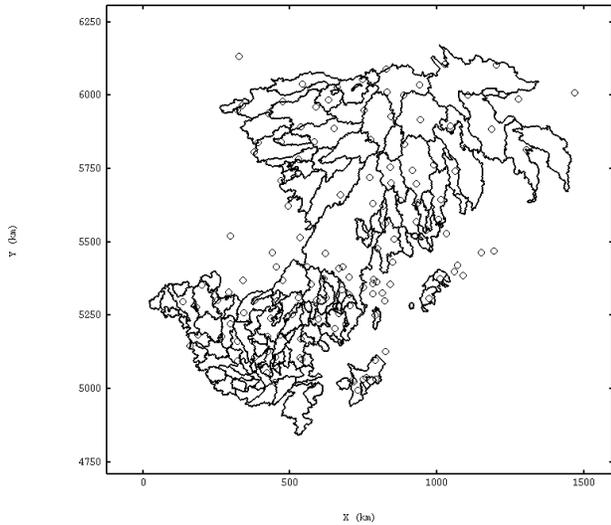
climatological and snow-metric variables are constructed, which are then linked to dendrometric data.

### Les données météorologiques aux stations

Les données météorologiques sont les observations quotidiennes des températures minimales et maximales et des précipitations totales provenant des réseaux d'Environnement Canada, du Ministère du Développement, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP); devenu le ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC) et de Rio-Tinto-Alcan. Elles ont été validées par ces organismes. Une seconde validation a été faite par les chercheurs de l'Institut de Recherche d'Hydro-Québec (IREQ). Finalement une base de données unique résultant de la fusion critique de toutes ces différentes sources de données a été construite. Elle comporte des observations qui couvrent la période allant de janvier 1960 à décembre 2007. La carte de la figure 1 montre pour la date du 15 janvier 2007, la répartition des sites météorologiques et les limites des bassins versants.

### Les données aux points de grilles

À partir de cette base de données, une interpolation par krigeage sur une grille régulière de 10km x10km de résolution a été produite. Cette technique est bien connue et est largement décrite par de nombreux auteurs, soit Matheron, (1965), Chilès et Delfiner (2012), Cressie (1994), Journel et Huijbregts (1978), pour ne citer que ceux-là. Nous n'en donnons ici qu'une description succincte. Le krigeage est une technique d'interpolation permettant de générer des surfaces estimées à



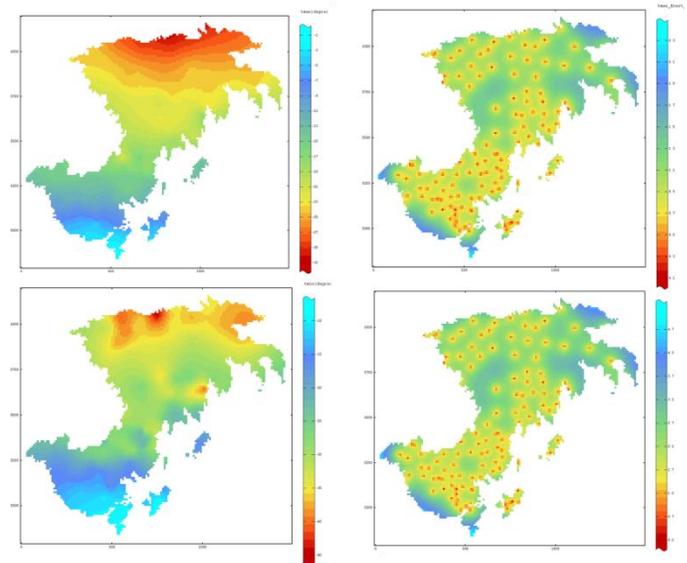
**Figure 1. Sites météorologiques et bassins versants (p. ex. 15 janvier 2007).**

partir d'un échantillon de points géoréférencés par une combinaison linéaire sans biais et à variance minimale des observations du phénomène en des sites voisins. De plus elle intègre les modalités d'organisation spatiale fortement structurées des variables météorologiques par le biais d'une fonction mathématique; le variogramme. Les fondements probabilistes sur lesquels cette technique se repose lui confèrent en plus des autres propriétés évoquées plus haut celle de fournir un baromètre de la quantification de l'erreur d'estimation. Les cartes des figures 2 et 3 illustrent les résultats des estimations obtenues par le krigeage et les écart-types associés à ces estimations pour les variables de températures et de précipitations pour la date du 15 janvier 2007.

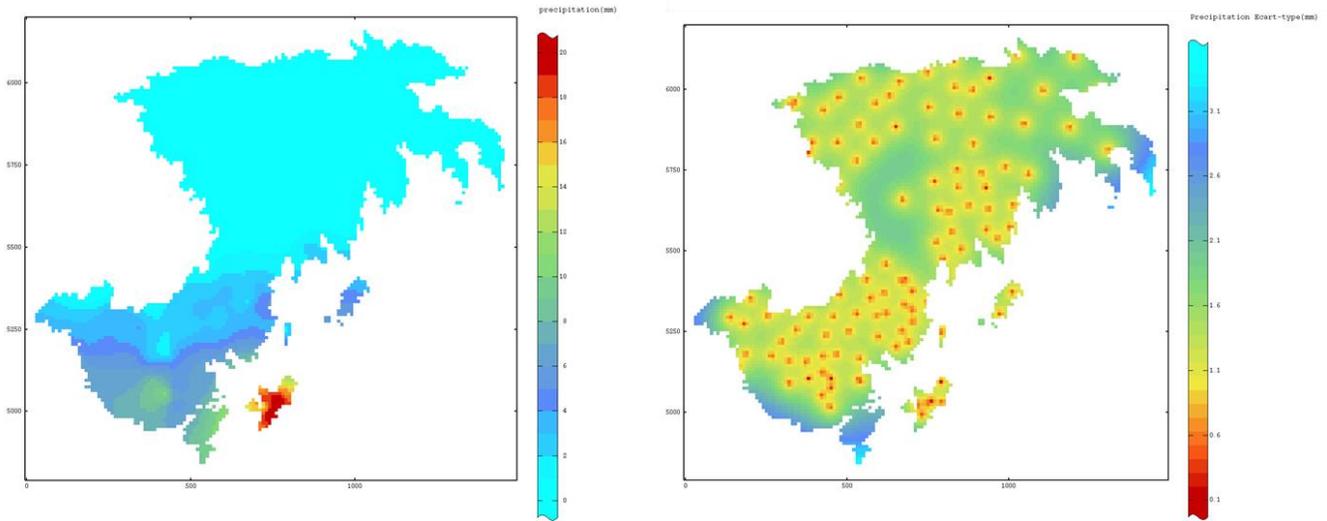
### Les observations : les lignes de neige

Les données nivométriques utilisées sont les mesures des équivalents en eau de la neige (ÉEN). En un point, l'ÉEN représente la colonne d'eau résultant de la fonte d'une carotte de neige prélevée sur toute l'épaisseur du manteau neigeux. C'est un paramètre hydrologique relativement facile à mesurer manuellement par carottage, mais très difficile à mesurer précisément de façon automatique ou

par télédétection. Il existe des nouveaux instruments comme les GMON (Gamma MONitor) qui permettent de mesurer automatiquement et en continu l'équivalent en eau de la neige au sol (Choquette *et al.*, 2008). Ces types de capteurs sont implantés seulement sur quelques sites expérimentaux au Québec. La couverture spatiale très limitée et la longueur très courte des séries ne permettaient pas leur exploitation dans le cadre du projet. Seules les données historiques d'ÉEN obtenues à partir des lignes de neige du réseau d'Hydro-Québec et de ceux de ses partenaires comme le MDDELCC, le ministère des ressources naturelles de l'Ontario et le ministère d'environnement du Nouveau Brunswick ont été utilisées. Elles ont été validées dans un premier temps par Hydro-Québec et par ses partenaires et dans un second temps par Brown et Tapsoba (2007). La figure 4 montre la répartition des sites de mesures des ÉEN.



**Figure 2. Carte des températures maximales et minimales estimées (colonne à gauche) et celles des écart-types d'estimations associées (colonne de droite) à la date du 15 janvier 2007.**

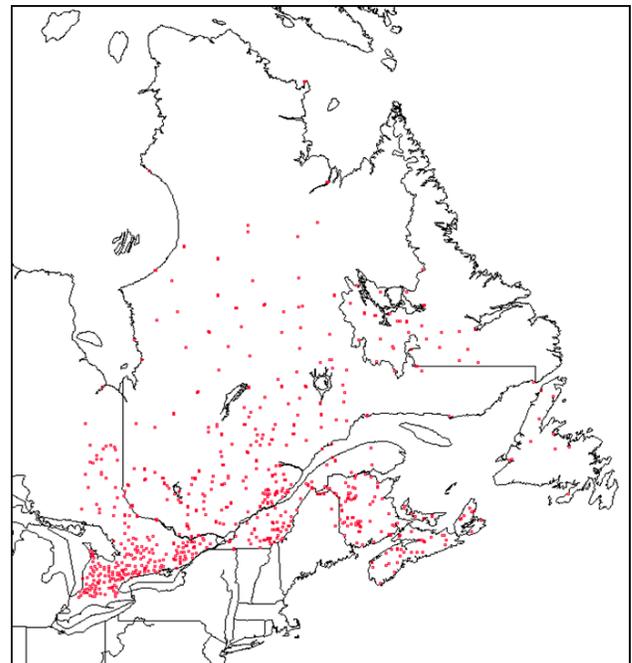


**Figure 3. Carte des précipitations estimées (à gauche) et carte des écart-types associés (à droite) à la date du 15 janvier 2007.**

### Les données ÉEN aux points de grilles

Les données ÉEN provenant des sites de mesures (Figure 4) sont interpolées spatialement sur une grille régulière de 10km x 10km. La technique d'interpolation utilisée est le krigage avec dérive externe (KDE). Cette technique est décrite dans Wackernagel, (1995), Tapsoba *et al.* (2005) et Brown *et al.* (2018). Elle permet d'intégrer dans le processus d'interpolation une ou plusieurs variables auxiliaires ou explicatives fortement corrélées avec l'ÉEN et qui décrivent en arrière-plan sa structure d'ensemble. En d'autres termes, on considère que l'on dispose d'une fonction de forme, c'est-à-dire d'une variable régionalisée distincte de l'ÉEN, capable de décrire ses grandes lignes structurales. Le comportement spatial de la variable explicative s'apparente alors à un indicateur de la tendance générale, dite dérive externe, représentative des répartitions des ÉEN sur le domaine géographique considéré. On peut ainsi améliorer les estimations de l'ÉEN par cette information supplémentaire surtout dans les zones où l'on dispose de peu ou pas de lignes de neige. Une variable auxiliaire connue sur l'intégralité de la grille d'interpolation est un cas idéal. Dans le cadre de cette étude, la variable auxiliaire qui était disponible et qui répondait à cette condition

idéale est le relief. Il est représenté par un modèle numérique d'altitudes (MNA) d'une résolution de 10 km en longitude et en latitude extrait de la banque du fichier mondial des altitudes produit par le US Geological Survey.



**Figure 4. Répartition des sites de mesure des équivalents en eau de la neige (Brown et Tapsoba, 2007).**

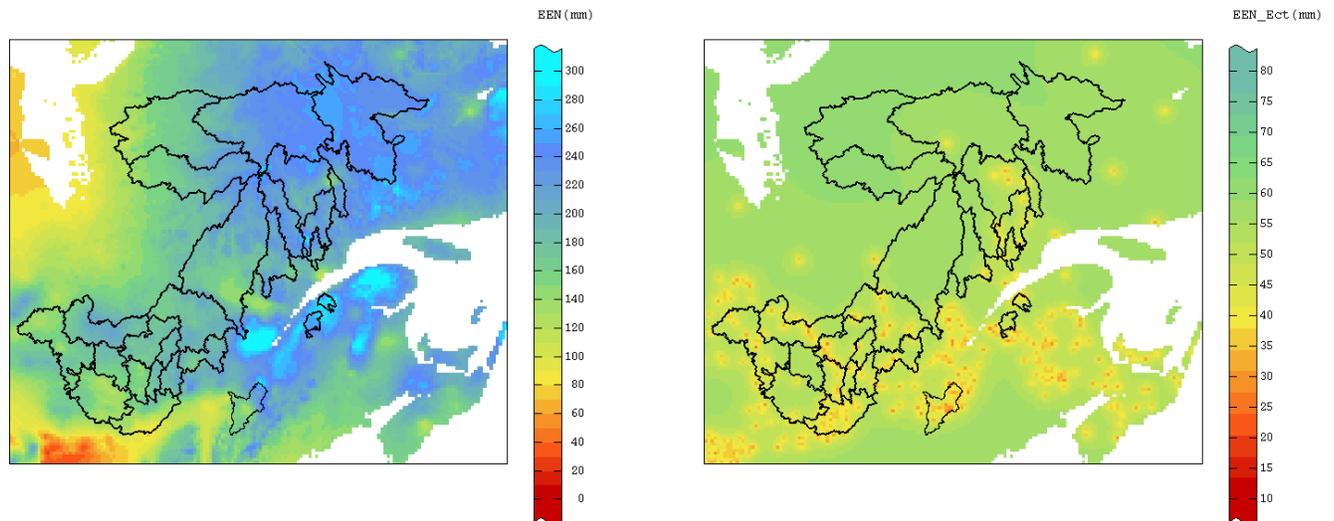


Figure 5. Exemple d'une carte de l'estimation de l'ÉEN (à gauche) et la carte des écart-types associé (à droite) pour la date du 15 avril 1975. Les contours de quelques bassins versants en traits continus.

Les grilles d'ÉEN produites couvrent la période 1970 à 2006. La résolution temporelle est bi-hebdomadaire (les 1er et les 15 du mois de janvier à mai) puisque les relevés aux lignes de neige se font globalement suivant cette fréquence. La figure 5 montre une carte avec une estimation de l'ÉEN au 15 avril 1975 et celle des écart-types d'estimation.

### Conclusion

La spatialisation de ces variables climatologiques et nivométriques permet de pouvoir, à n'importe quel point ou bassin versant, faire toutes les études et analyses entre le climat les données dendrométriques. Cette spatialisation sera raffinée par l'intégration de plusieurs autres variables explicatives autres que les altitudes utilisées dans cette étude, comme par exemple les sorties des modèles numériques à plus forte résolution spatio-temporelle et aussi l'utilisation des simulations géostatistiques pour le calcul de plusieurs quantiles.

<https://doi.org/10.4095/328070>

### Références

- Brown, R.D. et Tapsoba, D., 2007. Improved mapping of Snow Water Equivalent over Québec. Proceedings 64<sup>th</sup> Eastern Snow Conference, St. John's, Newfoundland, 29 May-1 June, 2007, p. 3-7.
- Brown, R., Tapsoba, D. et Derksen, C., 2018. Evaluation of snow water equivalent datasets over the Saint-Maurice river basin region of southern Québec. *Hydrological Processes*, 32. 10.1002/hyp.13221.
- Chilès, J.P. et Delfiner, P., 2012. *Geostatistics: Modeling spatial uncertainty*. Wiley, 2<sup>nd</sup> ed., 734 p.
- Choquette, Y., Lavigne, P., Nadeau, M., Ducharme, P., Martin, J.-P., Houdayer, A. et Rogoza, J., 2008. GMON, a New Sensor For Snow Water Equivalent Via Gamma Monitoring. *International Snow Science Workshop proceedings*, Montana state university, 2008.
- Cressie, N.A.C., 1994. *Statistics for spatial data*. Series in Probability and Mathematical statistics. Wiley. 903 p.
- Journel, A.G. et Huijbregts, C.J., 1978. *Mining geostatistics*. Academic Press, Londres. 595 p.
- Matheron, G., 1965. *Les variables régionalisées et leur estimation*. Masson, Paris. 305pp.
- Tapsoba, D., Fortin, V., Anctil, F. et Haché, M., 2005. Apport de la technique du krigeage avec dérive externe pour une cartographie raisonnée de l'équivalent en eau de la neige : application aux bassins de la Rivière Gatineau. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 32(1): 289–297.
- Wackernagel, H., 1995. *Multivariate geostatistics*. Springer-Verlag, Berlin, 256 p.

# Deuxième partie

---

Le traitement et la  
signification des données  
et des indicateurs

## 6. Établissement de la base de données de référence ARCHIVES

### Résumé

À l'image d'autres réseaux dendrochronologiques dans le monde, le groupe ARCHIVES a établi une collection de sites fondée sur un plan d'échantillonnage stratifié prenant en compte les conditions moyennes au plan hydrique (milieux mésiques), au plan de l'exposition au vent et au froid, et en cherchant à représenter les grands types régionaux de formations forestières (pessières à lichens et pessières à mousses). La répartition des sites prenait aussi en compte l'altitude, la continentalité et la latitude pour une couverture géographique complète sur un territoire allant de la Baie de James au Labrador et entre les 53<sup>e</sup> et 56<sup>e</sup> parallèles. L'homogénéité et la densité des peuplements, l'âge des arbres et leur physiologie ont été des critères de sélection servant à éliminer certains effets possibles comme la compétition lors de la succession végétale et d'autres facteurs reliés à l'hétérogénéité du site ou de l'histoire de vie des arbres. L'aire couverte par le réseau ARCHIVES est de 360 000 km<sup>2</sup>, un territoire suffisamment grand pour permettre l'analyse jumelée des données des modèles climatiques et hydrologiques et des données de dendrochronologie. En ce qui concerne les séries millénaires, des arbres sub-fossiles ont été échantillonnés dans un ensemble de lacs sélectionnés en fonction de la physiographie, la répartition spatiale sur le vaste territoire désigné et selon l'histoire des feux. Les séries sédimentaires laminées de quelques lacs ont aussi été utilisées pour compléter l'approche multi-proxys mise de l'avant dans le projet ARCHIVES. Enfin, ARCHIVES a utilisé un assemblage complexe de données sur grille obtenues par krigeage de registres

Yves Bégin, Antoine Nicault et Christian Bégin

instrumentaux, de réanalyses et de séries modélisées.

### Abstract

Like other dendrochronological networks in the world, the ARCHIVES group has established a collection of sites based on a stratified sampling plan taking into account average hydric conditions (mesic environments), in terms of exposure, and seeking to represent the major regional types of forest formations (spruce-lichen and spruce-moss forests). The distribution of sites also took into account the altitude, continentality and latitude to achieve at best the geographic coverage over the area stretching from James Bay to Labrador and between the 53<sup>rd</sup> and 56<sup>th</sup> parallels. The homogeneity and density of the stands, the age of the trees and their physiology were selection criteria used to eliminate certain possible effects such as competition during plant succession and other factors related to the heterogeneity of the sites or of the life history of trees. The area covered by the ARCHIVES network is 360,000 km<sup>2</sup>, a territory large enough to allow the combined analysis of climate and hydrological model data and dendrochronological data. For the millennial series, subfossil trees were sampled in a set of lakes selected on the basis of catchment physiography, spatial distribution over the vast designated area and fire history. The laminated sedimentary series of a few lakes were also used to complete the multi-proxy approach put forward in the ARCHIVES project. Finally, ARCHIVES used a complex assemblage of grid data obtained by kriging of instrumental registers, reanalyses and modeled series.

### Sélection des peuplements en vue du développement d'un réseau dendrochronologique

Les réseaux dendrochronologiques sont fondés sur des sites d'échantillonnage de cernes d'arbres fournissant des bases de données acquises sur de vastes territoires de façon à percevoir des différences climatiques régionales et à dégager les variations et la tendance communes aux séries temporelles produites. Théoriquement, des arbres d'une même espèce croissant sous les mêmes conditions stationnelles et ayant une même histoire de vie (même évolution de leur statut dans le peuplement) devraient porter dans leurs cernes les mêmes influences climatiques et présenter un signal commun dans leurs variations interannuelles d'épaisseurs et de composition. La répétition de leur patron de croissance sur un vaste territoire devrait être expliquée par une succession de mêmes ambiances régissant en grande partie leur croissance. Or, sur un territoire, la variabilité des conditions de croissance est omniprésente et ces particularités stationnelles inhibent ou cachent à divers degrés la signature hydro-climatique que pourraient porter les séries de cernes. Les facteurs régionaux sont : la latitude, l'altitude et la continentalité. Les facteurs locaux sont le relief, l'exposition au vent, l'enneigement. Les facteurs de site sont la densité forestière, le drainage, la compétition. Par emboîtement d'échelle, certains facteurs peuvent aussi être l'expression de variables climatiques régionales. Par exemple, le drainage peut être déficient durant des épisodes de fortes précipitations.

Ces principes de construction de réseaux ont bien été appliqués par certains pionniers de la dendrochronologie aux États-Unis et au Canada. Lamarche (1973) avait exploité la

signature dendroclimatique d'arbres situés en altitude et en fond de vallée dans les montagnes blanches (White Mountains) de Californie. En altitude, le facteur limitant la croissance des arbres est la température; en fond de vallée, ce sont les sécheresses. Il avait ainsi pu mettre en évidence 13 périodes climatiques alternées durant l'Holocène récent (périodes froides et sèches, froides et humides, chaudes et sèches ou chaudes et humides) en comparant la signature des séries dendrochronologiques de référence selon la position altitudinale. Dans les Rocheuses canadiennes, Luckman (2000) a fait des travaux dans une optique similaire et il a pu reconstituer par dendrochronologie et d'autres méthodes indirectes des épisodes climatiques entourant le mouvement des glaciers. En forêt boréale, les conditions ne sont pas bien démarquées selon l'altitude, mais il existe des sites très bien drainés et des sites saturés où l'on trouve des arbres d'une même espèce. La constitution du réseau dendrochronologique du projet ARCHIVES avait pour but de couvrir un maximum de conditions jugées moyennes (milieux préférentiellement mésiques), évitant les extrêmes comme les milieux saturés (tourbières) et les milieux xériques (sommet de collines rocheuses). On a aussi cherché des conditions « moyennes » quant à l'exposition, en échantillonnant des arbres appartenant à la pessière à lichens et non à la pessière à mousses; les premiers étant des peuplements d'arbres espacés les uns des autres et ainsi peu assujettis à la compétition. Enfin, l'expression de variables régionales, comme la latitude, l'altitude et la continentalité (distance à la mer), se trouve dans la répartition de peuplements présentant des séries portant une même signature dendrochronologique.

L'épinette noire (*Picea mariana* Mill. BSP) est l'espèce dominante sur laquelle les travaux du projet ARCHIVES ont porté. C'est une espèce aux cônes semisérotineux, c'est-à-dire qu'ils libèrent leurs graines surtout lors d'un incendie forestier. Comme la majorité, sinon tous les peuplements sont issus de feux, l'âge des arbres est déterminé par la dernière occurrence de feu. Comme la fréquence des feux est élevée, il est difficile de trouver des arbres âgés et sénescents (200-250 ans). La recherche de tels arbres a fait l'objet d'une stratégie fondée sur l'analyse d'images Landsat<sup>tm</sup> produites par le Service canadien des forêts en feuillets à 1 : 250000 et comportant des pixels de 900 m<sup>2</sup> portant la signature de la pessière dense (Figure 1). Comme la densité forestière est corrélative de l'âge des arbres, les rares parcelles de forêt dense correspondent à des sites fortement peuplés d'épinette, en marge desquels on devrait trouver des arbres âgés répondant aux caractéristiques choisies pour notre réseau. Or, bon nombre de ces sites se situent sur le flanc nord-est des collines, tout simplement parce que s'y trouvent des conditions humides reliées au sureneigement, les vents dominants hivernaux transportant la neige depuis le sud-est. Ces conditions humides préservent ces forêts des feux. Un survol des peuplements se trouvant sur d'autres faces des collines a révélé un ex-

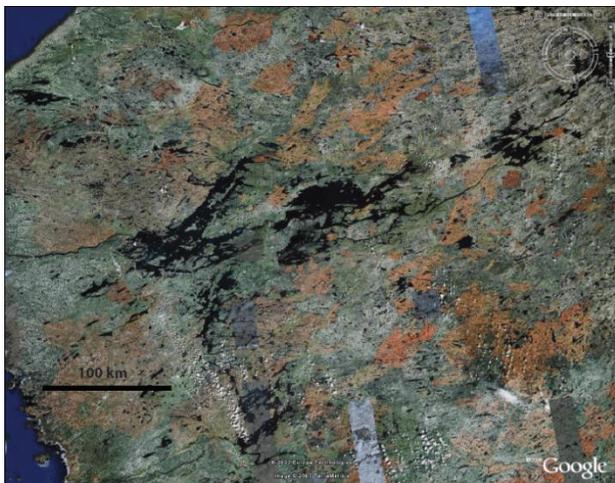


Figure 1. Extrait d'image Landsat.

cellent potentiel. Sur place, d'autres observations permettaient de déceler les peuplements âgés : la présence de troncs morts couchés au sol, une couverture épaisse de lichens, une structure forestière inéquienne marquée par des arbres de taille variée. De plus, l'absence de pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.) peut être un diagnostic de vieille forêt. Les cônes du pin gris sont entièrement sérotineux. Ils ne s'ouvrent que sous l'influence de la chaleur extrême produite par un incendie forestier. L'absence du pin gris en présence d'épinettes en milieu bien drainé correspond généralement à des forêts de plus de 150 ans, ce qui correspond à la longévité moyenne du pin.

Enfin, fait inusité, l'écureuil roux aide au repérage des arbres âgés. Il s'intéresse aux graines contenues dans les cônes. L'épinette atteint sa maturité sexuelle vers l'âge de 40 ans et seuls les arbres ayant une bonne croissance arrivent à produire des graines pleines, c'est-à-dire comportant des embryons murs. Les gros arbres productifs ne sont donc pas nécessairement vieux. Or, les milieux où la croissance est limitée par le mauvais drainage, l'exposition au vent ou la compétition comportent des arbres à croissance limitée par ces facteurs et ceux-ci n'ont pas de réserve suffisante de graines mures pour intéresser l'écureuil. Il jardine plutôt la cime des arbres à croissance rapide qui portent des cônes aux graines pleines et son action est facilement perceptible par la présence de cimes dégarnies de branches par étages (Figure 2). En fait, il coupe les branches de deuxième ordre près de la cime, la sexualité étant portée par les axes d'ordre 2 et 3 chez l'épinette, et récolte les cônes tombés au sol. En évitant les sites où l'écureuil est actif et en concentrant la prospection d'arbres âgés sur des sites répondant aux autres critères ci-haut mentionnés, nous avons pu repérer des arbres ayant plus de 200 ans, malgré la fréquence élevée d'incendies.



Figure 2. Arbres jardinés par l'écureuil roux.  
Photo de Y. Bégin

### Aire d'échantillonnage du réseau ARCHIVES

L'aire couverte par la première phase d'ARCHIVES était d'environ 360 000 km<sup>2</sup> (900 km de longitude par 400 km de latitude) à l'emplacement du complexe hydroélectrique de La Grande Rivière. La phase 2 du projet a consisté à étendre le réseau à d'autres grands

bassins boréaux de façon à ce que sa résolution spatiale permette la comparaison et la covalidation des registres interpolés sur grille avec les projections des modèles régionaux et globaux (Joussaume et Taylor, 1995). Ainsi, l'aire du projet initial couvrait 170 tuiles (45 X 45 km) du Modèle Régional Climatique Canadien (MRCC) et 140 du modèle global Arpège (espacement approximatif des centroides de 55 km au niveau du Québec). La nouvelle aire d'étude couvre environ 600 000 km<sup>2</sup>, soit 282 et 233 tuiles, respectivement pour les résolutions des sorties des modèles précités (Figure 3). Ce domaine est aussi suffisant pour permettre l'analyse spatiale des reconstitutions dendrochronologiques et les confronter aux données spatialisées, qu'elles soient instrumentales ou simulées à l'aide de modèles. De plus, le réseau dendrochronologique mis en place comble un vide important dans la couverture mondiale de tels réseaux.

L'accessibilité des sites par voie rou-

### ② Reconstitution

### ① Calibration/Validation

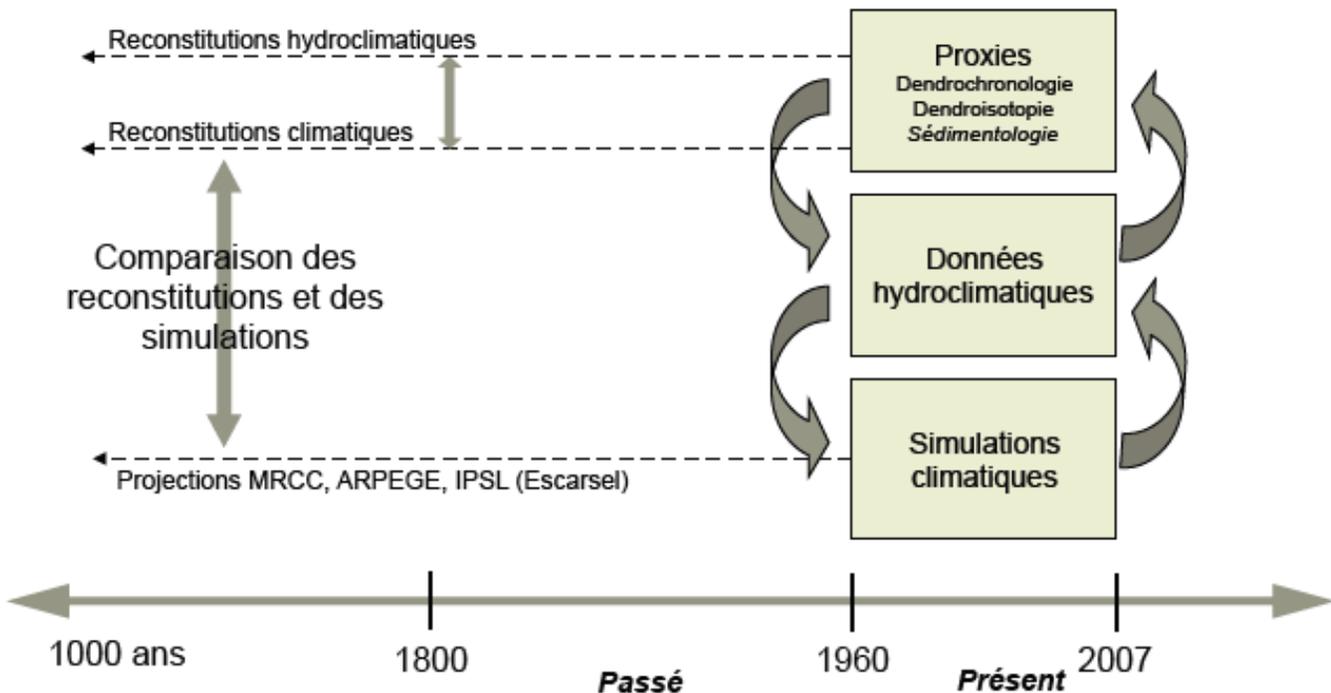


Figure 3. Diagramme des phases 1 et 2 d'ARCHIVES.

tière a été privilégiée dans le projet ARCHIVES, bien que plus du tiers des sites n'étaient accessibles que par hélicoptère. Les sites choisis sont des sites mésiques (drainage moyen) comportant des arbres matures espacés les uns des autres. On a cherché à éviter les arbres issus de marcottage. En effet, les sites les plus nordiques comportent beaucoup de formations clonales d'épinettes. Les arbres devaient être distants de leurs voisins pour éviter les effets de la compétition. De plus, leur port est symétrique. Les vieux arbres comportent beaucoup de branches mortes, fortement réitérées (remplacées par des branches nées de bourgeons latents) et leur tronc est généralement ogiforme (en forme d'ogive). Deux sections par arbre étaient prélevées généralement, une à la base (près du collet qui est la jonction entre les racines et la tige) et à 30 cm du sol (plus haut dans le cas de bois de coeur carié). De 20 à 30 arbres par site ont ainsi été récoltés. Pour l'analyse isotopique, sur certains sites choisis des sections d'environ 10 cm d'épaisseur étaient prélevées sur une dizaine d'arbres. Enfin, la collecte d'arbres subfossiles a été réalisée en plongée et deux sections ont été prélevées sur chaque pièce retenue. Cet échantillonnage sera décrit plus longuement au chapitre 15.

Le réseau dendrochronologique ARCHIVES fondé sur des chronologies établies au moyen d'arbres vivants comporte 129 sites de séries dendrochronologiques de référence (2195 arbres, période 1648-2010), quatre sites comportant des séries isotopiques ( $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{18}\text{O}$ ), et six lacs pour la construction de séries au moyen d'arbres immergés ( $n = 2565$  arbres subfossiles récoltés en plus de 150 vivants pour l'interdatation).

### Réseau de lacs pour la construction des dendroséries millénaires

Les débris ligneux grossiers abondent dans les lacs boréaux et ils offrent un excellent potentiel pour allonger les séries dendrochro-

nologiques. Nos travaux préliminaires dans le secteur de LG4 (lac DA1) ont permis de recueillir plusieurs centaines de troncs immergés et de reconstituer la dynamique millénaire du réservoir de débris ligneux en mesurant autant les taux d'apports à partir de la rive que les taux de décomposition et d'enfouissement dans l'eau. Nous avons choisi de limiter cette étude à des environnements non anthropisés, au nord de la limite d'exploitation des forêts. Les images satellitaires (Google Earth) révèlent des centaines de lacs, la plupart d'une largeur maximale d'un km, accessibles à moins de 1 km des routes. Les paysages tendent à être dominés par des pessières fermées ou ouvertes vers l'ouest, et par des pessières très ouvertes ou discontinues vers l'est. Les feux de forêt représentent partout la plus importante perturbation écologique et sont même l'un des principaux facteurs expliquant l'ouverture plus grande des forêts vers l'est, à cause d'un phénomène de mauvaise régénération après feu, particulièrement au cours des périodes froides du dernier millénaire. L'épinette noire domine largement les forêts riveraines de tous les secteurs, même s'il est possible de rencontrer le mélèze laricin, le pin gris et le sapin baumier. Notre objectif est de produire des séries millénaires dans cinq régions, à raison de deux lacs dans chacune, dont les résultats seront bien répliqués sur le dernier millénaire. Ce travail permettra de choisir une région jugée représentative de l'ensemble du Québec central et où nous sélectionnerons des lacs pour trouver des séquences laminées (Chapitre 4). Notre analyse dendrochronologique préliminaire montre qu'il est possible de construire des séries millénaires hautement répliquées (*p. ex.* 840 AD à 2006 AD au lac DA1) et des bois bien conservés datant de 3000 ans ( $^{14}\text{C}$ ; Chapitres 7 et 18)

### Séquences de sédiments lacustres laminés

ARCHIVES a été l'occasion d'explorer l'utilisation d'un nouvel indicateur indépen-

dant : les séquences sédimentaires rythmées comme indice d'écoulement (Chapitre 4). Les lacs propices aux laminations sédimentaires sont rares. Deux sites se sont avérés prometteurs, l'un au Labrador (Grand Lake) et l'autre dans la réserve Port-Cartier-Sept-Iles (lac Walker; Chapitre 20). Les débits reconstitués au moyen des deux indicateurs (dendrochronologie et sédimentologie) renforcent l'approche multi-proxi mise de l'avant dans le projet ARCHIVES.

### Données hydro-climatiques disponibles

Trois types de données hydro-climatiques ont été utilisés dans le projet ARCHIVES. Le premier est l'ensemble des banques de données instrumentales issues de stations météorologiques (températures et précipitations) et hydrométrique (apports en eau quotidiens calculés aux bassins-versants d'Hydro-Québec). Les séries de température retenues ont été validées et homogénéisées. Le deuxième type de registre correspond aux interpolations sur grille par krigeage à partir des informations disponibles aux sta-

tions d'enregistrement. On retrouve dans cette catégorie les données interpolées du Climatic Research Unit (CRU) et celles interpolées par l'équipe d'Hydro-Québec qui incluent les données nivométriques (voir Chapitre 5). Enfin, le troisième groupe est constitué des produits de la modélisation (sorties de modèle), soit les simulations rétrospectives de variables hydrologiques (écoulements) et climatiques sur grille. Entrent dans cette catégorie les données de ré-analyses de type NCEP.

<https://doi.org/10.4095/328072>

### Références

- Joussaume, S. et Taylor, K., 1995. Status of the Paleoclimate Modelling Intercomparison Project (PMIP), 92 : 415-430.
- Luckman, B.H., 2000. The Little Ice Age in the Canadian Rockies. *Geomorphology*, 32 (3-4) : 357-384.
- Lamarche, V.C. Jr., 1973. Holocene climatic variations inferred from treeline fluctuations in the White Mountains, California. *Quaternary Research*, 3(4) : 632-660.

**Échantillonnage d'une vieille pessière noire à lichens au site HM-1, à proximité du lac Hurault.  
Photo de A. Nicault.**



## 7. Le climat et les très grands feux à la Baie de James

Dominique Arseneault, Sandy Erni, Jessie Héon et Yves Bégin

### Résumé

La région de la Baie James dans le Nord du Québec est parmi celles qui enregistrent les plus grands feux et les feux les plus fréquents de toute la forêt boréale nord-américaine. En même temps, cette région comprend plusieurs infrastructures associées notamment à la production hydroélectrique. Dans le cadre du projet ARCHIVES, nous avons développé une nouvelle approche permettant de reconstituer simultanément la taille des feux et les intervalles de temps entre les feux successifs au cours des derniers 200 ans. Les objectifs étaient de: 1- reconstituer la taille des feux pour identifier les années de très grands feux et documenter l'histoire des sécheresses sévères; 2- voir si le risque de feu et la vulnérabilité des infrastructures dépendent du temps de rétablissement des combustibles depuis le dernier feu. Nos résultats démontrent un changement important dans le régime des feux au début du XX<sup>e</sup> siècle, avec une augmentation marquée de la taille et de la fréquence des très grands feux (1915-2013) en comparaison de la période précédente (1850-1915). Après 1915, le risque de feu a augmenté avec le rétablissement des combustibles, de sorte que l'on pourrait évaluer la vulnérabilité des infrastructures à partir d'une cartographie de l'âge de la forêt.

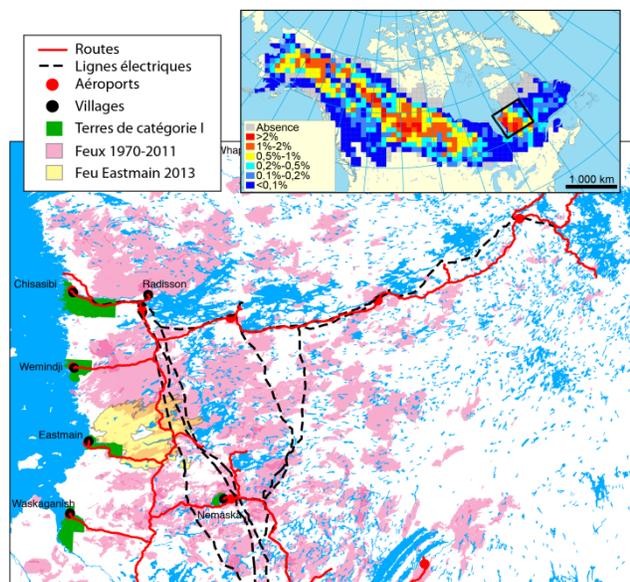
### Abstract

The James Bay area in northern Québec is characterised by frequent and large wildfires and is one of the most fire-prone regions of the entire North American boreal zone. This region also comprises several anthropogenic infrastructures, mostly related to the La Grande Hydroelectric Complex. Within the frame of the ARCHIVES project, we have developed a new approach in order to simultaneously re-

construct fire size and fire-free intervals of the last 200 years. Our objectives were: 1- to reconstruct fire size and identify large fire and severe drought years; 2- to verify whether or not the risk of burning and infrastructure vulnerability increase with fuel recovery and time since last fire. Our results reveal a fire regime shift at the beginning of the 20<sup>th</sup> century, from the absence of large fire year (1850-1915), to the regular recurrence of very large fire years (1915-2013). Following this shift, the probability of burning has increased with time since last fire, such that the risk of burning and infrastructure vulnerability would be quantifiable from maps of forest age.

### Problématique des feux dans la région de la Baie de James

Les feux de forêts sont le principal facteur de la dynamique des paysages dans le Nord québécois (Payette *et al.*, 1989; Héon *et al.*, 2014; Erni *et al.*, 2017). La portion occidentale du territoire du Complexe hydroélectrique La Grande, située entre la Baie de James et LG4, est parmi celles qui enregistrent les fréquences de feux les plus élevées et les plus grands feux de toute la zone boréale circumpolaire (Boulanger *et al.*, 2012; Figure 1). Dans cette région, les feux ont une influence déterminante sur la structure, la composition et le fonctionnement des écosystèmes, et sur leur biodiversité et les services écologiques qu'ils fournissent. Par ailleurs, les feux présentent un risque pour les infrastructures existantes ou à venir dans le Nord (Beverly et Bothwell, 2011; Figure 1). Les incendies de forêt sont un phénomène tellement important dans cette région qu'ils sont un des principaux facteurs de risque à considérer dans la planification du développement du territoire et de la protection de l'environnement.



**Figure 1. Feux récents et principales infrastructures anthropiques dans la région de la Baie James. L'encart indique que cette région est parmi celles qui enregistrent les taux de brûlage les plus élevés (% du territoire brûlé par année) à travers la forêt boréale nord-américaine. Les périmètres des incendies proviennent de la base de données nationale sur les feux de forêt du Canada (Service canadien des forêts, 2015).**

De plus, on s'attend à ce que la taille des feux et que la fréquence des grands feux augmentent dans le futur (Boulanger *et al.*, 2013; Girardin et Mudelsee, 2008). À vaste échelle (échelle du Canada ou des provinces), on observe une très bonne corrélation entre les températures estivales et les superficies incendiées annuellement (Flannigan *et al.*, 2005; Ali *et al.*, 2012). À l'échelle régionale, la propagation des feux et l'occurrence des grands feux sont favorisées par les sécheresses estivales sévères (Héon *et al.*, 2014; Girardin et Wotton, 2009). On prévoit donc que les superficies incendiées vont augmenter fortement avec le réchauffement anticipé du climat, (Bergeron *et al.*, 2010; Boulanger *et al.*, 2013). Il faut aussi prévoir que l'importance des feux va augmenter avec l'accroissement de la présence humaine. Partout sur le globe les feux déclenchés par l'homme sont devenus de plus en plus fréquents depuis le début du XIX<sup>e</sup> siècle (Mar-

lon *et al.*, 2008). Des feux anthropiques sont survenus dans toutes les régions de la forêt boréale circumpolaire.

Dans la région du Complexe hydroélectrique La Grande, où des indicateurs naturels (cernes annuels de croissance des arbres, séries sédimentaires) doivent être utilisés pour étendre vers le passé les séries instrumentales servant à calibrer les modèles de prévision des apports en eau, la taille des incendies passés pourrait aider à reconstituer l'histoire des sécheresses. Par ailleurs, de meilleures données sur l'histoire des grands feux (taille des feux, intervalle de temps entre les grands feux) pourraient aider à évaluer le risque que les feux présentent pour les infrastructures dans un contexte de réchauffement climatique et d'anthropisation du Nord.

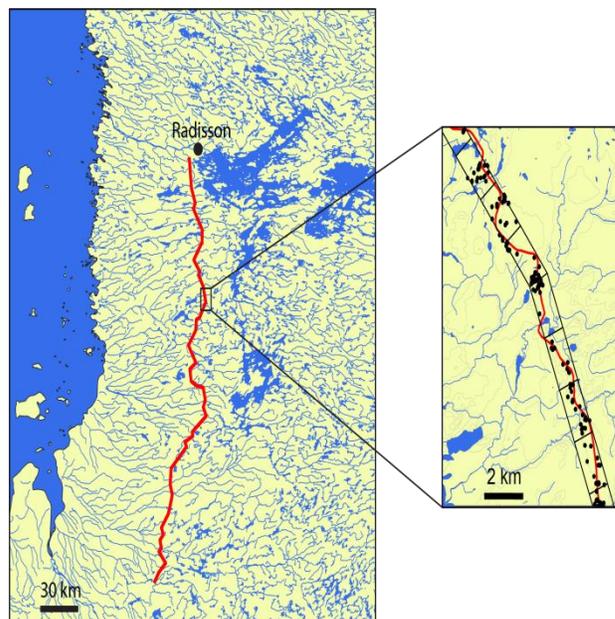
Reconstituer la taille des grands feux dans un territoire soumis à des feux fréquents et sévères pose un défi méthodologique important puisque chaque nouveau feu masque les feux précédents survenus au même endroit. Les méthodes disponibles pour documenter l'histoire des feux dans la forêt boréale permettent soit de retracer les intervalles de temps entre les feux successifs pour des localisations ponctuelles sans connaître la taille des feux, ou bien de mesurer la taille du dernier feu survenu sur un territoire sans connaître les intervalles de temps depuis les feux précédents. Aucune méthode n'a encore été développée pour reconstituer simultanément et systématiquement la taille des feux et les intervalles de temps entre les feux à travers le temps et l'espace. L'absence de telles données nous empêche de voir comment le risque de feu augmente avec le temps et à mesure que les combustibles se rétablissent après un feu, et nous empêche d'évaluer la fréquence des grands feux.

Un des objectifs du projet ARCHIVES a été de développer une méthode pour reconstituer simultanément la taille des feux et les

intervalles de temps qui les ont séparés au cours des derniers 200 ans dans le but de: 1- reconstituer les années de sécheresses sévères et leur patron d'occurrence à partir des années de grands feux; 2- aider à cartographier le risque qu'un feu survienne à chaque point du paysage, particulièrement les grands feux.

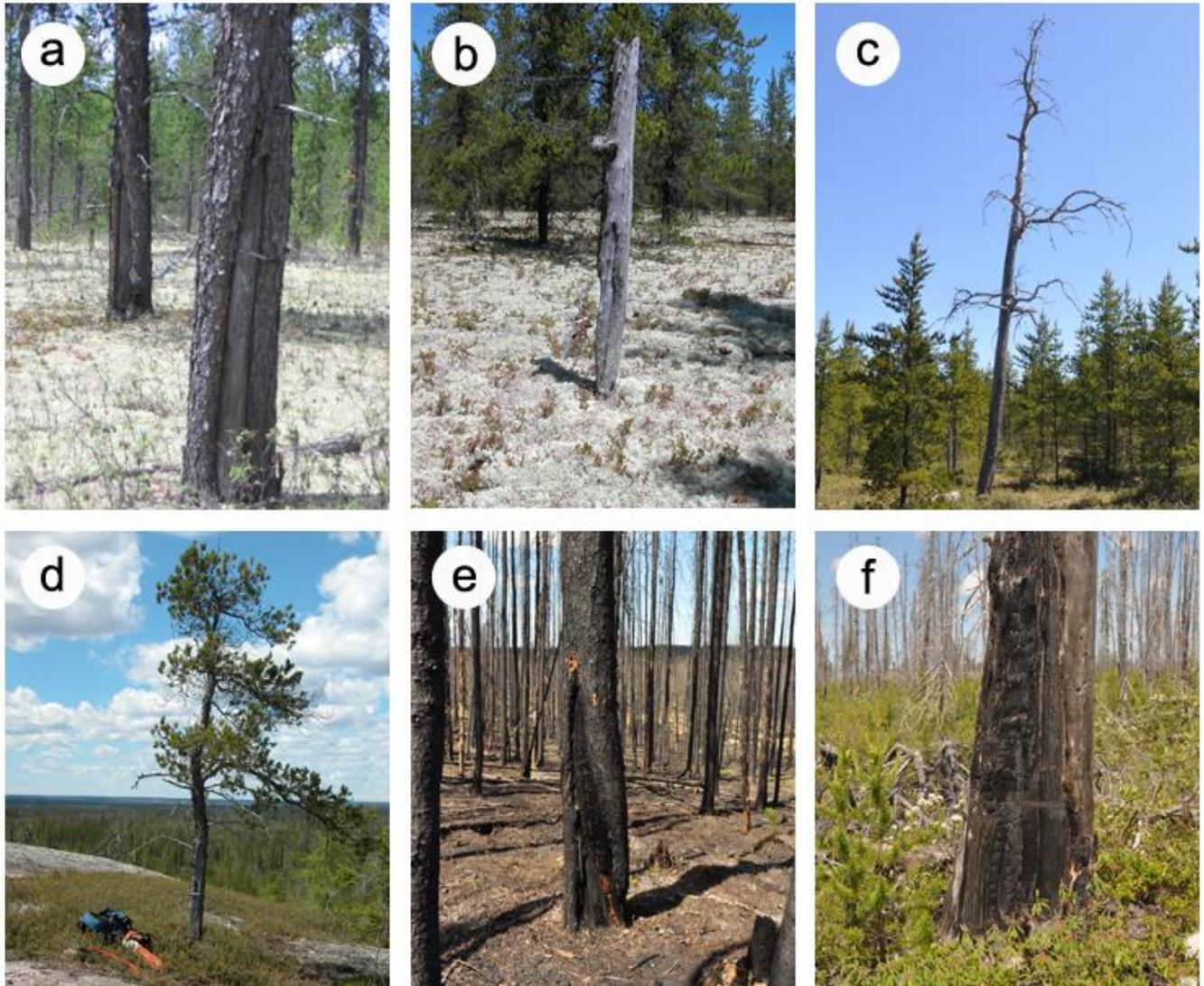
### Une méthode originale pour reconstituer les chevauchements de feux

La taille des plus grands feux (jusqu'à 4000 km<sup>2</sup>) nous empêche de déterminer l'emplacement des feux qui se sont chevauchés à chaque point du territoire dans le passé. Pour contourner ce problème, nous avons choisi de reconstituer le recouvrement linéaire des feux qui se sont chevauchés à chaque point le long d'une route. Des cellules contigües de 2 km x 1 km ont été positionnées dans un SIG, le long de la route de la Baie James, à partir de la rivière Broadback jusqu'à Radisson (total de 168 cellules; Figure 2). Sur le terrain, chaque cellule a été parcourue exhaustivement de manière à localiser les gisements de cicatrices de feux sur les arbres vivants, les chicots et les débris ligneux (Figure 3). Plusieurs cicatrices ont été échantillonnées (section transversale de tronc) dans chaque gisement, de manière à dater par dendrochronologie au moins deux fois chaque feu des derniers 200 ans dans chaque cellule. Comme les pins gris s'établissent rapidement et massivement après-feu, les dates d'établissement des pins vivants et morts ont aussi été considérées pour dater les feux. Les dates de feux obtenues suite à un premier échantillon-



**Figure 2. Dispositif expérimental (168 cellules de 2 km<sup>2</sup>) entre la rivière Broadback et la localité de Radisson le long de la route de la Baie James. L'encart montre l'emplacement des échantillons récoltés (cicatrices de feux et dates d'établissement des pins) dans une série de cellules représentatives. Le trait rouge indique le tracé de la route.**

nage ont été comparées entre les cellules voisines pour identifier et revisiter les cellules semblant contenir des séquences incomplètes de feux. Finalement, la présence/absence de chaque année de feu dans chaque cellule a permis de reconstituer avec une résolution de 2 km le recouvrement linéaire de chaque feu (distance parcourue par le feu en travers de la route), de même que sa position et les intervalles de temps entre les feux successifs le long de la route (Figure 4).



**Figure 3. Cicatrices de feux représentatives de la région de la Baie James. Les cicatrices se forment lorsque la chaleur d'un incendie détruit la couche de cellules qui se divisent pour former les cernes annuels de croissance des arbres. La portion du tronc qui survit au feu dépose par la suite des cernes annuels par-dessus la partie morte, ce qui permet de dater les incendies en comptant à rebours les cernes. a) deux cicatrices (avant et arrière plans) causées par un feu en 1972. b) une cicatrice ancienne sur un chicot de pin gris. Cet arbre s'est établi après un feu en 1708, il a formé une cicatrice après un feu en 1791. Il a été tué par un troisième feu en 1872 ou 1882 et a été calciné par le dernier feu survenu dans cette cellule en 1941. La forêt à l'arrière-plan s'est établie après le feu de 1941. c) chicot de pin correspondant à un arbre établi après un feu en 1847, cicatrisé en 1910 et tué par un autre feu en 1983. Les arbres vivants se sont établis suite au feu de 1983. d) pin vivant à deux cicatrices (1916 et 1972) isolé sur un affleurement rocheux. e) cicatrice de 1938 sur un arbre tué par un feu en 2010. f) pin établi après un feu en 1864, avec trois cicatrices (feux de 1910, 1955 et 1983) et tué par le dernier feu en 2002. Photos de D. Arseneault**

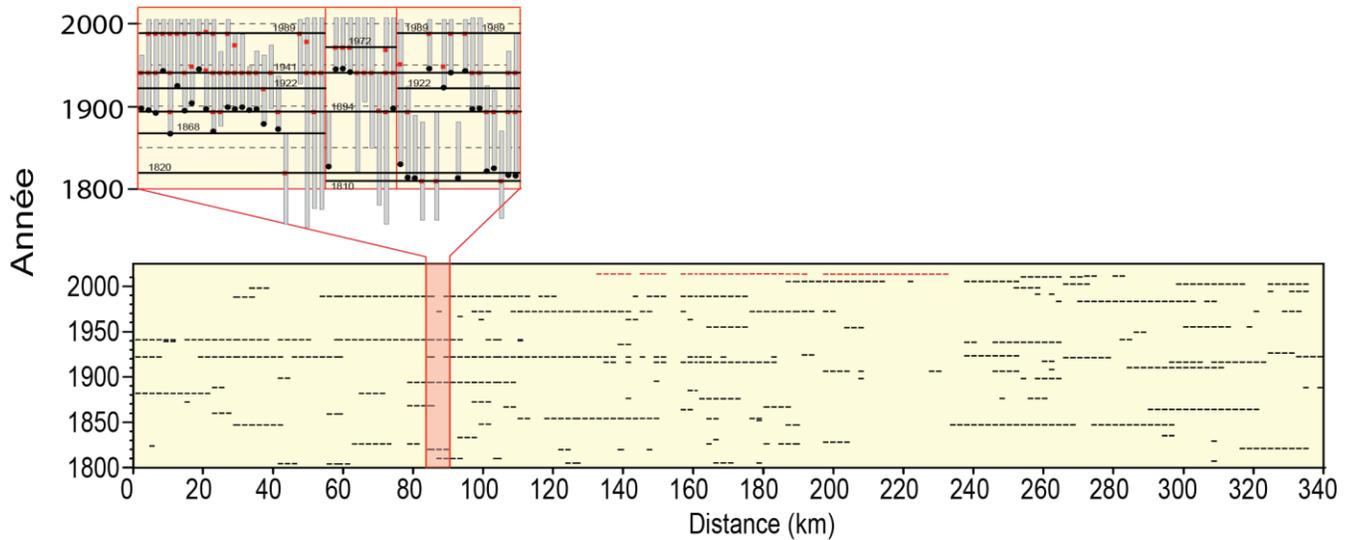


Figure 4. Chevauchement des feux dans le temps et l'espace le long du tracé actuel de la route de la Baie James. Chaque trait noir représente un feu détecté dans une des 168 cellules de 2 km<sup>2</sup> positionnées en continu le long de la route. Les traits rouges indiquent le feu de 2013 dans la région de la rivière Eastmain. L'encart montre comment on a daté les feux (traits noirs horizontaux) à partir des échantillons récoltés dans trois cellules représentatives. Les barres grises indiquent la période de vie de chaque arbre échantillonné (déterminée par interdatation; voir chapitre 1); les carrés rouges indiquent les dates de cicatrices de feux; les cercles noirs indiquent les dates d'établissement des pins. Comme les pins s'établissent massivement après les feux, les dates d'établissement indiquent l'occurrence d'un feu.

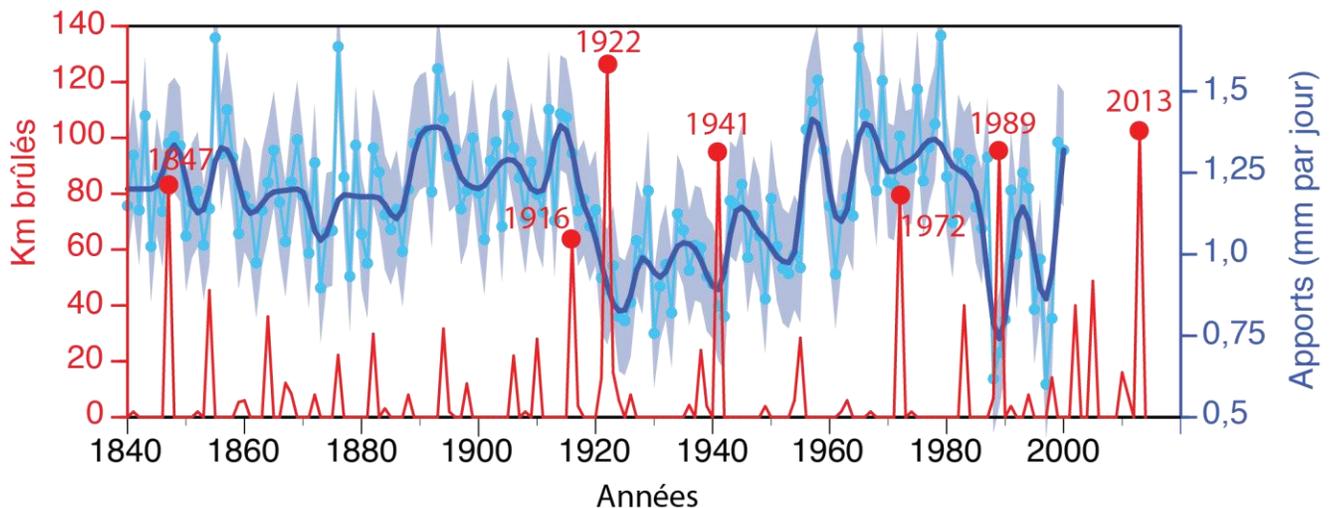


Figure 5. Comparaison entre la taille des feux (trait rouge) et les apports d'eau (trait bleu) au réservoir Robert-Bourassa entre 1840 et 2013. La taille des feux correspond à la distance interceptée par les feux sur la route de la Baie James, entre les rivières Broadback et Radisson. Les feux de plus de 60 km sont indiqués par un cercle rouge. La méthode de calcul des apports en eau reconstitués est détaillée au chapitre 16.

### La taille des feux et le climat depuis le début du XIX<sup>e</sup> siècle

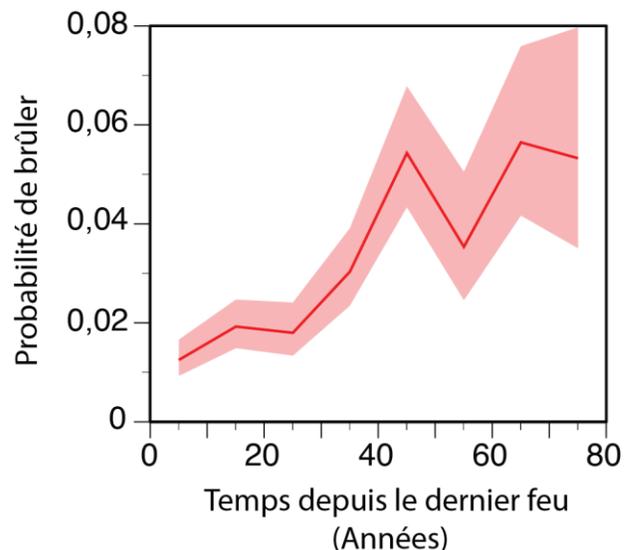
Les feux ont été tellement fréquents et grands depuis le début du XX<sup>e</sup> siècle que les sites ont été incendiés à environ tous les 40 ans en moyenne (Figures 4 et 5). Au cours de la période 1922-1989, des feux ont croisé la route de la Baie de James sur 60-120 km en 1922, 1941, 1972, 1989 et 2013. Un seul feu de taille comparable est survenu au XIX<sup>e</sup> siècle, en 1847. Notre reconstitution de la taille des feux correspond bien à la reconstitution dendroclimatique des apports au réservoir Robert-Bourassa (Chapitre 17). Les trois plus grands feux (1922, 1941, 1989) correspondent aux trois plus importantes séquences de faible hydraulicité reconstituées entre 1900 et 2000, alors qu'une longue période sans grand feu correspond à un régime persistant d'apports élevés entre 1850 et 1915. Ensemble, ces deux séries de données complémentaires suggèrent un changement de régime hydrologique au début du XX<sup>e</sup> siècle, à partir d'un régime d'apports élevés vers un régime d'apports généralement plus faibles avec une récurrence de sécheresses sévères propices aux grands feux.

### Le risque de grands feux

Notre reconstitution de la séquence de chevauchement des feux sur le territoire de la Baie de James permet de déterminer l'âge (c.-à-d. le temps depuis le dernier feu) des forêts qui étaient disponibles pour brûler chaque année dans chaque cellule depuis 1915, ainsi que l'âge des forêts qui ont effectivement été incendiées au cours de cette période. En divisant ces deux valeurs (nombre de cellules brûlées divisé par nombre de cellules disponibles par classe d'âge), on observe que la probabilité de brûler augmente rapidement à mesure que les combustibles se rétablissent pendant environ 40 ans après-feu (Figure 6). On en déduit que les secteurs qui comprennent de grands massifs forestiers de plus de 40 ans sont les plus susceptibles de subir un grand feu dans le fu-

tur. Par exemple, le grand feu de 2013 de la région de rivière Eastmain s'est développé dans le secteur du territoire où les forêts de plus de 40 ans étaient les plus abondantes à l'ouest de LG4, là où surviennent les grands feux (Figure 1). Ces résultats suggèrent que le massif de vieilles forêts occupant le triangle Chisasibi-Wemindji-Radisson, et où sont déployées plusieurs infrastructures importantes, est l'un des plus à risque d'être prochainement touché par un grand feu (Figure 1). De meilleures données sur la relation entre l'âge de la forêt et le risque de brûler, combinées à des modèles de propagation des feux, permettraient de cartographier le risque de feux à chaque point du territoire et de vérifier si des traitements de combustibles pourraient atténuer la vulnérabilité des infrastructures (Parisien *et al.*, 2005; 2007; Erni *et al.*, 2018).

<https://doi.org/10.4095/328073>



**Figure 6.** Évolution du risque de feu en fonction du temps écoulé depuis le dernier feu entre 1915 et 2013. Pour chaque classe de 10 ans et pour toute la période 1915-2013, la probabilité correspond au nombre de cellules de 2 km<sup>2</sup> qui ont effectivement brûlé divisé par le nombre total de cellules qui auraient pu brûler dans cette classe d'âge. Les intervalles de confiance à 95% (trame rose) ont été calculés en utilisant la méthode de Wald modifiée (Agresti et Coull, 1998).

## Références

- Agresti, A. et Coull, B.A., 1998. Approximate is Better than "exact" for interval estimation of binomial proportions. *The American Statistician*, 52: 119-126.
- Ali, A.A., Blarquez, O., Girardin, M.P., Hély, C., Tinquaut, F., Guellab, A.E., Valsecchi, V., Terrier, A., Bremond, L., Genries, A., Gauthier, S. et Bergeron, Y., 2012. Control of the multimillennial wildfire size in boreal North America by spring climatic conditions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 109: 20966–20970.
- Bergeron, Y., Cyr, D., Girardin, M.P. et Carcaillet, C., 2010. Will climate change drive 21<sup>st</sup> century burn rates in Canadian boreal forest outside of its natural variability: collating global climate model experiments with sedimentary charcoal data. *International Journal of Wildland Fire*, 19: 1127–1139.
- Beverly J. L. et Bothwell P., 2011. Wildfire evacuations in Canada 1980–2007. *Natural Hazards*, 59: 571–96.
- Boulanger, Y., Gauthier, S., Burton, P.J. et Vaillancourt, M.-A., 2012. An alternative fire regime zonation for Canada. *International Journal of Wildland Fire*, 21: 1052-1064.
- Boulanger, Y., Gauthier, S., Gray, D. R., Le Goff, H., Lefort, P. et Morissette, J., 2013. Fire regime zonation under current and future climate over eastern Canada. *Ecological Applications*, 23: 904–923.
- Erni, S., Arseneault, D., Parisien, M.-A. et Bégin, Y., 2017. Spatial and temporal dimensions of fire activity in the fire-prone eastern Canadian taiga. *Global Change Biology*, 23: 1152–1166.
- Erni, S., Arseneault, D. et Parisien, M.-A., 2018. Stand Age Influence on Potential Wildfire Ignition and Spread in the Boreal Forest of Northeastern Canada. *Ecosystems*, 21: 1471-1486.
- Flannigan, M.D., Logan, K.A., Amiro, B.D., Skinner, W.R. et Stocks B.J., 2005. Future Area Burned in Canada. *Climatic Change*, 72: 1–16.
- Girardin, M.P. et Mudelsee, M., 2008. Past and future changes in Canadian boreal wildfire activity. *Ecological Applications*, 18: 391–406.
- Girardin, M.P. et Wotton, B.M., 2009. Summer moisture and wildfire risks across Canada. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48: 517-533.
- Héon, J., Arseneault, D. et Parisien, M.-A., 2014. Resistance of the boreal forest to high burn rates. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111: 13888–13893.
- Marlon, J.R., Bartlein, P.J., Carcaillet, C., Gavin, D.G., Harrison, S.P., Higuera, P.E., Joos, F., Power, M.J. et Prentice, I.C., 2008. Climate and human influences on global biomass burning over the past two millennia. *Nature Geoscience*, 1: 697–702.
- Parisien, M.-A., Junor, D.R. et Kafka V.G., 2007. Comparing landscape-based decision rules for placement of fuel treatments in the boreal mixedwood of western Canada. *International Journal of Wildland Fire*, 16: 664-672.
- Parisien, M.A., Kafka, V.G., Hirsch, K.G., Todd, J.B., Lavoie, S. et Maczek, P.D., 2005. Mapping wildfire susceptibility with the BURN-P3 simulation model. *Canadian Forest Service, Edmonton*, 36 p.
- Payette, S., Morneau, C., Sirois, L. et Despons, M., 1989. Recent Fire History of the Northern Quebec Biomes. *Ecology*, 70: 656-673.
- Service canadien des forêts, 2015. Base de données nationale sur les feux de forêt du Canada. Disponible en ligne : <http://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/ha/nfdb>

## 8. Analyse des relations entre le climat et les séries temporelles de densité de cerne

Antoine Nicault, Luc Cournoyer, Thibault Labarre et Yves Bégin

### Résumé

Dans le cadre du projet ARCHIVES, nous avons produit, en plus des séries temporelles d'épaisseurs, d'isotopes et de sédiments varvés, plusieurs chronologies de densité. Dans la littérature, la densité maximale des cernes est, en effet, considérée comme un très bon indicateur des températures. Le potentiel paléoclimatologique de 38 chronologies de densité minimales et de 38 chronologies de densité maximales a été analysé. Si le potentiel des densités minimales en termes de reconstitutions climatique s'avère assez faible, les densités maximales montrent un très bon potentiel en termes de reconstruction des températures estivales. Cependant, pour plusieurs chronologies il a été mis en évidence une diminution de la relation densité / climat depuis la fin des années 60. Cette diminution est interprétée comme le phénomène de divergence climatique déjà soulevé dans la littérature. Ainsi, l'utilisation des chronologies de densité maximale dans le cadre de reconstructions climatiques devra être faite en tenant compte de ce phénomène.

### Abstract

In the framework of the ARCHIVES project, we produced several chronologies of tree-ring density, in addition to the tree-ring widths, tree-ring isotopes and varved sediments temporal series. In the literature tree-ring maximum density is indeed considered as a very good indicator of temperature. The paleoclimatic potential of 38 tree-ring minimal density chronologies and 38 tree-ring maximum density chronologies was analyzed. While the potential of minimum density is fairly low in terms of climate reconstructions, the potential of max-

imum density is very good in terms of summer temperature reconstruction. However, several chronologies have revealed a decrease in the density to climate relationship since the late 60s. This decrease is interpreted as a climate divergence phenomenon, as previously suggested in the literature. Thus, the use of tree-ring maximum density chronologies in climate reconstructions must take into account this phenomenon.

### Introduction

Hormis son épaisseur, le cerne de croissance peut fournir d'autres paramètres porteurs d'informations climatiques, comme les rapports isotopiques de la cellulose ou bien la densité du bois. Si les épaisseurs de cernes annuels sont les plus communément utilisées, c'est en grande partie dû à leur facilité d'acquisition. En effet, les rapports isotopiques et l'analyse densitométrique demandent beaucoup plus de temps de préparation et d'analyse. Dans le cadre du projet ARCHIVES, il a été décidé d'optimiser nos chances de reconstituer une ou plusieurs variables hydroclimatiques en utilisant un maximum de bioindicateurs issus des cernes d'arbres et notamment les différentes variables densitométriques.

La densité du bois est directement liée aux caractéristiques anatomiques des cernes. Elle varie à l'intérieur du cerne. Chez les gymnospermes, dans le cas présent chez l'épinette noire, au début de la mise en place du cerne il se forme des cellules assez grandes avec une paroi très fine, la densité du bois est alors plus faible (bois initial plus clair). Puis, au cours de la formation du cerne, les cellules deviennent de plus en plus petites et leurs parois propor-

tionnellement de plus en plus épaisses; le bois formé est alors plus dense (bois final plus sombre). La formation des cellules et leurs caractéristiques anatomiques, et donc l'épaisseur et la densité des cernes, sont sujettes aux variations environnementales et notamment climatiques.

Les relations entre la densité des cernes et les températures sont connues et exploitées avec succès depuis plusieurs années dans le cadre de reconstitutions climatiques (Briffa *et al.*, 2001). Elles ont également permis de mettre au jour plusieurs éruptions volcaniques passées jusque là incertaines ou inconnues (Briffa *et al.*, 1998). Acquérir de telles données dans le cadre du projet ARCHIVES s'est donc avéré incontournable et les arbres issus d'une cinquantaine de sites ont donc été sélectionnés pour faire l'objet d'une analyse densitométrique. Bien que les relations densité climat soient largement décrites dans la littérature, la mise en évidence, ces dernières années, d'un phénomène de divergence entre la densité et les températures (D'Arrigo *et al.*, 2008) et l'observation d'une grande variabilité géographique de la nature des relations entre les chronologies d'épaisseurs de cerne et le climat (Nicault *et al.*, 2014) nous ont conduit à réaliser une analyse détaillée, sur l'ensemble de notre aire d'étude, du signal porté par les séries temporelles de densité. Les dernières mesures de densité ont été réalisées au début 2013 c'est-à-dire à la toute fin du projet ARCHIVES. En conséquence, les analyses présentées ici ont donc été réalisées dans le cadre du projet ANHYCLI (2013-2015), suite du projet ARCHIVES dans le cadre du programme du consortium Ouranos.

#### Bilan des données densitométriques disponibles sur la région d'étude

L'analyse densitométrique a été réalisée sur une cinquantaine de sites échantillonnés dans le cadre du projet ARCHIVES. Cependant des analyses densitométriques avaient

déjà été effectuées dans la région lors de projets antérieurs, « ancêtres » du projet ARCHIVES, mais aussi lors d'un grand projet international de construction d'un réseau nord hémisphérique de chronologies d'épaisseur et de densité (Schweingruber, 1996; Briffa *et al.*, 2001). Dans les deux cas, les données n'ont pas été retenues pour cette analyse. En effet, ces données ayant été acquises plus d'une dizaine d'années avant le début de notre projet, la longueur de la période de calibration s'avérait trop courte pour intégrer ces séries aux séries récentes. Néanmoins, elles existent; les données issues du réseau nord hémisphérique, disponibles dans la banque de données mondiale ITRDB et couvrant notre région d'étude ont été intégrées à la banque de données ARCHIVES. Les données issues des projets québécois antérieurs ont posé quelques problèmes de vérification et d'homogénéisation, nous avons donc décidé de ne pas les intégrer pour l'instant à la base de données. Leur utilisation nécessiterait un retour aux radiographies toujours disponibles.

#### Construction des séries temporelles de densité des cernes

Pour la mesure de la densité des cernes, nous avons suivi la procédure décrite par Schweingruber (1978, 1996) et Cournoyer (2010). Tout d'abord les sections transversales d'arbres exemptes de toute anomalie (pourriture, bois de réaction, déformation, etc.) ont été sélectionnées. Des fines lamelles de bois (1mm) sont ensuite découpées grâce à une scie de précision à double lame puis passées au soxhlet (bains d'alcool successifs à ébullition) afin d'extraire les substances opaques aux rayons X (résines, tanins, etc.). Les échantillons obtenus sont radiographiés en conditions de température et d'humidité contrôlées. Les radiographies ont été développées en collaboration avec le service radiographique de l'hôpital St-Sacrement (Québec). La mesure de la densité ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) est ensuite réalisée sur les radiogra-

phies, grâce à un microdensitomètre optique (DENDRO 2003 microdensitometer (Walesch, Switzerland)). Les données d'intensité lumineuse sont transformées en densité grâce à une calibration préalable de l'appareil. Les mesures ont été réalisées au Centre d'études nordiques (Université Laval) et à l'IMBE (Aix-en-Provence, France) que nous remercions pour la mise à disposition de leur appareil.

L'analyse micro-densitométrique permet d'obtenir le profil de densité du cerne duquel on peut extraire huit valeurs supplémentaires : l'épaisseur de bois initial, l'épaisseur de bois final (et donc la proportion de bois final), la densité moyenne du cerne, la densité moyenne du bois initial, la densité moyenne du bois final, la densité maximale du cerne ( $d_{\max}$ ) et la densité minimale ( $d_{\min}$ ) du cerne. Dans cette étude, seules les densités maximales et minimales du cerne ont été analysées.

Les séries obtenues ont été standardisées en utilisant la méthode des bandes d'âge (Briffa *et al.*, 2001; Nicault *et al.*, 2010) afin de préserver au mieux les variations de croissance de basse fréquence. À l'issue de cette procédure, nous obtenons pour chaque site une chronologie maîtresse standardisée de dimension comparable et débarrassée des signaux liés à l'âge de l'arbre. Cette méthode permet de garder une grande partie des fluctuations de basse fréquence enregistrées dans les cernes.

Parmi la cinquantaine de sites ayant fait l'objet d'une analyse densitométrique dans le cadre du projet ARCHIVES, seulement 38 ont été retenus pour cette analyse (Figure 1). L'analyse densitométrique produit beaucoup plus de déchets, liés aux contraintes techniques, que les mesures d'épaisseurs. Ainsi, suite aux pertes liées à la préparation (pertes lors des découpes très fines) et aux mesures (certaines parties des films sont floues et donc inexploitable) pour quelques sites, nous ne possédons pas un nombre assez grand de ré-

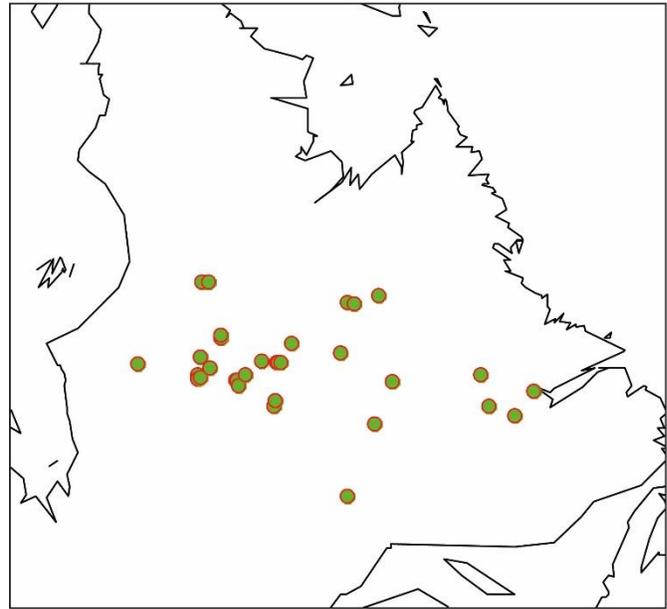


Figure 1. Localisation des sites ayant fait l'objet de mesures densitométriques et retenus pour l'analyse.

plication pour réaliser une chronologie maîtresse convenable.

### Analyse des relations entre la densité des cernes et le climat

Les données climatologiques utilisées sont des valeurs sur grille ( $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ ), fournies par Hydro-Québec (Chapitre 5), qui couvrent l'ensemble de la région étudiée. Les interpolations sur grille ont été réalisées grâce à la technique du krigeage avec dérive externe (Tapsoba *et al.*, 2005). La dérive externe utilisée est la topographie. Les données utilisées sont la somme des précipitations mensuelles et les températures moyennes mensuelles, les températures maximales et minimales. Nous avons sélectionné les points de grille les plus proches des sites étudiés et nous avons extrait les données sur la période 1960-2001, commune aux cernes et aux données climatologiques. Les données utilisées sont la somme des précipitations mensuelles, les températures moyennes mensuelles, les températures minimales mensuelles et les températures maximales mensuelles.

Les relations entre la variabilité interannuelle de la densité et du climat ont été

étudiées grâce à une analyse de fonction de corrélation associée à une procédure bootstrapp permettant d'évaluer la robustesse de la relation (Zang et Biondi, 2013). Sur la période 1960-2001, nous avons recherché les relations existantes entre les précipitations et les températures moyennes, minimales et maximales mensuelles (couvrant la période de 16 mois de juin de l'année précédente à septembre de l'année en cours) et la densité des cernes représentés ici par les paramètres de la densité maximale et de la densité minimale. Les résultats sont présentés en graphiques de surfaces (les sites en abscisse, les paramètres climatiques en ordonnée et la valeur des corrélations sur le graphique; Figures 2 et 3).

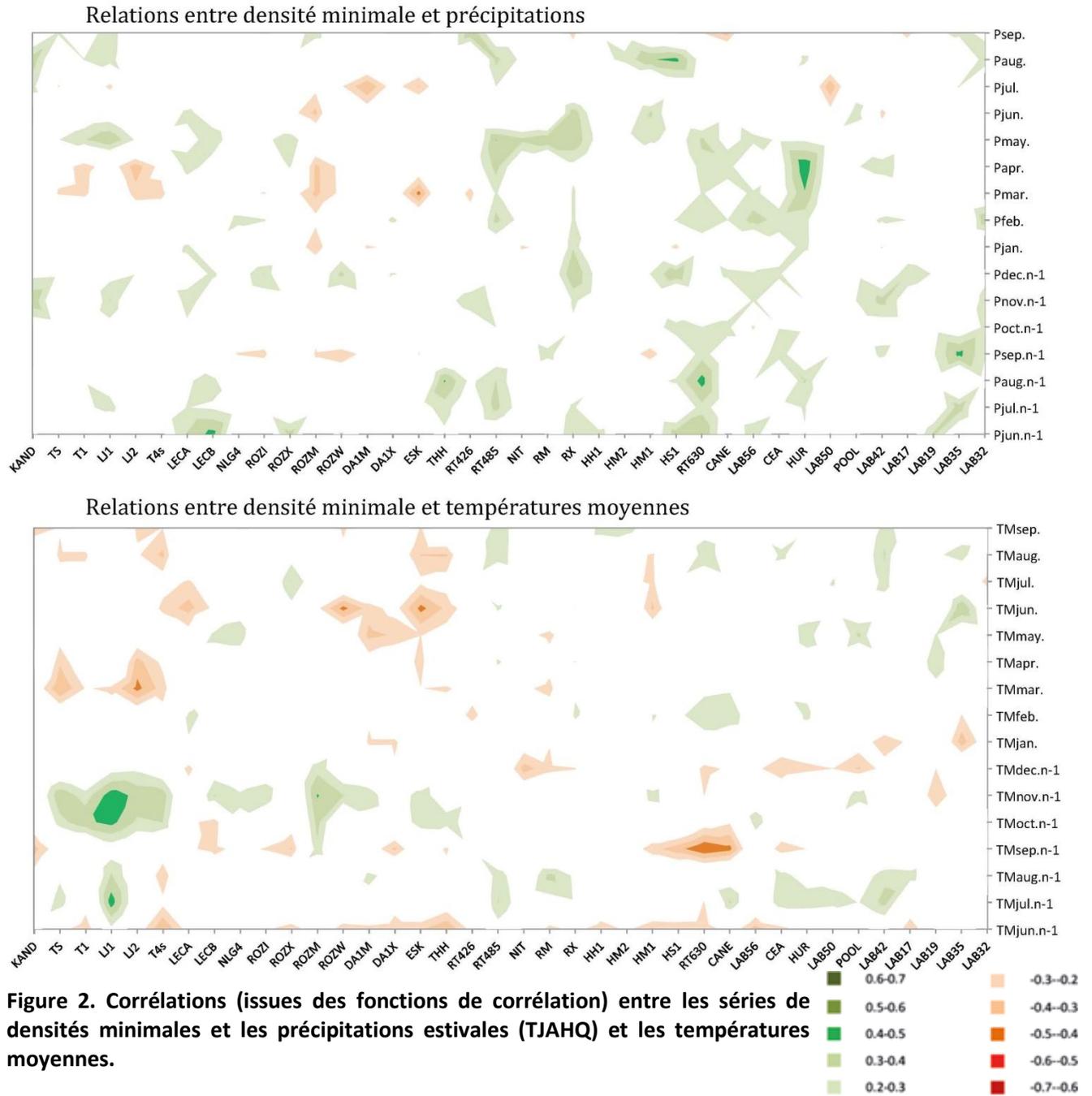
#### **Faible dépendance des densités minimales à la variabilité climatique**

Sur la période 1960-2001 les séries temporelles de densités minimales ne montrent pas, ou très peu, de relations significatives avec les températures et les précipitations (Figure 2). Parmi ces relations, on peut noter une influence, certes faible, des précipitations des mois de mars, avril et mai sur les populations du centre du Québec situées prin-

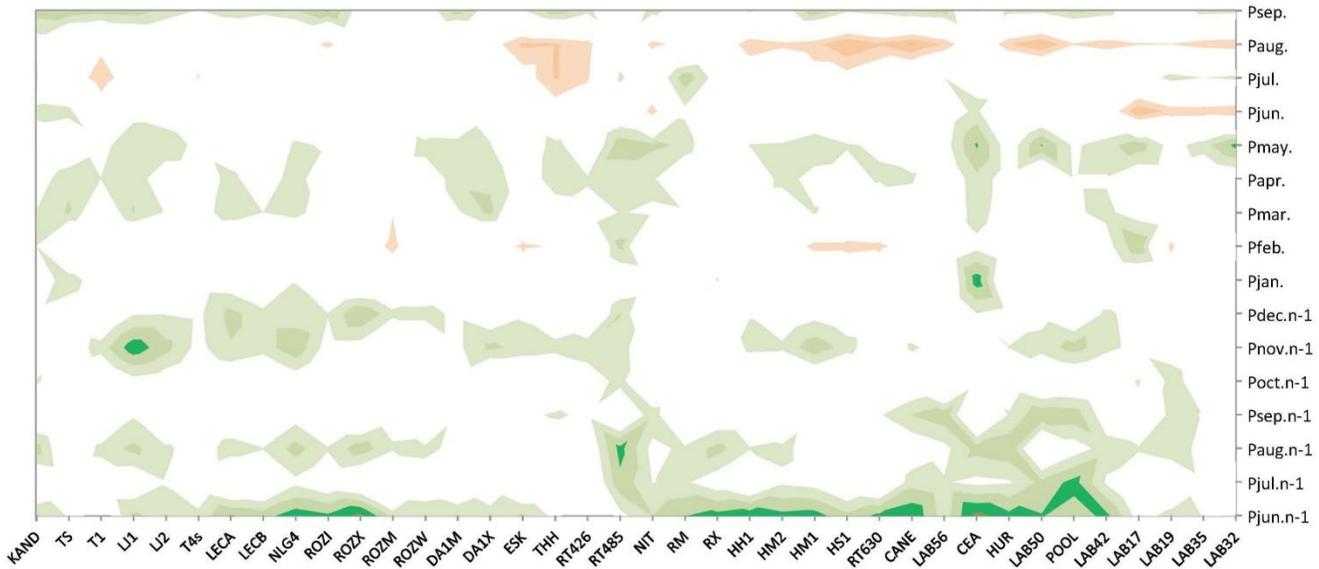
cipalement autour du réservoir Caniapiscou. Bien que ces relations puissent paraître anecdotiques, les densités minimales avaient été retenues, conjointement avec des séries glacielles, pour une reconstruction des crues printanières dans la région de Caniapiscou (Boucher *et al.*, 2011). Hormis cet exemple, le potentiel paléoclimatique des séries de densités minimales s'avère donc assez faible.

#### **Forte sensibilité des densités maximales aux températures estivales**

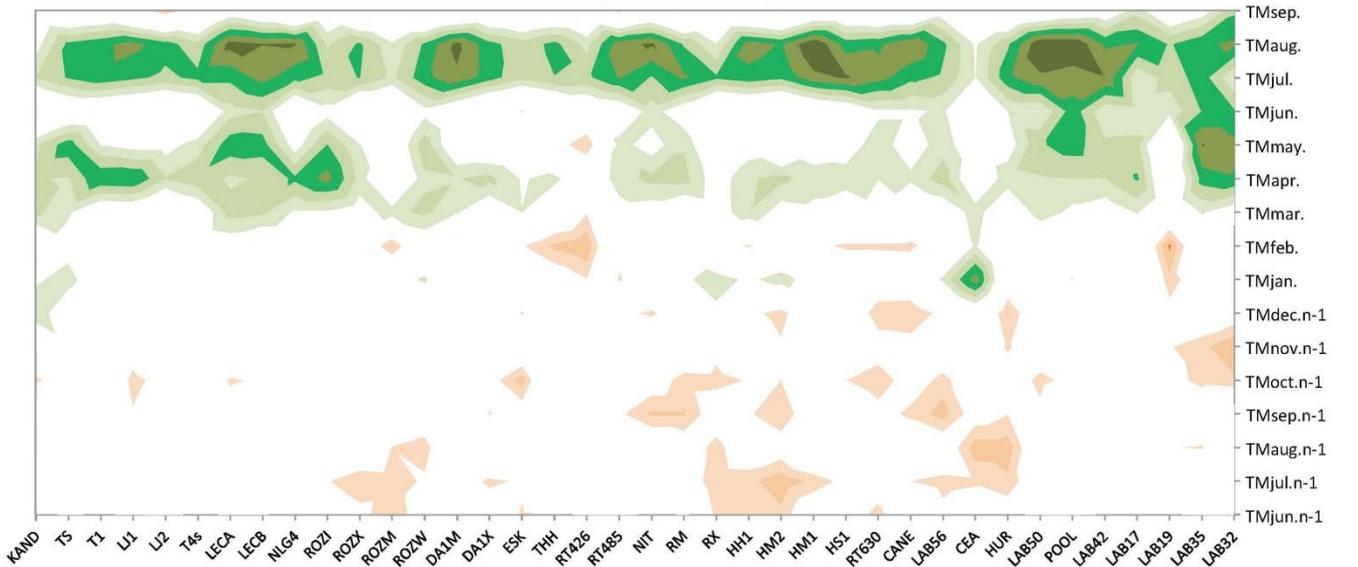
Les relations entre la densité maximale et les précipitations apparaissent assez faibles (Figure 3). On peut observer une certaine cohérence entre les populations. En effet, plus de la moitié des séries temporelles de densité maximale montrent une relation positive avec les précipitations du mois de juin, de novembre et de décembre de l'année précédente et des mois d'avril et de mai de l'année courante. Certaines populations montrent une relation négative avec les précipitations du mois d'août. Ces relations sont difficilement interprétables et pas assez fortes pour pouvoir utiliser les densités maximales comme un indicateur des précipitations.



Relations entre densité maximale et précipitations



Relations entre densité maximale et températures moyennes



**Figure 3. Relation (fonctions de corrélations) entre les séries de densité maximales et les précipitations estivales (TJAHQ) et les températures moyennes.**



Hormis l'apparition de relations négatives avec les températures minimales des mois d'automne et d'hiver précédent la période de végétation; relations qui restent faibles et difficilement interprétables; l'influence des températures sur la variabilité des séries temporelles de densité maximale est

très marquée. En effet, pour l'ensemble des sites il y a une influence significative, voire très significative, des températures moyennes des mois de juillet et août sur la variabilité temporelle de la densité maximale. Seul un site ne montre pas de relation entre les températures estivales et la densité maximale des cernes.

Pour une grande majorité des sites la température des mois d'avril et de mai influence aussi significativement la densité des cernes. Ces relations sont en adéquation avec celles entre la densité des cernes et le climat trouvées dans la littérature. La force de la relation entre la densité maximale des cernes et les températures estivales en font effectivement un excellent proxy pour les reconstitutions de la variabilité temporelle des températures estivales.

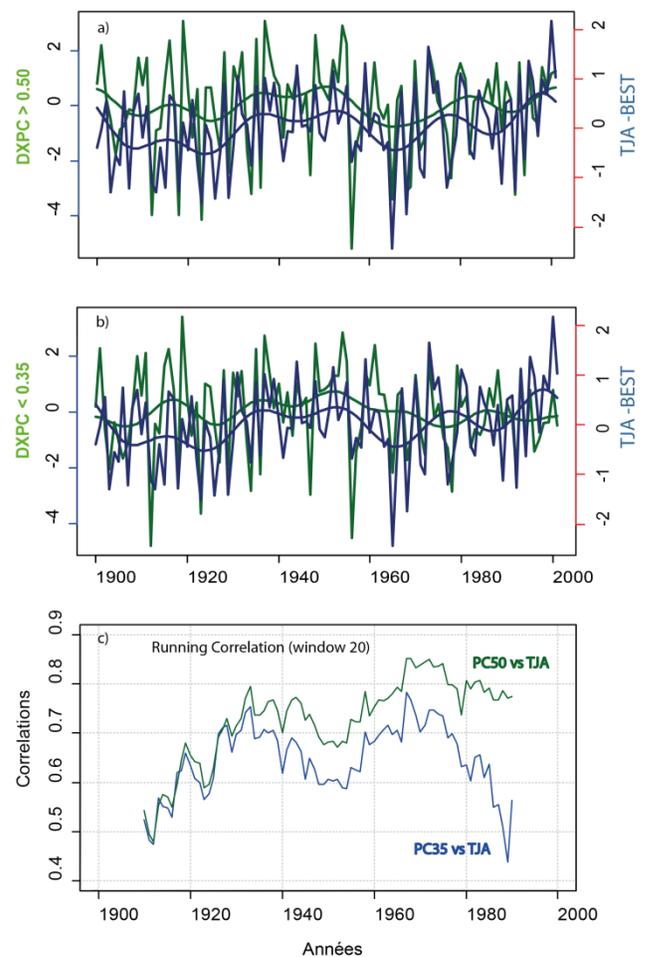
### Observation d'un phénomène de divergence pour certains sites

Bien que quasiment toutes les séries temporelles soient significativement influencées par les températures estivales, on remarque une assez grande variabilité dans l'intensité de la relation. Nous avons voulu savoir si cette variabilité reflétait pour certaines séries temporelles de densité maximale le phénomène de divergence des relations de la croissance et de la densité vis-à-vis du climat, tel que soulevé par plusieurs auteurs (D'Arrigo *et al.*, 2008). Le phénomène de divergence exprime une forte diminution, observable depuis les années 90, de l'intensité de la relation entre la densité des cernes d'arbres et les températures.

Pour rechercher cette divergence, nous avons discriminé les séries de densité en deux groupes : un premier groupe composé des séries de densité maximale les moins corrélées aux températures estivales ( $r < 0.35$ ; 12 populations) et un autre composé des séries de densité maximale les mieux corrélées aux températures estivales ( $r > 0.5$ ; 13 populations). Sur chacun de ces groupes, une analyse en composante principale a été réalisée sur la période 1900-2001. Nous avons ensuite extrait les premières composantes principales, issues des séries les moins sensibles (DXCP35) et des séries les plus sensibles (DXCP50), puis nous les avons comparées aux séries de température

estivale (juillet-août) issue de la banque de données climatiques BEST (TJABEST; <http://berkeleyearth.org/>) pour la période 1900-2001 (Figures 4a et 4b). En parallèle une analyse de corrélation mobile a été réalisée entre DXPC35 et DXPC50 et la série TJABEST (Figure 4c).

La première composante principale DXCP50 suit la courbe des températures estivales sur toute la période explorée aussi bien au niveau haute fréquence que moyenne et



**Figure 4. Comparaison entre les premières composantes principales, issues des séries de densités les plus sensibles (DXCP50) au climat et des séries les moins sensibles (DXCP35), aux séries de températures estivales (juillet-août) issues de la banque de données climatiques BEST (TJABEST ; <http://berkeleyearth.org/>) (respectivement a et b). Corrélation mobile entre DXPC35, DXPC50 et la série TJABEST (c).**



notre étude, le gradient latitudinal assez faible et contrarié par le relief explique probablement en partie l'absence d'influence de la latitude et du GDD5.

Les variables les plus influentes sont la longitude associée aux minimorum et à la somme totale des précipitations de neige, et, (Axe RDA 1) sur l'autre axe, la distance à la mer et l'altitude jouent également un rôle important. Il apparaît donc que ce seraient les séries temporelles de densité maximale issues des populations d'épinettes poussant dans les zones les plus froides (centre et nord) qui sont les plus sensibles aux températures estivales. Pour ces populations le seuil de « non limitation » par les températures ne serait pas encore atteint. En revanche, pour les chronologies issues de secteurs un peu moins froids, l'effet limitant des températures serait en diminution.

**Tableau 1. Influence (R<sup>2</sup>) de chacune des variables environnementales sur la relation densité – climat.**

VAR	r <sup>2</sup>	p-value
LAT	0.054	0.38
LONG	0.473	0.001
ELE	0.337	0.002
d.sea	0.372	0.002
D.class	0.025	0.065
Sn.Tot	0.392	0.001
Tm.An	0.222	0.013
Ptot	0.312	0.002
Tmin	0.428	0.001
gdd5	0.059	0.328

### Conclusion

Nous avons analysé les relations entre 38 séries temporelles de densités de cerne (densité minimale et densité maximale). Ces analyses montrent que la variabilité de la densité minimale est très peu influencée par les températures ou les précipitations. Le potentiel dendroclimatique des chronologies de densité minimale est donc assez faible contrairement aux séries temporelles de densité maxi-

male qui montrent une relation très forte avec les températures estivales. On observe une variation interstationnelle de la sensibilité des densités maximales au climat. Cependant, à la différence des séries temporelles des cernes (Nicault *et al.*, 2015), la nature de la relation densité-climat ne change pas, seule l'intensité de la relation change. Ces variations ont été interprétées comme les conséquences du phénomène de divergence. En effet, pour une partie des séries de densité maximale, il y a une diminution importante des corrélations entre les températures estivales et la densité maximale des cernes. Ce sont les arbres poussant dans les conditions les moins froides qui semblent le plus touchés par le phénomène.

Malgré tout, les séries de densité maximale présentent un très fort potentiel paléoclimatique, à condition bien sûr de s'affranchir au mieux de la divergence observée. L'intégration de ce type de proxy dans les futures études paléoclimatiques sur le millénaire, à partir des troncs d'arbres prélevés dans les lacs, contribuerait grandement, en complément des épaisseurs et des isotopes, à améliorer la qualité des reconstructions. Plusieurs études ont d'ailleurs montré qu'il est tout à fait possible de construire des chronologies de densité maximales satisfaisantes à partir de bois subfossiles (Wang *et al.*, 2001, Grund, 2008).

Enfin, ces séries de densités combinées aux mesures de la largeur des cernes ont permis de fournir des indices de productivité pour l'ensemble des peuplements étudiés à partir desquels Boucher *et al.* (2017) ont pu mettre en évidence une forte relation entre la production de biomasse et les processus d'interactions océan/atmosphère à grande échelle.

<https://doi.org/10.4095/328074>

## Références

- Boucher, É., Ouarda, T.B.M.J., Bégin, Y. et Nicault, A., 2011. Spring flood reconstruction from continuous and discrete tree ring series. *Water Resources Research*, 47(7). <https://doi.org/10.1029/2010WR010131>
- Boucher, É., Nicault, A., Arseneault, D., Bégin, Y. et Karami, M.P., 2017. Decadal Variations in Eastern Canada's Taiga Wood Biomass Production Forced by Ocean-Atmosphere Interactions. *Scientific Reports*, 7(1) : 1-13.
- Briffa, K.R., Jones, P.D., Schweingruber, F.H. et Osborn, T.J., 1998. Influence of volcanic eruptions on Northern Hemisphere summer temperature over the past 600 years. *Nature*, 393(6684): 450-455.
- Briffa, K.R., Osborn, T.J., Schweingruber, F.H., Harris, I.C., Jones, P.D., Shiyatov, S.G. et Vaganov, E.A., 2001. Low-frequency temperature variations from a northern tree ring density network. *Journal of Geophysical Research*, 106(D3): 2929-2941.
- Cournoyer, L., 2010. Imagerie numérique et analyse densitométrique du bois. In Payette, S. et Filion, L. (eds) *Dendroécologie : concepts, méthodes et applications*. Presses de l'Université Laval, Québec. pp. 283-310.
- D'Arrigo, R., Wilson, R., Liepert, B. et Cherubini, P., 2008. On the 'divergence problem' in northern forests: a review of the tree-ring evidence and possible causes. *Global and Planetary Change*, 60(3) : 289-305.
- Grudd, H., 2008. Torneträsk tree-ring width and density AD 500–2004: a test of climatic sensitivity and a new 1500-year reconstruction of north Fennoscandian summers. *Climate Dynamics*, 31(7-8): 843-857.
- Nicault A., Bégin, Y. et Guiot, J. 2010. Standardisation des séries dendrochronologiques. In Payette, S. et Filion, L. (eds) *Dendroécologie : concepts, méthodes et applications*. Presses de l'Université Laval, Québec, pp. 199-227.
- Nicault, A., Boucher, É., Tapsoba, D., Arseneault, D., Berninger, F., Bégin, C., Berninger, F., DesGranges, J-L., Guiot, J., Marion, J., Wicha, S. et Bégin, Y., 2014. Spatial analysis of black spruce (*Picea mariana* (Mill.) BSP) radial growth response to climate in northern Québec–Labrador Peninsula, Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, 45(3) : 343-352.
- Schweingruber, F.H., Fritts, H.C., Bräker, O.U., Drew, L.G. et Schär, E., 1978. The X-ray technique as applied to dendroclimatology. *Tree-Ring Bulletin*, 38 : 61-91.
- Schweingruber, F.H. 1996. *Tree rings and environment: dendroecology*. Paul Haupt AG Bern. 609 p.
- Tapsoba, D., Fortin, V., Anctil, F. et Haché, M., 2005. Apport de la technique du krigeage avec dérive externe pour une cartographie raisonnée de l'équivalent en eau de la neige: Application aux bassins de la rivière Gatineau. *Canadian journal of civil engineering*, 32(1) : 289-297.
- Wang, L., Payette, S. et 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. *The Holocene*, 11(3): 333-341.
- Zang, C. et Biondi, F., 2013. Dendroclimatic calibration in R: the bootRes package for response and correlation function analysis. *Dendrochronologia*, 31(1) : 68-74.

## 9. Influence des variations interannuelles du climat sur la croissance radiale des épinettes noires

Antoine Nicault, Étienne Boucher, Dominique Tapsoba et Yves Bégin

### Résumé

Le but de cette étude est d'analyser la variabilité spatiale des relations entre la croissance de l'épinette noire (*Picea mariana* Mill. BSP) et le climat dans la forêt boréale du nord de la péninsule Québec-Labrador. Tout d'abord, une analyse ascendante hiérarchique a été réalisée sur 93 populations d'épinette noire pour déterminer les affinités entre les sites et ensuite calculer des fonctions de réponse (régressions linéaires multiples sur composantes principales), ceci afin d'apprécier la réponse des arbres au climat. L'analyse hiérarchique a montré des affinités régionales entre les populations, expliquées en grande partie par les relations entre les arbres et le climat. Les variations interannuelles de la croissance sont régies principalement par des variables de température qui précèdent la saison de croissance : la température des mois de novembre (influence négative) et d'avril (influence positive) pour les sites les plus à l'ouest; la température des mois de décembre et de janvier (influence positive) pour les sites les plus au sud. Les températures ayant une influence durant la période de végétation (températures de juillet) n'ont d'influence que sur les populations les plus septentrionales et les plus à l'est (influence de la mer du Labrador). Ces relations ont été spatialisées sur l'aire d'étude grâce à la méthode de krigeage avec dérive externe.

### Abstract

This study aims at analyzing the relationships between the black spruce (*Picea mariana* Mill. BSP) radial growth response to climate over a wide territory on the northern Quebec-Labrador peninsula's boreal forest. Firstly, a hierarchical cluster analysis was con-

ducted to detect the affinities among 93 black spruce tree-ring width series. Secondly, linear multiple regression analysis, associated with a bootstrap technique, was used to calculate response functions of the tree-ring series. As a result, spatial affinities among tree-ring series highlight a geographical pattern that can be related to the spatial variability of the tree-ring - climate relationships. Inter-annual growth variations are governed mainly by temperature variables of the preceding growing season: November temperatures have a negative influence, while April has a positive one for among the westernmost trees, as do December-January for the southernmost trees. Growing season temperatures (mainly July temperatures) influence only the northernmost and easternmost populations. The response was spatially interpolated using a kriging technique with an external drift.

### Introduction

L'analyse des relations cernes/climat permet de mettre en évidence les facteurs climatiques limitant la croissance, et donc responsables des variations interannuelles d'épaisseurs des cernes, ou d'autres variables comme la densité. Ce type d'analyse permet de mieux connaître l'écologie des espèces et, dans le cas présent, d'évaluer leur valeur en tant que bio-indicateur climatique.

Il est admis que la relation entre le climat et la croissance des arbres peut varier de façon assez importante spatialement à la faveur de gradients environnementaux naturels (Mäkinen *et al.*, 2002; Carrer *et al.*, 2007; Miyamoto *et al.*, 2010). Au Québec et au Labrador, plusieurs études ont analysé les relations cernes-climat de plusieurs espèces et

notamment le long de transects latitudinaux (Huang *et al.*, 2010; Hofgaard *et al.*, 1999; Girard *et al.*, 2011) ou longitudinaux (Trindade *et al.*, 2011ab). Pour l'ensemble des secteurs et des espèces étudiées, ils ont observé une importante variabilité régionale de la relation cernes-climat. Cette étude réalisée dans le cadre du projet ARCHIVES propose une analyse de la variabilité spatiale des relations cernes-climat sur un long transect est-ouest parcourant l'ensemble de la péninsule Québec-Labrador, de la Baie James à Goose Bay au Labrador, avec pour objectif de mettre en évidence d'éventuels régionalismes.

Sur un aussi grand territoire, avant toute étude paléoclimatique, il est nécessaire de mieux comprendre l'autécologie de l'épinette noire et de mieux appréhender la variabilité géographique des relations cernes-climat. Il sera ainsi plus facile d'évaluer le potentiel dendroclimatologique des peuplements d'épinette noire. De plus, une bonne compréhension des relations entre les variations de la croissance radiale des arbres et les variations du climat pourrait être un atout important dans la prévision des impacts potentiels des changements climatiques sur les écosystèmes forestiers (Spittlehouse, 2005).

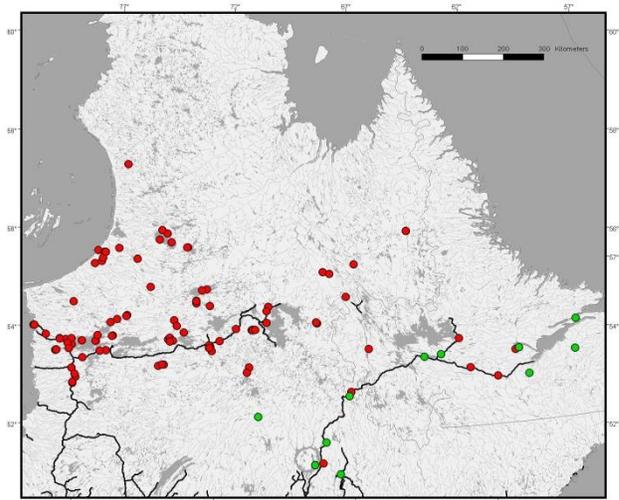
Tout d'abord une analyse des affinités entre les chronologies d'épaisseurs de cernes a été réalisée sur l'ensemble des populations afin de déceler d'éventuels patrons spatiaux déterminés par les gradients environnementaux ou des groupes d'affinité en lien avec des caractéristiques écologiques stationnelles. Ensuite, nous avons calculé et analysé les relations cernes-climat, leur variabilité spatiale et un modèle spatial des relations les plus significatives.

## Données dendrochronologiques et climatologiques

### Échantillonnage

Nous avons analysé 93 sites répartis dans le nord de la péninsule Québec-Labrador (Figure 1), sélectionnés à même un réseau composé de plus ou moins 120 sites. Les sites échantillonnés s'étagent du niveau de la mer à une altitude de plus de 900 mètres au centre du Québec. Il existe également un fort gradient de continentalité; les sites les plus maritimes étant situés à quelques kilomètres de la mer d'Hudson, tandis que les sites les plus continentaux sont situés à environ 480 km de la mer. Une partie de l'échantillonnage a été réalisée dans le cadre d'un projet connexe financé par Environnement Canada (Figure 1, points verts; Wicha *et al.*, 2010).

Les populations d'épinette noire échantillonnées appartiennent à trois grands types de formations forestières: la toundra forestière, la pessière noire à lichens et la pessière noire à mousses. Des sites à topographie et à structure homogènes ont été sélectionnés. Dans chacun des sites, 12 arbres au minimum ont été échantillonnés. Seuls les arbres domi-



**Figure 1.** Localisation des sites dont sont issues les épinettes noires étudiées. En rouge, les sites échantillonnés dans le cadre du projet ARCHIVES et, en vert, les sites échantillonnés dans le cadre d'un projet connexe avec Environnement Canada.

nants, avec un port symétrique et exempts d'anomalie morphologique apparente ont été sélectionnés. Dans la mesure du possible, les arbres issus de marcottage ont été évités. L'âge des arbres échantillonnés varie entre 60 et 350 ans. Les peuplements échantillonnés sont généralement monospécifiques. Cependant, on peut noter la présence sporadique de pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.) et de mélèze (*Larix laricina* DuRoi Koch.) au sein des peuplements les plus à l'ouest, et de sapin (*Abies balsamea* L. Mill.) et de mélèze dans les peuplements les plus à l'est. Certains sites voisins mais ayant des conditions environnementales très différentes ont été échantillonnés afin de pouvoir évaluer l'influence des conditions écologiques sur la croissance. Ces sites ont principalement été choisis selon des classes de drainage. Par exemple : les sites HH1, HM2, HM1, HS1 ont été échantillonnés selon un fort gradient de drainage; les arbres HH1 étant en milieu très humide, les arbres du site HS1 sur des affleurements rocheux donc fortement drainés. La même démarche a été réalisée pour les sites DA1R, DA1M, DA1X; les sites ROZM, ROZX, ROZW, ROZI; les sites T1, T4X; les sites LJ1, LJ2.

#### *Construction des chronologies de cernes*

Les échantillons récoltés ont tout d'abord été soigneusement poncés, mesurés sur deux rayons, avec une précision de 1/100 mm, et interdatés. Les séries de largeur de cernes obtenues ont ensuite été standardisées afin d'enlever les tendances reliées à l'âge des arbres et de pouvoir travailler sur des séries de dimensions comparables. Ces séries standardisées ont été obtenues en divisant les largeurs de cerne par une courbe théorique de croissance calculée grâce à une méthode de lissage de type LOESS (lissage par régression locale; Cleveland et Delvin, 1988, Nicault *et al.*, 2010). Le paramètre de lissage que nous avons utilisé correspond à une fenêtre de 40% du nombre d'années de la série dendrochronologique. La

standardisation a été réalisée pour chaque rayon. Finalement, la chronologie maîtresse de chaque site a été construite en calculant la moyenne de l'ensemble des séries standardisées de chaque arbre.

#### *Données climatologiques*

Les stations climatiques sont rares et dispersées sur le territoire étudié et leur couverture temporelle est souvent réduite et incomplète. Par souci d'homogénéité, nous avons choisi d'utiliser des données météorologiques sur grille (0,5°x 0,5° de latitude et de longitude), fournies par Hydro-Québec, et couvrant l'ensemble de la région étudiée. Les interpolations sur grille ont été réalisées grâce à la technique du krigeage avec dérive externe (Tapsoba *et al.*, 2005). La dérive externe utilisée est la topographie (Chapitre 5). Les données utilisées comme prédicteurs de la croissance radiale sont la somme des précipitations mensuelles et les températures moyennes mensuelles. Ces données couvrent la période 1961-2004. Nous avons sélectionné les points de grille les plus proches des sites étudiés pour les calculs de relations cernes-climat.

#### **Affinité régionale entre les séries dendrochronologiques**

##### *Analyse de classification ascendante hiérarchique*

Une analyse de classification ascendante hiérarchique (ACA; Everitt, 1974, Gordon, 1999) a été réalisée afin de déterminer les affinités entre les chronologies des différents sites.

Cette approche permet de déterminer si les arbres se regroupent sur la base de critères locaux (écologiques) ou régionaux (climatiques). La mesure de ressemblance a été calculée sur la période commune entre les séries standardisées (1920-1987; Figure 2a) par le calcul de distance euclidienne. La méthode de groupement, qui vise à partitionner l'ensemble des objets en différents groupes, a été réalisée

grâce à la méthode d'agglomération de Ward. Les résultats sont présentés sous la forme d'un dendrogramme. L'appartenance de chaque population à leur groupe respectif est ensuite reportée sur une carte.

#### *Discrimination régionale des sites*

Le dendrogramme issu de l'analyse hiérarchique (Figure 2b) montre que les populations d'épinette noire se divisent en quatre groupes principaux. Le plus petit groupe (groupe 1), se dissocie nettement des trois autres. La figure 2c montre que les sites de chaque groupe se regroupent de façon cohérente dans l'espace. Trois groupes sont clairement distincts au plan de position géographique, sans aucun recouvrement spatial (Figure 2c).

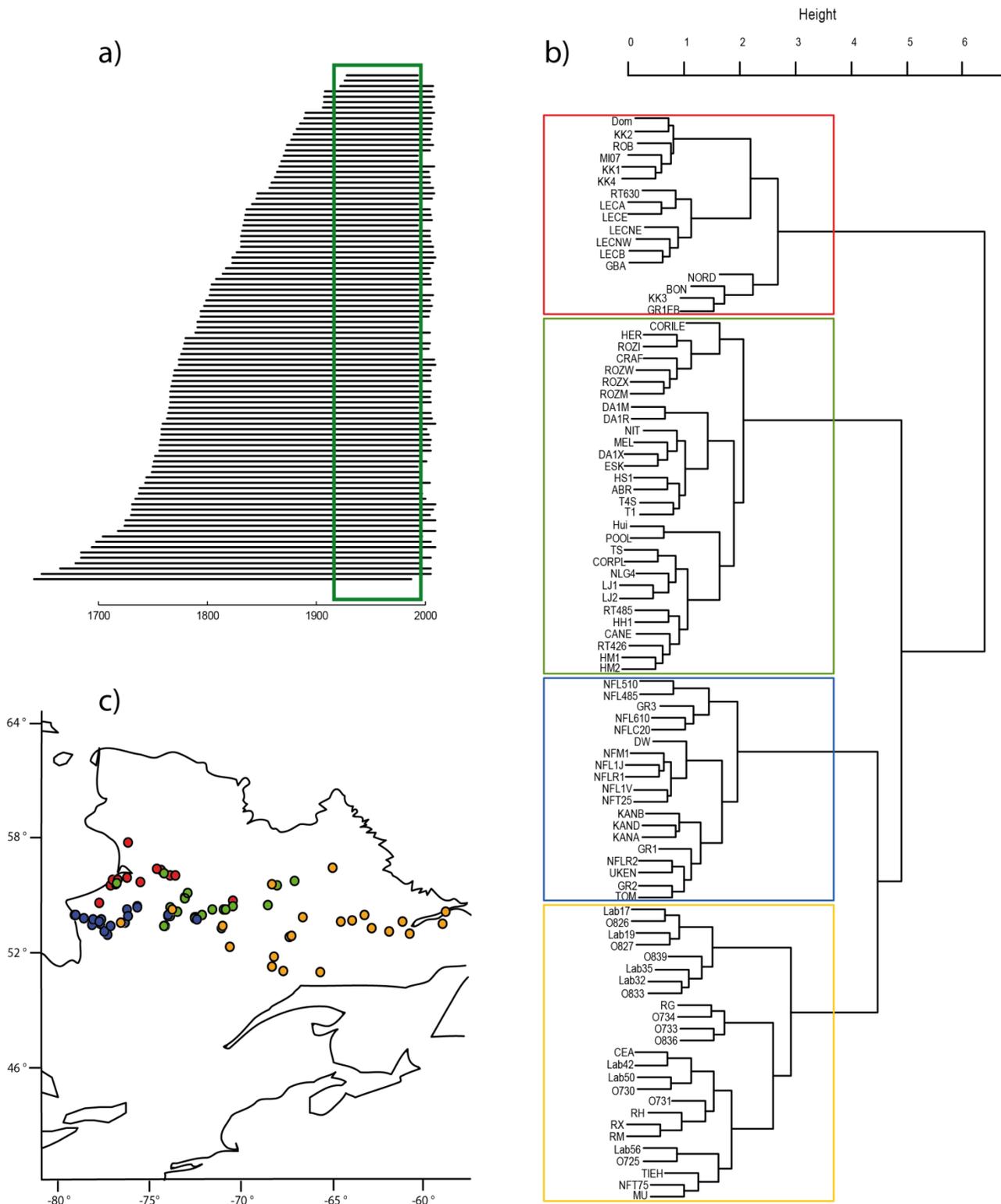
Le groupe le plus fortement dissocié des autres se compose presque exclusivement des populations subarctiques situées dans le secteur de la baie d'Hudson (points rouges), un autre groupe composé des arbres les plus proches de la Baie de James/Lg2 (points bleus) et un groupe composé de populations les plus à l'est, presque toutes situées au Labrador (points oranges).

Le quatrième groupe (points verts) occupe la partie centrale de l'aire d'étude, la zone LG4-Caniapiscau. Toutefois, bien qu'il soit cohérent géographiquement, il chevauche les trois autres groupes (Figure 2c). L'observation plus précise du dendrogramme montre que des populations voisines poussant dans des conditions écologiques très différentes se retrouvent quasiment toujours dans les mêmes sous-groupes. Les conditions écologiques des sites seraient donc beaucoup moins discriminantes pour la variabilité interannuelle de la croissance que les conditions régionales et donc probablement la variabilité spatiale du climat.

### **Influence du climat sur la variabilité interannuelle de la croissance**

#### *Analyse des relations cernes-climat*

La fonction de réponse en dendroclimatologie est définie comme étant la fonction linéaire qui relie le climat et la croissance annuelle des arbres (Guiot et Nicault, 2010). Si la croissance est régie par un ensemble complexe d'interrelations entre des facteurs climatiques et des processus physiologiques, seuls les facteurs climatiques les plus contraignants sont enregistrés de façon régulière dans les séries de cernes de croissance. La fonction de réponse est une régression linéaire multiple appliquée sur les composantes principales des variables climatiques afin d'éviter la colinéarité. La reproduction des résultats est testée par la technique « bootstrap » (x500 ici; Efron, 1979). Les coefficients de la fonction de réponse et leurs intervalles de confiance sont donnés par la médiane sur ces itérations et par les 2,5ième et 97,5ième percentiles. La fiabilité globale de la fonction de réponse est évaluée sur la base du coefficient moyen de corrélation des années de calibration au carré ( $R^2$ ) et par l'erreur standard (RMSE). Le poids de chaque variable climatique dans la régression est évalué par le degré de signification de chaque coefficient de régression partielle. Le signe de ce coefficient de régression partielle précise par ailleurs la nature de la relation (directe ou inverse) entre la croissance et la variable climatique considérée. Les fonctions de réponse ont été calculées sur la période 1961-2005. Les douze mois de températures, et les douze mois de précipitations ont été utilisés successivement comme variables explicatives. La formation du cerne étant terminée à la fin du mois d'août, les données mensuelles sont utilisées en années biologiques, c'est-à-dire d'octobre à septembre. Les calculs ont été réalisés à l'aide d'une fonction du package R Bioindic.



**Figure 2. Analyse de classification hiérarchique, a) représentation de la dimension temporelle des chronologies étudiées et visualisation de la période commune d'analyse, b) dendrogramme résultant de l'analyse de classification hiérarchique (quatre groupes principaux définis), c) cartographie des groupes discriminés par le dendrogramme (correspondance des couleurs).**

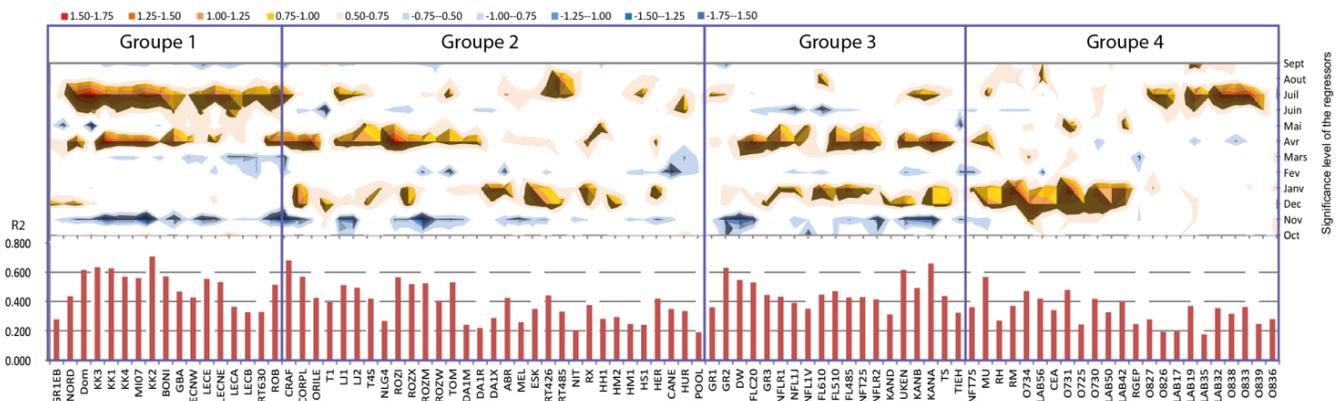
### Des relations cernes-climat complexes

L'analyse des fonctions de réponses montre que la croissance radiale des épinettes noires est beaucoup plus sensible aux températures qu'aux précipitations. Cependant les relations entre la variabilité de la croissance et le climat apparaissent complexes. Au moins quatre variables de températures, dont trois variables précédant la saison de croissance, jouent un rôle important dans la variabilité interannuelle de la croissance des épinettes (Figure 3). On observe aussi une grande variabilité interstationnelle et régionale dans les patrons de réponse aux températures. Les températures du mois de novembre et du mois d'avril ont une influence significative (positive) sur les populations les plus à l'ouest (des rives de la baie de James et de la baie d'Hudson), les températures hivernales des mois de décembre et janvier influencent la croissance d'un tiers des populations, principalement celles situées le plus au sud de la zone d'étude, et finalement les températures du mois de juillet jouent un rôle important sur la réponse des populations les plus au nord (subarctiques) et les plus à l'est (Figure 3).

### Interprétations écophysiologiques des relations croissance-climat

Des températures froides au mois de novembre ont une influence positive sur la

croissance des arbres durant la saison de végétation suivante. Ces températures plus froides durant cette période pourraient en effet permettre l'installation d'une couverture neigeuse précoce qui permettra une meilleure protection du sol vis-à-vis du gel lors des épisodes plus froids des mois de décembre et de janvier. Des températures douces aux mois de décembre et janvier influencent positivement la croissance des arbres l'été suivant. En effet, les hivers très froids sont susceptibles de causer des dommages importants à l'appareil foliaire et diminuer ainsi le potentiel photosynthétique, mais aussi de geler les sols plus en profondeur et retarder la reprise de croissance. Inversement, des hivers plus doux, donc avec un manteau neigeux plus important, auront un effet protecteur sur l'arbre. Des températures douces au mois d'avril favoriseraient le développement des bourgeons foliaires, alors que la croissance de ces derniers serait retardée par des températures froides. De plus, durant cette période, des températures basses pourraient introduire un délai dans la reprise de la photosynthèse. Plus les températures estivales sont élevées, plus la croissance sera accentuée. La saison de croissance étant très courte sous ces latitudes, l'apport d'énergie (ici les températures) sera déterminant pour la production ligneuse.



**Figure 3. Résultats des fonctions de réponses des chronologies d'épaisseurs de cernes aux températures moyennes. Les histogrammes (rouge) représentent le R<sup>2</sup> (variance expliquée par les températures), le graphique en surface la nature et la force des relations (nuance de bleu relations inverse, nuance de rouge relation directe).**

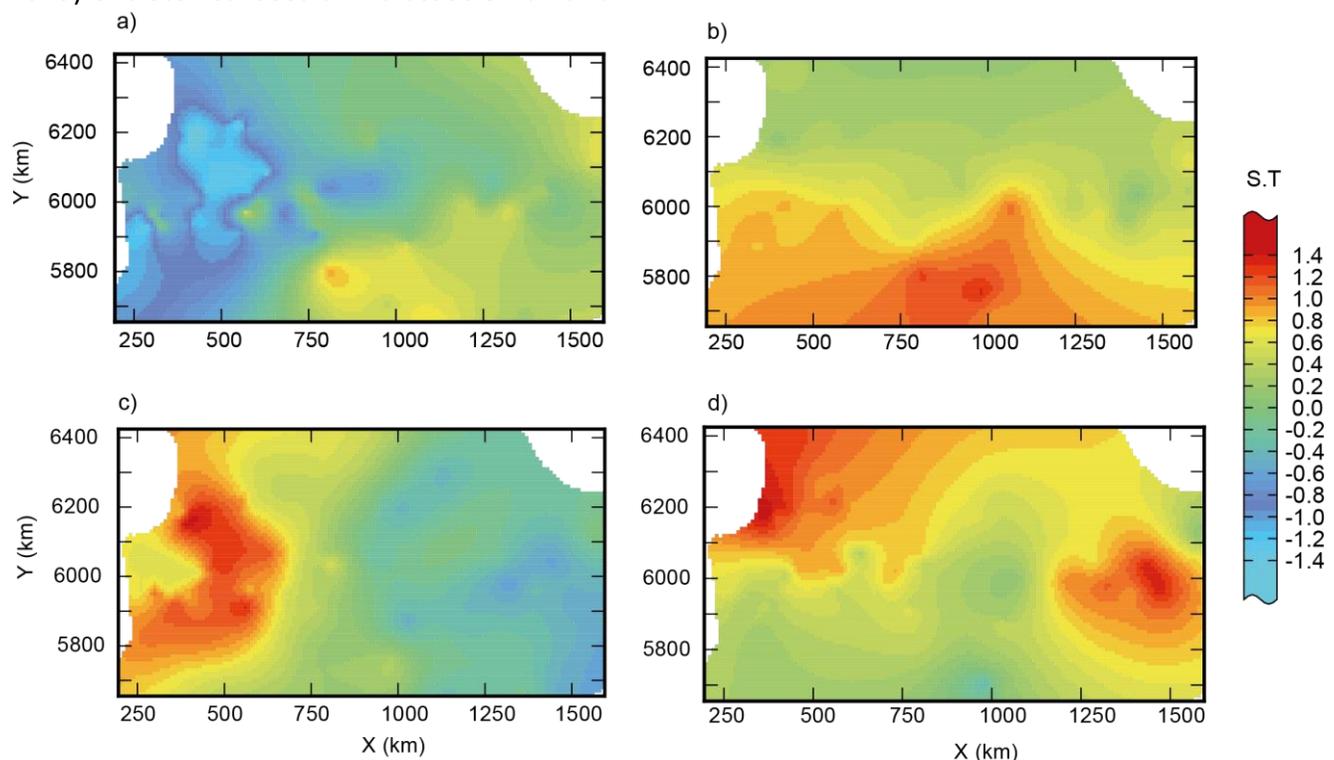
### Analyse spatiale – les relations cernes-climat varient selon les patrons climatiques du Nord québécois

#### Analyse spatiale – krigeage avec dérive externe

La forte affinité géographique observée entre les arbres et la variabilité spatiale des relations cernes-climat a permis d'élaborer un modèle spatial des relations entre la croissance et les variables climatiques les plus pertinentes. L'estimation spatiale des relations cernes-climat a été réalisée grâce à une méthode de krigeage avec dérive externe (KED). La principale caractéristique de cet algorithme géostatistique est de tenir compte non seulement du comportement spatial spécifique des relations cernes-climat mais aussi de celui d'autres variables ou co-facteurs, qui gouvernent leurs manifestations dans l'espace. Une analyse de corrélation et une analyse canonique de redondance (RDA; Nicault *et al.*, 2015) ont été réalisées afin d'associer la varia-

bilité observée des relations cernes-climat à des variables environnementales. Ainsi, pour la sensibilité des arbres aux températures de novembre et avril, c'est la hauteur de neige moyenne qui a été retenue ( $r = 0,67$  et  $r = 0,78$ ) et pour la sensibilité aux températures de décembre, janvier et juillet, c'est la latitude ( $r = 0,68$  et  $r = 0,58$ ). Ces variables qui expliquent le mieux la variabilité spatiale des fonctions de réponse ont été utilisées comme dérive externe dans la procédure de spatialisation.

Les résultats mettent en évidence deux gradients distincts dans la réponse des arbres au climat : un gradient sud-nord (Figure 4b, d), et un gradient ouest-est (Figure 4a, c). Cette affinité de type géographique montre que la discrimination entre les sites semble être plus déterminée par la variabilité climatique régionale que par les caractéristiques écologiques stationnelles. Il apparaît notamment que la variabilité spatiale des relations entre la crois-



**Figure 4.** Spatialisation de la sensibilité des arbres (ST) aux températures de novembre (a), aux températures de décembre-janvier, (b) aux températures d'avril (c) et aux températures de juillet (d). Le coefficient de sensibilité (ST) exprime le degré de signification des relations, les valeurs 1 et -1 expriment un degré de signification de 95%.

sance et les températures des mois de novembre et d'avril reposerait sur la quantité de neige reçue en hiver. En effet, les arbres recevant le moins de neige durant la saison froide apparaissent plus sensibles aux températures des mois de novembre et d'avril. Ces mois étant situés au début et à la fin de l'hiver, nous laissent penser que, plus que la neige en elle-même, ce sont les relations entre l'enneigement et le gel du sol qui sont ici exprimées. Le gradient nord-sud est plutôt exprimé par la latitude que par les températures, températures maximales, moyennes ou GDD5. Notre gradient sud-nord est assez restreint et contrarié par le relief au centre de l'aire d'étude, ce qui expliquerait probablement la difficulté de mettre en évidence le déterminisme des températures selon ce gradient.

### Conclusion

Les relations cernes-climat des épinettes noires, issues de 93 populations échantillonnées dans le Haut-boréal québécois, ont été analysées. Les résultats obtenus montrent que l'on observe :

1) une grande variabilité spatiale dans l'influence du climat sur la croissance radiale de l'épinette noire selon deux gradients distincts, un gradient nord-sud et un gradient est-ouest,

2) une influence prépondérante des températures, les précipitations ne jouant qu'un rôle mineur et souvent indirect,

3) un fort contrôle de la croissance par des conditions hydro-climatiques précédant la période de végétation et principalement reliées aux conditions hivernales et d'enneigement,

4) une influence des conditions climatiques concomitantes (températures de juillet) à la saison de croissance uniquement chez les populations les plus nordiques, et

5) la présence de régionalismes dans la réponse des populations d'épinette noire au climat, lesquels ont été illustrés à l'échelle du Québec–Labrador à l'aide de techniques de krigeage avec dérive.

Ainsi, pour le Haut-boréal québécois, avec la hausse des températures qui devrait se poursuivre au cours des prochaines décennies, la productivité des peuplements d'épinette noire et leur sensibilité au climat pourraient évoluer de façon différente selon les régions concernées. Notons ici que le rôle important des feux dans l'écologie et la croissance des épinettes n'a pas été pris en compte. Ils modulent probablement de façon non négligeable les relations cernes-climat, et joueront sûrement un rôle de plus en plus important dans les années à venir.

<https://doi.org/10.4095/328075>

### Références

- Carrer, M., Nola, P., Edouard, J.L., Motta, R. et Urbinati, C., 2007. Regional variability of climate–growth relationships in *Pinus cembra* high elevation forests in the Alps. *Journal of Ecology*, 95(5) : 1072–1083.
- Cleveland, W.S. et Devlin, S., 1988. Locally weighted regression: an approach to regression analysis by local fitting. *Journal of the American Statistical Association*, 83: 596–610. doi:10.1080/01621459.1988.10478639.
- Efron, B., 1979. Bootstrap methods: another look at the jackknife. *Annals of Statistics*, 7: 1–26. doi:10.1214/aos/1176344552.
- Everitt, B., 1974. *Cluster analysis*. Heinemann Educ. Books, London. 122 p.
- Girard, F., Payette, S. et Gagnon, R. 2011. Dendroecological analysis of black spruce in lichen woodlands within the closed-crown forest zone in eastern Canada. *Ecoscience*, 18: 279–294. doi:10.2980/18-3-3438.
- Gordon, A.D., 1999. *Classification*. Second Edition. Chapman and Hall / CRC, London. 272 p.
- Guiot, J. et Nicault, A., 2010. Méthodes de dendroclimatologie à l'échelle continentale : fonctions de réponse et fonctions de transfert. In Payette, S. et L. Filion (éd.). *La dendroécologie : Principes, méthodes et applications*. Presses de l'Université Laval, Québec. pp. 229–254.

- Hofgaard, A., Tardif, J et Bergeron, Y. 1999. Dendroclimatic response of *Picea mariana* and *Pinus banksiana* along a latitudinal gradient in the eastern Canadian boreal forest. *Canadian Journal of Forest Research*, 29: 1333–1346.
- Huang, J., Tardif, J., Bergeron, Y., Denneler, B., Berninger, F. et Girardin, M.P., 2010. Radial growth response of four dominant boreal tree species to climate along a latitudinal gradient in the eastern Canadian boreal forest. *Global Change Biology*, 16(2) : 711-731.
- Mäkinen, H., Nojd, P., Kahle, H.P., Neumann, U., Tveite, B., Mielikainen, K., Rohle, H. et Spiecker, H., 2002. Radial growth variation of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) across latitudinal and altitudinal gradients in central and northern Europe. *Forest Ecology and Management*, 171: 243–259. doi:10.1016/S0378-1127(01)00786-1.
- Miyamoto, Y., Griesbauer, H.P. et Green, D.S., 2010. Growth responses of three coexisting conifer species to climate across wide geographic and climate ranges in Yukon and British Columbia. *Forest Ecology and Management*, 259(3): 514-523.
- Nicault, A., Y. Bégin et Guiot, J., 2010. La standardisation des séries dendrochronologiques. In Payette, S. et Filion, L. (éd.). *La dendroécologie : Principes, méthodes et applications*. Presses de l'Université Laval, Québec, pp. 199-228.
- Nicault, A., Boucher, É., Tapsoba, D., Arseneault, D., Bégin, C., Berninger, F., DesGranges, J.-L., Guiot, J., Marion, J., Wicha, S. et Bégin, Y., 2015. Spatial analysis of black spruce (*Picea mariana* [Mill] B.S.P.) radial growth response to climate in northern Québec-Labrador Peninsula, Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, 45: 343–352 dx.doi.org/10.1139/cjfr-2014-0080
- Tapsoba, D., Fortin, V., Anctil, F. et Haché, M., 2005. Apport de la technique du krigeage avec dérive externe pour une cartographie raisonnée de l'équivalent en eau de la neige : Application aux bassins de la rivière Gatineau. *Revue canadienne de génie civil*, 32: 289-297.
- Trindade, M., Bell, T. et Laroque, C. 2011a. Changing climatic sensitivities of two spruce species across a moisture gradient in Northeastern Canada. *Dendrochronologia*, 29: 25–30
- Trindade, M., Bell, T., Laroque, C., Jacobs, J.D. et Hermannutz, L., 2011b. Dendroclimatic response of a coastal alpine treeline ecotone: a multispecies perspective from Labrador. *Canadian Journal of Forest Research*, 41(3): 469–478. doi:10.1139/X10-192.
- Spittlehouse, D.L., 2005. Integrating climate change adaptation into forest management. *The Forestry Chronicle*, 81(5) : 691-695.
- Wicha, S., Desgranges, J.-L., Bégin, Y., Labarre, T. et Nicault, A., 2010. Analyse dendroécologique de peuplements « hotes » d'épinette noire dans l'aire de nidification d'oiseaux boréaux au Québec - Année 2. Rapport d'un projet conjoint INRS – Environnement Canada. 30 p.

# 10. Des arbres virtuels pour reconstituer les variations climatiques : une approche basée sur les processus écophysiologicals

Étienne Boucher, Joël Guiot, Frank Berninger et Fabio Gennaretti

## Résumé

La dendrochronologie traverse actuellement un important changement de paradigme. Historiquement définie comme une science empirique fondée sur l'étude des relations empiriques et statistiques entre le climat et les paramètres de la croissance, de nombreuses études se penchent désormais sur la modélisation mécaniste / déterministe de ces relations. Cette nouvelle approche mise entre autres sur le développement et l'amélioration de modèles écophysiologicals (aussi appelés « arbres virtuels »). Ces arbres virtuels sont composés d'un ensemble de règles et d'équations permettant de simuler de manière dynamique la réponse des arbres aux variations de l'hydro-climat. Cette nouvelle approche offre des avantages considérables par rapport à une approche plus classique : elle permet notamment d'accroître la capacité de prédiction de la réponse écophysiological dans un contexte de changement climatique et de produire des reconstitutions hydro-climatiques cohérentes avec les processus régissant la croissance. Le présent chapitre vise à démontrer que ce changement de paradigme pourra être bénéfique pour l'étude des relations cerne-climat au Québec-Labrador.

## Abstract

Tree-ring science is experiencing an important paradigm shift. Historically defined as an empirical science based on the study of statistical relationships between climate and growth, studies now choose to focus on the mechanistic / deterministic modelling of such relationships. This new approach consists in

developing and improving ecophysiological models (also referred to as “virtual trees”). Such virtual trees form an ensemble of rules and equations that allow for the dynamical simulation of tree response to hydro-climate variations. This new approach offers several advantages for future tree ring research: it should improve our capacity to predict tree response in the face of climate change and should also help producing reconstructions that are in line with processes controlling growth. This chapter aims at demonstrating that this paradigm change can be beneficial to tree ring studies conducted in the Quebec-Labrador region.

## Introduction

Dans le cadre du projet ARCHIVES, plusieurs reconstitutions climatiques ont été réalisées à partir d'indicateurs dendrochronologiques tels que la largeur des cernes, le rapport des isotopes stables de l'oxygène et du carbone dans la cellulose du bois des séries de cernes et la densité du bois obtenue par radiodensitométrie aux rayons X. Ces reconstitutions sont basées sur l'identification d'une relation statistique entre les propriétés de la croissance et le climat (fonction de réponse), une relation qui, lorsqu'inversée (fonction de transfert), permet de reconstituer le climat sur des périodes passées allant au-delà des données instrumentales. Or, le projet ARCHIVES aura aussi montré que la réponse au climat de l'épinette noire est complexe et que plusieurs paramètres interagissent sur la mise en place du cerne au cours d'une année (Nicault *et al.*, 2014). De plus, la nature de la réponse au climat varie spatialement. Ainsi, l'expression

« paléothermomètres » employée par Libby et Pandolfi (1976) pour caractériser la relation entre la température et la croissance des arbres n'est pas tout à fait exacte (ou du moins quelque peu réductrice) pour décrire la relation cernes-climat chez l'épinette noire.

Dans cette perspective, il importe de mieux comprendre les processus par lesquels le climat influence la croissance des épinettes noires à l'échelle annuelle et sub-annuelle. Parmi ces mécanismes, on retrouve notamment (mais non exclusivement) la photosynthèse, la conductance stomatale, l'absorption racinaire, l'évapotranspiration, le fractionnement isotopique et l'allocation des ressources à l'intérieur de l'arbre. Une caractérisation moins empirique de ces processus permettrait, entre autres, d'améliorer la fiabilité des reconstitutions climatiques et aussi de renforcer notre capacité à prévoir l'effet des changements climatiques sur la réponse des arbres en forêt boréale. Il est essentiel, si l'on souhaite atteindre ces objectifs, de chercher à quantifier et à modéliser ces processus fondamentaux, de façon à pouvoir intégrer ces connaissances dans le processus de reconstitution des climats du passé.

Dans ce chapitre, nous nous intéresserons aux données ainsi qu'aux techniques qui permettent de décrire les relations cernes-climat d'un point de vue déterministe, c'est-à-dire à partir d'une étude approfondie des mécanismes qui gouvernent la croissance. Nous porterons une attention particulière aux modèles écophysologiques, qui lient la croissance aux variables abiotiques (climat, sol, CO<sub>2</sub>). Afin d'être utilisable en dendroclimatologie, on

s'attend à ce que la croissance simulée à partir de ces modèles ressemble à la croissance observée des arbres. Enfin, une fois que les modèles reproduisent bien les observations, nous verrons comment les utiliser en mode inverse pour produire des reconstitutions climatiques respectant le fonctionnement écophysologique des arbres.

### Modélisation des échanges gazeux à l'interface canopée-atmosphère

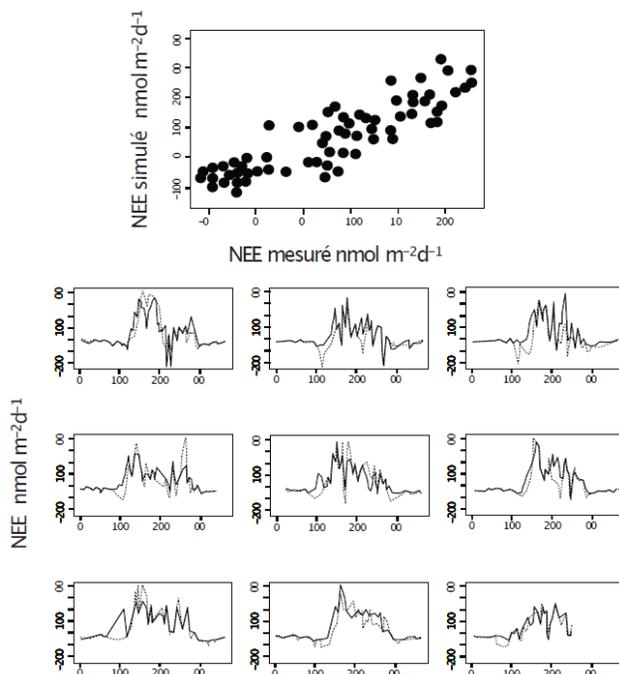
Les travaux menés dans le cadre d'ARCHIVES ont contribué à affiner la connaissance des mécanismes écophysologiques par lesquels le climat influence la croissance de l'épinette noire. Toutes ces connaissances visent éventuellement à être intégrées dans les modèles écophysologiques décrits plus loin dans ce chapitre et qui pourront être utilisés soit pour prévoir la croissance future, soit pour produire des reconstitutions à partir de techniques de modélisation inverse.

En ce sens, les études dirigées par Frank Berninger ont permis de décrire et de quantifier les liens écophysologiques qui existent entre le climat et la production photosynthétique des épinettes noires. Dans le contexte du projet ARCHIVES, une description / modélisation des mécanismes contrôlant la photosynthèse fut fondamentale, entre autres parce que la photosynthèse est étroitement liée, d'un point de vue écophysologique, à la croissance des arbres, mais également à l'évapotranspiration de l'eau par la plante. L'évapotranspiration étant une partie significative du bilan hydrologique des bassins versant, le projet ARCHIVES lui a donc accordé une importance de premier plan.

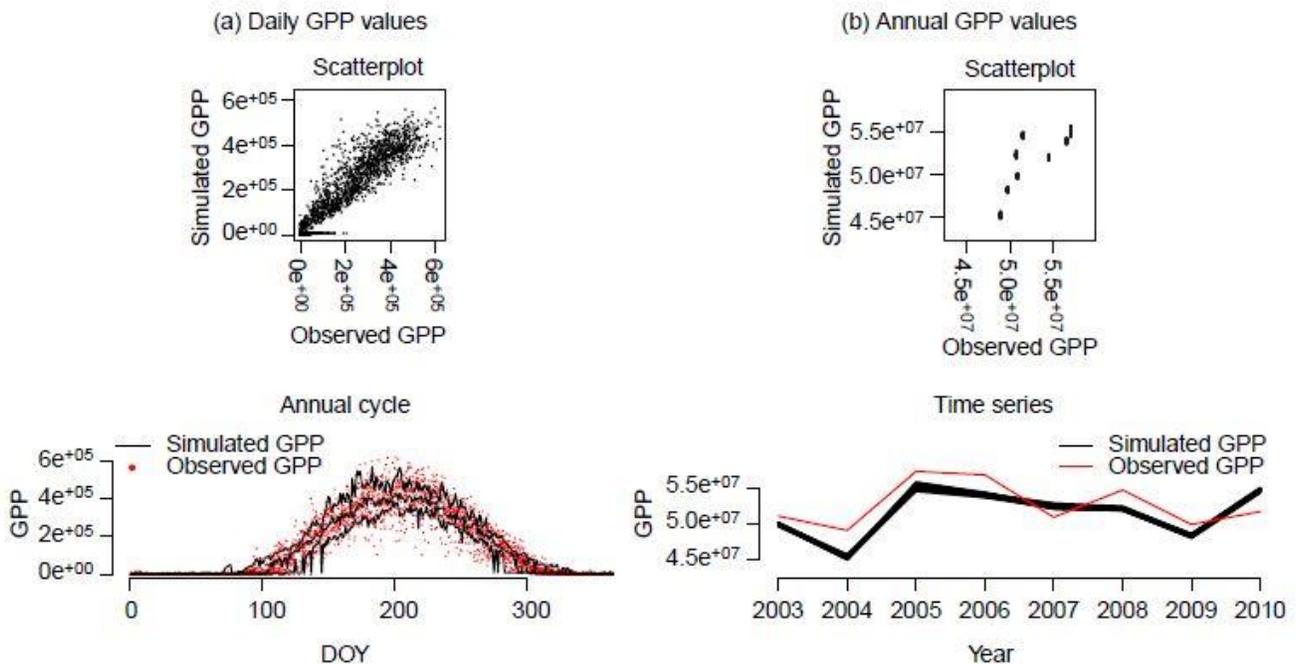
À partir des mesures de covariance de la turbulence (*eddy covariance*, station NOBS sur la côte Ouest de la Baie James; Dunn *et al.*, 2007) permettant de quantifier les échanges de CO<sub>2</sub> entre la végétation et l'atmosphère, la production photosynthétique a pu être modélisée pour l'épinette noire par Frank Berninger. On constate que, pour la période 1960-2011 (Figure 1a), les échanges gazeux simulés (NEE : *Net Ecosystem Exchange*) sont en accord avec les valeurs de NEE mesurées à la station NOBS. Cette cohérence entre les simulations et les mesures est aussi visible à l'échelle de temps journalière (Figure 1b), ce qui indique que la production photosynthétique et les flux de CO<sub>2</sub> associés sont adéquatement modélisés pour l'épinette noire. Les travaux de Gennaretti *et al.* (2017) ont quant à eux montré que la production primaire nette (GPP) d'épinettes noires matures (site *eddy-covariance* EOBS à la Baie James; Bergeron *et al.*, 2007) est bien simulée (Figure 2) à partir d'équations écophysio-

logiques adaptées aux milieux froids.

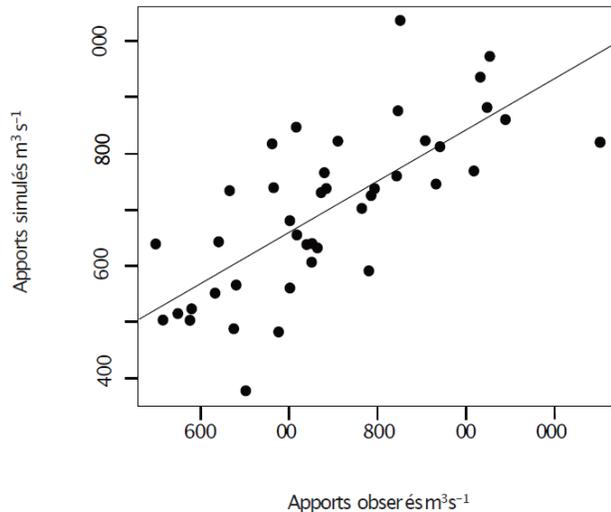
Si la production photosynthétique est bien modélisée, l'évapotranspiration l'est aussi, en raison de la relation évidente qui existe entre les deux processus sur le plan physiologique. Par contre, il n'existe pas, pour l'évapotranspiration, d'enregistrements disponibles sur de vastes échelles de temps et d'espace qui pourraient permettre de valider les simulations. Il existe toutefois, à l'échelle du Moyen Nord québécois, des enregistrements de l'écoulement pour les grands bassins versants du complexe La Grande. Sachant que l'écoulement équivaut à la différence entre les précipitations (observées) et l'évapotranspiration (simulée), il devient alors possible d'évaluer les capacités d'un modèle écophysologique à simuler les différentes composantes du bilan hydrologique. Par exemple, les travaux de Frank Berninger montrent que l'évapotranspiration dans le bassin versant de la rivière Caniapiscou peut être estimée à partir d'une simulation de la production photosynthétique des épinettes noires de la même région. Au réservoir Caniapiscou, la comparaison des apports observés et des apports simulés (considérant que apports simulés = précipitations observées – évapotranspiration simulée) produit une corrélation relativement forte ( $r = 0,68$ , pente près de 1; Figure 3). Force est de conclure que la représentation de l'évapotranspiration, par le biais d'une modélisation de la photosynthèse basée sur les processus offre d'intéressantes perspectives pour la reconstitution hydrologique.



**Figure 1.** Relation entre les échanges écosystémiques nets (NEE, *Net Ecosystem Exchanges*) mesurés à la station NOBS (Baie James Ouest) et les simulations à l'échelle inter-annuelle (a) et intra-annuelle (b).



**Figure 2.** Simulation de la production primaire grossière (GPP, Gross primary production) à la station EOBS (Baie James Ouest) et les simulations à l'échelle inter-annuelle (a) et intra-annuelle (b). Tiré de Gennaretti *et al.* (2017).



**Figure 3.** Relation entre les apports mesurés (1960-2011) et simulés à l'aide d'une modélisation de l'évapotranspiration basée sur les processus écophysologiques. Les apports simulés ont été calculés de la manière suivante : apports simulés = précipitations observées – évapotranspiration simulée.

### La modélisation écophysologique de la croissance de l'épinette noire

Les modèles écophysologiques sont constitués d'une série d'équations qui permettent de calculer, à un pas de temps donné, la croissance d'un arbre. Ces modèles utilisent, en entrée, des variables simples telles que la température, les précipitations journalières, ainsi que la concentration de CO<sub>2</sub> atmosphérique et la capacité hydrique maximale du sol. À la sortie des modèles, on retrouve des variables que l'on peut comparer directement aux mesures communément utilisées en dendrochronologie : largeur des cernes, rapports isotopiques (carbone et oxygène de la cellulose). Il existe plusieurs modèles écophysologiques : Vaganov-Shashkin (2008), MAIDENiso (Misson, 2004 ; Danis *et al.*, 2012), standLEAP (Landsberg et Waring, 1997), chacun ayant sa complexité.

Par exemple, le modèle MAIDENiso (Figure 4) utilise en entrée trois variables météorologiques : la température maximale (°C) et

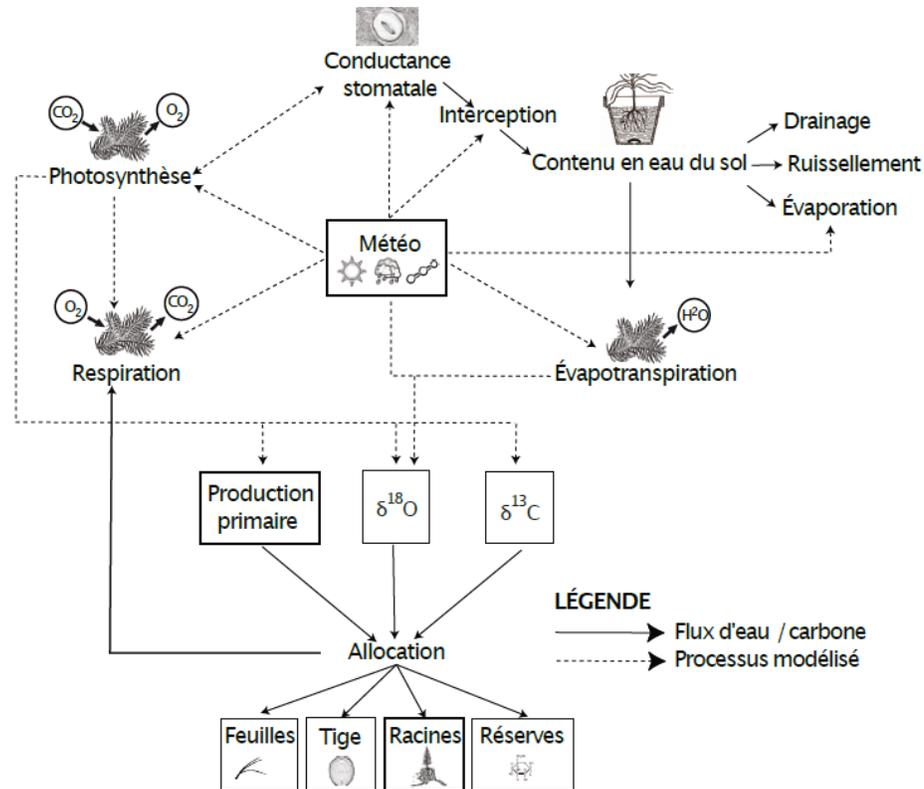


Figure 4. Schéma des flux et des processus modélisés par MAIDENiso.

minimale ( $^{\circ}\text{C}$ ), ainsi que les précipitations journalières (cm). De plus, la concentration en  $\text{CO}_2$  atmosphérique (ppm) ainsi que son contenu en  $\delta^{13}\text{C}$  (‰) doivent être ajoutés afin de modéliser correctement les échanges gazeux entre la feuille et l'atmosphère, ainsi que l'appauvrissement en  $\delta^{13}\text{C}$  du  $\text{CO}_2$  atmosphérique en raison de la combustion par l'Homme des carburants fossiles. En principe, ces deux dernières variables devraient être mesurées localement, mais en l'absence de données, elles peuvent être trouvées dans la littérature (*p. ex.* McCarroll et Loader, 2004). Ces variables pilotent le modèle MAIDENiso, où les équations de la photosynthèse (Farquhar *et al.*, 1980), de la conductance stomatale (Leuning, 1995), de l'interception des précipitations (Gash *et al.*, 1995) sont résolues au pas de temps journalier. À chaque pas temporel, les différents flux d'eau et de carbone se dispersent à l'intérieur de la plante virtuelle pour ultimement être allouées à quatre grands compartiments : les feuilles, les racines, la tige

et les réserves (stockage). Les deux compartiments qui intéressent la dendrochronologie sont la tige et les réserves. Le premier peut être directement comparé aux mesures faites dans les cernes de croissance. Le second permet de modéliser la dépendance qui existe entre les années successives, car les réserves peuvent être réutilisées lors des années subséquentes pour alimenter la levée de la croissance. Pour simuler correctement ces processus, une vingtaine de paramètres doivent être ajustés pour estimer aussi bien que possible les différents processus. Ces paramètres sont trouvés soit dans la littérature, soit par des techniques d'optimisation de manière à ajuster au mieux les simulations aux observations disponibles. Danis *et al.* (2012) ont appliqué cette démarche aux données dendrochronologiques et dendroisotopiques de la forêt de chênes de Fontainebleau en France.

Nous avons testé la capacité du modèle MAIDENiso à reproduire les patrons de crois-

sance de l'épinette noire pour deux sites (POOL et DA1) situés au Nord du Québec. Pour chaque site, nous disposons de trois chronologies : largeur des cernes, rapports isotopiques du carbone ( $\delta^{13}\text{C}$ ) et ceux de l'oxygène ( $\delta^{18}\text{O}$ ) de la cellulose du bois. La combinaison optimale de paramètres d'ajustement a été trouvée par optimisation (algorithme de Metropolis Hastings) de manière à simuler la croissance de l'épinette noire telle qu'observée dans chacun des deux sites. Des données météorologiques locales et journalières (température maximum et minimum, précipitations) sont nécessaires pour piloter le modèle. Les données météorologiques ont été fournies non pas uniquement aux sites, mais sur chacun des 5000 points de grille situés 50 et 55°N, et 78 et 70°W. Ce jeu de données à grande extension spatiale va nous permettre de simuler des arbres virtuels sur 5000 points de grille et vérifier ainsi à quel point les paramètres dendrochronologiques d'intérêt varient spatialement. On s'attend à ce que les meilleures corrélations entre les simulations et les observations soient obtenues pour l'emplacement réel des sites d'échantillonnage.

L'analyse des résultats montre que l'étalonnage préliminaire du modèle MAIDENiso permet de simuler des chronologies de  $\delta^{13}\text{C}$  et de  $\delta^{18}\text{O}$  qui sont bien corrélées aux observations faites sur l'épinette noire (Figure 5). Pour ce qui est de la simulation du  $\delta^{13}\text{C}$ , on observe des corrélations maximales de  $r = 0,55$  ( $p \leq 0,05$ ) au site DA1 et  $r = 0,49$  au site POOL. Les corrélations sont encore meilleures pour  $\delta^{18}\text{O}$  :  $r = 0,53$  ( $p \leq 0,05$ ) et  $r = 0,59$  pour les sites DA1 et POOL, respectivement. Sur le plan spatial, pour les deux rapports isotopiques, peu importe l'endroit dans le nord du Québec où les arbres virtuels sont simulés, il y a toujours une corrélation assez forte avec les observations. Cela indique que les rapports isotopiques sont de très bons indicateurs des conditions climatiques régionales et que ces indicateurs capturent l'essentiel du signal climatique à l'échelle

régionale. Quant à la largeur des cernes, les corrélations entre simulations et observations sont beaucoup plus faibles. Au site DA1, la corrélation maximale est de  $r = 0,4$  ( $p < 0,05$ ) entre les simulations et les observations, tandis que pour le site POOL, les corrélations sont non significatives. Sur le plan spatial, on note qu'il existe, à l'échelle du Moyen Nord québécois, beaucoup plus de variabilité dans la réponse au climat. Cela suggère que cet indicateur est plus complexe et pourrait être plus sensible aux conditions de site que les indicateurs isotopiques. En revanche, les processus par lesquels le fractionnement isotopique s'effectue au sein de l'arbre sont mieux connus (et plus simples) que les processus qui engendrent les variations dans la largeur des cernes, ce qui les rend plus faciles à modéliser. Il n'est donc pas surprenant d'obtenir de meilleurs résultats pour la simulation des rapports isotopiques que pour la largeur des cernes.

Il s'agit d'un travail préliminaire de modélisation basé uniquement sur la comparaison entre des simulations et des observations mesurées au pas de temps annuel. Pour bien comprendre les mécanismes en cause, une analyse plus poussée des divers processus simulés par MAIDENiso doit être effectuée à partir de mesures décrivant ces processus *in situ* et à un pas de temps infra annuel (journalier, hebdomadaire). L'analyse des fonctions de réponse menée dans le projet ARCHIVES a montré que l'épinette noire réagit de manière complexe à diverses variables climatiques et qu'il existe d'importantes disparités régionales dans la réponse au climat. Les températures d'hiver jouent manifestement un rôle important dans la xylogénèse et ces processus ne sont pas pris en compte dans le modèle. Afin d'améliorer la modélisation de la croissance de l'épinette noire, il faut obtenir une meilleure connaissance des divers processus fondamentaux qui influencent, à l'échelle infra-annuelle, la mise en place du cerne de croissance.

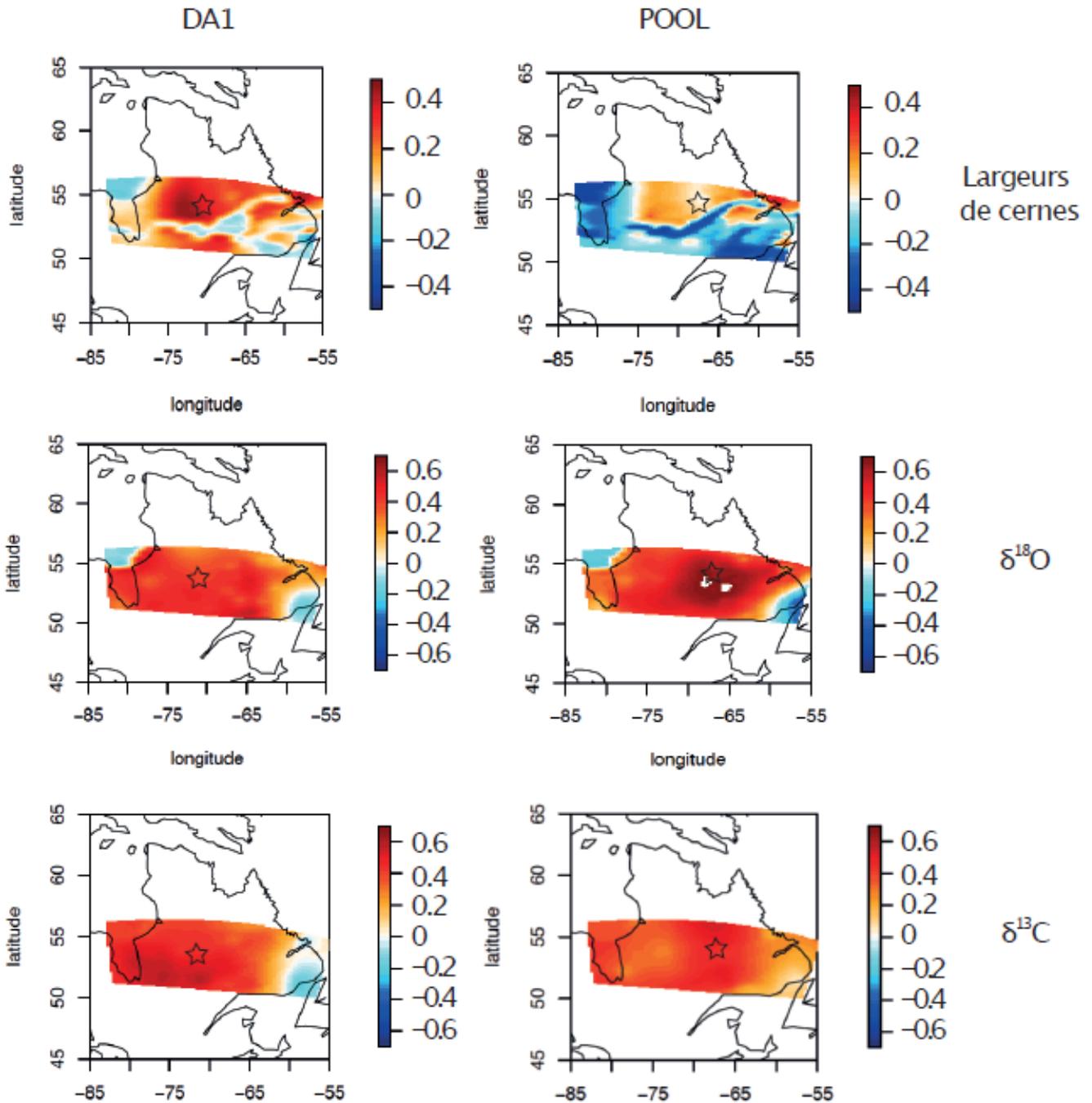


Figure 5. Carte des corrélations (Pearson) entre les différents indicateurs dendrochronologiques (largeur de cerne, rapports isotopiques du carbone et de l'oxygène) mesurés en deux sites du projet ARCHIVES (DA1 et POOL, marqués par des étoiles), et les simulations de MAIDENiso pour chaque point de grille. Les corrélations ont été calculées sur la période 1960-2010. Tous les points de grilles sont équivalents sur le plan des conditions de site. Seule la météorologie change. On cherche par conséquent à ce que les meilleures corrélations (rouge foncé) se trouvent à proximité des sites étudiés.

### L'inversion des modèles écophysiologicals : un nouvel outil de reconstitution

À moyen terme, il est envisageable de penser que la connaissance des processus qui gouvernent la croissance de l'épinette noire sera suffisante pour que la modélisation déterministe puisse éclairer les reconstitutions climatiques menées au Moyen Nord québécois. En fait, les modèles déterministes permettent d'accéder à un niveau de précision et d'intégration des connaissances des processus qui est difficile d'atteindre à partir des approches statistiques conventionnelles. Mais il subsiste une difficulté : comment intégrer les modèles dans la reconstitution climatique?

Des avancées importantes à ce sujet ont été réalisées par Boucher *et al.* (2014). Dans ce travail, il est proposé d'utiliser en mode inverse les modèles écophysiologicals de manière à décoder l'information météorologique qui pourrait être à l'origine des chronologies de cernes que l'on observe sur de réels échantillons. L'inversion d'un modèle écophysiological comme MAIDENiso ne signifie pas qu'il faille solutionner de façon inverse les équations des modèles. Il s'agit plutôt d'identifier la meilleure combinaison de variables d'entrée (*c.-à-d.* météorologique) que l'on doit fournir au modèle pour que ce dernier simule des cernes d'arbres dont les propriétés (largeur, rapports isotopiques) ressemblent aux observations. Sans entrer dans les détails, la procédure d'inversion mise de l'avant par Boucher *et al.* (2014) est basée sur l'algorithme de Metropolis-Hastings et procède en cinq étapes (Figure 6):

1) *Identification d'une année climatique de référence.* On trouve, à partir des séries climatiques disponibles, une année que l'on qualifie de moyenne (*c.-à-d.* ni trop chaude, ni trop froide; ni trop sèche, ni trop humide). Cette année servira de référence pour l'inversion.

2) *Perturbation de l'année de référence.* On applique des coefficients perturbateurs (*c.-*

*à-d.* des deltas) à l'année de référence de façon à modifier cette dernière pour générer un scénario météorologique « alternatif ». Des deltas additifs sont appliqués aux températures; des deltas multiplicatifs sont appliqués aux précipitations. Le scénario météorologique alternatif est donc un état « perturbé » de l'année de référence

3) *Simulation mécaniste et comparaison avec les observations.* A partir du scénario météorologique alternatif, on produit une simulation des variables dendroécologiques d'intérêt et on mesure l'écart entre les simulations et les observations.

4) *Marche aléatoire Metropolis Hastings.* Pour chaque année pour laquelle on possède une information sur le cerne, on utilise

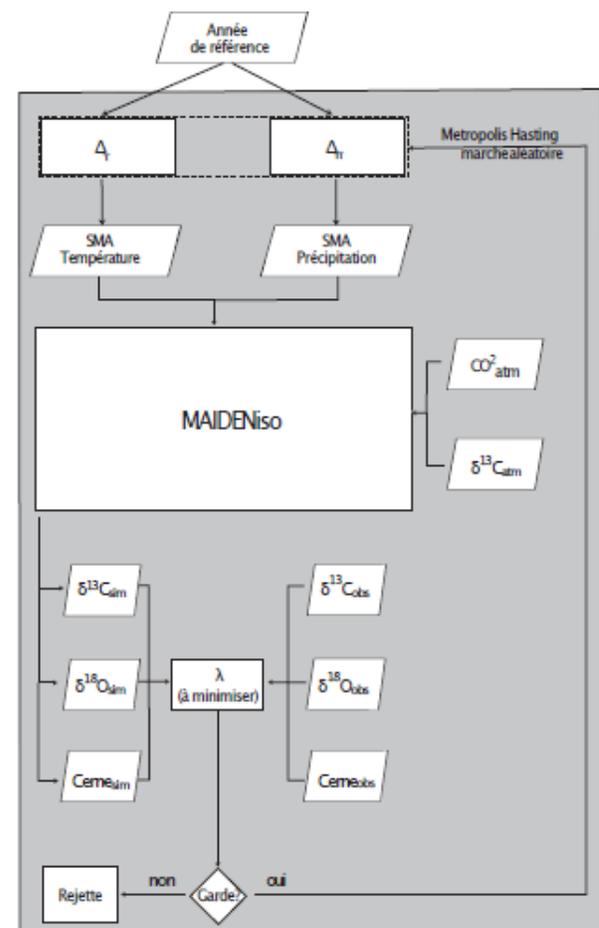


Figure 6. Organigramme de l'algorithme d'inversion de MAIDENiso (tiré de Boucher *et al.* (2011)).

l'algorithme Metropolis Hastings afin d'inférer des valeurs possibles pour chaque delta. L'algorithme Metropolis Hastings modifie itérativement et un très grand nombre de fois chaque delta, en puisant dans une distribution de probabilité *a priori* représentant l'ensemble des cas possibles, jusqu'à ce qu'il converge, par marche aléatoire, vers une distribution *a posteriori* stable et correspondant aux « valeurs optimales ».

5) *Reconstitution*. Pour chaque année que l'on souhaite reconstituer, on ajoute les perturbations trouvées en 4 à l'année de référence pour retrouver le climat qui a généré les cernes. Cette reconstitution est obtenue avec une distribution de probabilité (dite *a posteriori*) et permet donc de quantifier l'incertitude autour des valeurs reconstituées.

Dans le cadre du projet ARCHIVES, il n'a

pas été possible de tester cet algorithme sur des chronologies d'épinette noire, en raison du caractère embryonnaire des recherches menées en modélisation déterministe pour cette espèce. La procédure a plutôt été développée dans un contexte où la connaissance des processus est meilleure et surtout appuyée sur des données plus riches et diversifiées (flux de sève, photosynthèse, eau dans le sol): le cas de la forêt de chêne sessile à Fontainebleau, au sud de Paris. Dans ce contexte français, la procédure d'inversion a permis de retrouver avec succès les variations climatiques d'origine et d'allonger l'historique au-delà des observations (Figure 7). Encore plus important pour la dendroclimatologie, la reconstitution des précipitations et des températures se fait de manière simultanée dans une approche inverse, car les effets respectifs de ces deux variables climatiques sont pris en compte directement dans le

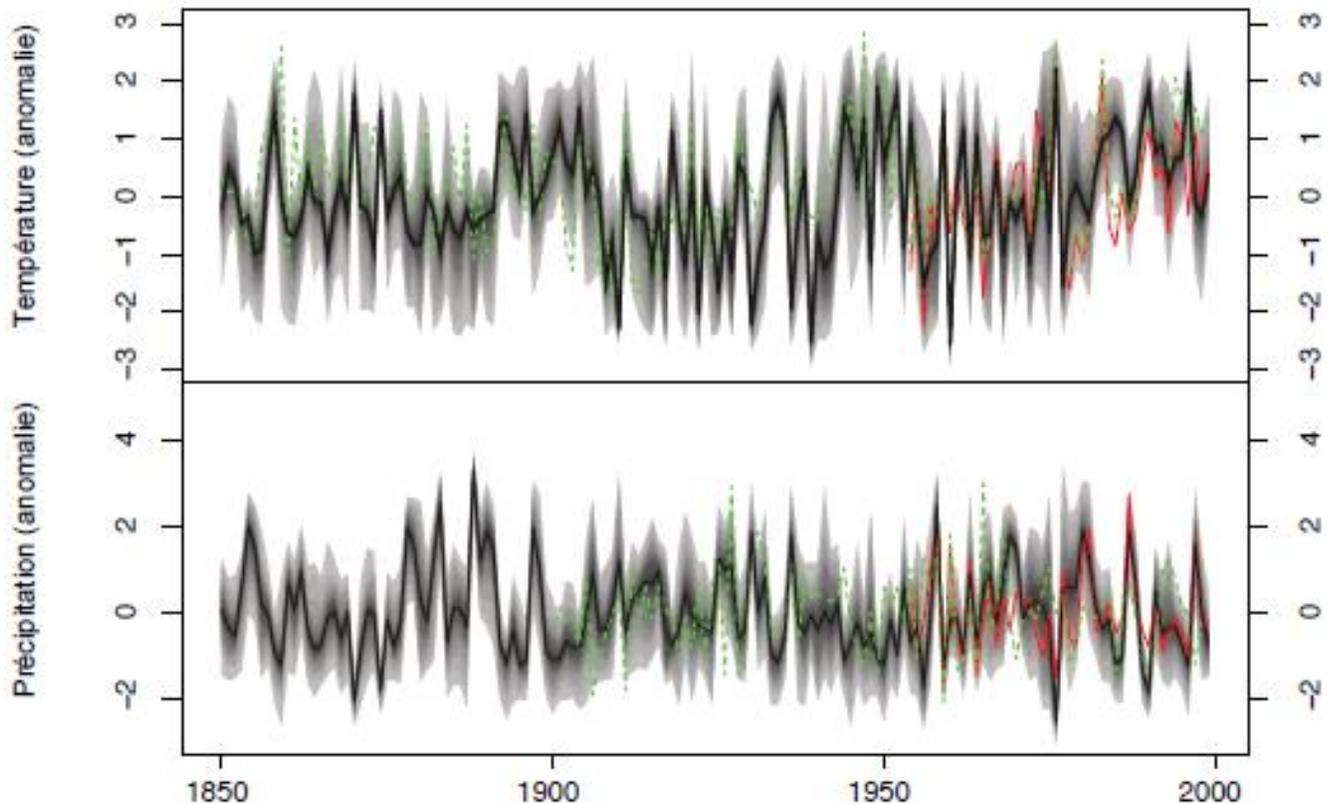


Figure 7. Reconstitution des anomalies de températures et de précipitation estivales dans la forêt de Fontainebleau (France) à partir de l'inversion de MAIDENiso jusqu'en 1850. Comparaison entre les reconstitutions réalisées par inversion (courbe noire), les observations (1960-1999, courbe rouge) et les données du CRU (Climate Research Unit, en vert pointillé; Tiré de Boucher *et al.* (2011)).

modèle. Le modèle prend en considération non seulement des conditions météorologiques mais également les changements dans la concentration en CO<sub>2</sub> atmosphérique. On sait que ce dernier a pu avoir un effet fertilisant sur la croissance des arbres, et, si tel est le cas, les relations cerne-climat peuvent en avoir été affectées au cours du temps. À Fontainebleau, l'approche par inversion a montré qu'une augmentation de la concentration en CO<sub>2</sub> de 280 à 400 ppm telle qu'observée au cours des derniers 150 ans a augmenté significativement l'efficacité des arbres à utiliser la ressource eau (*water use efficiency*) pour la croissance. Par conséquent, l'augmentation de l'efficacité hydrique des arbres due à une fertilisation par le CO<sub>2</sub> est un biais qui est bien présent, mais qui est rarement pris en compte dans les reconstitutions climatiques.

### Conclusion

Les modèles écophysologiques peuvent être utilisés, en mode direct, pour simuler la croissance future des peuplements forestiers, ou pour produire, en mode inverse, des reconstitutions climatiques. Ces modèles permettent d'intégrer et de représenter, sous forme de règles et d'équations mécanistes quantitatives, les principaux processus écophysologiques qui sont associés à la croissance des arbres (*p. ex.* la photosynthèse, l'évapotranspiration, l'allocation des ressources, etc.). En ce sens ils sont très prometteurs parce qu'ils rendent possible une modélisation non-linéaire des relations cerne-climat et l'intégration de ces connaissances dans l'optique de l'étude des climats passés. Par conséquent, les modèles écophysologiques sont idéaux pour l'étude des relations complexes qui existent entre le climat et les différents paramètres de la croissance, lesquels peuvent être difficilement réduits à de simples modèles linéaires et sont particulièrement bien adaptés pour l'étude des populations végétales dont la croissance résulte d'une combinaison

de plusieurs facteurs (*p. ex.* précipitations, températures estivales, hivernales). Les modèles écophysologiques sont de nouveaux outils mis à la disposition des scientifiques pour l'analyse des relations cerne-climat, et leur amélioration est constante. Toute amélioration de la modélisation de la croissance se traduit nécessairement par le renforcement de la qualité et de la robustesse des reconstitutions climatiques. Par contre, pour améliorer les modèles écophysologiques et les adapter à différentes espèces, il importe de recueillir davantage de données de terrain, en particulier des données qui permettent de faire le suivi de la croissance à très haute résolution temporelle, (*p. ex.* journalière, hebdomadaire) car au fond, c'est à cette échelle que l'étude des processus liant le climat et la croissance est la plus directe.

<https://doi.org/10.4095/328076>

### Références

- Bergeron, O., Margolis, H.A., Black, T.A., Coursolle, C., Dunn, A.L., Barr, A.G. et Wofsy, S.C., 2007. Comparison of carbon dioxide fluxes over three boreal black spruce forests in Canada. *Global Change Biology*, 13: 89-107.
- Boucher, É., Guiot, J., Hatté, C. Daux, V., Danis, P.A. et Dussouillez, P., 2014. An inverse modeling approach for tree-ring-based climate reconstructions under changing atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations. *Biogeosciences* 11: 3245-3258.
- Danis, P.-A., Hatté, C., Misson, L. et Guiot, J., 2012. MAIDENiso: a multiproxy biophysical model of tree-ring width and oxygen and carbon isotopes. *Canadian Journal of Forest Research*, 42: 1697-1713
- Dunn, A.L., Barford, C.C., Wofsy, S.C., Goulden, M.L., Daube et B.C., 2007. A long-term record of carbon exchange in a boreal black spruce forest: means, responses to interannual variability, and decadal trends. *Global Change Biology*, 13: 577-590.
- Farquhar, G.D., von Caemmerer, S. et Berry, J.A., 1980. A biochemical model of photosynthetic CO<sub>2</sub> assimilation in leaves of C<sub>3</sub> species. *Planta*, 149: 78-90.
- Gash, J.H.C., Lloyd, C.R. et Lachaud, G., 1995. Estimating sparse forest rainfall interception with an analytical model. *Journal of Hydrology*, 70: 79-86.

- Gennaretti, F., Gea-Izquierdo, G., Boucher, É., Berninger, F., Arseneault, D. et Guiot, J., 2017. Ecophysiological modeling of photosynthesis and carbon allocation to the tree stem in the boreal forest : *Biogeosciences*, 14: 4851-4866
- Landsberg, J.J. et Waring, R.H., 1997. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation use efficiency, carbon balance and partitioning. *Forest Ecology and Management*, 95: 209–228.
- Leuning, R., 1995. A critical appraisal of a combined stomatal photosynthesis model for C3 plants. *Plant Cell & Environment*, 18: 339–355.
- Libby, L.M. et Pandolfi, L.J., 1976. Isotopic tree thermometers: Correlation with radiocarbon, *Journal of Geophysical Research*, 81: 6377-6381.
- McCarroll, D. et Loader, N.J., 2004. Stable isotopes in tree rings, *Quaternary Science Reviews*, 23: 771–801,
- Misson, L., 2004. MAIDEN: a model for analyzing ecosystem processes in dendroecology, *Canadian Journal Forest Research*, 34: 874–887.
- Nicault, A., Guiot, J., Bégin, Y., Boucher, É., Berninger, F., Bégin, C., Arseneault, D., Tapsoba, D., Marion, J., DesGranges, J.-L. et Wicha, S., 2014. Spatial analysis of black spruce's (*Picea mariana*) radial growth response to climate in northern Québec, Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, 45: 343-352.
- Vaganov, E.A., Hughes, M.K. et Shashkin, A.V., 2006. Introduction and Factors Influencing the Seasonal Growth of Trees. In: *Growth Dynamics of Conifer Tree Rings. Ecological Studies (Analysis and Synthesis)*, vol 183. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/3-540-31298-6\\_1](https://doi.org/10.1007/3-540-31298-6_1)



**Pessière à lichens ouverte dans le secteur du lac Jourdin.**

**Photo de A. Nicault**

# 11. Développement d'un modèle hiérarchique Bayésien appliqué aux épaisseurs de cernes

Jean-Jacques Boreux

## Résumé

Un principe de base de la dendroclimatologie est que les anneaux annuels de croissance des arbres (cernes) cachent des informations sur le climat passé. D'un point de vue statistique, on peut associer à tous les cernes formés la même année dans un périmètre donné une variable aléatoire latente – c'est-à-dire une variable aléatoire inobservable – intégrant tous les forçages subits par les arbres du périmètre pendant la période où ils formaient leur cerne respectif. Cette variable latente annuelle est donc commune aux arbres du périmètre investigué. La succession de ces variables latentes constitue une série temporelle propre au périmètre investigué et le travail du statisticien est de mobiliser toute l'information disponible pour en extraire une chronique susceptible de recevoir une interprétation climatique. La clarté de la reconstruction climatique varie selon les espèces d'arbres, les facteurs régionaux et les méthodes statistiques utilisées. Pour ce qui concerne l'épinette noire, bien répandue dans le nord du Québec, nous avons développé un modèle statistique Bayésien hiérarchique nommé DENDRO-AR qui fournit essentiellement une chronologie des distributions *a posteriori* des variables latentes, chacune d'entre elles synthétisant l'influence de l'environnement sur la croissance des arbres, y compris l'ensemble des conditions climatologiques qui prévalaient durant la période de végétation. En appliquant ce modèle à un ensemble de sites bien répartis sur une large région, la cartographie d'un quantile particulier, par exemple la médiane, autorise une analyse spatio-temporelle du signal commun.

## Abstract

A basic principle of the dendroclimatology is that the annual tree-rings hide information on past climate. From a statistical viewpoint, all tree rings formed the same year belong to a given perimeter associated with a latent random variable - i.e. an unobservable random variable - integrating all forcings having affected trees of the perimeter during the period they formed their respective ring. This annual latent variable is therefore common of all trees of the investigated area. The succession of these latent variables constitutes temporal series characterizing the handling area and the work of the statistician is to mobilize all the available information to extract a chronicle that may receive a climatic interpretation. The clarity of the output signal varies depending on the tree species, regional factors and the statistical methods used. In the case of black spruce (*Picea mariana* Mill. BSP), very common in Northern Quebec, we developed a hierarchical Bayesian model named DENDRO-AR which essentially provides a chronological of posterior distributions of the latent variables, each synthesizing the influence of the environment on the growth of trees, including the climatic conditions that prevailed during the period of vegetation. Applying this model to a set of adequately distributed sites over a wide area, the mapping of a particular quantile, e.g. the median, authorizes a spatiotemporal analysis of the common signal.

## Introduction

Le Nord du Québec, très important pour la production hydroélectrique, n'a pas une bonne couverture de stations météorologiques. Mobiliser les arbres de la taïga en tant

que bioindicateurs du climat était donc la seule alternative praticable dans un délai raisonnable. La difficulté majeure est de filtrer les séries de cernes de façon à ne garder que le signal climatique. Bien sûr, il s'agit là d'une vue de l'esprit et aucune série particulière standardisée avec soin ne peut prétendre à elle seule révéler les fluctuations du climat annuel sur le long terme. C'est pourquoi nous avons développé un modèle hiérarchique Bayésien dans le but d'extraire une série indicatrice des fluctuations du climat annuel au site échantillonné. La clé du succès réside évidemment dans l'étude spatio-temporelle de ces séries de site. Les enjeux socioéconomiques étant importants, les modèles de prévision utilisés par les producteurs d'électricité doivent être aussi performants que possible et malheureusement l'information disponible couvre des périodes récentes, trop courtes pour valider ces modèles. Les reconstructions climatiques (Nicault *et al.*, 2014) ont justement pour but de palier à ce manque d'information. L'incertitude entourant ces reconstructions doit être quantifiée avec soin et les méthodes bayésiennes (Boreux *et al.*, 2010) sont particulièrement efficaces pour les cerner.

Dans le cadre du projet ARCHIVES nous avons développé un modèle probabiliste Bayésien (Boreux *et al.*, 2009) en vue d'extraire une série caractéristique d'un ensemble de séries standardisées provenant d'un même lieu d'échantillonnage. Cette série commune – désignée par la lettre  $Z = \{Z_t\}$  – est un quantile particulier de la suite des distributions *a posteriori* associées aux variables latentes  $Z_t$ . La chronique de ce quantile est assimilable à une moyenne ou à une première composante principale. Bien sûr, disposer de la suite des distributions de probabilité procure de nombreux avantages, notamment la quantification des incertitudes et la possibilité de quantifier la part explicative de chacune des séries individuelles dans la série commune. Cette approche faisait partie de l'effort d'innovation méthodo-

logique du projet ARCHIVES. Ce modèle a été appliqué à un grand nombre de sites couvrant l'ensemble de l'aire d'étude afin de mettre en évidence des périodes de forte ou de faible productivité forestière pouvant être liées à des régimes climatiques différents.

### Qu'est-ce qu'un modèle statistique ?

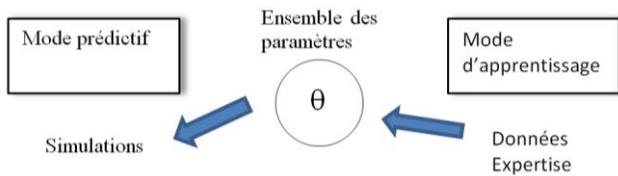
Un modèle statistique imite la nature en produisant des données idéalement indiscernables des vraies observations. Avec un ordinateur on réalise des tirages en cascade dans des distributions de probabilité, chacune d'entre elles étant caractérisée par un jeu de paramètres inconnus. Ce sont ces tirages en cascade qui confèrent aux modèles statistiques réalistes une structure hiérarchique.

Sous le paradigme Bayésien, les paramètres des distributions de probabilité impliquées sont incertains (par opposition au paradigme classique qui les voit comme des quantités, certes inconnues, mais certaines) et il y a donc un sens à les doter d'une distribution *a priori* plus ou moins informative. La règle de Bayes met à jour ces distributions *a priori* en mobilisant les vraies observations via le modèle d'échantillonnage qui génère la fonction de vraisemblance. Toutes les prédictions seront fondées sur la connaissance de la distribution jointe *a posteriori* des paramètres impliqués dans le modèle statistique hiérarchique.

### Complexité, modularité, efficacité

Graphiquement, les paramètres, les variables latentes et les observables sont représentés par des nœuds « stochastiques » par opposition aux nœuds « logiques » (qui sauvegardent des résultats intermédiaires) et aux nœuds « constants » qui représentent des entrées considérées comme certaines et invariantes. Des flèches exprimant des relations de cause à effet relient les nœuds stochastiques de manière à former un graphe acyclique orienté : en mode simulation on fixe les paramètres (qui apparaissent donc comme des

causes) pour finalement aboutir aux données simulées (apparaissant comme des effets); en mode inférence, on mobilise les vraies observations pour remonter vers les paramètres inconnus et leur attribuer des valeurs compatibles avec l'expertise et les observations; le mode prédictif est similaire au mode simulation à ceci près que désormais on connaît leur distribution et les liens qui les unissent (Figure 1).



**Figure 1. L'inférence statistique mobilise toute l'information disponible pour estimer les paramètres du modèle qui, à leur tour, permettent des prédictions.**

On le comprend, la représentation graphique d'un modèle hiérarchique Bayésien (BHM pour *Bayesian hierarchical model*) peut apparaître sophistiquée, mais ce qui compte c'est que le modèle remplisse la tâche qui lui est assignée, fût-ce au prix d'une certaine complexité. Sans entrer dans des détails techniques, on peut montrer qu'un modèle complexe se découpe en sous-modèles, souvent très simples, et c'est cette modularité qui est exploitée dans les méthodes de Monte-Carlo permettant désormais de créer des modèles statistiques répondant efficacement aux attentes des praticiens.

### Le modèle DENDRO-AR(1)

L'observable est le logarithme de l'indice de croissance (TGI pour *tree growth index*). Soit un site quelconque sur lequel  $S$  épinettes noires ont été échantillonnées. Considérons l'arbre  $s$  ( $s = 1, \dots, S$ ) qui a produit un cerne l'année ( $t = 1, \dots, T$ ). Pour éviter de traiter les données manquantes, la période de longueur  $T$  est commune aux  $S$  séries standar-

disées ( $T \geq 100$ , car on veut couvrir au moins le vingtième siècle).

On a :

$$Y_{st} = \ln TGI_{st}$$

Le modèle DENDRO-AR(1) intègre trois sous-modèles : un modèle de processus, un modèle de régression, et un modèle d'échantillonnage.

### Le modèle de processus

La variable latente  $Z_t$  ou « facteur commun » représente les caractéristiques générales de l'année  $t$  qui a vu l'arbre  $s$  former un cerne. Si la standardisation est bien faite, l'indice de croissance observé  $y_{st}$  renferme une information essentiellement climatique et la variable latente  $Z_t$  peut alors être interprétée comme la résultante de tous les facteurs météorologiques ayant pu influencer la formation du cerne aux différents stades de son développement. Bien que le climat régional puisse subir des changements sur le moyen ou long terme, il doit montrer une certaine persistance annuelle et c'est pourquoi le modèle de processus est un modèle autorégressif d'ordre 1 où  $U_t$  est un bruit blanc de variance  $\sigma_U^2 > 0$

$$Z_t = \rho Z_{t-1} + U_t$$

Par récurrence il est aisé d'exprimer  $Z_t$  en fonction de  $Z_0$  :

$$Z_t = \rho^t Z_0 + \sum_{j=0}^{t-1} \rho^j U_{t-j}$$

Conditionnellement à la connaissance du paramètre  $\rho$  et de la valeur initiale du signal commun  $Z_0 = z_0$  la valeur attendue et la variance de  $Z_t$  suivent :

$$E(Z_t | \rho, z_0) = \rho^t z_0, \quad V(Z_t | \rho, z_0) = \sigma_U^2 \frac{1 - \rho^{2t}}{1 - \rho^2}$$

Sans perte de généralité on peut poser  $\sigma_U^2 = 1$ . Maintenant il est doit être clair que si  $|\rho| > 1$  la variance du facteur commun explose et on ne peut plus rien espérer de ce modèle. Pratiquement la condition  $0 < \rho < 1$  suffit et donc

le modèle de processus peut être résumé comme suit :

$$\forall t: Z_t | \rho, z_0 \sim \mathcal{N}(z_t | \rho^t z_0, (1 - \rho^2)^{-1})$$

Ce modèle est donc *a priori* stationnaire, car  $E(Z_t | \rho, z_0) \rightarrow 0$  quand  $t \rightarrow \infty$ . Bien entendu, les informations portées par les  $S$  séries standardisées du site d'intérêt vont perturber cette stationnarité et, *a posteriori*, le profil temporel d'un quantile fixé des distributions  $Z_t$  sera irrégulier avec des bosses et des fosses autorisant ainsi une éventuelle interprétation climatique ce qui est bien le but de la modélisation.

### Le modèle de régression

Soit  $y_{st}$  le logarithme de l'indice de croissance de l'arbre  $s$  observé durant l'année  $t$  (en d'autres mots on sait que  $Y_{st} = y_{st}$ ). Le modèle de régression assume que la partie essentielle de cette observation varie linéairement avec la variable latente  $Z_t$  commune à toutes les séries standardisées :

$$h_{st} = h(Z_t | \mu_s, \lambda_s) = \mu_s + \lambda_s Z_t$$

Le modèle de régression  $h(Z_t | \mu_s, \lambda_s)$  mesure la part de l'indice de croissance du cerne  $s$  l'année  $t$  due au facteur caché  $Z_t$  que nous avons interprété comme la résultante de tous les forçages climatiques et édaphiques qui ont influencé les arbres sur le site d'intérêt durant l'année  $t$ . En particulier le produit  $\lambda_s Z_t$  mesure la part de croissance du cerne  $s$  due au facteur commun  $Z_t$ .

### Le modèle d'échantillonnage

Disposant des observations  $y_{s1}, y_{s2}, \dots, y_{st}$  on souhaite faire une prévision de l'observable en  $t + 1$ . Par exemple, on souhaite calculer la probabilité que  $Y_{st+1}$  excède

un certain seuil. L'idée est de dire que la différence entre la variable aléatoire et sa prévision est proportionnelle à la dernière différence observée à laquelle on ajoute un bruit blanc  $\varepsilon_{st}$  de variance  $\sigma_s^2 > 0$  :

$$Y_{st+1} - h_{st+1} = \phi_s(y_{st} - h_{st}) + \varepsilon_{st}$$

On connaît  $h_{st+1} = h(Z_{t+1} = z_{t+1} | \mu_s, \lambda_s)$  par le modèle de régression alors que la valeur  $z_{t+1}$  est fournie par le modèle de processus.

En d'autres termes l'observable a une distribution normale de moyenne  $h_{st+1} + \phi_s(y_{st} - h_{st})$  et de variance  $\sigma_s^2$  :

$$Y_{st+1} \sim \mathcal{N}(h_{st+1} + \phi_s(y_{st} - h_{st}), \sigma_s^2)$$

### Exemple : application aux arbres du site TS

Chaque site  $k$  ( $k = 1, 2, \dots, K$ ) produit  $S_k$  séries standardisées recouvrant une période commune de  $T_k$  années consécutives.

À l'issue de l'inférence Bayésienne, on dispose de la distribution *a posteriori* des  $T_k$  variables latentes. On peut alors considérer un centile  $q$  particulier, par exemple la médiane ( $q = 50$ ) :

$$Z_{qk} = \{Z_{tk}(q) : t = 1, 2, \dots, T_k\}$$

La figure 2 montre le profil temporel de la médiane du signal commun au site TS.

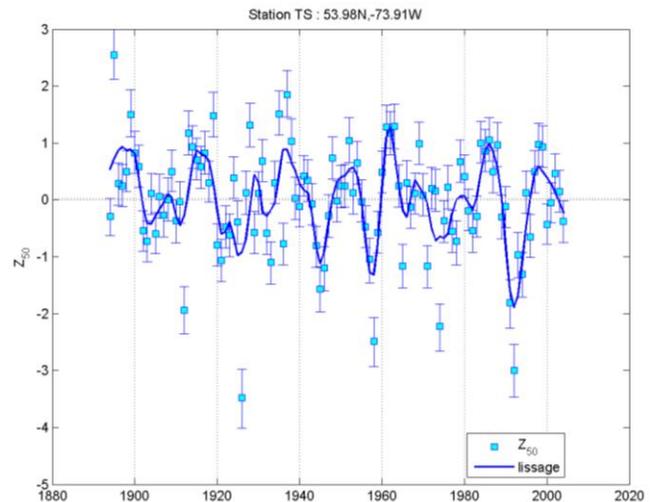


Figure 2. Série temporelle du signal Signal Z(T) modélisée pour le site TS.

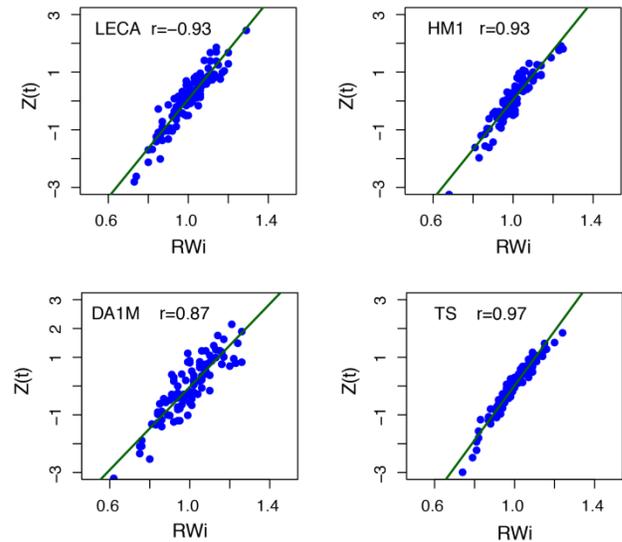
### Application aux séries temporelles de cernes du projet ARCHIVES

Le modèle a été appliqué à 57 sites d'épinettes noires. Pour chacun de ces sites nous avons ainsi obtenu une chronologie  $Z(t)$  représentant au mieux le signal commun à tous les individus du site. Plusieurs paramètres sont également fournis par le modèle permettant de juger de la qualité du signal commun et du poids de chacune des chronologies intégrées.

Dans le cadre du projet Anhycli (Ouranos 2013-2015) les séries  $Z(t)$  ont été comparées aux chronologies d'épaisseurs de cernes standardisées avec la même méthode et ensuite nous avons réalisé sur les chronologies obtenues une analyse de classification ascendante hiérarchique similaire à celle menée sur les épaisseurs de cernes (Nicault *et al.*, 2015; Chapitre 9).

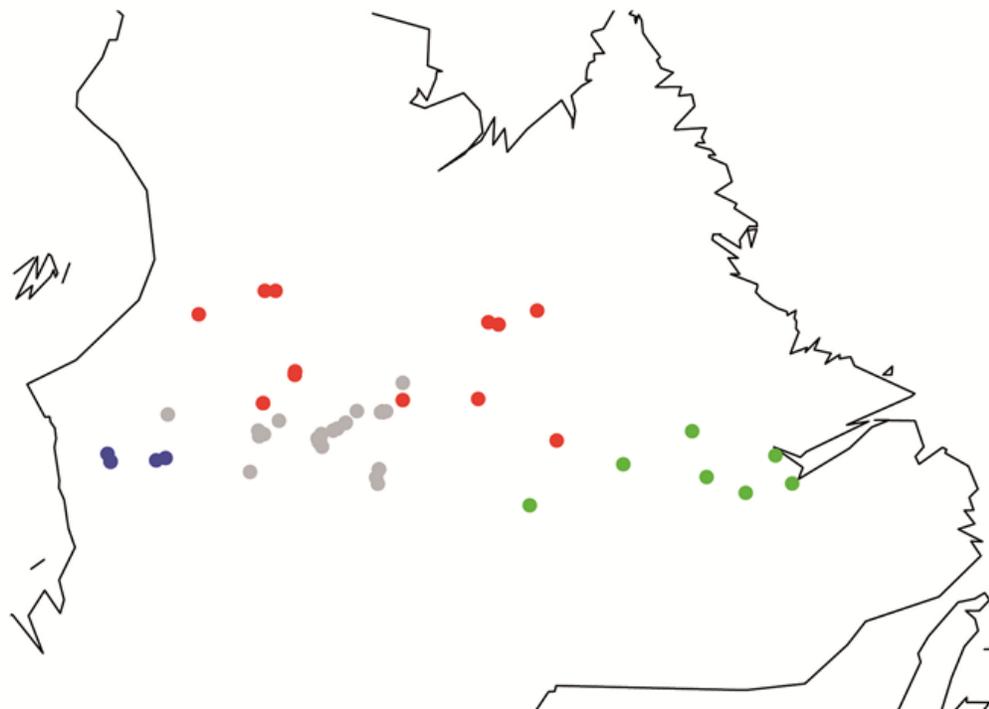
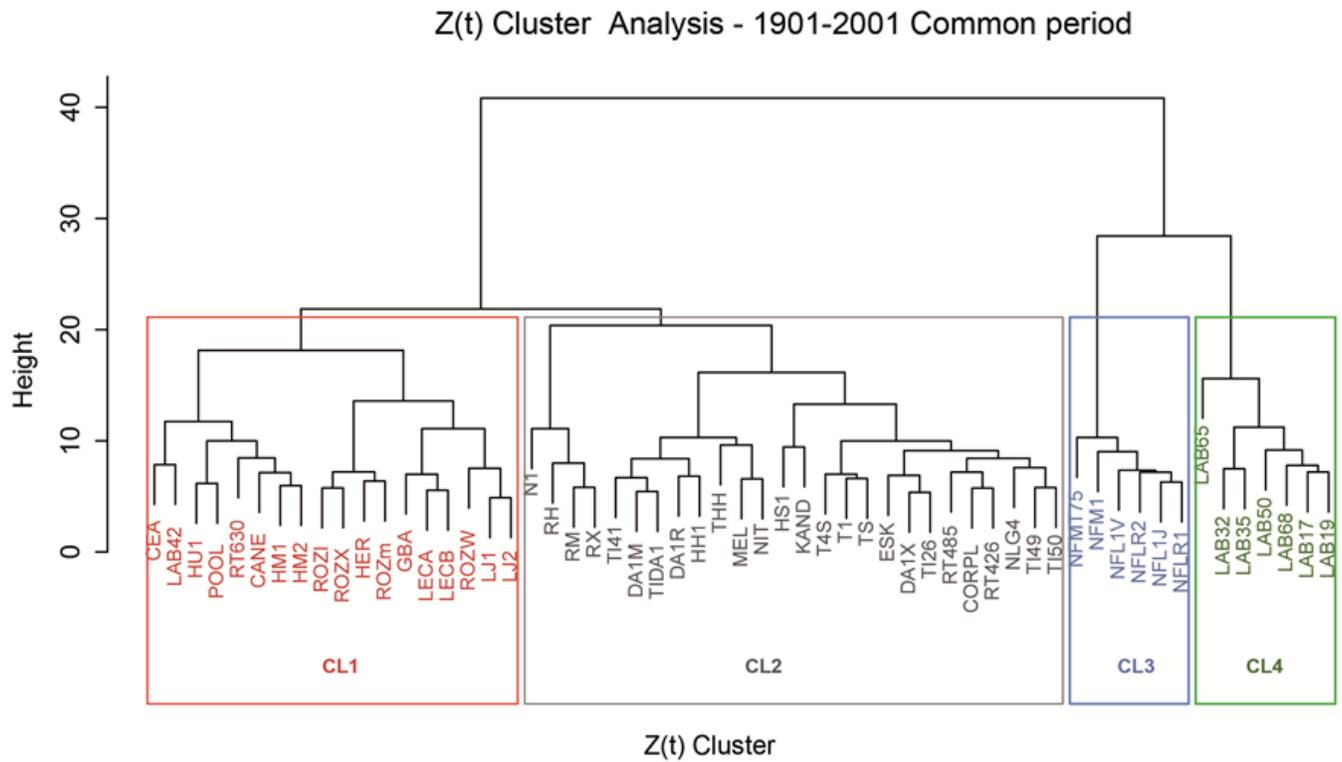
La comparaison entre les séries  $Z(t)$  et les séries de cernes standardisées montre que les deux méthodes nous donnent des chronologies très proches l'une de l'autre quelque soient les sites (voir Figure 3 : sélection de quatre sites); les corrélations varient entre 0,87 et 0,97. Les chronologie  $Z(t)$  fournissent donc une information climatique cohérente avec celle obtenue avec un traitement classique dendrochronologique, mais avec, en plus, une très bonne quantification des incertitudes. Ces chronologies offrent donc un potentiel supérieur dans le cadre d'études dendroclimatiques.

Notons que le nombre de série  $Z(t)$  intégrée dans l'analyse (57) est inférieur au nombre de séries de cernes ayant fait l'objet de la même analyse (90; Chapitre 9). En revanche, la période d'analyse est la même dans les deux cas (1920-1987). Le dendrogramme obtenu (Figure 4) présente quatre groupes distincts qui se répartissent de façon structurée dans l'espace. Deux groupes sont composés des populations situées à l'extrême est (CL4) et à l'extrême ouest (CL3), et deux autres



**Figure 3. Comparaison des chronologies maîtresses « classiques » (Rwi) et des chronologies  $Z(t)$ .**

groupes sont représentés par les populations nord et centre nord (CL2) et par les populations situées au centre sud (CL1). On retrouve, à quelques petites différences près, la même structure spatiale que celle mise en évidence dans Nicault *et al.* (2015) mais avec des groupes mieux discriminés spatialement (moins de chevauchement entre les groupes). Ces résultats nous confortent sur la qualité des chronologies  $Z(t)$  obtenues et laisse même supposer une meilleure captation du signal « climatique ». Ils nous ont donc conduits à initier une analyse spatiale plus rigoureuse.



**Figure 4.** Analyse de classification ascendante hiérarchique réalisée sur les séries temporelles du signal  $Z(t)$  et cartographie des résultats.

### Analyse spatiale du signal $Z(t)$

Ces analyses ont été réalisées avec la collaboration de Dominique Tapsoba (IREQ). L'objectif ici est de détecter des patrons spatiaux de croissance (donc potentiellement de régimes climatiques etc.) récurrents dans le temps (Boreux et Nicault, 2014), et d'associer ces patrons à des années caractéristiques en terme d'hydrologie ou de circulation atmosphérique. Pour l'instant ces analyses n'ont été réalisées que pour deux années aux caractéristiques hydrologiques très différentes : l'année 1979 caractérisée par des niveaux d'eau très hauts et l'année 1985 caractérisée par des niveaux d'eau très bas. La figure 5 montre que pour ces deux années la structure spatiale du signal  $Z(t)$  est très différente. L'année 1979 présente un contraste est-ouest très fort des valeurs de  $Z(t)$  alors que pour l'année 1985 le  $z(t)$  est beaucoup plus homogène sur l'ensemble du territoire et ne montre pas ou

peu de patron spatial clair. Ces patrons spatiaux pourraient être reliés à un état atmosphérique particulier, lui-même probablement influant l'hydrologie.

L'objectif futur sera de réaliser l'analyse spatiale pour toutes les années et rechercher les années montrant un même type de structure spatiale et de les classer. Ces différentes années pourront éventuellement être interprétées en terme d'hydraulicité et /ou en terme de patron de circulation atmosphérique à la lueur des années où l'on possède des observations.

### Conclusion

Les reconstructions hydro-climatiques prévues et réalisées dans le projet ARCHIVES avaient pour ambition de fournir des informations sur la variabilité hydrologique et climatique passée, mais aussi, à terme, d'être utilisées ou intégrées dans des modèles de prévi-

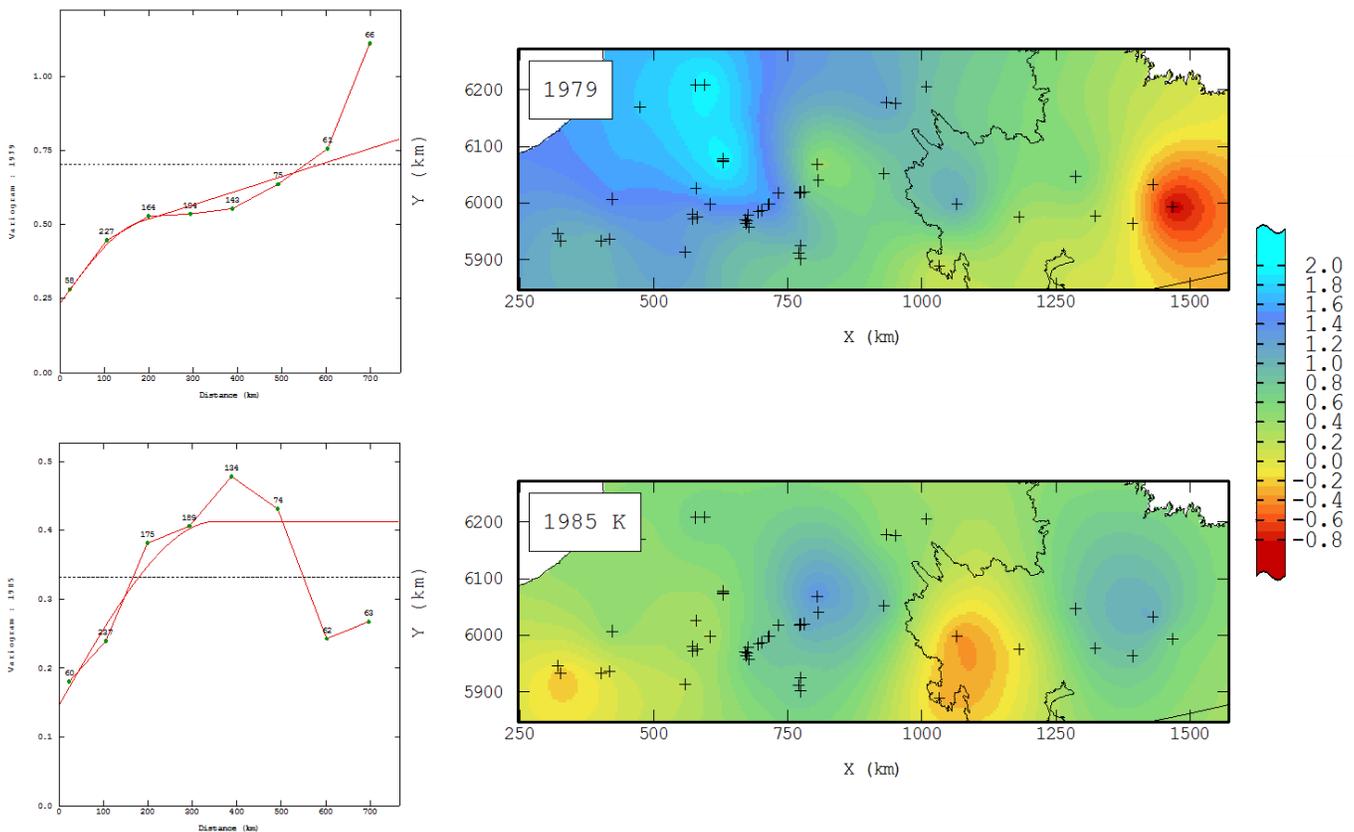


Figure 5. Analyse spatiale du signal  $Z(t)$  pour les années 1979 (hautes eaux) et 1985 (basses eaux).

sion hydrologique. C'est dans cette optique, qu'il a été décidé de développer une nouvelle méthode de construction des chronologies de référence utilisées comme indicateur hydroclimatique. Cette nouvelle méthode, un modèle hiérarchique Bayésien (BHM) a pour principal avantage de beaucoup mieux quantifier les incertitudes que les méthodes classiques de dendrochronologie. Ce modèle a été appliqué à 57 populations issues du réseau dendrochronologique développé dans le cadre du projet (Chapitre 6). Le potentiel est là. En effet, les séries obtenues par le modèle sont très proches des séries obtenues par les méthodes classiques, avec l'avantage d'être associées à une quantification rigoureuse des incertitudes. De plus, la classification des séries définit des groupes bien mieux discriminés dans l'espace et montrerait donc un potentiel supérieur aux chronologies maîtresses obtenues de façon classique (moyenne des chronologies individuelles).

Aujourd'hui ce modèle semble donc très performant, mais les contraintes liées à sa mise en œuvre n'ont permis sa livraison et son application à l'ensemble des sites qu'à la toute fin du projet. Seul un début d'analyse spatiale du signal, certes prometteur, a pu être initié

mais il montre le grand potentiel d'une telle approche.

<https://doi.org/10.4095/328077>

### Références

- Boreux, J.J. et Nicault, A., 2014. A Bayesian hierarchical model (BHM) to extract a common series from a set of tree growth index series in order to summarize the weather conditions over the past. ITISE 2014, Granada, Spain; 06/2014. 7 pages
- Boreux, J.J., Parent, É. et Bernier, J., 2010. Pratique du calcul bayésien. Springer Science & Business Media. 335 pages.
- Boreux, J.J., Naveau, P., Guin, O., Perreault, L. et Bernier, J., 2009. Extracting a common high frequency signal from Northern Quebec black spruce tree-rings with a Bayesian hierarchical model. *Climate of the Past*, 5: 607-613.
- Nicault, A., Boucher, É., Bégin, C., Guiot, J., Perreault, L., Roy, R., Savard, M.M. et Bégin, 2014. Hydrological reconstruction from tree-ring multi-proxies over the last two centuries at the Canipiscau Reservoir, northern Québec, Canada. *Journal of hydrology*, 513 : 435-445.
- Nicault, A., Boucher, É., Tapsoba, D., Arseneault, D., Bégin, C., Berninger, F., DesGranges, J.-L., Guiot, J., Marion, J., Wicha, S. et Bégin, Y., 2015. Spatial analysis of black spruce (*Picea mariana* [MILL] B.S.P.) radial growth response to climate in northern Québec-Labrador Peninsula, Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, 45: 343-352 [dx.doi.org/10.1139/cjfr-2014-0080](https://doi.org/10.1139/cjfr-2014-0080)

## 12. Contexte paléoenvironnemental d'un lac à troncs subfossiles

Gabriel Rodrigue, Pierre Francus et David Fortin

### Résumé

Cette recherche précise le contexte paléoenvironnemental (principalement l'occurrence d'incendies et les taux de sédimentation) d'un lac contenant un important gisement de troncs subfossiles utilisés pour élaborer une reconstitution dendroclimatique millénaire dans le cadre du projet ARCHIVES (Chapitre 18). Des macrorestes d'éricacées carbonisés dans les sols de la forêt riveraine du site L18 ont été datés au radiocarbone et corroborent l'historique des feux reconstitué à partir des séquences de recrutement des subfossiles dans la zone littorale du lac au cours du dernier millénaire. Des analyses géochimiques révèlent que les apports sédimentaires au lac et les conditions limnologiques n'ont pas changé significativement au cours de cette période. Par conséquent, bien que les incendies aient influencé la régularité des apports de troncs subfossiles, ils n'ont pas influencé leurs conditions de conservation dans l'eau.

### Abstract

This research specifies the palaeoenvironmental context (mainly the occurrence of fires and the rate of sedimentation) of a lake containing an important deposit of subfossil trunks used to develop a millennial dendroclimatic reconstruction within the framework of the ARCHIVES project (Chapter 18). Charred ericaceous macroremains in the soils of the riparian forest at site L18 have been dated with radiocarbon and corroborate the fire history reconstructed from the recruitment sequences of subfossils in the lacustrine littoral zone over the past millennium. Geochemical analyzes show that sediment inputs to the lake and limnological conditions have not changed signifi-

cantly during this period. Consequently, although the fires influenced the regularity of the supply of subfossil trunks, they did not influence their conditions of conservation in water.

### Introduction

Cette recherche se veut complémentaire à celles présentées aux chapitres 7 et 18 de cet ouvrage. Dans ce cadre, six dendroséries millénaires ont été construites à l'aide d'arbres vivants et subfossiles récoltés dans des lacs situés le long de la route transtaïga. Deux questions importantes sont apparues lors de l'examen des dates de mortalité des arbres. L'apport de troncs subfossiles est-il influencé par l'historique des feux de la région (Arseneault *et al.*, 2013)? Les feux ont-ils eu une influence sur le taux de sédimentation dans le lac ou sur les conditions de conservation des bois dans le fond périphérique du lac (Gennaretti *et al.*, 2014)? Pour répondre à ces questions, ce chapitre explore tout d'abord l'approche pédoanthracologique pour tenter de retracer l'historique des feux en bordure d'un lac ayant produit une chronologie millénaire et de comparer cette chronique des incendies avec celles issues d'études dendroécologiques. Ensuite, il réalise une étude paléolimnologique à partir de carottes de sédiments prises dans le même lac afin d'estimer les variations possibles des conditions de préservation des arbres subfossiles, dont notamment les variations du taux de sédimentation et des conditions d'oxydo-réduction.

### Site d'étude

Parmi les lacs considérés pour construire le réseau de séries dendrochronologiques, le Lac 18 a retenu notre attention, car les carottes de sédiments montraient des la-

minations, couches aux caractéristiques homogènes qui indiquent généralement de bonnes conditions de préservation des sédiments (Cohen, 2003). Ce lac est situé à environ 15 km au sud-ouest de la centrale hydroélectrique La Forge-1 (54,25°N; 72,38°O; Figure 1) et occupe une dépression sculptée par l'érosion glaciaire. Il a une superficie de 45 ha, une longueur de 1,45 km, une largeur de 0,6 km et une profondeur maximale de 45 m.

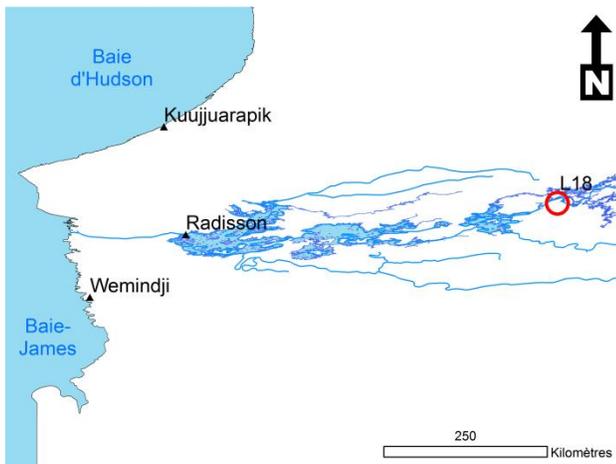


Figure 1. Localisation du site d'étude.

### Analyse pédoanthracologique

#### Méthodes

L'analyse des macrorestes végétaux fossiles qui sont préservés dans les sols permet de reconstituer la végétation locale puisqu'ils se déposent à proximité de la plante mère ( $p$ .

ex. aiguilles, bois, bourgeons, cônes, écailles, feuilles, fleurs, graines, rameaux, tiges; Marguerie *et al.*, 2000). La pédoanthracologie se focalise sur l'étude de la végétation ligneuse à l'aide de charbons de bois ou de macrorestes végétaux carbonisés enterrés dans les sols (Thinon, 1978). Lors de la campagne de terrain de 2011, des monolithes de sol (tranches verticales taillées dans un profil de sol qui préserve les horizons) ont été échantillonnés le long de la rive ouest du lac 18, la même rive le long de laquelle les arbres subfossiles ont été récoltés. En laboratoire, les monolithes ont été découpés en tranches de 1 centimètre qui ont été tamisées. Les refus de tamis ont été triés à la loupe binoculaire. Quatre macrorestes végétaux carbonisés (Figure 2) de genre *Chamaedaphne* ou *Vaccinium* ont été datés au radiocarbone.

#### Résultats

Selon l'étude pédoanthracologique, la forêt riveraine du Lac 18 a brûlé au minimum à quatre reprises depuis 1241 cal BP (Figure 2). Les charbons analysés correspondent à des feux détectés par les cicatrices laissées dans les séries dendrochronologiques (Figure 3) dans la marge d'erreur des datations radiocarbones, à l'exception des charbons de 1421 et 1446 cal BP qui proviennent sans doute d'un même feu. Cette période correspond aussi à une interruption de l'apport en arbres fossiles dans le lac

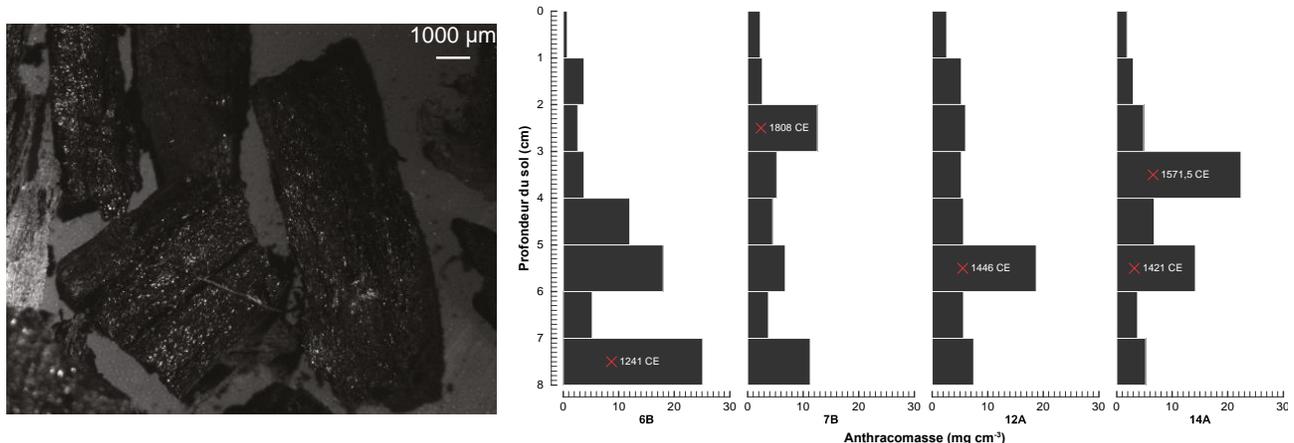
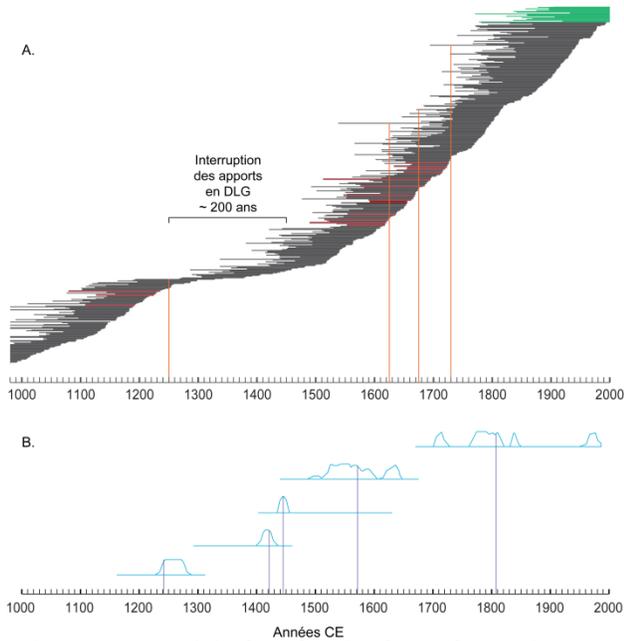


Figure 2. A. Macrorestes végétaux carbonisés sous loupe binoculaire. B. Anthracomasses de quatre profils de sols.



**Figure 3. A. Périodes de vie des arbres vivants (barres vertes) et subfossiles (barres noires); les débris ligneux grossiers (DLG) calcinés sont représentés par des barres rouges; les traits orangés représentent les dates de feux de Gennaretti *et al.* (*ibid.*). B. Dates  $^{14}\text{C}$  (et leurs intervalles de confiance) des charbons calibrés par OxCal 4.2 et converties en années CE. Les traits verticaux mauves sont les dates  $^{14}\text{C}$  médianes.**

(Gennaretti *et al.*, 2014) qui a été expliquée par une augmentation de la mortalité des arbres. Ainsi, l'historique des feux élaboré à l'aide d'arbres vivants et subfossiles ne semble pas en contradiction avec celui des macrorestes végétaux carbonisés. Davantage de dates  $^{14}\text{C}$  sur les charbons des sols permettraient de conforter cette constatation.

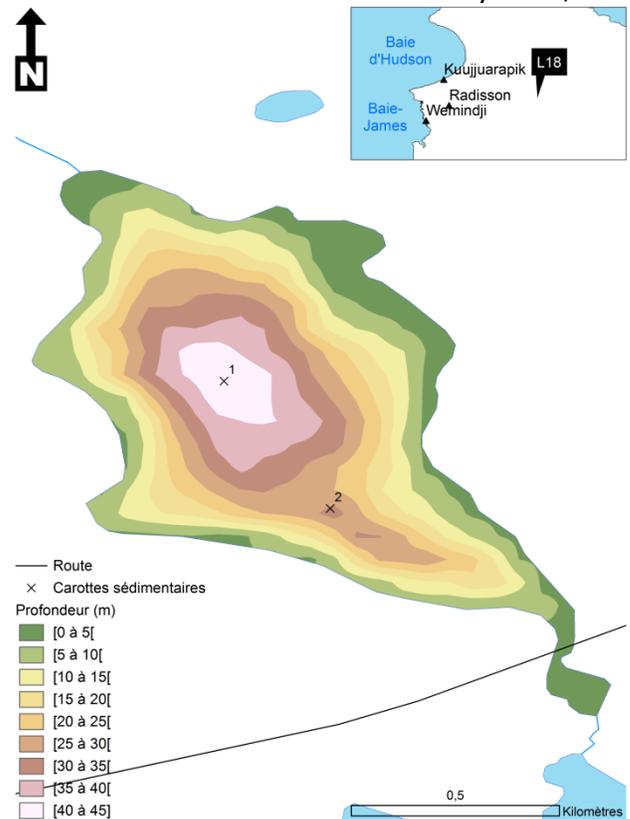
### Analyse des sédiments lacustres

#### Méthodes

Un levé bathymétrique du Lac 18 a été réalisé à l'aide d'un échosondeur afin d'identifier les secteurs les plus propices à une étude paléolimnologique et de mieux comprendre les processus sédimentaires qui s'y déroulent (Figure 4). Plusieurs carottes ont été récoltées sur deux sites et ont été analysées en laboratoire. Les analyses d'une colonne strati-

graphique représentative du site 1 sont présentées ici.

La chronologie récente a été élaborée à l'aide de radio-isotopes de courte période ( $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  et  $^{137}\text{Cs}$ ), alors que la chronologie à long terme repose sur six datations radiocarbone de sédiments lacustres. Les analyses effectuées sur les carottes de sédiments comprennent les éléments suivants : 1) la tomodensitométrie est réalisée par un CT-Scanner médical qui permet de visualiser en 3 dimensions la structure des sédiments sans les perturber. Elle permet aussi d'estimer les variations de la densité des sédiments (Fortin *et al.*, 2013). L'intensité tomographique de chaque voxel (pixel volumétrique) est exprimée en unités Hounsfield (UH) qui est une unité relative par rapport à la densité de l'eau (UH = 0; St-Onge *et al.*, 2009), 2) la microfluorescence X permet l'analyse non-destructive de la composition chimique élémentaire des sédiments. Sous l'effet d'un faisceau de rayons-X, les



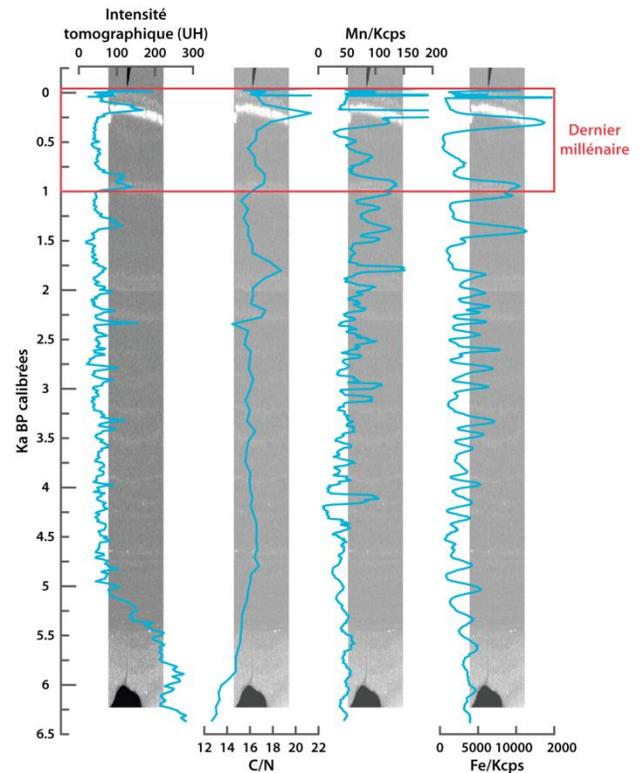
**Figure 4. Bathymétrie du Lac 18.**

échantillons émettent des photons (fluorescence) dont l'énergie est caractéristique de chaque élément. L'intégrale de l'aire des pics d'émission de chaque élément est alors mesurée en nombre de coups par seconde (Croudace *et al.*, 2006), 3) l'analyseur CNS mesure la teneur en carbone, azote et soufre d'un échantillon par combustion. Le rapport carbone sur azote reflète l'origine de la matière organique. Les plantes vasculaires terrestres ont un rapport C/N supérieur à 20, tandis que les plantes aquatiques ont un rapport C/N compris entre 4 et 10 (Meyers, 1994).

### Résultats

La séquence sédimentaire couvre plus de six millénaires sur 45 cm (Figure 5). Ces faibles taux de sédimentation varient entre 0,04 et 0,15 cm an<sup>-1</sup>. Ils sont typiques de la région de la forêt boréale sur le Bouclier canadien (Carcaillet *et al.*, 2006), et sont relativement constants dans cette séquence sédimentaire, à l'exception des centimètres supérieurs qui ne sont pas affectés par la compaction. La tomodensitométrie montre que la structure du sédiment n'est pas affectée par de grandes perturbations et de grands changements. Les carottes présentent des couches centimétriques plus denses et riches en éléments terrigènes et en fer et manganèse dans la partie plus ancienne des carottes. Le profil du rapport C/N reste stable avec une tendance générale vers un enrichissement en matière organique terrestre allochtone. Durant le dernier millénaire, le dépôt sédimentaire ne change pas significativement, bien que des variations importantes en fer et manganèse soient visibles vers ~1780 et -1990 CE. Celle de ~1780 correspond au front d'oxydo-réduction qui se forme sous l'interface surface eau/sédiment des lacs dont la colonne d'eau est saturée en oxygène, et n'est pas indicateur de perturbation externe (Davison, 1993). Le pic en surface est un artefact d'analyse et de carottage (Figure 5). En bref, mis à part la présence de laminations té-

nues riches en fer-manganèse, les profils sédimentaires ne fluctuent pas beaucoup, surtout durant le dernier millénaire.



**Figure 5. Séquence sédimentaire du site 1. Intensité tomographique, rapport carbone sur azote, manganèse et fer en fonction de l'âge. L'image en arrière-plan est une coupe longitudinale d'une reconstruction tridimensionnelle (CT-scan). Les profondeurs sont transformées en dates cal BP.**

### Conclusion

Les datations des macrorestes dans les sols de la forêt riveraine du site L18 corroborent l'historique des feux reconstitué à partir des séquences de recrutement des subfossiles dans la zone littorale du lac au cours du dernier millénaire. En outre, les faibles variations des apports sédimentaires, que soit les taux de sédimentation ou les propriétés des sédiments, indiquent que les feux de forêt n'ont pas eu d'influence sur la sédimentation et que les conditions de préservation des arbres subfossiles sont restées relativement stables, ce qui valide la qualité des reconstructions dendro-

climatiques millénaires réalisées à partir des arbres subfossiles.

<https://doi.org/10.4095/328078>

## Références

- Arseneault, D., Dy, B., Gennaretti, F., Autin, J. et Bégin, Y., 2013. Developing millennial tree ring chronologies in the fire-prone North American boreal forest. *Journal of Quaternary Science* 28(3): 283-292.
- Carcaillet, C., Richard, P. J. H., Asnong, H., Capece, L. et Bergeron, Y., 2006. Fire and soil erosion history in East Canadian boreal and temperate forests. *Quaternary Science Reviews*, 25(13-14): 1489-1500.
- Cohen, A., 2003. *Paleolimnology : The History and Evolution of Lake Systems: The History and Evolution of Lake Systems*. Oxford University Press, New York, USA, 500 p.
- Croudace, I. W., Rindby, A. et Rothwell, R. G. 2006. ITRAX: description and evaluation of a new multi-function X-ray core scanner. *Special publication- Geological society of London*, 267: 51.
- Davison, W., (1993). Iron and manganese in lakes. *Earth-Science Reviews*, 34(2): 119-163.
- Fortin, D., Francus, P., Gebhardt, A. C., Hahn, A., Kliem, P., Lise-Pronovost, A., Roychowdhury, R., Labrie, J., St-Onge, G. et Pasado Science Team, 2013. Destructive and non-destructive density determination: method comparison and evaluation from the Laguna Potrok Aike sedimentary record. *Quaternary Science Reviews*, 71: 147-153.
- Gennaretti, F., Arseneault, D. et Bégin, Y., 2014. Millennial disturbance-driven forest stand dynamics in the Eastern Canadian taiga reconstructed from sub-fossil logs. *Journal of Ecology*, doi: 10.1111/1365-2745.12315.
- Marguerie, D., Bégin, Y. et Cournoyer, L., 2000. Distinction anatomique du bois du mélèze (*Larix laricina* [Du Roi] K. Koch), de l'épinette blanche (*Picea glauca* [Moench.] Voss), et de l'épinette noire (*Picea mariana* [Mill.] B.S.P.), en vue de l'analyse des macrorestes. *Géographie physique et Quaternaire*, 54(3): 317-325.
- Meyers, P. A., 1994. Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter. *Chemical Geology*, 114(3): 289-302.
- St-Onge, G. et Long, B. F., 2009. CAT-scan analysis of sedimentary sequences: An ultrahigh-resolution paleoclimatic tool. *Engineering Geology*, 103(3): 127-133.
- Thinon, M., 1978. Pédoanthracologie: une nouvelle méthode d'analyse phytochronologique depuis le néolithique. *Comptes rendus Académie des Sciences Paris*, t 287, Serie D: 1203-1206.

# Troisième partie

---

Analyse rétrospective  
de l'hydro-climat des  
derniers siècles

# 13. Reconstitution de l'amplitude des crues printanières passées dans le bassin versant de La Grande Rivière

## Résumé

Les arbres situés en bordure des hydro-systèmes boréaux sont des témoins directs des crues printanières. Les blessures infligées à ces arbres lors des crues (souvent chargées de glace) évoluent sous la forme de bourrelets cicatriciels pouvant être datés par dendrochronologie. L'étude rétrospective de la fréquence et de la hauteur des cicatrices d'abrasion peut renseigner à la fois sur les changements dans la saisonnalité, l'intensité et la fréquence des événements passés de hauts niveaux d'eau. Cependant, selon le milieu où ces cicatrices sont échantillonnées, des informations différentes sur les propriétés de l'hydrogramme de crue sont obtenues. En rivière, les arbres situés sur les plaines inondables sont cicatrisés lors des crues printanières soudaines et hâtives, menant à la formation d'embâcles de glace. En milieu lacustre, ces cicatrices évoquent surtout des conditions de hauts niveaux d'eau, portant la glace au contact des arbres exposés. Ces observations discrètes sont des évidences directes de la dynamique hydrologique passée des cours d'eau en milieu froid, et peuvent être utilisées conjointement avec d'autres indicateurs pour éclairer et / ou baliser les reconstitutions hydro-climatiques.

## Abstract

Trees located in riparian landscapes of boreal hydrosystems are directly exposed to spring floods. Injuries inflicted to these stems during floods (often carrying ice blocks or ice rafts) evolve under the form of scars that can be dated by dendrochronology. The retrospective analysis of the frequency and height of

Étienne Boucher, Mickaël Lemay et Yves Bégin

these injuries can inform on the seasonality, intensity, and frequency of past high water levels. However, depending on the environment in which these scars are found, different information on hydrograph properties may be retrieved. Along rivers, trees located on floodplains tend to be scarred during sudden early spring floods often associated with ice-jamming events. In lacustrine environments, scar chronologies describe sequences of high water levels, which bring ice rafts in contact with riparian trees. Such discrete observations represent direct evidence of past hydrological events in cold-region rivers, and can be used jointly with other proxies to constrain hydro-climatic reconstructions.

## Introduction

La crue printanière est un événement crucial dans le cycle hydrologique annuel des milieux nordiques. C'est à ce moment de l'année que, sous l'effet de la fonte des neiges et du réchauffement des températures, d'imposants volumes d'eau transitent vers l'aval des bassins versants et envahissent les lacs et les rivières. Au Québec boréal, on estime qu'entre 30% et 40% du volume d'eau produit annuellement par les grands bassins versants (*p. ex.* la Grande Rivière) s'écoule en moins de deux mois (soit durant les mois de mai et de juin). Il s'agit donc d'une quantité d'eau considérable qui ne peut être négligée, ni du point de vue environnemental, ni du point de vue de la production hydroélectrique.

Sans en négliger l'importance environnementale (Boucher *et al.*, 2012), ni les enjeux de sécurité, c'est au plan de la production hy-

droélectrique que la crue printanière dans cette région peu habitée prend toute son importance pour l'ensemble de la société québécoise. Le remplissage annuel des vastes réservoirs hydroélectriques situés dans le Haut-Boréal québécois est fortement lié à l'ampleur de la crue printanière. Les années de fortes hydraulicités fournissent à la société d'état (c.-à-d. Hydro-Québec) la marge de manœuvre nécessaire pour répondre à la demande en hydroélectricité, tout en maximisant les exportations vers l'Ontario et les États-Unis. En revanche, plusieurs années consécutives de faible hydraulicité printanière peuvent avoir des conséquences sur l'ensemble de l'économie québécoise.

Afin de gérer adéquatement la ressource hydrique dans les milieux boréaux, où se trouvent la majeure partie des ressources hydroélectriques du Québec, il est impératif de connaître la variabilité hydrologique naturelle des écoulements printaniers. Or, ce n'est pas chose facile, car les registres instrumentaux n'existent sur le territoire que depuis quelques décennies et ne permettent d'accéder qu'à une fenêtre très réduite du spectre de variabilité des écoulements. Il faut donc se tourner vers les archives naturelles pour approfondir notre connaissance des fluctuations hydrologiques printanières dans cette région. Dans le présent texte, nous allons faire la démonstration que les arbres qui occupent les rives des principaux plans d'eau du Nord québécois agissent comme de véritables « témoins du passé » et peuvent nous livrer d'importantes informations sur l'ampleur des crues printanières historiques.

### Les crues glacielles et leur enregistrement par la végétation riveraine

La végétation riveraine est exposée épisodiquement aux inondations. Cependant, la submersion n'est pas un phénomène enregistré systématiquement par les indicateurs biologiques, car les inondations surviennent généralement

avant la levée de la dormance hivernale. La végétation riveraine a plutôt tendance à enregistrer les événements de crue qui ont la capacité d'effectuer un travail géomorphologique. Ces événements ont une énergie suffisante pour déplacer ou transformer les habitats naturels que l'on retrouve en bordure des plans d'eau. Dans ce contexte, on exploite plutôt la réponse des arbres à ces événements formatifs (Boucher *et al.*, 2010).

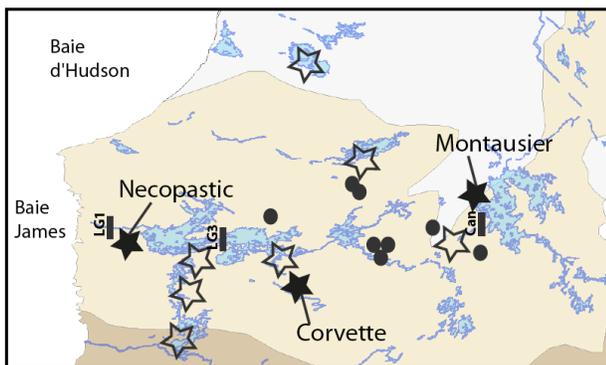
Les crues glacielles qui surviennent dans les hydrosystèmes nordiques sont des événements formatifs majeurs. À la fin de l'hiver, les lacs sont encore recouverts d'un imposant couvert de glace, mais la détérioration thermique de ce dernier n'est souvent pas terminée lorsque la crue survient. Par conséquent, lors de la montée des eaux, la glace encore dense et noire (et donc fortement abrasive), est mobilisée par les différentes forces dynamiques du milieu telles que le courant (en rivière) et le vent (en milieu lacustre). Lorsque la crue atteint un niveau suffisant, les radeaux glaciels de tailles diverses sont portés au contact de la végétation riveraine et peuvent endommager ou détruire cette dernière. Même sur les tiges ligneuses les plus résistantes, les tissus responsables de la croissance radiale (cambium) sont parfois érodés, laissant alors des marques visibles là où la croissance secondaire n'est plus possible. Ces marques, communément appelées « cicatrices glacielles », sont datables par dendrochronologie et nous renseignent sur la nature et l'amplitude des crues printanières passées.

L'information sur l'historique des crues printanières provient de deux variables : 1) le nombre (ou la proportion) d'arbres cicatrisés, et 2) la hauteur moyenne des cicatrices par rapport à un niveau de base. Indépendamment des variations dans la densité des peuplements riverains, plus l'amplitude et la durée de la crue sont importantes, plus la proportion d'arbres touchés devrait être grande et plus la

hauteur des cicatrices devrait être élevée. Cependant, l'interprétation hydroclimatique des chronologies glacielles ne peut être faite sans une analyse fine des processus qui génèrent la crue glacielle elle-même. L'acquisition de cette connaissance constitue la base sur laquelle les indicateurs discrets peuvent être utilisés pour la reconstitution des événements printaniers et qui ont constitué un thème central dans le projet ARCHIVES.

### La rivière Nécopastic

La rivière Nécopastic (bassin versant de 250 km<sup>2</sup>; Figure 1) est un affluent de la Grande Rivière qui termine son cours entre LG1 et LG2. Cette rivière est relativement étroite, de pente faible et s'écoule dans des dépôts sableux d'origine fluvio-glaciaire. Les portions intermédiaires et aval de ce cours d'eau subissent d'importants embâcles de glace au printemps. Ces embâcles surviennent en moyenne une fois à tous les cinq ans, et sont causés par l'obstruction du chenal par des bouchons de glace non dégradée, empêchant la libre circulation de l'eau au moment de la crue. Lorsque ces embâcles surviennent, le refoulement de l'eau en amont du barrage cause des inondations dont la hauteur est bien souvent supérieure au niveau plein bord. La glace non-



**Figure 1. Localisation des chronologies décrites dans le présent chapitre. Les étoiles représentent les chronologies glacielles. Les étoiles vides sont les chronologies glacielles non publiées ou qui ne font pas l'objet d'une description détaillée dans le cadre du présent chapitre. Les cercles noirs représentent les chronologies de densité minimale.**

dégradée peut ainsi être portée au contact de la végétation (épinette noire) et scarifier les arbres exposés.

L'analyse des cicatrices glacielles sur la rivière Nécopastic a permis de mieux connaître les conditions qui mènent à la formation d'embâcles majeurs sur ce cours d'eau. Au total, 15 sites ont été échantillonnés le long du cours d'eau, près de 181 arbres ont été analysés et 444 cicatrices glacielles datées. Boucher *et al.* (2009) ont montré qu'une façon efficace d'extraire un signal régional des chronologies glacielles en rivière est de travailler à l'échelle du bassin versant. C'est pourquoi les auteurs ont développé un indice d'intensité des crues glacielles basé sur la réplique des événements glaciels entre les sites. L'hypothèse sous-jacente est donc la suivante : pour une année  $t$ , plus les conditions sont propices à la formation d'embâcles dans la région, plus un grand nombre de sites présenteront des arbres cicatrisés.

Sur la rivière Nécopastic, l'intensité des embâcles témoigne du rapport entre les forces qui tendent à déloger le couvert de glace et celles qui permettent de le maintenir en place. Boucher *et al.* (2009) ont démontré que les embâcles intenses surviennent lorsque les crues printanières sont anormalement hâtives. Plus les crues surviennent hâtivement, plus les forces hydrodynamiques l'emportent sur la détérioration thermique du couvert de glace, ce qui entraîne son morcèlement. En revanche, de fortes précipitations à la fin de l'hiver viennent, d'une part, alourdir le couvert de glace et, d'autre part, ralentir la dégradation thermique du couvert de glace en raison des propriétés isolantes de la neige. Un couvert non dégradé (et donc plus solide) est difficilement mobilisable par la crue, ce qui favorise la formation de bouchons de glace dans les constrictions. Cette même étude a révélé que les fortes précipitations nivales printanières sont sous le contrôle de grands modes annulaires

de variabilité climatique tels que l'oscillation arctique (AO). Cela signifie que les embâcles qui surviennent localement sur la Nécopastic reflètent grossièrement la dynamique atmosphérique qui prédomine à l'échelle continentale (Boucher *et al.*, 2009; Figure 2).

### Le lac de la Corvette

Le lac de la Corvette est un plan d'eau de bonne taille (env. 10 km de diamètre) et drainant un bassin versant de près de 3500 km<sup>2</sup> dont la plus grande portion est comprise à l'intérieur du réseau de drainage alimentant la centrale LG3. Il est raisonnable d'assumer que les variations interannuelles de niveau d'eau observables au lac de la Corvette ressemblent à celle que l'on observe à LG3, puisque le premier système est compris dans le second.

En raison de la taille du plan d'eau, mais aussi de la dynamique propre aux environnements lacustres, les enregistrements glaciels du lac de la Corvette diffèrent considérablement de ceux de la rivière Nécopastic. Lemay

*et al.* (2008) ont daté 353 cicatrices sur 231 arbres dans le secteur ouest du lac de la Corvette. L'analyse hydroclimatique de la chronologie a montré que les événements glaciels, sur ce lac, sont fortement associés au volume de la crue régionale (*p. ex.* les débits à LG3; Figure 3). En somme, plus la crue régionale est importante, plus les cicatrices sont nombreuses au lac de la Corvette et plus leur hauteur est élevée. En milieu lacustre, il faut savoir qu'il n'y pas (ou très peu) de forces hydrauliques (*p. ex.* le courant) qui agissent sur le couvert de glace pour le morceler, le fractionner ou le déplacer. Au contraire, la glace flotte et se dégrade sur place sous l'effet des températures et du rayonnement solaire. En fait, dans ce contexte, seul le vent peut mobiliser d'immenses radeaux de glace, mais pour cela, le couvert ne peut être ancré dans les zones de faible profondeur. Lors de fortes crues printanières, la glace se libère de ses entraves et peut parvenir plus aisément au contact de la végétation.

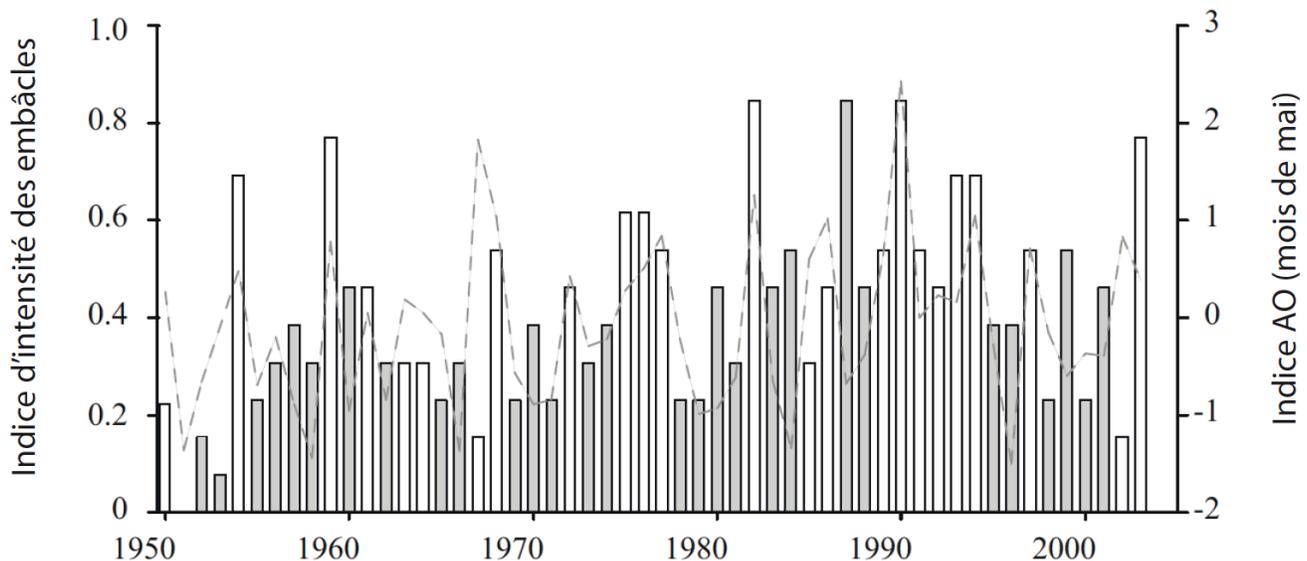
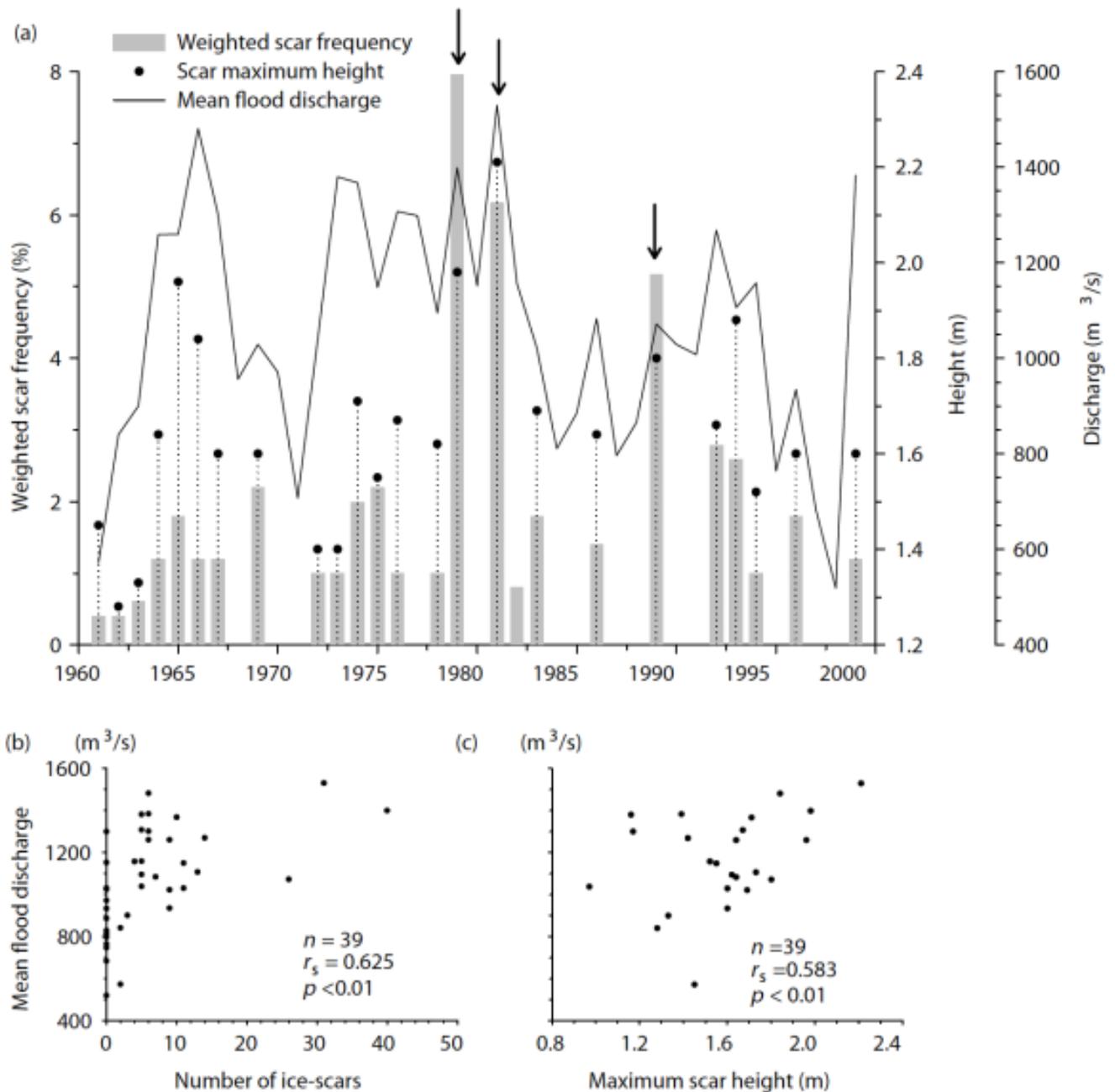


Figure 2. Relation entre l'intensité des embâcles de glace ( $I_t$ ) sur la rivière Nécopastic et l'indice d'oscillation arctique (AO) entre 1950 et 2003. L'indice  $I_t$  exprime la proportion de sections fluviales ayant enregistré une crue glacielle à l'année  $t$ .



**Figure 3.** Lien entre la chronologie glacielle du lac de la Corvette (a) et le débit moyen de la crue printanière à LG3. Relation entre la fréquence de cicatrices (b), la hauteur des cicatrices (c) et le débit moyen de crue à LG3.

Cette forte correspondance entre l'intensité des crues glacielles et le volume d'eau printanier à l'échelle régionale nous a permis d'utiliser ces indicateurs discrets comme marqueurs de l'amplitude des crues printanières passées.

### Reconstitution des crues printanières au réservoir Caniapiscau

Puisque les cicatrices glacielles constituent de bons indicateurs des conditions hydrologiques régionales, Boucher *et al.* (2011) ont développé un cadre méthodologique permettant l'utilisation directe de ces indicateurs pour la

reconstitution quantitative des écoulements printaniers dans le Haut-Boréal.

Cette nouvelle approche a été testée dans le but de reconstituer les apports printaniers à Caniapiscou depuis 1850. La méthode fait intervenir deux grands types d'indicateurs dendrochronologiques : 1) des indicateurs glaciels discontinus échantillonnés sur des arbres directement exposés aux fluctuations d'un plan d'eau et 2) des indicateurs continus provenant d'arbres situés de manière distale par rapport au plan d'eau. Les indicateurs glaciels ont été échantillonnés sur le lac Montausier, situé à quelques kilomètres à l'ouest du réservoir Caniapiscou. Au total, 134 tiges d'épinette noire ont été récoltées et 304 cicatrices datées. Les indicateurs continus sont des séries de densité minimale, référant à la portion du cerne qui est formée au printemps. Treize sites ont été échantillonnés au total et autant de séries de densité ont été constituées.

Les deux types d'indicateurs ont été intégrés dans un modèle de régression non-linéaire afin de produire une reconstitution des apports hydrauliques à la centrale Caniapiscou depuis 1850 (même si cette date est bien antérieure à l'établissement de la centrale elle-même). La reconstitution tient compte non seulement des erreurs attribuables au modèle

de reconstitution, mais également de l'incertitude liée aux séries dendrochronologiques elles-mêmes. La reconstitution montre que l'hydrologie régionale printanière dans la région de Caniapiscou peut être découpée en trois grandes phases distinctes (Figure 4). Une première phase (intermédiaire) entre 1850 et 1900 caractérisée par des apports oscillant autour de  $1000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . Puis, entre 1900 et 1945 survient une seconde phase caractérisée par de faibles apports (entre  $750$  et  $900 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) et une faible variabilité interannuelle. Enfin, on note une augmentation considérable des apports printaniers depuis 1950, les apports devenant plus variables, mais aussi plus abondants (moyenne de  $1200 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ). Puisque ce sont les apports du mois de mai qui ont été reconstitués, cette tendance à l'augmentation souligne le fait que, depuis une cinquantaine d'année, la crue printanière tend à se produire de manière plus hâtive.

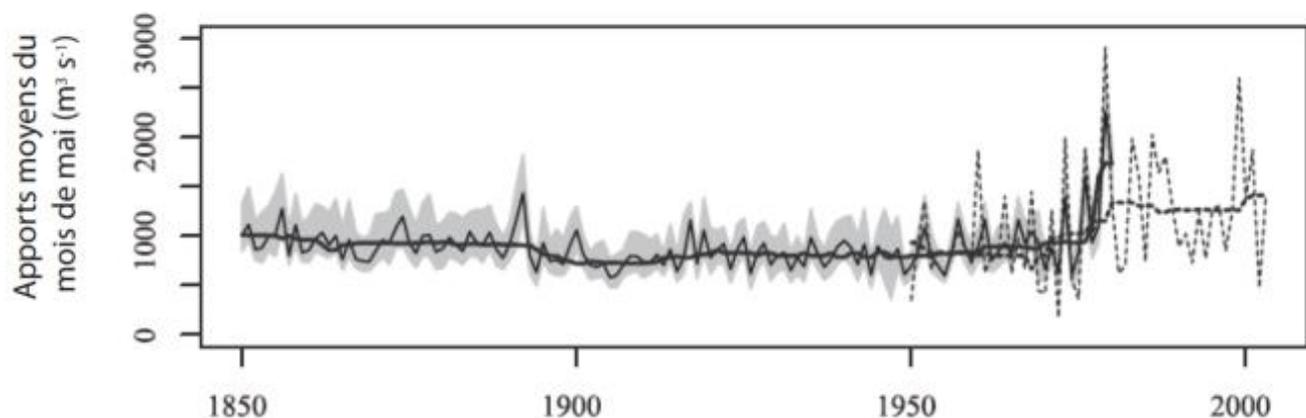


Figure 4. Reconstitution quantitative des apports printaniers (mois de mai) à partir de la chronologie glacielle du lac Montausier et de mesures de densité minimale du bois (Figure 1). Le trait pointillé représente les apports observés, tandis que le trait plein correspond aux apports reconstitués. Les intervalles de confiance à 90% sont en gris pâle.

### Vers une reconstitution des crues printanières à l'échelle régionale

Les chronologies glacielles qui ont été construites dans le cadre du projet ARCHIVES, qu'elles proviennent du milieu lacustre ou du milieu fluvial, contiennent un signal hydroclimatique clair. En jumelant ces chronologies au réseau existant (*p. ex.* le lac à l'eau Claire Bienville) ainsi qu'aux chronologies qui ne sont pas encore publiées (lac Hervé, Polaris, Miron, Mirabelli, Rodayer), le nouveau réseau de chronologies d'événements discrets couvrira l'ensemble du bassin versant de la Grande Rivière. Il est donc désormais possible, à partir de ce réseau utilisé conjointement (ou non) avec des chronologies continues (largeur de cerne, densité, isotopes), de produire des reconstitutions de l'amplitude passée des crues printanières à vaste échelle spatiale (*p. ex.* les multi-bassins). L'avantage de ces reconstitutions sera d'offrir un portrait global et spatialement intégré des écoulements printaniers à l'échelle du Moyen-Nord québécois, et de mettre en lumière les différents contrastes (ou phases) qui pourraient exister entre l'amont (est) et l'aval (ouest) du bassin versant de La Grande Rivière.

### Conclusion

Les crues printanières sont des événements discrets qui surviennent lors de la fonte des neiges (mai, juin) au Moyen-Nord québécois. On les qualifie de discrets parce qu'ils ont « un début et une fin » et donc que leur occurrence est fixée dans le temps. En raison de cette caractéristique, les indicateurs classiques utilisés en dendrochronologie (largeur, densité, isotopes) plutôt évocateurs des bilans ou moyennes saisonnières sont moins bien adaptés pour décrire les caractéristiques de l'hydrogramme printanier, et donc, dans le cas particulier du projet ARCHIVES, pour produire des reconstitutions de ces paramètres couvrant les derniers siècles. Afin de reconstituer les événements printaniers, nous avons plutôt

misé sur l'utilisation d'indicateurs dendrogéomorphologiques discrets (cicatrices glacielles) qui permettent de dater et d'évaluer l'intensité des crues là où elles surviennent, c'est-à-dire dans les lacs et rivières du Haut-Boréal.

Nous avons montré que les chronologies glacielles construites en lac et en rivière ne livrent pas la même information hydrologique. De manière générale, les chronologies glacielles construites en lac décrivent l'amplitude et le volume de la crue printanière, alors que les chronologies construites en rivière renseignent sur le moment, ou le caractère hâtif de la crue. Cela est dû au fait que les processus menant à l'enregistrement des événements par la végétation ne sont pas les mêmes dans les deux environnements. En lac, la crue doit être imposante pour détacher et soulever le couvert de glace au niveau de la végétation. Par contre, en rivière, la crue doit être hâtive et survenir avant la dégradation thermique du couvert, ce qui mène à la formation d'embâcles de glace. Or, que les chronologies d'événements discrets permettent de reconstituer le moment ou l'amplitude des crues printanières, l'information livrée est très utile pour la gestion de la ressource hydrologique dans un contexte de production hydroélectrique et de changement climatique. L'expertise développée dans le cadre du réseau ARCHIVES ainsi que les nombreuses chronologies construites dans ce contexte permettront bientôt de produire des reconstitutions des caractéristiques de la crue printanière à très vaste échelle spatiale, permettant ainsi d'étudier les patrons de fluctuations des ressources hydriques dans le Haut-Boréal québécois.

<https://doi.org/10.4095/328083>

### Références

- Boucher, É., Bégin, Y. et Arseneault, D., 2009. Hydroclimatic analysis of mechanical breakups reconstructed from tree-rings, Necopastic Watershed, northern Québec, Canada, *Journal of Hydrology*, 375: 373-382.

Boucher, É., Bégin, Y. et Arseneault, D., 2010. Dendrohydrologique en milieu boréal. In Payette, S. ; Fillion, L. eds. La dendroécologie : principes, méthodes et applications, chapitre 20, pp. 573-592.

Boucher, É., Ouarda, T.B.M.J., Bégin, Y. et Nicault, A., 2011. Spring flood reconstruction from continuous and discrete tree ring series. *Water Resources Research*, 47, W07516, doi :10.1029/2011.

Boucher, É., Bégin, Y., Arseneault, D. et Ouarda, T.B.M.J., 2012. Long-term and large-scale river ice processes. in Church, M., Biron, P., Roy, A. *Gravelbed Rivers : Processes, Tools, Environments*, John Wiley & Sons, chapitre 39, pp. 546-555.

Lemay, M. et Bégin, Y., 2008. Hydroclimatic analysis of an ice-scar tree-ring chronology of a high-boreal lake in Northern Québec, Canada. *Hydrology Research*, 39: 451-464.



**Forêt récemment incendiée entre le reservoir Caniapiscou et Shefferville.  
Photo de C. Bégin. Photo RNCAN 2021-127**

## 14. Analyse des changements de régimes dans les séries temporelles issues de la dendrochronologie

Luc Perreault, Antoine Nicault, Étienne Boucher, Dominique Arseneault et Fabio Gennaretti

### Résumé

Le problème de changements de régime dans les séries hydrométéorologiques a suscité beaucoup de questionnements à Hydro-Québec. Les débits et les précipitations annuels de certains bassins versants québécois montrent en alternance des séquences d'années humides et d'années sèches. Ces variations doivent être prises en compte dans le processus de prévision hydrologique d'Hydro-Québec. Pour situer ces ruptures observées dans un contexte plus large dans le temps, l'un des objectifs du projet ARCHIVES était d'étudier les changements de « régimes » historiques présents dans les séries chronologiques issues de la dendrochronologie. Pour ce faire, nous nous sommes appuyés sur des modèles de type mélanges de lois de probabilité, auxquels nous avons ajouté une dépendance temporelle. Ces modèles sont particulièrement adaptés pour représenter des jeux de données où les observations peuvent provenir de plusieurs populations statistiques distinctes.

La perspective bayésienne a été adoptée pour la mise en œuvre de cette approche. Elle a été appliquée à diverses séries temporelles produites dans le projet ARCHIVES. Ces applications nous ont permis d'identifier des changements de régimes qui sont cohérents spatialement, ainsi que des ruptures qui correspondent à des événements particuliers survenus historiquement, notamment des changements brusques à la baisse du niveau des températures estivales qui coïncident avec de fortes éruptions volcaniques. Dans ce chapitre, nous décrivons l'approche et nous l'illustrons à partir d'une longue série temporelle de températures estivales et d'apports en eau reconsti-

tués à partir de l'épaisseur de cernes chez l'épinette noire (*Picea mariana* Mill. BSP).

### Abstract

The problem of switching regimes in hydrological time series led to serious questioning in Québec during the last decades. In fact, when we examine annual inflow and precipitation time series of a number of Québec watersheds, we can identify alternating sequences of high and low values. These variations must be taken into account in the hydrological forecasting process. However, since we only have limited information (no more than five decades of observations), we may examine different natural archives such as trees to study hydroclimatic variability over a longer period. One of the objectives of the ARCHIVES project was therefore to study hydrometeorological regime changes in time series reconstructed using dendrochronology. In this chapter, we address the problem of changepoint analysis in such time series by using finite mixtures of distributions. Mixtures of distributions become natural models to represent datasets in which observations may originate from several distinct statistical populations.

The problem is treated from a Bayesian perspective. Our approach was applied to several time series reconstructed in the ARCHIVES project. These applications allowed us to identify regime changes that are spatially consistent, as well as historical changepoints that correspond to specific events such as abrupt changes in summer temperatures that coincide with strong volcanic eruptions. In this chapter, we describe the approach and illustrate it by analysing time series of summer temperatures

and water inflows reconstructed using black spruce (*Picea mariana* Mill. BSP) tree-rings.

### Le passé hydrométéorologique est-il garant de l'avenir ?

Jusqu'à tout récemment la prévision hydrologique à moyen terme à Hydro-Québec s'appuyait sur la moyenne historique des apports naturels. Cette stratégie suppose en particulier qu'il n'existe aucune persistance interannuelle et que les observations récentes (et futures) s'inscrivent dans la continuité des précédentes en termes de distribution de probabilité. Or, les chroniques d'apports printaniers à la base de certains des modèles de prévision pour des bassins-versants du nord-est de la péninsule Québec-Labrador, montrent des séquences d'années consécutives de faible et de forte hydraulité (Figure 1). La rupture du milieu des années 1980 correspond au début de la plus importante période de faible hydraulici-

té observée dans les séries d'apports historiques d'Hydro-Québec.

Dès le début des années 90, après cinq années d'apports faibles, l'entreprise s'est interrogée sur la validité de ses méthodes de prévision qui reposaient alors sur la moyenne historique des apports en eau. L'hypothèse de stabilité des caractéristiques statistiques des séries d'apports est-elle toujours valide ? Doit-on négliger la possible présence de ruptures lors de la modélisation des apports en eau d'Hydro-Québec ? La moyenne historique demeure-t-elle la meilleure prévision de l'apport des années à venir ? Voilà quelques questions qui ont grandement orienté les travaux de recherche des dernières années à Hydro-Québec.

À l'issue de plusieurs études et à la suite de deux importantes consultations menées auprès d'experts en statistiques, en hydrologie et en climatologie, un consensus s'est

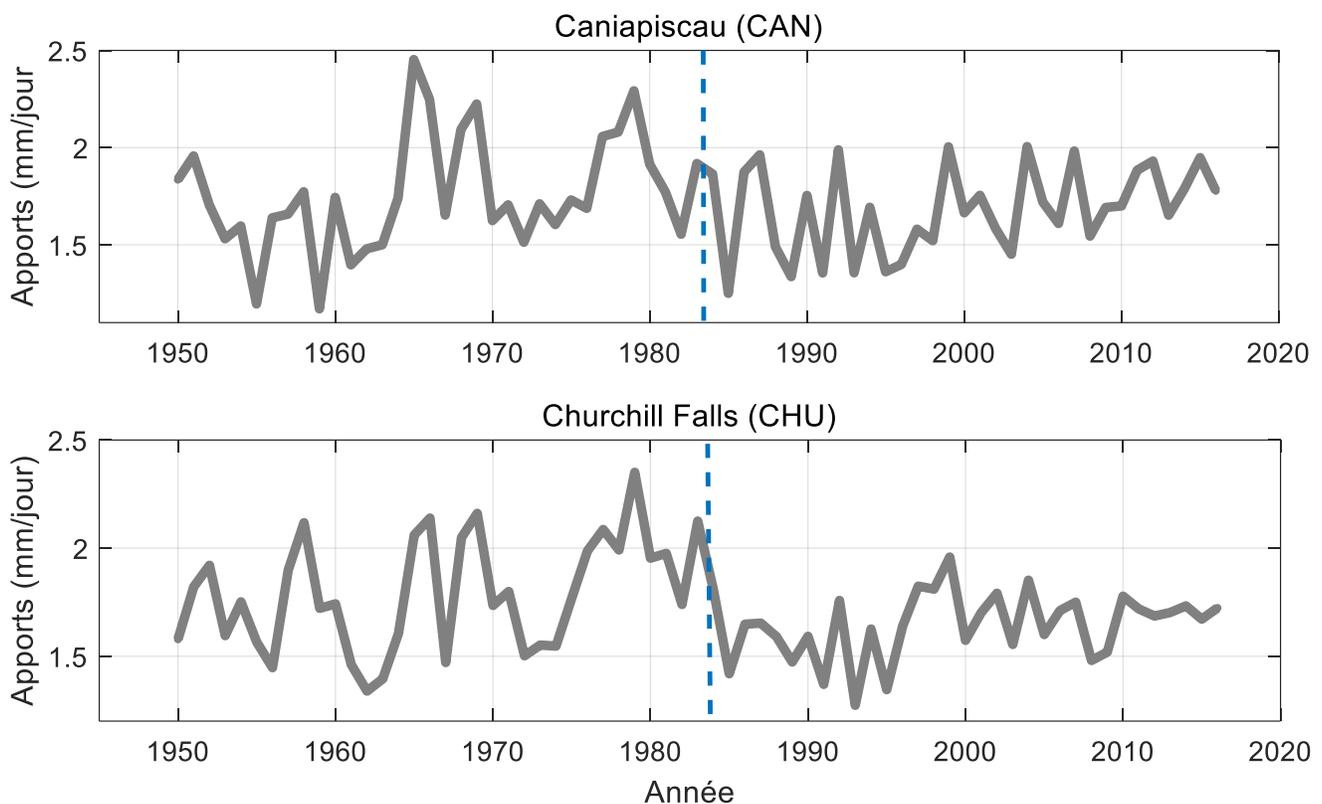


Figure 1. Apports en eau annuels exprimés en mm/jour pour les bassins versants Caniapiscou (CAN) et Churchill Falls (CHU).

finalement dégagé parmi les prévisionnistes et les décideurs de la direction responsable de la planification de la production : lors de la prévision des apports et de la prise de décision qui s'ensuit, on ne peut rejeter, hors de tout doute raisonnable, l'hypothèse que les régimes hydrologiques et climatiques aient pu changer dans le passé. C'est pourquoi, la division Hydro-Québec Production consent des efforts considérables pour développer et mettre en opération des méthodes permettant de prendre en compte d'éventuels changements de régime hydrométéorologique pouvant résulter de variations climatiques. Aujourd'hui, l'unité responsable de la prévision hydrologique utilise périodiquement et en mode opérationnel des modèles non stationnaires pour identifier, analyser et anticiper des changements dans les chroniques de données hydrométéorologiques.

L'information hydrométéorologique disponible étant limitée dans le temps et dans l'espace, il convient de valoriser toute l'information disponible pour analyser et prévoir les variations hydrométéorologiques. En effet, au Québec, les séries temporelles de données hydrométéorologiques sont très courtes, les relevés hydrométéorologiques ne s'étendant que très rarement au-delà de 50 années. Par ailleurs, particulièrement au Nord, on dispose de très peu de stations de mesure. Pourrait-on alors étudier la variabilité hydroclimatique à l'aide de reconstitutions de longues séries climatiques construites à partir d'archives naturelles, comme l'épaisseur des cernes d'arbres? C'est l'un des objectifs du projet ARCHIVES.

La dendrochronologie est une méthode en plein essor, susceptible de témoigner en certaines régions, et c'est le cas du Québec, de la variabilité passée du climat, voire directement de l'hydrologie. Les éléments quantitatifs qu'elle fournit sur des périodes pluri-séculaires peuvent être reliés statistiquement sur les périodes récentes aux principales variables mé-

téorologiques qui conditionnent l'aléa d'hydraulicité (Nicault *et al.*, 2014; Chapitre 17). L'exploitation de ces données, en particulier l'analyse des changements de régime dans les chroniques hydrométéorologiques dérivées de la dendrochronologie, présente donc un grand intérêt, ne serait-ce que pour affiner le choix des modèles statistiques utilisés pour représenter les séries de données hydrométéorologiques.

### Mélanges de lois avec structure de dépendance temporelle

Les premiers modèles formels à avoir été considérés à Hydro-Québec pour analyser les séries temporelles hydrométéorologiques sont ceux qui supposent que la distribution de probabilité des observations voit ses paramètres changer subitement à un seul instant inconnu (*p. ex.* Perreault *et al.*, 2000). Ces modèles de rupture supposent que les variables aléatoires étudiées se comporteront indéfiniment comme celles des dernières années (dernier régime). Ainsi, on ne peut anticiper l'occurrence d'une future rupture, et à ce titre, ces méthodes n'ont qu'une portée réduite en matière de prévision. Par ailleurs, il est plus raisonnable de supposer que les séries hydrologiques et météorologiques sont caractérisées par une succession peu régulière d'épisodes de faibles et de fortes valeurs. Un tel processus peut être représenté par des modèles de mélanges de lois de probabilité auquel une structure de dépendance temporelle est ajoutée. Ces modèles sont aussi appelés modèles de Markov à états cachés, « Hidden Markov Models » (Thier et Kuczera, 2000; Évin *et al.*, 2011).

Les mélanges de lois sont des modèles bien adaptés lorsque l'on s'intéresse à la modélisation de phénomènes hétérogènes, où plusieurs populations aux caractéristiques distinctes sont observées. Les paramètres des composantes du mélange de lois peuvent alors être interprétés « physiquement » (ici, les régimes). Ils fournissent une solution rigoureuse

au problème de modélisation et d'analyse d'échantillons non homogènes.

### Mélange de lois standard

Le mélange de distributions de probabilité est un modèle paramétrique qui repose sur l'hypothèse que chaque observation  $y_t$  qui compose l'échantillon  $\mathbf{y} = (y_1, \dots, y_n)$  provient, avec probabilité  $w_i$ , de l'une de  $K$  distributions distinctes  $f(y_t | \theta_i, d)$ . Ici,  $d$  indique la famille de loi de probabilité (*p. ex.* loi normale) et  $\theta_i$  désigne le vecteur de paramètres de cette loi (pour la loi normale, ce vecteur est composé de la moyenne et de la variance). La densité de probabilité d'une observation donnée  $y_t$  s'exprime alors de la manière suivante :

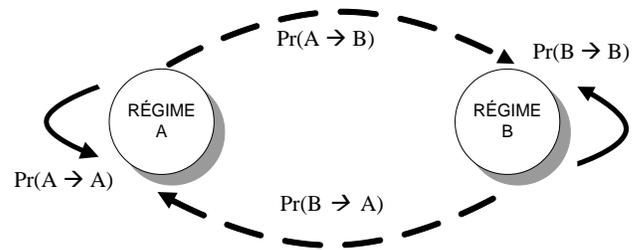
$$g(y_t | \mathbf{w}, \boldsymbol{\theta}, d) = \sum_{i=0}^{K-1} w_i f(y_t | \theta_i, d) \quad (1)$$

où  $\mathbf{w} = (w_0, \dots, w_{K-1})$  est le vecteur contenant les  $K$  probabilités associées à chacune des composantes du mélange et  $\theta_i$  le vecteur de paramètres spécifiques à la composante  $i$ .

L'expression (1) n'est valide que lorsqu'on suppose que les observations sont indépendantes. Pour des séries ayant un comportement similaire à celui des apports en eau présentés à la figure 1, le mélange de lois (1) n'est pas tout à fait adéquat puisqu'il n'exprime pas la dépendance qui semble présente dans ce type de série chronologique. Pour bien représenter ce phénomène, nous introduisons dans le modèle de mélange une persistance markovienne. Cela est décrit dans la section qui suit.

### Mélange de lois avec dépendance (modèle de Markov à états cachés)

Les mélanges de lois sont particulièrement intéressants pour les séries d'observations qui semblent exhiber des séquences de fortes et de faibles valeurs (les régimes). Pour ce type de comportement, la persistance devient alors un élément important dont il faut tenir compte dans le modèle. Elle est intégrée au mélange de lois en considérant au premier niveau du modèle une relation markovienne qui spécifie les probabilités de transition d'un état à l'autre. Le schéma de la figure 2 illustre le premier niveau d'un modèle de mélange avec dépendance qui serait constitué de seulement deux régimes, les régimes A et B.



**Figure 2. Représentation schématique du premier niveau d'un modèle de mélange à deux composantes avec dépendance.**

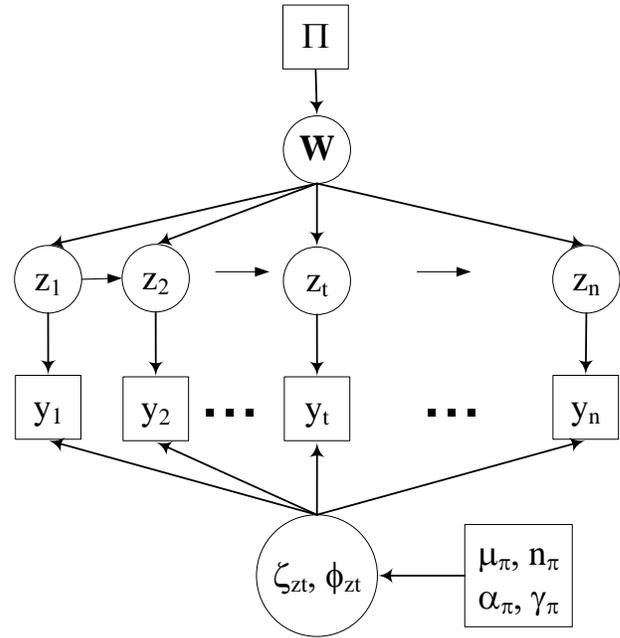
Cette composante de premier niveau, où le mécanisme qui gère les changements d'états est formalisé, est définie en introduisant des variables cachées (ou variables latentes),  $z_1, \dots, z_n$ , qui évoluent dans le temps selon un processus de Markov homogène. Pour un modèle à deux composantes, ces variables évoluent donc dans le temps selon une chaîne de Markov à 2 états avec une matrice de transition  $\mathbf{W} = \{w_{ij}\}$  définie comme suit :

$$W = \begin{pmatrix} W_{AA} & W_{AB} \\ W_{BA} & W_{BB} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Pr(z_t = A | z_{t-1} = A) & Pr(z_t = B | z_{t-1} = A) \\ Pr(z_t = A | z_{t-1} = B) & Pr(z_t = B | z_{t-1} = B) \end{pmatrix} \quad (2)$$

Le second niveau de la hiérarchie représente le processus qui génère les observations connaissant le régime. Pour une année donnée  $t$ , sachant que le régime courant est  $z_t = i$  (p. ex.  $i = A$  pour le régime « faible » et  $i = B$  pour le régime « fort »), l'observation  $y_t$  est générée à partir d'une loi de probabilité  $f$  avec paramètres  $\theta_i$ . Nous considérons ici des lois de probabilité à 2 paramètres, la moyenne  $\zeta_i$  et la précision  $\phi_i$  (l'inverse de la variance). Ainsi,  $\theta_i = (\zeta_i, \phi_i)$ .

Il est utile de représenter un modèle hiérarchique de ce type à l'aide d'un diagramme acyclique directionnel (DAG) qui illustre la structure de dépendance entre les variables constitutives. La figure 3 présente le schéma correspondant au modèle de mélange à 2 régimes avec dépendance. Dans ce diagramme, les nœuds représentent les variables. Ceux-ci prennent deux formes : soit un cercle, auquel cas la valeur de la variable est inconnue et celle-ci est sujette à estimation, soit un carré, ce qui signifie que la valeur est supposée connue. Les flèches liant deux nœuds indiquent la présence d'une relation entre les variables correspondantes ainsi que sa direction. Dans le schéma de la figure 3, on constate que le régime  $z_t$  dépend des probabilités de transition  $W$  ainsi que du régime de la période précédente. De manière analogue, l'observation  $y_t$  dépend du régime courant  $z_t$  et de la loi de probabilité  $f$  de paramètres  $\zeta_i$  et  $\phi_i$  (moyenne et précision), ces derniers étant spécifiques à ce régime. Le dernier niveau du schéma représente les paramètres des lois *a priori* qui doivent être fixés dans une analyse bayésienne (les paramètres  $\Pi$ ,  $\mu_\pi$ , etc.).

Le modèle à deux composantes comporte 6 paramètres qui doivent être estimés :  $\theta = (\zeta_A, \phi_A, \zeta_B, \phi_B, W_{AA}, W_{BB})$ . De plus, il comprend  $n$  variables d'états discrètes,  $z_1, \dots, z_n$ , qui sont



**Figure 3. Représentation schématique du modèle de mélange à deux composantes avec dépendance markovienne.**

aussi sujettes à estimation. Signalons toutefois que ces quantités ne sont pas des paramètres supplémentaires. Il s'agit de quantités inconnues au même titre que les termes d'erreurs d'un modèle probabiliste (p. ex. un modèle de régression linéaire). Mentionnons que le nombre de paramètres augmente rapidement avec le nombre de composantes (régimes). Cela a bien-sûr une incidence sur l'incertitude des estimations.

Les détails techniques concernant les lois *a priori* et l'estimation bayésienne de ce type de modèle de mélange sont présentés en détail dans Évin *et al.* (2011).

### Application aux températures estivales et aux apports en eau reconstitués

Cette section vise à illustrer l'application des modèles de mélanges de lois avec dépendance. Nous considérons ici une longue série de températures estivales (Gennaretti *et al.*, 2014) ainsi que quatre séries d'apports annuels (Nicault *et al.*, 2014) reconstitués à partir de l'épaisseur des cernes. Ces

séries sont décrites respectivement aux chapitres 17 et 18.

Avant de présenter les résultats de cette application, il convient d'abord de discuter brièvement de certains aspects techniques de la mise en œuvre de notre approche, notamment le choix des distributions *a priori* ainsi que le critère adopté pour sélectionner le meilleur modèle de mélange.

### Spécification des lois *a priori*, échantillonnage de Gibbs et sélection de modèle

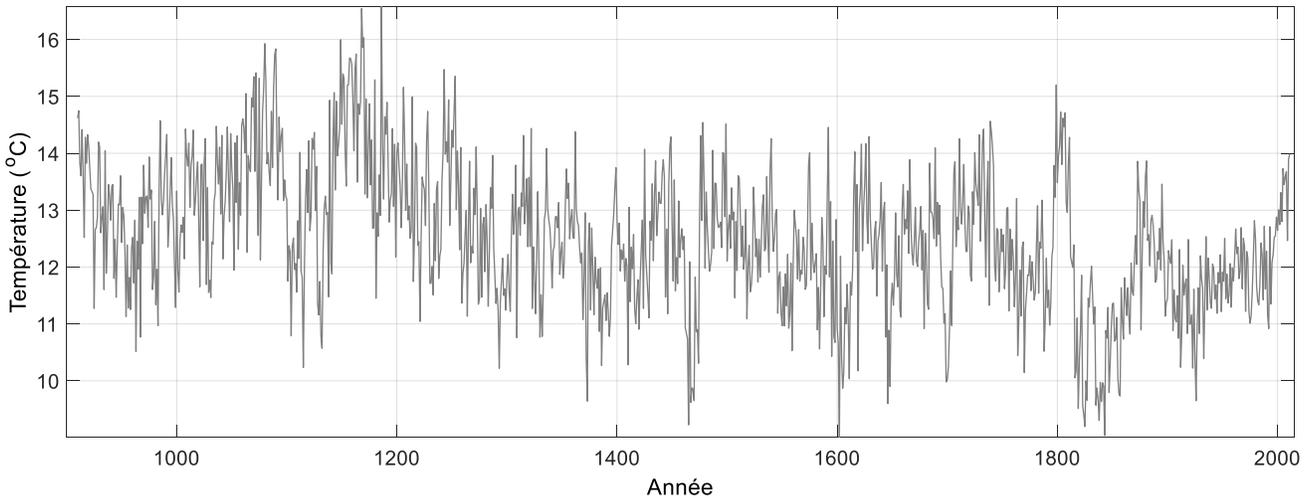
Selon le nombre de composantes et le type de dépendance, il faut spécifier les lois *a priori* de plusieurs paramètres. Nous avons considéré des lois *a priori* assez diffuses pour traduire le fait que nous disposions de peu d'information *a priori* sur les paramètres des modèles. Nous avons, en quelque sorte, laissé parler les données par elles-mêmes. Les lois *a priori* sont identiques pour chaque composante des mélanges. La technique utilisée est celle de Évin *et al.* (2011). Pour estimer les paramètres des modèles nous avons recours à des méthodes de simulation Monte-Carlo par chaînes de Markov (MCMC). Plus précisément, nous utilisons l'algorithme de Gibbs dont les détails techniques pour la mise en œuvre des modèles de mélanges de lois employés ici sont aussi présentés dans Évin *et al.* (2011).

L'application des mélanges de lois nécessite d'effectuer un choix de modèle. Combien de composantes doit-on considérer?

Quelle famille de lois fournit la meilleure adéquation aux données? Il existe plusieurs critères d'information dont le but est de choisir le modèle statistique, parmi un ensemble de modèles possibles, représentant le mieux possible les observations. Nous adoptons ici le critère de Schwarz (1978). Lorsque le vrai processus générateur de données se trouve dans cet ensemble et que l'échantillon est assez grand par rapport au nombre de paramètres, le rôle de ce critère est de l'identifier parmi toutes les possibilités contenues dans l'ensemble. Ce critère contient une pénalité pour le nombre de paramètres qui interviennent dans les modèles. Il prend ainsi en compte le principe de parcimonie qui consiste à décrire les données avec le plus petit nombre de paramètres possible.

### Longue série de températures estivales reconstituées

Les températures estivales (juillet-août) ont été reconstituées à partir de longues séries d'épaisseurs de cernes (voir détails au chapitre 18 ainsi que dans Gennaretti *et al.* (2014)). Cette série chronologique est présentée à la figure 4. Nous observons que cet échantillon semble hétérogène, car formé de séquences plus ou moins longues de températures faibles et élevées. Ces observations semblent résulter de « processus » distincts. C'est pourquoi les mélanges de lois de probabilité avec dépendance sont ici tout indiqués.



**Figure 4. Chronique de températures estivales (juillet-août) reconstituées issue des travaux de Gennartti et al. (2014).**

Douze modèles ont été appliqués à la série temporelle de températures reconstituées (Figure 4). Nous avons considéré les modèles constitués de une à six composantes (régimes) et supposé deux lois de probabilité, la loi normale et la loi lognormale. Pour chacune des 12 configurations, le critère de Schwarz (1978) a été évalué de manière à identifier le modèle qui représente le mieux ces données de températures reconstituées. Ces valeurs sont données au tableau 1. Les résultats montrent d'abord, quel que soit le nombre de composantes considéré, que la loi normale devrait être privilégiée par rapport à la loi lognormale. Cela n'est pas étonnant, l'hypothèse de normalité étant très souvent utilisée pour des observations de températures dans les études en météorologie et en climatologie. Le critère de Schwarz indique par ailleurs que quatre composantes sont nécessaires pour bien représenter la série de températures reconstituées (valeur maximale du critère).

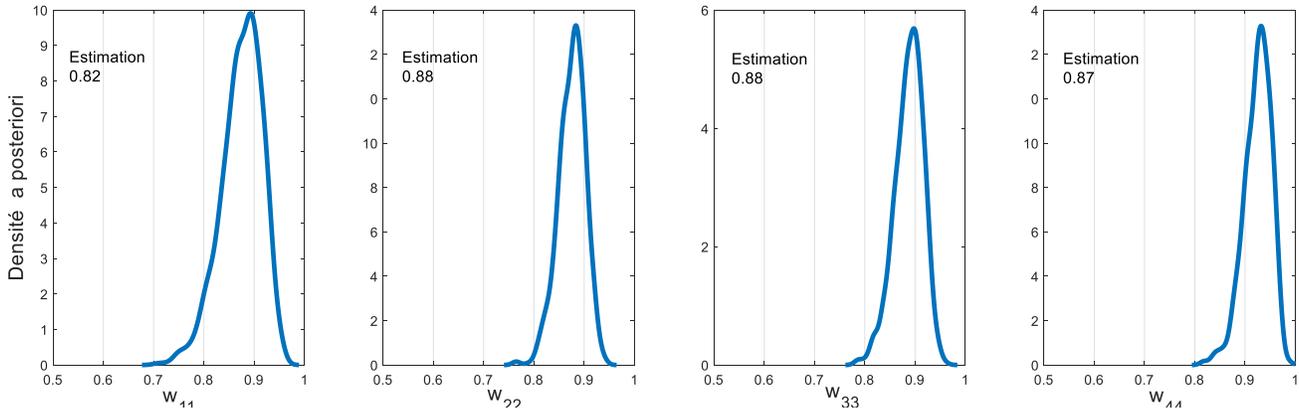
Les figures 5 et 6 présentent les distributions *a posteriori* de certains paramètres du modèle choisi, le mélange de quatre lois normales avec dépendance markovienne. On y retrouve les distributions des probabilités de transition  $w_{jj}$  ( $j = 1, \dots, 4$ ) ainsi que des moyennes et des écarts-types de chacune des

quatre composantes du mélange. On tire principalement de ces résultats que :

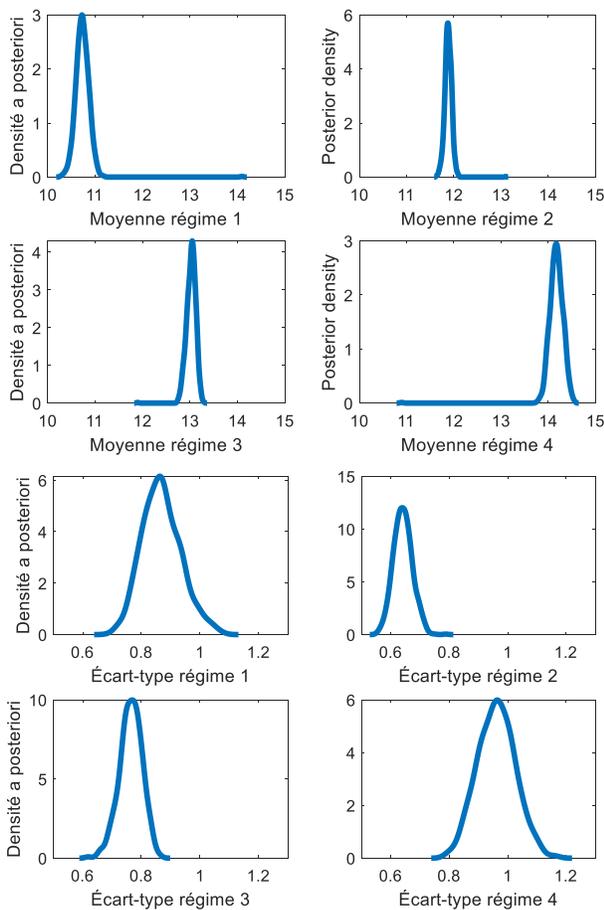
- les distributions de  $w_{jj}$  affichent toutes un mode bien défini (Figure 5). Les valeurs estimées (espérances *a posteriori*) sont toutes supérieures à 0,80, ce qui signifie que les températures reconstituées affichent une forte persistance in

**Tableau 1. Critère de Schwarz (1978) pour les douze modèles de mélanges lois avec dépendance appliqués à la longue série de températures reconstituées. Le modèle ayant la plus grande valeur du critère de Schwarz doit être privilégié.**

N. de regimes	Loi normale	Loi lognormale
1	-1810	-1813
2	-1618	-1624
3	-1546	-1552
4	-1520	-1523
5	-1545	-1545
6	-1585	-1585



**Figure 5. Distributions *a posteriori* des probabilités de transition du modèle de mélanges de lois normales à 4 composantes estimé à partir des températures estivales reconstituées.**

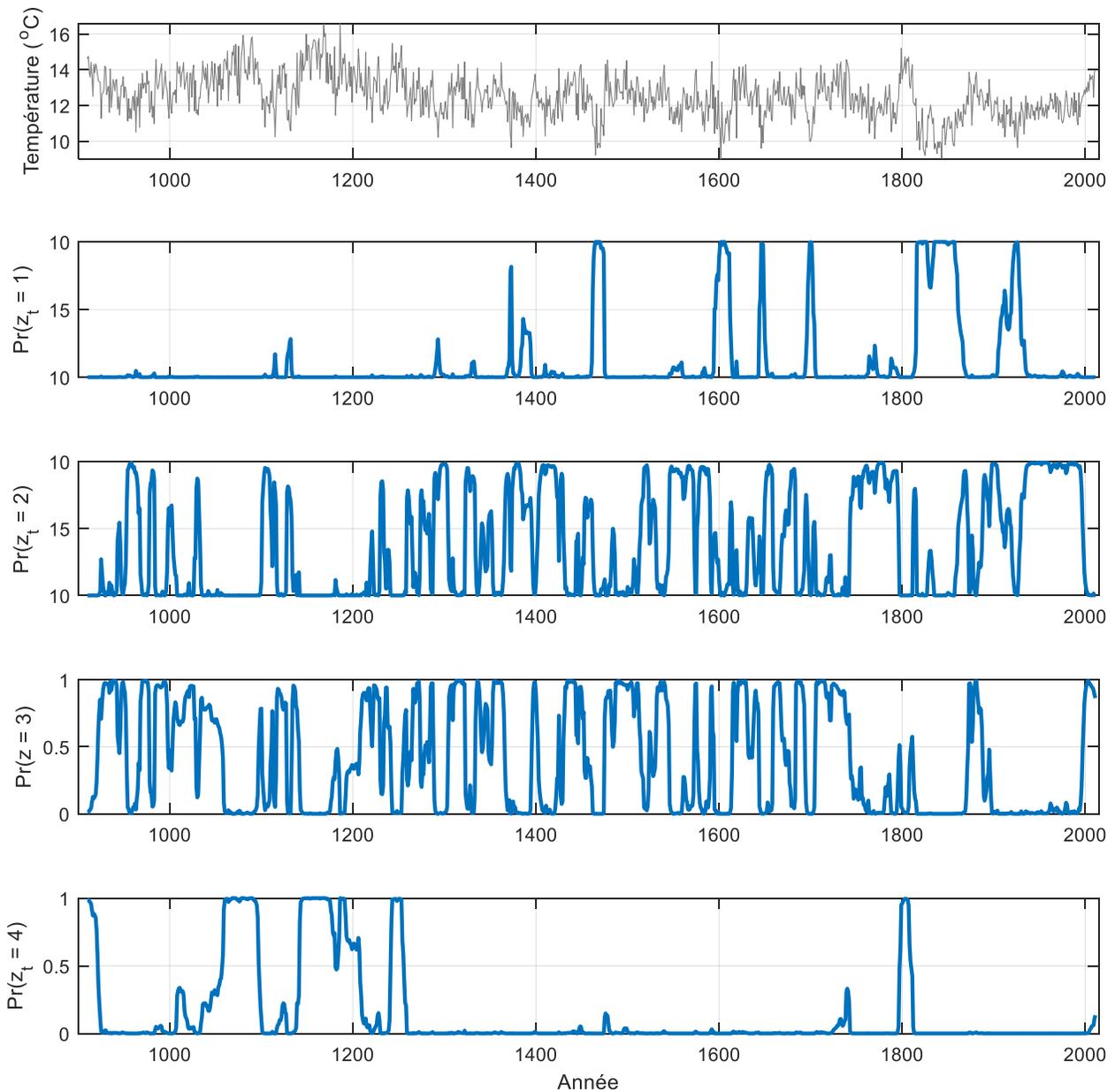


**Figure 6. Distributions *a posteriori* des moyennes et des écarts-types des lois de probabilité formant le mélange de lois normales à 4 composantes estimé à partir des températures estivales reconstituées.**

terannuelle : une fois dans un régime donné, il y a de forte chance d'y rester. Mentionnons, par ailleurs, que les lois *a priori* des probabilités de transition étaient toutes uniformes (lois non informatives). Les résultats obtenus montrent bien que la prise en compte des observations vient modifier considérablement l'état des connaissances *a priori* sur ces paramètres.

- les distributions *a posteriori* des paramètres de moyenne sont très différentes d'un régime à l'autre et ne se chevauchent pas (Figure 6). Elles admettent des espérances *a posteriori* respectives de 10,7 °C, 11,9 °C, 13,0 °C et 14,2 °C. Cela indique que les quatre régimes sont bien distincts en regard de la température moyenne. Les distributions des écarts-types se chevauchent quelque peu, ce qui semble indiquer que la différence entre les variances est moins importante que celle des moyennes des quatre composantes.

La figure 7 présente le tracé des probabilités d'occurrence *a posteriori* de chacune des 4 composantes alors que la figure 8 illustre la classification optimale des températures reconstituées obtenues à l'aide du modèle. En examinant ces graphiques, on pourrait diviser



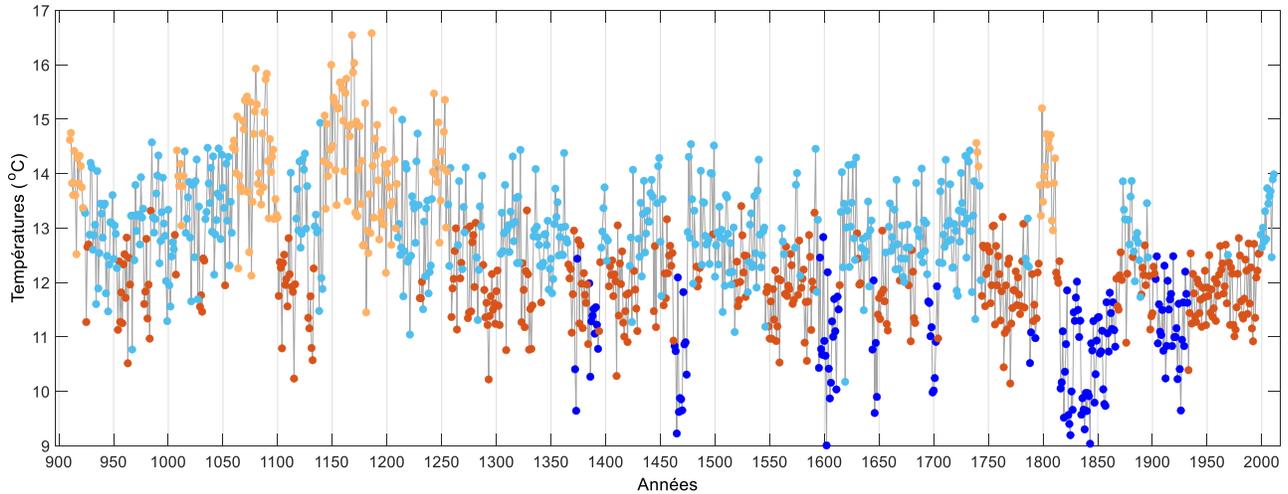
**Figure 7. Probabilité d'appartenance à chacun des régimes de température selon le modèle de mélange de quatre lois normales avec dépendance markovienne.**

la série en plusieurs segments de régimes de température historiques distincts. Évidemment, compte tenu de l'incertitude inhérente à l'estimation du modèle, cette partition pourrait sembler quelque peu hasardeuse. Toutefois, les changements de régime les plus importants (ceux survenus début 1200 et début 1800) coïncident très bien avec de fortes éruptions volcaniques qui, il est bien connu, peuvent induire une chute marquée des températures.

Nous invitons le lecteur à consulter Gennaretti *et al.* (2014) qui traitent de ce sujet.

#### Séries d'apports en eau annuels reconstitués

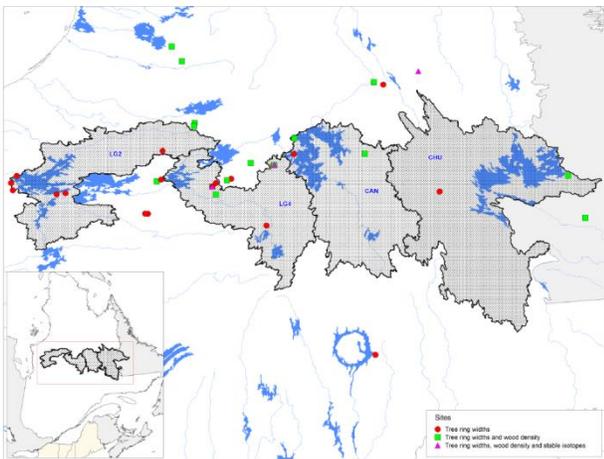
Les apports annuels des bassins versants La Grande 2 (LG2), La Grande 4 (LG4), Caniapiscou (CAN) et Churchill Falls (CHF) ont été reconstitués à partir de séries d'épaisseurs de cernes (voir détails au chapitre 17 ainsi que dans Nicault *et al.* (2014)). Les bassins versants sont situés sur la carte présentée à la figure 9. Les



**Figure 8. Classification rétrospective des observations des températures estivales reconstituées selon le modèle de mélange de quatre lois normales avec dépendance markovienne.**

séries chronologiques reconstituées correspondantes sont présentées à la figure 10. Nous observons que ces échantillons sont formés de séquences plus ou moins longues d’apports faibles et élevés. Ces observations semblent donc résulter de « processus » distincts. Ici encore, les mélanges de lois de probabilité avec dépendance sont bien adaptés. Nous avons considéré les modèles constitués de 1 à 3 composantes (régimes) et supposé la loi de probabilité normale. La valeur du critère de

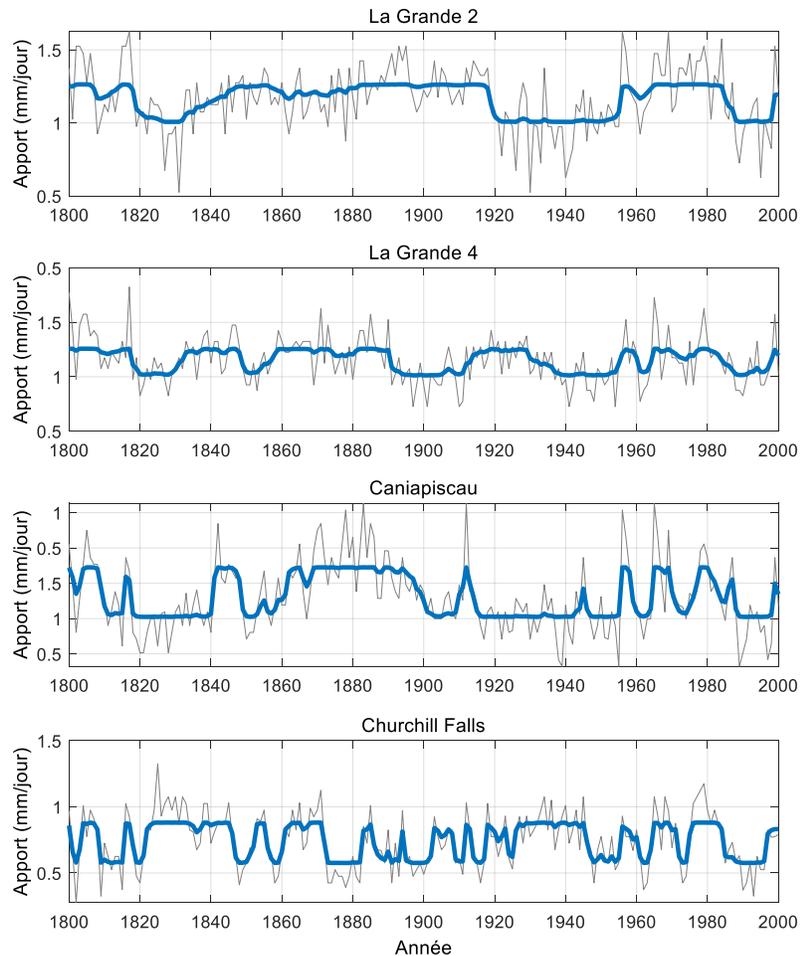
Schwarz (1978) est donnée au tableau 2 pour les trois configurations et chacun des bassins-versants. Les résultats indiquent, pour les quatre bassins versants, que 2 composantes sont nécessaires pour bien représenter la série des apports exprimés en mm/jour. Cela est cohérent avec les résultats obtenus plus récemment par Nasri *et al.* (2020) qui ont employé le même type de modèle probabiliste mais dans une perspective fréquentiste (non bayésienne) et en ayant recours à des outils de sélection de modèle différents.



**Figure 9. Localisations des quatre bassins-versants en gris La Grande 2 (LG2), La Grande 4 (LG4), Caniapiscou (CAN), et Churchill Falls (CHF), ainsi que le réseau des sites de dendrochronologie utilisé pour la reconstitution des apports en eau. Figure tirée de Nasri *et al.* (2020).**

**Tableau 2. Critère de Schwarz (Schwarz, 1978) pour les modèles de mélanges lois normales avec dépendance appliqués à la longue série de températures reconstituées. Le modèle ayant la plus grande valeur du critère de Schwarz doit être privilégié.**

N. de regimes	LG2	LG4	CAN	CHU
1	21	25	38	28
2	35	32	65	44
3	31	20	57	35

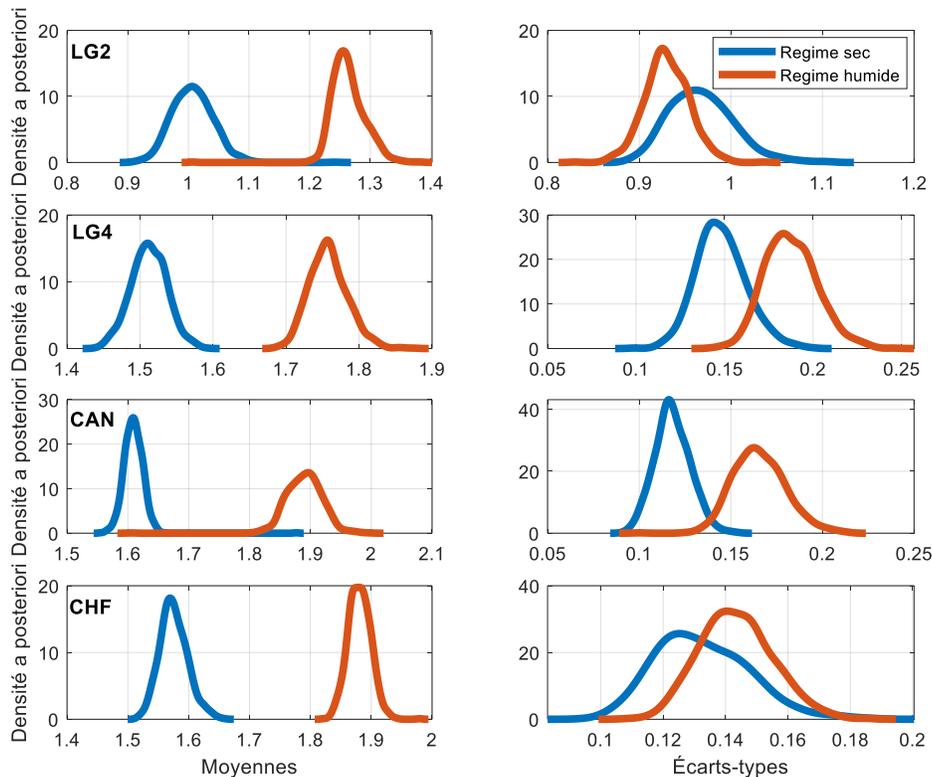


**Figure 10. Reconstruction des apports annuels (mm/jour) de 1800 à 2000 pour chaque bassin-versant (en gris) ainsi que l'espérance *a posteriori* obtenue à partir du modèle de mélange de lois normales à 2 régimes avec dépendance markovienne (en bleu).**

La figure 11 présente les distributions *a posteriori* des moyennes et des écarts-types de chaque composante du modèle choisi : le mélange de deux lois normales avec dépendance markovienne. On constate, tout comme pour la série de températures reconstituées, que les distributions *a posteriori* des paramètres de moyennes de chaque régime ne se chevauchent pas, et ce pour chacun des bassins-versants. Cela indique donc que les deux régimes sont bien distincts en termes d'apports annuels moyens. Toutefois, les distributions des écarts-types de chaque régime se chevauchent considérablement pour les bassins-versants LG2 et Churchill Falls. La différence entre les variances de chacun des régimes est donc peu significative pour ces séries. Enfin,

pour les bassins-versants LG4 et Caniapiscau, la différence dans les moyennes des régimes serait aussi accompagnés d'une différence en dispersion, l'écart-type du régime « humide » (en rouge) étant significativement supérieur à celui du régime « sec » (en bleu).

Nous terminons cette section en présentant le résultat d'un « lissage » appliqué aux séries reconstituées. Ce lissage est construit à partir des espérances *a posteriori* des apports annuels reconstitués obtenues par le modèle. Cette quantité annuelle tient compte de la moyenne estimée de chacun des régimes (Figure 11) ainsi que de la probabilité d'appartenir, chaque année, à l'un ou l'autre des états  $z_t$ . La série lissée ainsi obtenue nous permet d'analyser les variations de plus faibles



**Figure 11.** Distributions *a posteriori* des moyennes et des écarts-types des lois de probabilité formant le mélange de lois normales à deux composantes estimé à partir des apports annuels reconstitués.

périodicités telles que des changements de régimes survenant plus ou moins abruptement et persistant plusieurs années. Ces courbes ont été superposées aux séries chronologiques reconstituées de la figure 10 (trait bleu). Cette représentation nous permet de constater que la série CHF se comporte de manière différente de celle des trois autres bassins versants. Elle semble beaucoup plus variable et admet moins de persistance dans l'un ou l'autre des régimes. À l'inverse, la série LG2 semble admettre des régimes qui perdurent plusieurs décennies, ce qui impliquerait une forte persistance. Enfin, on observe quelques points de rupture ou changements de régimes qui sont communs aux bassins LG2, LG4 et CAN. Il s'agit des années 1820, 1860, 1920 et la fin des années 1980.

L'analyse présentée dans cette section est limitée et mérite d'être approfondie. Nasri *et al.* (2020) ont effectué une étude plus détaillée

de ces quatre séries d'apports annuels reconstitués. Nous vous référons donc à cet article pour consulter davantage de résultats de modélisation de ces séries temporelles hydrologiques issues de la dendrochronologie.

### Conclusion et perspectives

Les objectifs du présent chapitre étaient de présenter les modèles bayésiens de mélanges de lois de probabilité avec dépendance markovienne, et d'illustrer leur utilisation dans le cadre de la modélisation statistique de séries chronologiques issues de la dendrochronologie. Ces modèles sont particulièrement intéressants pour détecter l'occurrence de régimes distincts et analyser leur persistance. Notre application à une longue série de températures reconstituées a confirmé la présence de changements de régime à la baisse qui correspondent bien avec des éruptions volcaniques documentées. Par

ailleurs, l'utilisation de nos modèles pour l'analyse des séries d'apports annuels reconstitués nous permet d'étudier la persistance des régimes hydrologiques secs ou humides et de situer l'intensité des ruptures observées pour les séries d'observations dans un contexte temporel plus étendu. Cette information est fort utile pour Hydro-Québec, notamment pour les questions relatives à la fiabilité énergétique.

<https://doi.org/10.4095/328084>

### Références

- Évin, G., Merleau, J. et Perreault, L., 2011. Two-component mixtures of normal, gamma, and Gumbel distributions for hydrological applications. *Water Resources Research*, 47, W08525.
- Gennaretti, F., Arseneault, D., Nicault, A., Perreault, L. et Bégin, Y., 2014. Volcano-induced regime shifts in millennial tree-ring chronologies from Northeastern North America. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111: 10077–10082.

- Nasri, B.R., Boucher, É., Perreault, L., Rémillard, B.N., Huard, D., Nicault, A., et Membres du groupe ARCHIVES-PERSISTENCE, 2020. Modeling hydrological inflow persistence using paleoclimate reconstructions on the Québec-Labrador (Canada) Peninsula. *Water Resources Research*, 56, e2019WR025122. <https://doi.org/10.1029/2019WR025122>.
- Nicault, A., Boucher, É., Bégin, C., Guiot, J., Marion, J., Perreault, L., Roy R., Savard M.M. et Bégin Y., 2014. Hydrological reconstruction from tree-ring multi-proxies over the last two centuries at the Caniapiscou Reservoir, northern Québec, Canada. *Journal of Hydrology*, 513: 435–445.
- Perreault, L., Bernier, J., Bobée, B. et Parent, É., 2000. Bayesian changepoint analysis in hydrometeorological time series, Part 2, Comparison of changepoint models and forecasting, *Journal of Hydrology*, 235: 242–263.
- Schwarz, G., 1978. Estimating the dimension of a model, *Annals of Statistics*, 6: 461–464.
- Thyer, M. et Kuczera, G., 2000. Modeling long-term persistence in hydroclimatic time series using a hidden state Markov model. *Water Resources Research*, 36 : 3301–3310.



Section de la rivière Caniapiscou s'écoulant vers le nord.  
Photo de C. Bégin. Photo RNCAN 2021-128

# 15. Reconstitutions hydroclimatiques basées sur les séries dendroisotopiques

Christian Bégin, Martine M. Savard, Joëlle Marion, Antoine Nicault et Mathieu Gingras

## Résumé

En s'appuyant sur les liens étroits entre les isotopes stables du carbone et de l'oxygène des cernes de croissance de l'épinette noire et les conditions climatiques régionales, nous avons reconstitué, sur les deux cents dernières années, deux paramètres hydroclimatiques parmi les mieux corrélés statistiquement aux valeurs isotopiques, à savoir les températures maximales des mois d'été ( $T_{\max}$  juin à août) et les débits des grandes rivières de la région pour les mois de juillet à novembre (hydrologie régionale). Les séries reconstituées pour les deux derniers siècles ont mis en évidence des conditions très contrastées, marquées par une alternance d'ambiances climatiques typiques des étés boréaux québécois, où des périodes chaudes et sèches succèdent à des conditions froides et humides. Elles ont également permis de documenter des événements climatiques particuliers tels le refroidissement qui a suivi l'éruption du Tambora en 1815. Les séries hydroclimatiques reconstituées ont ensuite été validées en les comparant à de longues séries de données mesurées à plus grande échelle, ainsi qu'à d'autres séries reconstituées à partir d'indicateurs indépendants. Les résultats de cet examen suggèrent notamment que les grandes variations hydroclimatiques de la partie centrale de la péninsule Québec-Labrador, reconstituées à partir des dendroisotopes, ne seraient pas uniquement contrôlées par des systèmes climatiques de la partie nord du Québec mais aussi par les grands systèmes atmosphériques contrôlant le niveau des rivières du nord-est de l'Amérique du Nord.

## Abstract

The close relationship between stable carbon and oxygen isotopes in growth rings of black spruce trees and regional climatic conditions allows us to reconstruct over the last two centuries, two hydroclimatic parameters providing the best statistical correlation with isotopic values, namely the maximum summer temperature (June-August  $T_{\max}$ ) and the summer discharge (July to November) of major regional rivers. The reconstructed 200 years series shows contrasting conditions marked by alternating climatic ambiances typically associated with Quebec boreal summers, where warm and dry conditions alternate with cold and wet periods. The series also documents specific climate events such as the cooling that followed the Tambora eruption in 1815. The reconstructed hydroclimatic series were then validated by comparing them to long datasets measured at larger scale, and to other series reconstructed from independent proxies. Results from this analysis suggest that mid and long-term hydroclimatic variations of the central part of the Quebec-Labrador peninsula, as reconstructed from dendroisotopes, were not only controlled by northern Québec climate systems, but also by major weather systems controlling the level of rivers of northeastern North America.

## Introduction

Au chapitre 3 de cet ouvrage nous avons montré que les isotopes stables du carbone et de l'oxygène des cernes de croissance de l'épinette noire constituent d'excellents indicateurs climatiques pour le secteur boréal du nord-est américain en mettant en évidence leur forte sensibilité aux variations des condi-

tions climatiques régionales. Plus précisément, nous avons montré que les valeurs  $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{18}\text{O}$  des cernes de croissance étaient influencées par plus d'un paramètre climatique, surtout la température et les précipitations, et que ces mêmes paramètres agissaient à des degrés divers sur les deux isotopes. Pour cette raison, les valeurs isotopiques sont également fortement corrélées avec certains paramètres intégrant plusieurs aspects du climat régional, notamment le déficit de pression de vapeur (DPV) et les débits régionaux (Dinis *et al.*, 2019). Leur influence rend compte des divers processus de fractionnement isotopique chez les conifères boréaux.

Une telle influence, qu'elle soit directe, comme dans le cas des températures, ou indirecte, comme dans le cas des débits de rivières, se traduit par des relations statistiques fortes entre les signaux isotopiques et certains paramètres hydroclimatiques et ouvre la porte à l'utilisation des dendroisotopes comme indicateurs des conditions hydroclimatiques passées (Bégin *et al.*, 2015). Afin de démontrer ce potentiel, nous présentons ici deux exemples de reconstitutions basées sur les valeurs  $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{18}\text{O}$  dans les cernes d'épinettes noires provenant de trois sites forestiers sélectionnés parmi le réseau de sites étudiés par ARCHIVES. Les paramètres reconstitués sont les températures maximales des mois d'été (juin à août) ainsi que les débits des grandes rivières de la région pour les mois de juillet à novembre (hydrologie régionale). Ces deux paramètres sont parmi ceux qui corrèlent le mieux aux valeurs isotopiques, particulièrement lorsque les signaux  $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{18}\text{O}$  sont combinés. Les coefficients de corrélation de Pearson sont alors de 0,73 dans le cas des températures maximales estivales et de -0,64 dans le cas des débits régionaux (voir tableau 1 au chapitre 3). Le lien statistique entre les valeurs isotopiques et les températures estivales traduit leur influence directe sur le fractionnement des isotopes du carbone et de l'oxygène. Le lien statistique

avec l'hydrologie régionale est indirect mais il n'est pas sans intérêt car, d'une part, il intègre l'influence de plusieurs paramètres associés au climat régional (*c.-à-d.* précipitations nivales, pluie, température, évapotranspiration, etc.), et d'autre part, c'est un paramètre essentiel pour comprendre les changements de régimes hydrologiques dans le secteur d'étude.

### Reconstituer les conditions du passé à partir des dendroisotopes

Il existe plusieurs méthodes statistiques, ou fonctions de transfert, permettant de reconstituer dans le temps les conditions climatiques sur la base de leur influence sur les valeurs isotopiques. Dans le cas présent, les températures maximales estivales normalisées provenant des trois stations météorologiques les plus rapprochées des sites analysés (Wabush Lake, Nitchequon et Schefferville) ainsi qu'une série hydrologique établie à partir des valeurs normalisées des débits des rivières Ashuanipi et Churchill et des apports au bassin Caniapiscou (nous l'appellerons série hydrologique régionale) ont été reconstituées pour la période de 1950 à 2005 en appliquant une régression des moindres carrés partiels (ou PLS pour *Partial Least Squares*) intégrée au package bioindic développé par Guiot tournant sous la plateforme R Project. L'algorithme de la régression PLS emprunte sa démarche statistique à l'analyse en composante principale et à la régression. Ici, les composantes principales de la régression PLS sont sélectionnées de façon à refléter le maximum de covariance entre les prédicteurs et la variable réponse et à minimiser l'erreur quadratique moyenne (RMSE) associée à la calibration (RMSEP). Le modèle de régression a été calibré entre les séries  $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{18}\text{O}$  et les températures maximales sur la période 1943-2003, et entre les séries  $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{18}\text{O}$  et la série hydrologique sur la période 1950-2003. Les deux séries sont par la suite reconstituées jusqu'en 1800. Le coefficient de détermination ( $R^2_p$  ou RE) et l'erreur quadra-

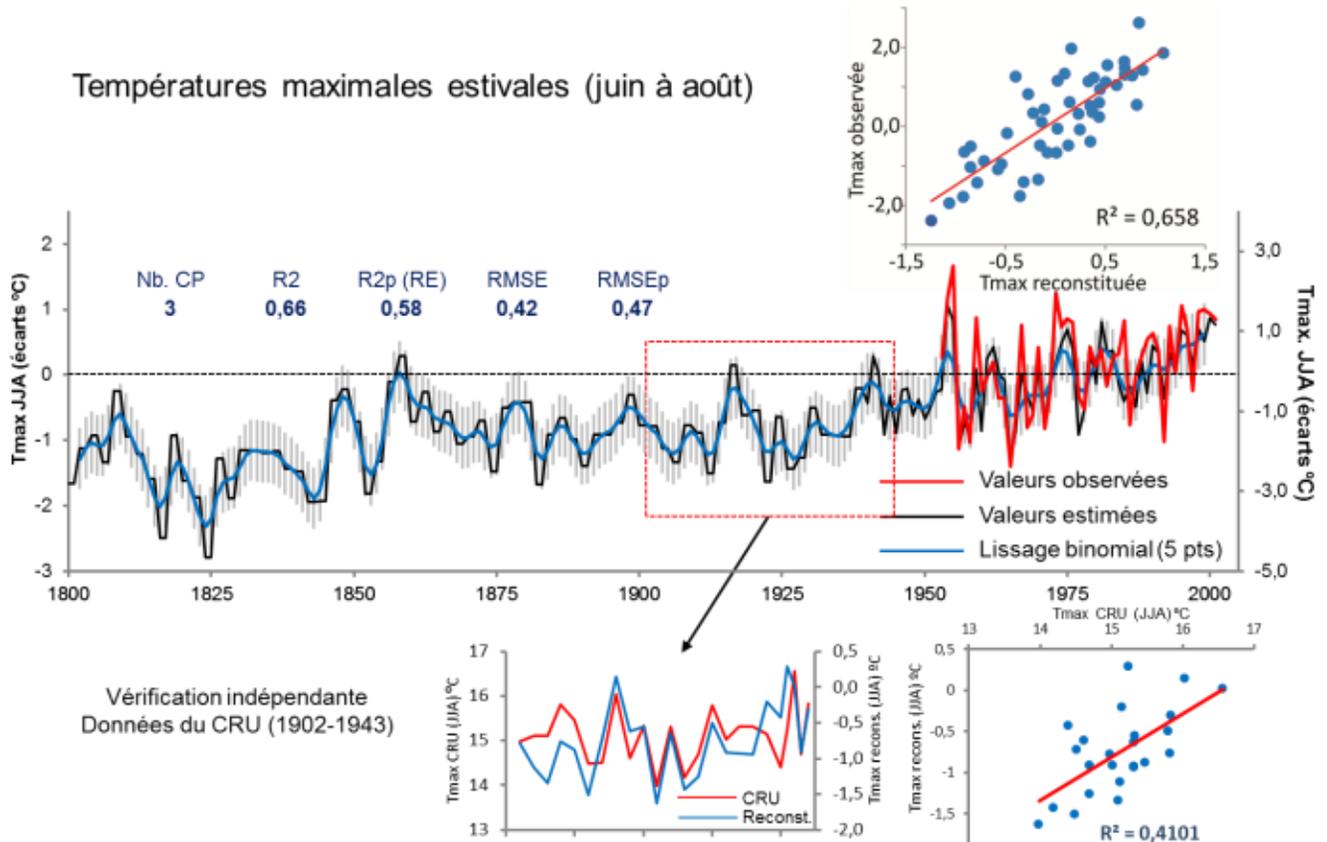
tique moyenne ( $RMSE_p$ ) associés à la vérification sont calculés à l'aide de la technique de rééchantillonnage *Jackknife* qui compare les prédicteurs à des valeurs exclues au hasard de la période de calibration et utilisées comme données indépendantes. Enfin, dans le cas des températures maximales estivales (juin à août), une vérification indépendante a été réalisée sur la période de 1902 à 1944 en comparant les valeurs reconstituées aux valeurs interpolées extraites de la base des données sur point de grille spatiale (0,5° lat. x 0,5° long.) compilées par le *Climatic Research Unit* (CRU TS 2.0; Mitchell *et al.*, 2004). Une telle vérification indépendante n'a pu être effectuée dans le cas des données hydrologiques reconstituées puisqu'aucune interpolation sur point de grille n'existe pour ce type de données. La série hydrologique reconstituée sera toutefois comparée à d'autres données indépendantes relatives au régime hydrique plus loin dans le chapitre.

### Conditions hydroclimatiques des deux derniers siècles

La reconstitution des températures maximales estivales de juin à août pour la période de 1800 à 2004 est présentée à la figure 1. Le modèle PLS a extrait trois composantes principales des six séries isotopiques (3 séries  $\delta^{13}C$  et 3 séries  $\delta^{18}O$ ) pour produire la régression linéaire. La cohérence entre les tempéra-

tures maximales estivales mesurées et celles simulées par le modèle s'avère excellente avec un coefficient de détermination ( $R^2$ ) de 0,66 (Figure 1). La vérification des valeurs reconstituées par la technique *Jackknife* montre que la régression PLS a une bonne aptitude de prédiction avec un coefficient de détermination ( $R^2_p$ ) significatif de 0,58. La vérification indépendante effectuée avec les données du *Climatic Research Unit* (CRU TS 2.0) pour la période de 1902 à 1943 confirme la capacité du modèle à prédire les températures. La corrélation ( $R^2$ ) entre les valeurs reconstituées et observées est de 0,41 (Figure 1).

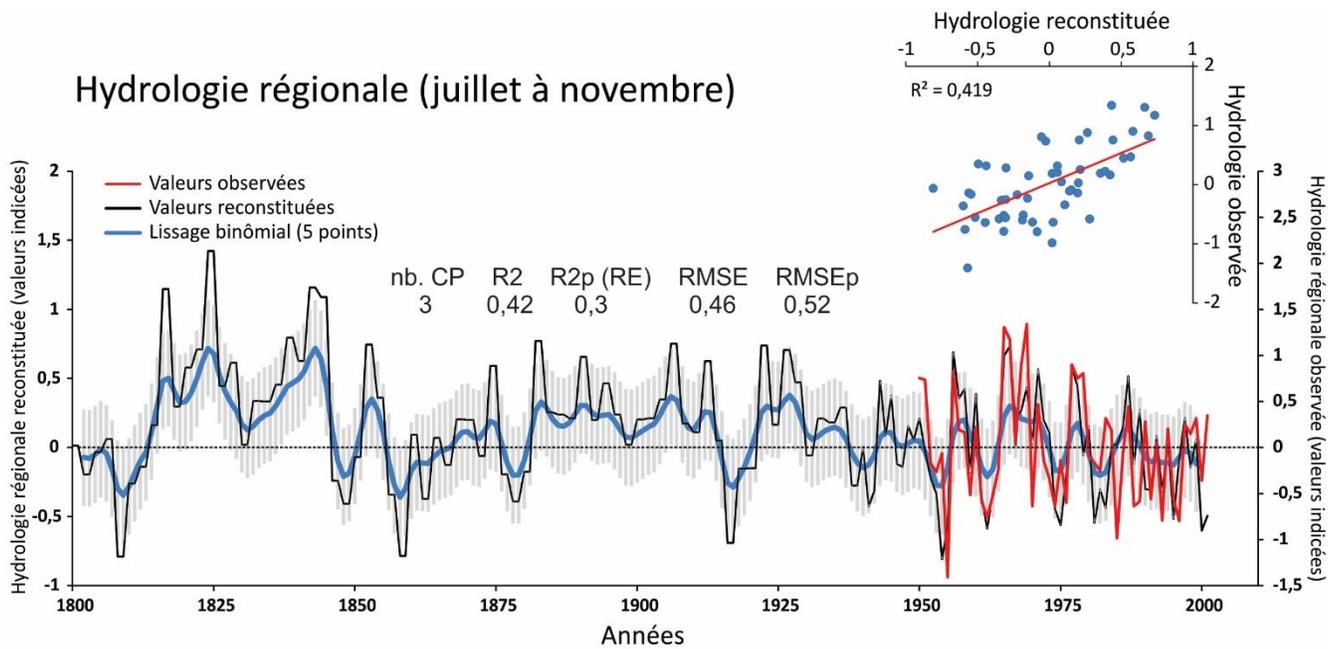
La figure 2 présente la série hydrologique régionale reconstituée pour les mois de juillet à novembre et couvrant la période de 1800 à 2004. Ici encore, la régression est basée sur trois composantes principales extraites des six séries isotopiques par le modèle PLS. La cohérence entre les valeurs observées et celles estimées par la PLS est légèrement inférieure à celle des températures maximales avec un coefficient de détermination ( $R^2$ ) de 0,42 (Figure 2). La vérification des données reconstituées nous donne ici un  $R^2_p$  de 0,3. L'aptitude plus faible du modèle à reproduire l'hydrologie régionale, comparativement aux températures estivales, réside probablement, en partie, dans la nature indirecte du lien entre les valeurs isotopiques et le débit des rivières.



**Figure 1.** Températures maximales des mois de juin à août reconstituées à partir des six séries isotopiques moyennes pour la période de 1800 à 2004 (trait noir). La courbe en rouge représente la série régionale des températures estivales mesurées ayant servi à la calibration du modèle et la courbe bleue est un lissage des données reconstituées à l'aide d'une fonction binomiale sur 5 points. Les barres grises verticales représentent, quant à elles, l'erreur associée au modèle (se référer à la section de texte précédente pour la description des paramètres statistiques associés au modèle). Les deux graphiques du bas présentent la vérification indépendante des données reconstituées à l'aide des données de température interpolées du CRU pour la période de 1902 à 1944.

Les deux séries hydroclimatiques reconstituées à partir des rapports isotopiques (Figures 1 et 2) mettent en évidence des conditions très contrastées au cours des deux cents dernières années marquées par une alternance d'ambiances climatiques estivales typiquement associées au climat boréal du nord-est de l'Amérique du Nord, à savoir des conditions chaudes et sèches alternant avec des conditions froides et humides. Elles montrent que la première moitié du XIX<sup>e</sup> siècle aurait d'abord été marquée par une courte période d'étés chauds et secs (1800-1813) puis par quelques décennies (1816 à 1845) où les conditions estivales ont été les plus froides et les plus hu-

mides des 200 dernières années. Au cours de cette période, les étés les plus froids et humides ont été enregistrés en 1816-17, 1824-25 et en 1843-45. Les conditions estivales se seraient ensuite améliorées (plus chaudes et sèches) entre 1847-1850 puis entre 1856-1860, avant de redevenir froides et humides pour le reste du XIX<sup>e</sup> siècle, et ce, jusqu'à 1938. Seuls les étés 1916-17 semblent avoir été plus chauds et plus secs à l'intérieur de cette longue période fraîche et humide. À partir de 1938, les conditions estivales auraient changé de façon importante; elles seraient devenues plus chaudes et sèches jusqu'en 2003. Cette amélioration générale des conditions jusqu'en 2003



**Figure 2. Série hydrologique régionale reconstituée (valeurs moyennes des débits des rivières Ashuanipi et Churchill et des apports au bassin Caniapiscou pour la période de juillet à novembre) à partir des six séries isotopiques moyennes pour la période de 1800 à 2004 (trait noir). Les valeurs mesurées ayant servi à la calibration du modèle sont présentées en rouge et la courbe bleue est un lissage des données reconstituées à l'aide d'une fonction binomiale sur cinq points. Les barres grises verticales représentent l'erreur associée au modèle (se référer à la section précédente du texte pour la description des paramètres statistiques associés au modèle).**

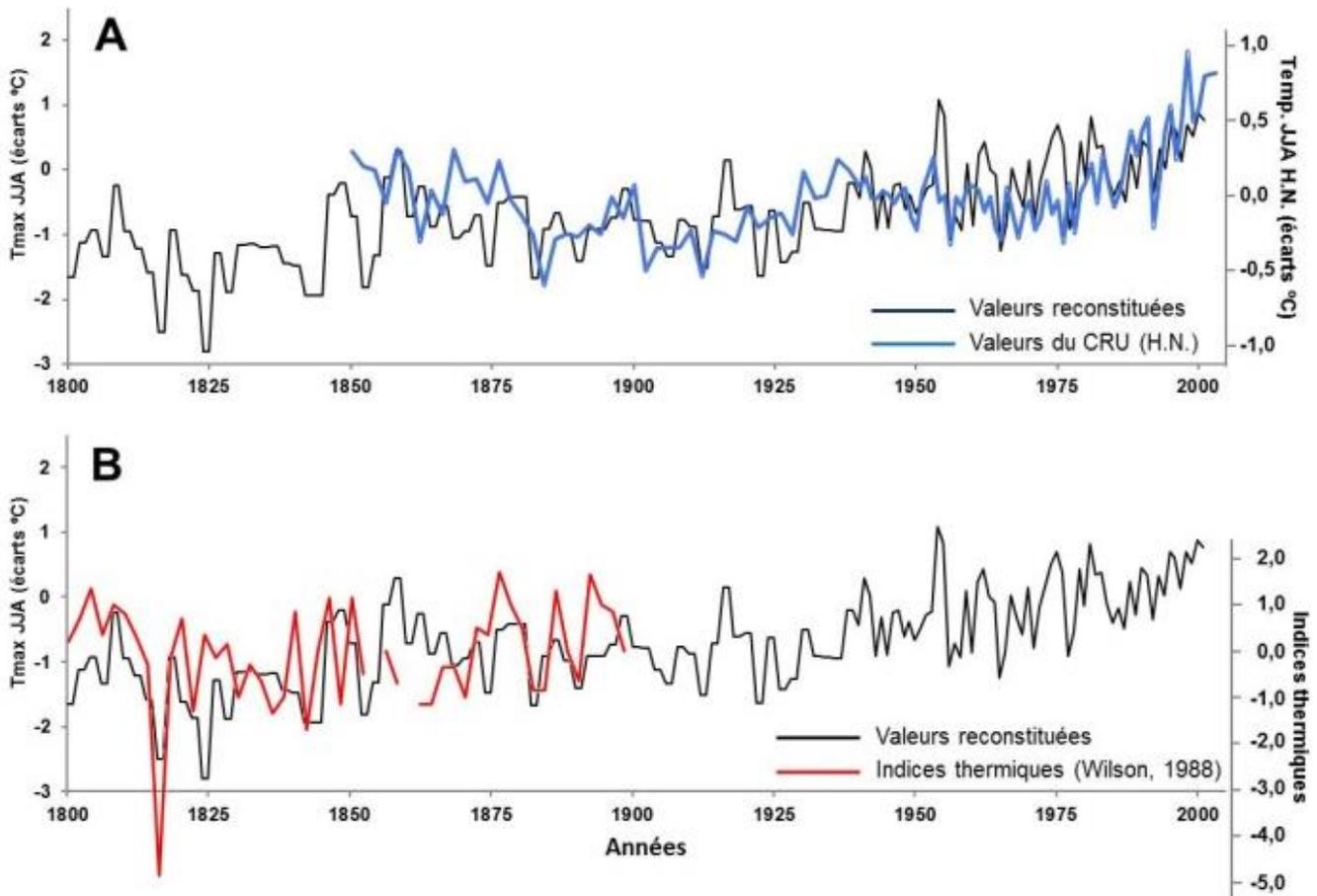
aurait cependant été ponctuée par quelques étés plus froids et plus humides entre 1956-58, 1965-66 et entre 1977-78.

### Validation des séries reconstituées

Nous avons d'abord comparé la portion récente des températures estivales reconstituées avec la série de températures estivales de l'hémisphère nord établie à partir des données sur point de grille du CRU (Jones *et al.*, 2012) couvrant la période de 1850 à 2010. L'objectif ici n'est pas de comparer les variations de haute fréquence (interannuelles) mais plutôt de vérifier comment les tendances à moyen et à long terme des valeurs reconstituées pour le secteur boréal québécois s'inscrivent dans un cadre spatial plus large de l'hémisphérique nord. De façon générale, la série instrumentale du CRU conforte relativement bien notre série de températures estivales reconstituées (Figure 3A). On y retrouve les mêmes grandes tendances, non seulement

à long terme mais aussi à moyen et parfois même à court terme. Il est cependant intéressant de noter que la hausse récente des températures estivales à partir du début des années 1990 est plus prononcée à l'échelle de l'hémisphère nord qu'elle ne l'est dans le secteur boréal.

Nous avons aussi comparé la portion plus ancienne (XIX<sup>e</sup> siècle) de la série de températures reconstituées avec les indices thermiques estivaux développés par Wilson (1988) à partir 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 (Figure 3B). Sans être parfaite, la correspondance entre les deux séries de températures reconstituées de manière indépendante est étonnante. Les écarts que l'on peut noter sont probablement reliés, au moins en partie, aux délimitations différentes de la période estivale. Néanmoins, les périodes où les températures ont été les plus froides ou les plus



**Figure 3. A:** Comparaison entre les températures maximales estivales reconstituées (ligne noire) et les températures de l’hémisphère nord (ligne bleu) (juin à août) interpolées à partir des données sur points de grille du CRU (CRUTEM4; Jones *et al.*, 2012); **B:** Comparaison avec les indices thermiques estivaux reconstitués (ligne rouge) à partir des archives des postes de traite de la compagnie de la Baie d’Hudson (Wilson, 1988).

chaudes apparaissent de façon synchrone sur les deux séries. Elles montrent notamment la baisse spectaculaire des températures au cours des étés 1816 et 1817. Cette diminution abrupte des températures en 1816 est bien documentée dans la littérature scientifique et a été attribuée surtout à l’éruption du volcan Tambora en 1815 et à son impact sur le rayonnement solaire. Dans le nord du Québec, les effets du Tambora se manifestent par une fréquence particulièrement élevée de cernes de croissance qualifiés de cernes pâles en 1816 et 1817 en raison de l’absence de bois final. La

formation de tels cernes témoignerait du maintien de conditions fraîches, printanières, tout au long de la saison de croissance (Filion *et al.*, 1986). Le refroidissement hémisphérique qui a suivi l’éruption du Tambora aurait perduré pendant plusieurs décennies (Robock, 2005; Gennaretti *et al.*, 2014) et aurait été exacerbé par un minimum d’activité solaire entre 1790 et 1830 (*p. ex.* le Minimum de Dalton; Wagner et Zorita, 2005). Ces deux phénomènes expliqueraient les conditions froides enregistrées par les dendroisotopes entre 1816 et 1844.

Dans le cas de la série hydrologique régionale, nous avons d'abord comparé la portion récente des valeurs reconstituées avec une série de débits moyens constituée à partir des débits standardisés de cinq rivières importantes de la partie méridionale du Québec (Mille-Îles, Petite Nation, Harricana, Matawin et Montmorency) et pour lesquelles de longs enregistrements sont disponibles (Figure 4). Ici encore, l'objectif n'est pas de comparer les variations interannuelles des débits mais bien de vérifier comment les tendances hydrologiques reconstituées de la partie centrale de la péninsule Québec-Labrador s'inscrivent dans un contexte suprarégional ou même continental. Les résultats montrent qu'à l'exception de la période entre 1976 et 1990 où il y a des écarts importants, les événements de débits élevés (*p. ex.* 1926-27, 1956-58 et 1971) et de faibles débits (*p. ex.* 1961-63, 1974-75) sont enregistrés sur les deux séries. Ils montrent également que la tendance générale à la baisse des débits au cours de soixante-quinze dernières années caractérise autant les grandes rivières du haut-boréal que celles de la partie sud du Québec. Il appert donc que les grandes variations hydrologiques du secteur amont de la rivière La Grande, mises en lumière à partir des dendroisotopes, ne seraient pas unique-

ment contrôlées par les conditions hydroclimatiques régionales mais aussi par les grands systèmes atmosphériques influant le débit des rivières du nord-est de l'Amérique du Nord.

Enfin, les variations hydrologiques reconstituées du XIX<sup>e</sup> siècle ont été comparées avec la série d'indices d'humidité reconstituée par Wilson (1988) à partir des archives des postes de traite de la Compagnie de la Baie d'Hudson qui, rappelons-le, constituent une des meilleures séries indépendantes disponibles pour la région (Figure 4). Notons cependant ici que les paramètres reconstitués à partir des deux systèmes d'archives (isotopes stables et archives historiques) sont différents mais reliés sur le plan climatique. La série hydrologique représente surtout des débits reconstitués alors que les indices d'humidité (*Wetness indices*) de Wilson (1988) intègrent tout ce qui réfère à l'humidité atmosphérique (*p. ex.* quantité de pluie et de neige) mais aussi aux niveaux d'eau pouvant être extraits de l'information contenue dans les journaux de bord des postes de traite. De plus, la série d'indices d'humidité est discontinue dans le temps. Pour ces raisons la cohérence entre les deux séries reconstituées n'est pas parfaite. Cependant, les importants épisodes de débits

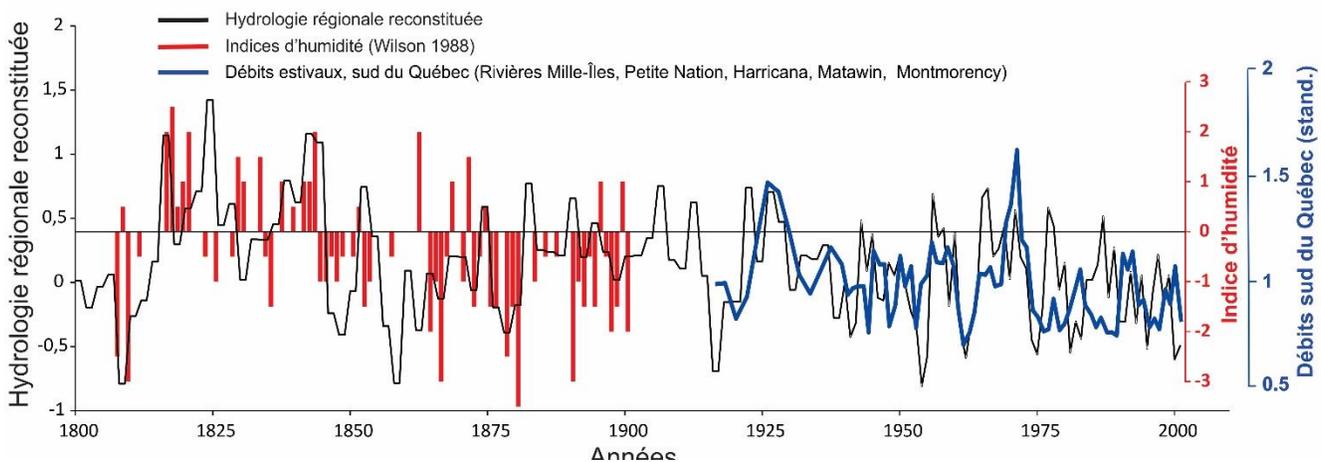


Figure 4. Comparaison entre l'hydrologie régionale reconstituée pour la période de juillet à novembre (ligne noire) et les débits des principales rivières du sud du Québec pour la même période (ligne bleu) et les indices d'humidité reconstitués à partir des archives des postes de traite de la compagnie de la Baie d'Hudson (barres rouges; Wilson, 1988).

estivaux élevés (*p. ex.* 1816-1817 et 1838-1844) et de faibles débits estivaux (*p. ex.* 1807-1809 et 1876-1881) correspondent bien aux variations d'humidité documentées par Wilson (1988; Figure 4), confirmant ainsi le caractère réaliste des valeurs reconstituées grâce aux isotopes stables du carbone et de l'oxygène dans les arbres.

### Conclusion

L'influence directe de certaines variables climatiques sur les processus de fractionnement isotopique du carbone et de l'oxygène lorsque ces éléments vitaux sont assimilés par l'arbre fait en sorte que les valeurs  $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{18}\text{O}$  mesurées dans les cernes de croissance constituent d'excellents indicateurs des conditions climatiques passées. Cette forte relation dendroisotopes-climat permet de reconstituer à l'échelle régionale, sur de longues périodes et à une haute résolution temporelle, l'évolution de plusieurs paramètres climatiques clés. Les exemples de reconstitution des températures maximales estivales et de l'hydrologie régionale que nous avons présentés ici, illustrent bien le potentiel de l'approche dendroisotopique pour documenter les conditions climatiques des derniers siècles. Ils mettent en évidence l'existence de conditions hydroclimatiques contrastées, depuis la fin du Petit âge glaciaire jusqu'au réchauffement du XX<sup>e</sup> siècle. Elles mettent aussi en lumière des événements climatiques particuliers, tels les conditions exceptionnellement froides et humides au cours des étés 1816 et 1817 suite à l'éruption du Tambora en 1815. Les séries reconstituées grâce aux dendroisotopes ont été confrontées et validées positivement à l'aide de séries indépendantes. Ainsi, les tendances du XX<sup>e</sup> siècle ont été corroborées à l'aide des données de températures du CRU pour l'hémisphère nord et d'une longue série de débits de rivières du sud du Québec, alors que les conditions reconstituées pour le XIX<sup>e</sup> siècle ont été validées à l'aide d'autres séries recons-

tituées à l'aide d'indicateurs indépendants, notamment les archives historiques disponibles pour la région. 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 performantes, voire la plus performante, pour documenter la variabilité des conditions climatiques passées et ainsi permettre de poser un regard plus réaliste et plus critique sur les tendances hydroclimatiques récentes et passées.

<https://doi.org/10.4095/328085>

### Références

- Bégin, C., Gingras, M., Savard, M.M., Marion, J., Nicault, A., et Bégin, Y., 2015. Assessing tree-ring carbon and oxygen stable isotopes for climate reconstruction in the Canadian northeastern boreal forest. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 423: 91–101
- Dinis, L., Bégin, C., Savard, M.M., Marion, J., Brigode, P. et Alvarez, C., 2019. Tree-ring stable isotopes for regional discharge reconstruction in eastern Labrador and teleconnection with the Arctic Oscillation. *Climate Dynamics*, 53: 3625-3640.
- Filion, L., Payette, S., Gauthier, L. et Boutin, Y., 1986. Light Rings in Subarctic Conifer as a dendrochronological Tool. *Quaternary Research*, 26: 272-279.
- Gennaretti, F., Arseneault, D., Nicault, A., Perreault, L. et Bégin, Y., 2014. Volcano-induced regime shifts in millennial tree-ring chronologies from Northeastern North America, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(28): 10077-10082.
- Guiot, J., 1991. *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.
- Jones, P.D., Lister, D.H., Osborn, T.J., Harpham, C., Salmon, M. et Morice, C.P., 2012. Hemispheric and large-scale land surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2010, *Journal of Geophysical Research*, 117, D05127, doi:10.1029/2011JD017139
- Mitchell, T.D., Carter, T.R., Jones, P.D., Hlmu, M. et New, M., 2004. A comprehensive set of high-resolution grids of monthly climate for Europe and the

## 15. Reconstitutions hydroclimatiques basées sur les séries dendroisotopiques

globe: the observed records (1901–2000) and 16 scenarios (2001–2100). Tyndall Centre for Climate Change Research, working paper 55, 25 p.

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.

Wagner, S. et Zorita, E., 2005. The influence of volcanic, solar and CO<sub>2</sub> forcing on the temperatures in the

Dalton Minimum (1790-1830): A model study. *Climate Dynamics* 25(2-3): 205-218.

Wilson, C.V., 1988. The summer season along the East coast of Hudson Bay during the nineteenth century. Part III: Summer thermal and wetness indices B. The indices, 1800-1900. Canadian Climate Centre. Report No.88-3. Atmospheric Environment Service. Downsview, Canada. 35 p.



**Section d'une vieille épinette noire prélevée au site Lab-32 au Labrador pour les analyses isotopiques.**

**Photo de C. Bégin. Photo RNCAN 2021-129**

# 16. Reconstitution des apports en eau des deux derniers siècles : approche méthodologique. Application au réservoir Caniapiscau (Complexe La Grande, Québec)

Antoine Nicault, Étienne Boucher, Joël Guiot et Yves Bégin

## Résumé

L'objectif de cette étude était de reconstituer sur les 200 dernières années la variabilité des apports en eau printaniers ( $Q_{spr}$ ), estivaux ( $Q_{sum}$ ) et annuels ( $Q_{ann}$ ) au réservoir Caniapiscau, dans une région éloignée du nord du Québec. Dans cette région clé pour la production énergétique, les registres hydrologiques sont très courts et clairsemés dans l'espace et les indicateurs dendrochronologiques sont considérés comme les meilleures alternatives pour étendre dans le temps les données climatiques instrumentales. Nous avons utilisé les largeurs des cernes, leur densité et leurs rapports isotopiques stables ( $\delta^{13}C$  et  $\delta^{18}O$ ) pour effectuer des reconstructions paléohydrologiques. Les techniques de reconstruction suivantes ont été évaluées pour chaque variable reconstituée: une régression des moindres carrés partiels (PLS) appliquée à toutes les séries temporelles, une régression PLS appliquée à des séries sélectionnées et la méthode des meilleurs analogues (BAM) également appliquée aux séries temporelles sélectionnées. Ces trois reconstitutions ont ensuite été combinées dans une reconstitution composite. Une procédure de vérification a montré que la qualité de la reconstitution des apports en eau annuels et estivaux est bonne. Cependant, les tests de vérification ont disqualifié notre reconstitution des apports en eau printaniers. Les variations à long terme des apports en eau reconstituées au cours des deux derniers siècles sont dominées par des fluctuations décennales à sous-décennales, et montrent aussi qu'il existe de longues périodes hy-

drologiques distinctes au cours desquelles les apports en eau changent en intensité et en variabilité. Les apports en eau annuels ( $Q_{ann}$ ) sont inversement corrélés aux indices d'oscillation nord-atlantique (NAO) d'hiver et d'été. Les indices d'oscillation arctique (AO) influencent également les  $Q_{ann}$  dans une plus grande mesure que les indices NAO. Les apports en eau estivaux sont inversement corrélés uniquement avec les indices AO et NAO estivaux.

## Abstract

The objective of this study was to reconstruct 200 years of spring ( $Q_{spr}$ ), summer ( $Q_{sum}$ ) and annual ( $Q_{ann}$ ) water supply variability at the Caniapiscau Reservoir in the remote area of northern Quebec. This key area for hydropower production lacks long-term hydrological records, and tree-ring proxies are thought to be the best substitute for extending the instrumental climatic records. Tree-ring widths, ring densities and stable isotope ratios ( $\delta^{13}C$  and  $\delta^{18}O$ ) were used to perform paleohydrological reconstructions. The following reconstruction techniques were evaluated for each variable reconstructed: partial least square (PLS) regression applied to all of the tree-ring series, PLS regression applied to selected tree-ring series, and the best analogue method (BAM) applied to selected tree-ring series. These three reconstructions were then combined into a composite reconstruction. Reconstruction verification shows that the annual and summer water supply reconstruction quality is good, while the verification tests dis-

qualified our spring water supply reconstruction. The reconstructed long-term water supply variations over the past two centuries are dominated by decadal to sub-decadal fluctuations, and also show that there are distinct long hydrological periods during which water supplies change in intensity and variability. Annual water supplies ( $Q_{\text{ann}}$ ) inversely correlate with both winter and summer North Atlantic Oscillation (NAO) indices. Arctic oscillation (AO) indices also influence  $Q_{\text{ann}}$  to a greater degree than NAO indices. Summer water supplies inversely correlate only with AO and NAO summer indices.

### Introduction

Depuis la deuxième moitié du XIX siècle, le climat change au-delà des limites déjà connues de la variabilité naturelle, avec des effets potentiellement importants sur la disponibilité et la distribution de l'eau. Dans ce contexte climatique et socio-économique sensible, les programmes de planification des ressources en eau doivent être fondés sur une meilleure compréhension des tendances hydrologiques à long terme (Kundzewicz *et al.*, 2007). Dans la moitié nord de la péninsule Québec–Labrador, qui représente plus de 50% de la production hydro-électrique québécoise, les registres hydrologiques sont très courts et clairsemés dans l'espace. Il devient donc difficile d'intégrer, dans les modèles de prévisions, des informations complètes sur la variabilité hydrologique et il est également difficile d'interpréter les fluctuations et les ruptures observées dans les séries récentes (Perreault *et al.*, 2000) sans une bonne connaissance de la variabilité, ne serait-ce que du XXe siècle.

En l'absence de registres instrumentaux, les indicateurs naturels sont la meilleure alternative pour étendre vers le passé les séries climatiques et hydrologiques. Les séries de sédiments lacustres laminés étant très rares, les cernes de croissance représentent les seuls indicateurs naturels disponibles dans la région.

Dans le Haut-Boréal québécois, les arbres fournissent deux types d'indicateurs: les cicatrices laissées par les radeaux de glace sur les arbres riverains (le glacié; Chapitre 13) qui sont des indicateurs discontinus des crues printanières (Bégin, 2000ab; Lemay et Bégin, 2008) et les chronologies dendrochronologiques continues. La seule reconstruction de crue printanière réalisée dans la région du complexe La Grande (Boucher *et al.*, 2010) a utilisé deux séries discrètes (glacié) et trois chronologies continues de densité minimale des cernes. Bien que le glacié soit un indicateur direct de crues extrêmes, son utilisation comme indicateur hydrologique est limitée aux crues printanières et la collecte de données est restreinte à certains lacs sensibles et les chronologies s'étalent rarement avant le XXe siècle.

L'utilisation de séries dendrochronologiques devient alors un complément indispensable. En effet, elles fournissent de l'information en continu au pas de temps annuel et, comme les forêts sont omniprésentes dans la région, les données sont disponibles sur l'ensemble du territoire. De plus, la présence d'arbres âgés de plus de 200 ans permet de construire des chronologies couvrant au moins les deux derniers siècles. En revanche, la mise en œuvre de reconstitutions de variables hydrologiques dans la région à partir des séries continues de cernes n'est pas sans poser de problèmes. En effet, si les largeurs des cernes ont été utilisées avec succès pour reconstruire les conditions hydrologiques passées dans les régions arides où le facteur limitant la croissance est la disponibilité en eau (Meko *et al.*, 2001; Nicault *et al.*, 2008; Woodhouse *et al.*, 2013), la disponibilité de l'eau en région boréale n'est pas un facteur limitant la croissance des arbres, et il n'y a donc pas de relation directe entre la largeur des cernes et les valeurs d'apports en eau. La calibration des relations cernes / variables hydrologiques risque donc d'être plus délicate et incertaine. Cependant, le fait que dans cette région, l'hydrologie et la

croissance des épinettes soient régies par des variables climatiques similaires (abondance et durée de la neige en hiver et températures printanières et estivales; Nicault *et al.*, 2014) nous a encouragé à tenter la mise en œuvre de reconstructions. Nous avons rencontré une autre difficulté : la courte durée des registres hydrologiques disponibles qui nous imposait une courte période de calibration et quasiment aucune donnée pour vérifier les reconstitutions de façon indépendante (hors période de calibration).

Aucun de ces problèmes ne pouvait être résolu directement; donc, afin de compenser en partie ces contraintes et de renforcer les reconstitutions, nous avons choisi d'utiliser plusieurs types d'indicateurs (largeur des cernes, densité des cernes et isotopes stables ( $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{18}\text{O}$ )) et de combiner différentes méthodes de reconstruction. Nous avons évalué le potentiel de reconstitution de trois variables hydrologiques différentes : les

apports en eau printaniers, les apports en eau estivaux et les apports en eau annuels pour le bassin de Caniapiscau.

### Les données dendrochronologiques

Les chronologies de cernes utilisées pour les reconstructions proviennent de 20 sites d'épinette noire (*Picea mariana*, Mill. BSP) échantillonnés dans le cadre du projet ARCHIVES. Ces sites sont situés dans un rayon de 200 km autour du réservoir Caniapiscau (Figure 1). Les sites sélectionnés devaient être jugés homogènes au plan des conditions écologiques, de la structure et de l'âge du peuplement. Au minimum 12 arbres de plus de 200 ans et ne présentant aucune anomalie majeure ont été échantillonnés dans chacun des sites. L'épaisseur des cernes de croissance a été mesurée pour tous les arbres de tous les sites, une sélection d'arbres issus de huit sites a fait l'objet d'une analyse densitométrique, et enfin une sélection d'arbres issus de trois sites a fait l'objet d'une analyse isotopique.

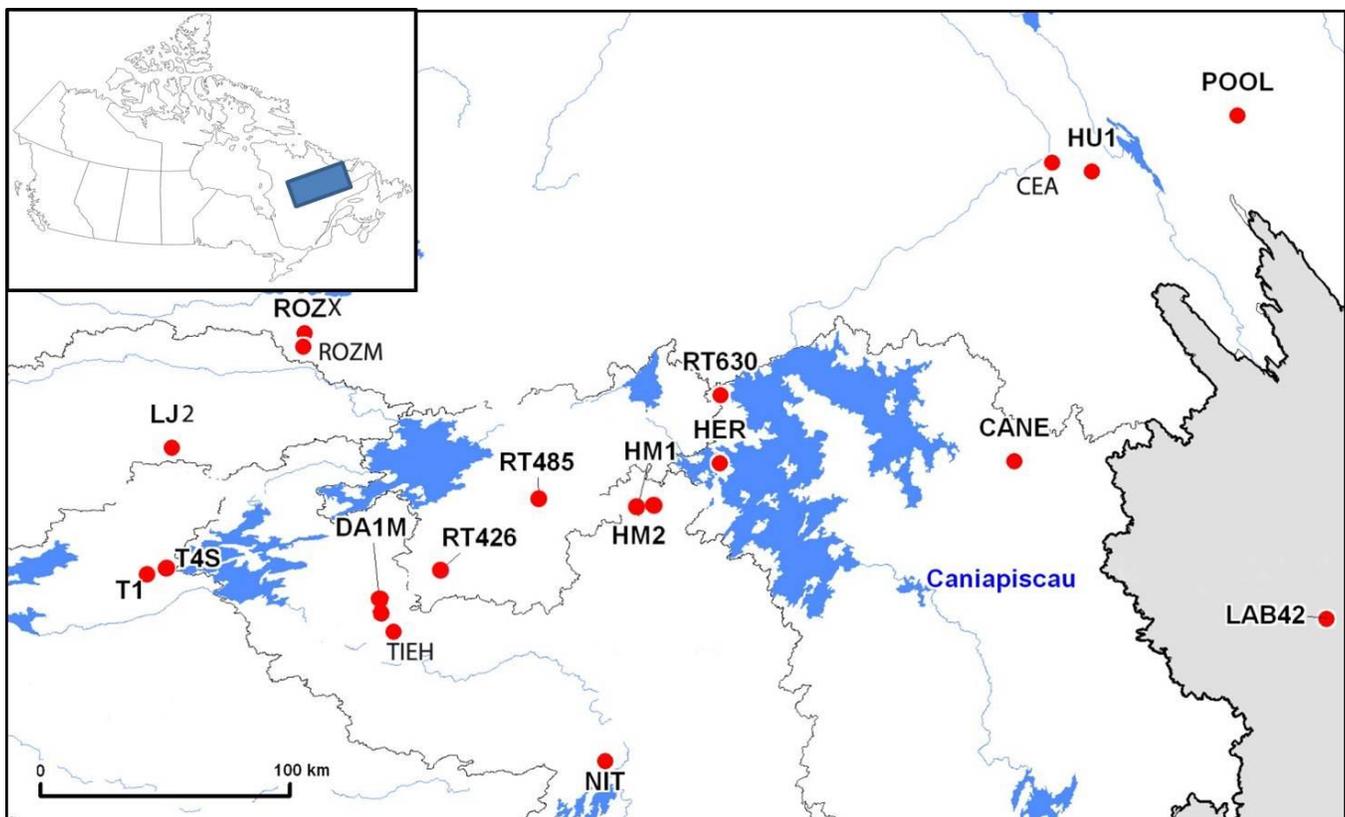


Figure 1. Localisation des sites d'épinette noire échantillonnés et utilisés pour la reconstruction des apports en eau au réservoir Caniapiscau (Figure produite par Frédéric Guay (Hydro-Québec)).

### Chronologies des épaisseurs de cernes

Pour chaque arbre, les cernes ont été préalablement interdatés visuellement et mesurés sur deux rayons. Les séries obtenues ont été standardisées en utilisant la méthode des bandes d'âge (Briffa *et al.*, 2001; Nicault *et al.*, 2010) afin de préserver au mieux les variations de croissance de basse fréquence. À l'issue de cette procédure nous obtenons pour chaque site une chronologie maîtresse standardisée de dimension comparable et débarrassée des signaux liés à l'âge de l'arbre. Cette méthode permet de garder une grande partie des fluctuations de basse fréquence enregistrées dans les cernes.

### Chronologies issues de l'analyse densitométrique

Pour la mesure de la densité des cernes, nous avons suivi la procédure décrite par Schweingruber *et al.* (1978), Schweingruber (1988) et Cournoyer (2010). Seules les sections transversales d'arbres exemptes de toute anomalie (pourriture, bois de réaction, malformations etc.) ont fait l'objet d'une découpe et ont été radiographiées. La mesure de la densité ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) est réalisée sur les radiographies grâce à un microdensitomètre optique (DENDRO 2003 microdensitometer (Walesch, Switzerland); Chapitre 8). Ces analyses nous ont fourni des séries temporelles de la densité maximale et de la densité minimale du cerne. Ces séries ont été standardisées en utilisant la même méthode des bandes d'âges (Briffa *et al.*, 2001) et ensuite une moyenne par site a été construite pour chacun de ces paramètres.

### Chronologies issues de l'analyse dendroisotopique

L'analyse des isotopes stables du carbone et de l'oxygène ( $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{18}\text{O}$ ) a été réalisée sur quatre arbres soigneusement sélectionnés au sein des peuplements des sites DA1, HM1 et POOL. Les protocoles de préparation des échantillons et des analyses isotopiques

sont détaillés aux chapitres 2 et 3 et dans Bégin *et al.* (2015). Pour la période 1940-2004, les analyses ont été réalisées au pas de temps annuel, et, pour une raison économique, les analyses sur la période 1800-1940 ont été réalisées au pas de temps bisannuel. Notons que les valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$  ont été corrigées de l'effet de Suess dû à la présence de  $\text{CO}_2$  anthropique dans l'atmosphère. Après avoir évalué le synchronisme et la cohérence des séries entre elles ( $\text{EPS} > 0,8$ ), les séries individuelles de  $\delta^{13}\text{C}$  et de  $\delta^{18}\text{O}$  ont été moyennées afin d'obtenir une chronologie moyenne par site pour chaque isotope.

### Les données hydrologiques

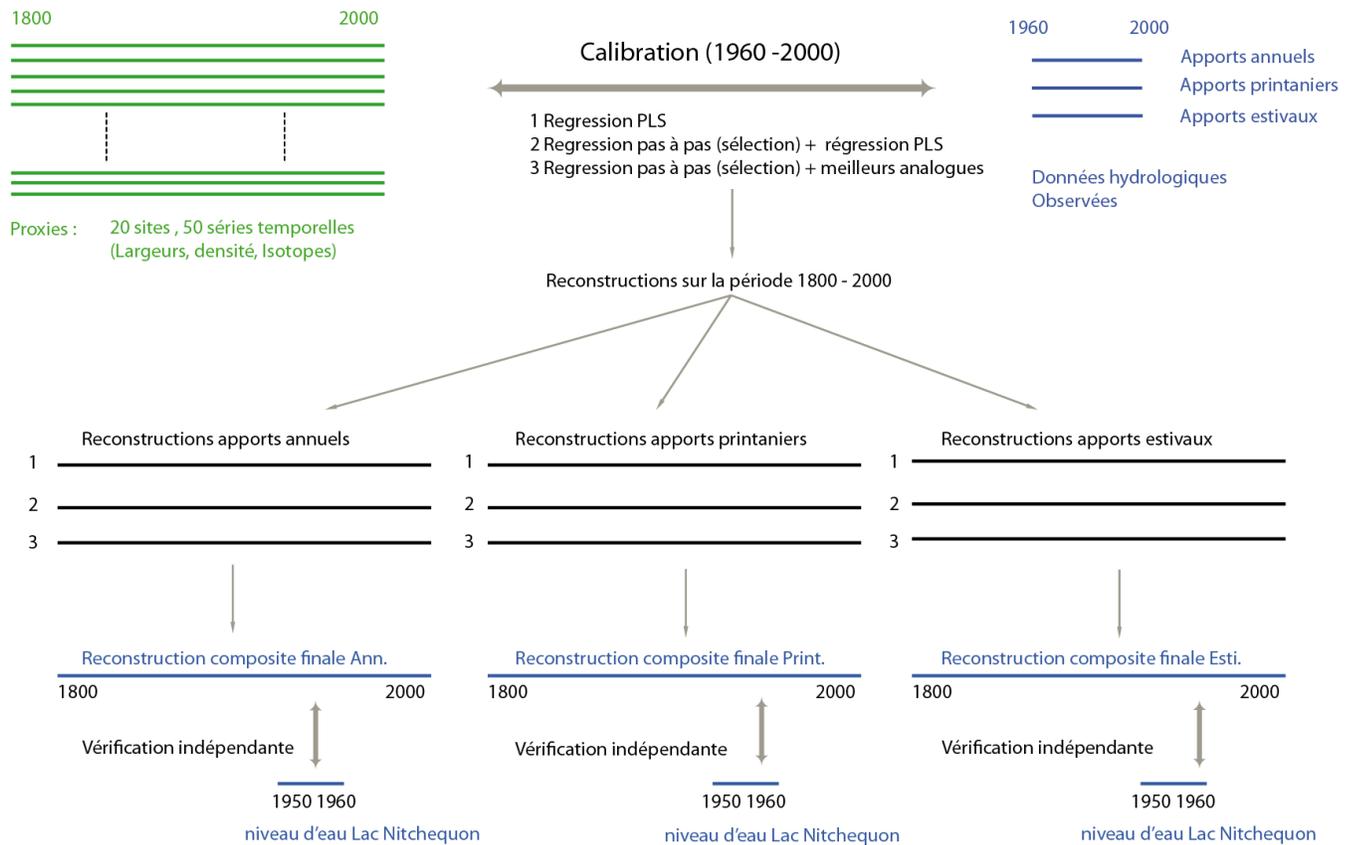
Les données hydrologiques utilisées sont les apports aux bassins ( $\text{mm}/\text{j}$ ) de Caniapiscou fournies par Hydro-Québec. Nous avons utilisé ces données sur la période 1960-2000. Trois variables hydrologiques ont été considérées : les apports moyens printaniers, les apports moyens estivaux et les apports annuels moyens.

Pour la validation indépendante, très peu de données existent. Nous avons utilisé les niveaux d'eau du Lac Nitchequon qui se situe à 150 km au sud-ouest du réservoir Caniapiscou. Ces données fournies par Environnement Canada ont été utilisées sur la période 1950-1960.

### Méthode de reconstitution hydrologique

Afin de renforcer les reconstitutions, nous avons mis en œuvre une combinaison de différentes méthodes : deux méthodes basées sur la calibration, une approche linéaire (PLS extension du modèle de régression linéaire multiple sur analyse en composante principale) et une non linéaire (réseaux de neurones), et une méthode basée sur la similarité (méthode des meilleurs analogues) qui ne permet pas d'inférence (Figure 2). Ces méthodes ont été appliquées d'une part sur l'ensemble des séries temporelles retenues et d'autre part sur une

## 16. Reconstitution des apports en eau des deux derniers siècles : Complexe La Grande



**Figure 2. Description de la démarche méthodologique utilisée pour reconstituer les apports en eau à partir des séries chronologiques de cerne.**

sélection de séries temporelles obtenues par la méthode de régression pas à pas. Cette dernière approche permet de sélectionner les séries temporelles les plus appropriées pour la reconstitution de chacune des séries hydrologiques et ainsi de réduire le nombre de variables explicatives. Ensuite, les reconstitutions les plus significatives obtenues sont combinées. En utilisant cette méthode, nous espérons obtenir une reconstruction plus robuste avec un intervalle de confiance qui tient compte des erreurs liées aux proxies, mais aussi au choix des différentes méthodes de calibration ou d'étalonnage.

La combinaison a été réalisée à partir d'un mélange de distributions gaussiennes (obtenues grâce à un processus de ré-

échantillonnage), une pour chaque méthode, dans lesquelles la moyenne de la valeur reconstruite et son écart-type ont été obtenus à partir des intervalles de confiance individuels associés à chaque procédé. La valeur retenue pour la reconstitution finale est le mode de la distribution combinée obtenue pour chaque année. L'intervalle de confiance pour la reconstruction composite est donné par les 5e et 95e percentiles basés sur les trois distributions conjointes.

Nous avons appliqué cette méthode pour reconstituer les apports moyens annuels, printaniers (mois de mai-juin) et estivaux (mois de juillet-août-septembre) au réservoir Cania-piscau (Figure 3).

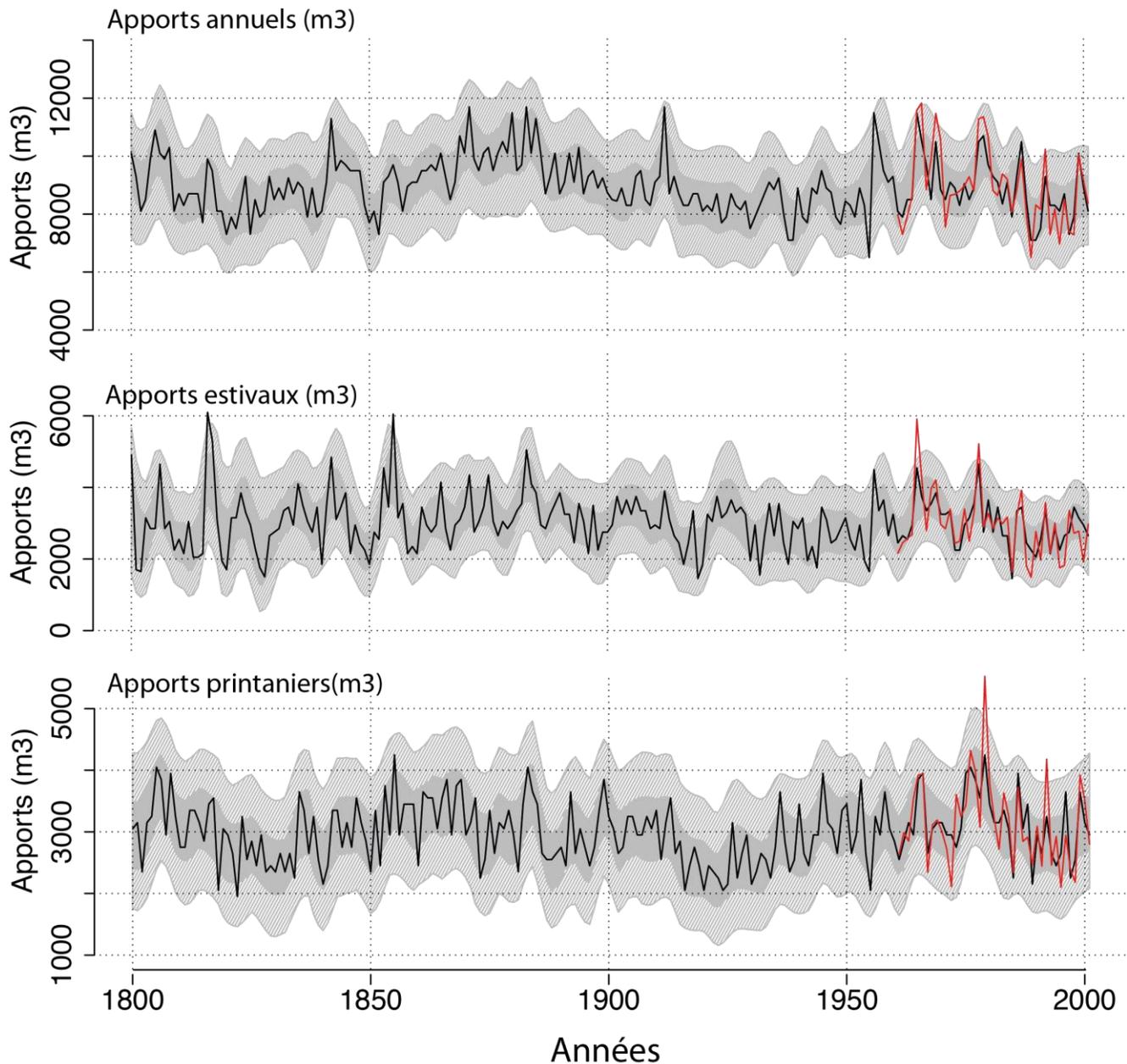


Figure 3. Reconstitution des apports en eau annuels, printaniers (mai-juin) et estivaux (juillet-août-septembre) au réservoir Caniapiscau. En rouge sont superposées les données d'apports observés fournis par Hydro-Québec.

### Évaluation des reconstructions

Les reconstructions ont été évaluées sur la base de la qualité statistique des reconstructions intermédiaires, par la comparaison des reconstructions finales (combinées) avec les données observées et par une vérification indépendante qui compare les reconstructions combinées finales aux niveaux d'eau du lac Nitchequon sur la période 1950-1960.

### Évaluation des reconstitutions intermédiaires

Toutes les reconstitutions intermédiaires n'ont pas été retenues. En effet les reconstructions réalisées à partir de réseaux de neurones ont posé des problèmes de stabilité au niveau inférence. Trois reconstructions ont été retenues, la reconstruction «PLS», la reconstruction PLS réalisée à partir des séries sélectionnées (par régression pas à pas), et la reconstruction « meilleurs analogues » réalisée

aussi sur les données sélectionnées. Elles ont été évaluées sur la base des statistiques associées: coefficient de détermination ( $R^2$ ), du RE (Guiot et Nicault, 2010) calculé sur les données de vérification (issues des méthodes de rééchantillonnage bootstrap et jackknife) et du RMSE (erreur standard; Tableau 1).

Ces statistiques montrent que, pour les apports en eau annuels et estivaux, la cohérence entre les données reconstituées et les données observées est très bonne et que le pouvoir de prédiction donné par le RE est lui aussi très bon et ce, quelle que soit la méthode utilisée. En revanche, pour les apports printaniers les statistiques montrent des résultats beaucoup plus inégaux avec une assez bonne cohérence entre la reconstitution et les observations, mais avec un pouvoir de prédiction (RE) allant de très moyen à quasi nul selon la méthode.

Au regard des statistiques associées aux reconstitutions, la méthode des meilleurs analogues est celle qui possède le meilleur pouvoir prédictif (peu de différence entre  $R^2$  et RE). Cependant, le faible nombre d'années disponibles pour définir les analogues se ressent fortement dans la reconstruction avec l'importante réplication de valeurs similaires (Nicault *et al.*, 2014). La méthode PLS donne également de bons résultats et une qualité de prédiction très bonne, surtout lorsqu'elle est appliquée sur les séries dendrochronologiques sélectionnées par régression pas à pas.

## Évaluation des reconstructions composites finales

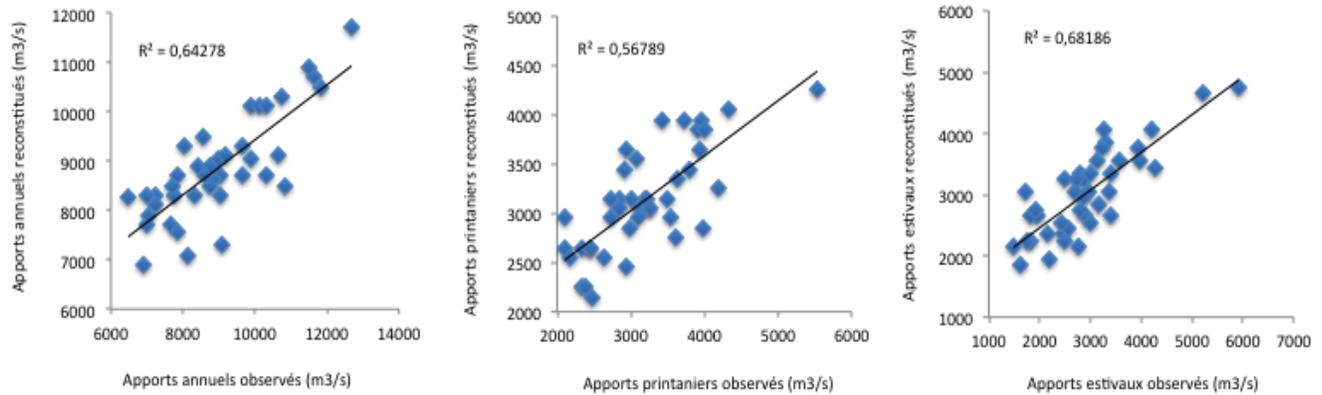
La comparaison avec les observations ayant servi d'analogues ou de régresseurs montre que la corrélation entre les reconstructions combinées et les données observées est équivalente aux  $R^2$ , voire meilleure dans le cas des apports printaniers, à ceux obtenus pour les reconstitutions intermédiaires (Figure 4).

Ces reconstitutions ont été confrontées aux niveaux d'eau du lac Nitchequon (Figure 5). Pour les apports en eau annuels et estivaux, les corrélations obtenues sur la période de vérification indépendante (hors période de calibration et de construction des analogues) sont similaires à celles obtenues sur la période 1960-2003 (non montrées). Bien que la période de vérification indépendante soit relativement courte (10 ans), on peut donc considérer la qualité des reconstructions des apports annuels et estivaux comme très bonne. En revanche pour les apports printaniers les corrélations chutent sur la période de vérification ( $r^2 = 0$ ), ce qui confirme la piètre qualité des reconstitutions des apports printaniers.

Les résultats obtenus montrent donc que les bioindicateurs "cernes" sont utilisables et performants dans l'optique de reconstruire la variabilité des niveaux d'eau passés dans les environnements boréaux. Ainsi, il est possible de reconstituer des séries hydrologiques fiables, continues et multi-centenaires qui pourront aider à mieux comprendre les princi-

**Tableau 1. Statistiques associées aux reconstitutions intermédiaires des reconstitutions.**

Variables	Method	Calib period	nb_series	nb_PC	r2	r2p(RE)	rmse	rmsep
Apports annuels	PLS	1961-2001	50	3	0,68	0,40	763,26	1057,44
	Selec. + PLS	1961-2002	10	7	0,70	0,52	732,81	945,12
	Selec. + BAM	1961-2003	10	0	0,69	0,66	745,56	907,55
Apports estivaux	PLS	1961-2001	50	5	0,80	0,31	405,40	762,87
	Selec. + PLS	1961-2002	11	9	0,77	0,57	439,10	601,94
	Selec. + BAM	1961-2003	11	0	0,60	0,59	580,20	538,71
Apport printanniers	PLS	1961-2001	50	2	0,47	0,09	513,32	678,87
	Selec. + PLS	1961-2002	8	4	0,52	0,26	488,82	612,83
	Selec. + BAM	1961-2003	8	0	0,54	0,56	486,11	538,90



**Figure 4. Vérification sur la période de calibration (1960-2000) : Reconstitutions combinées versus données observées.**

poux processus qui régissent les fluctuations temporelles de la ressource en eau.

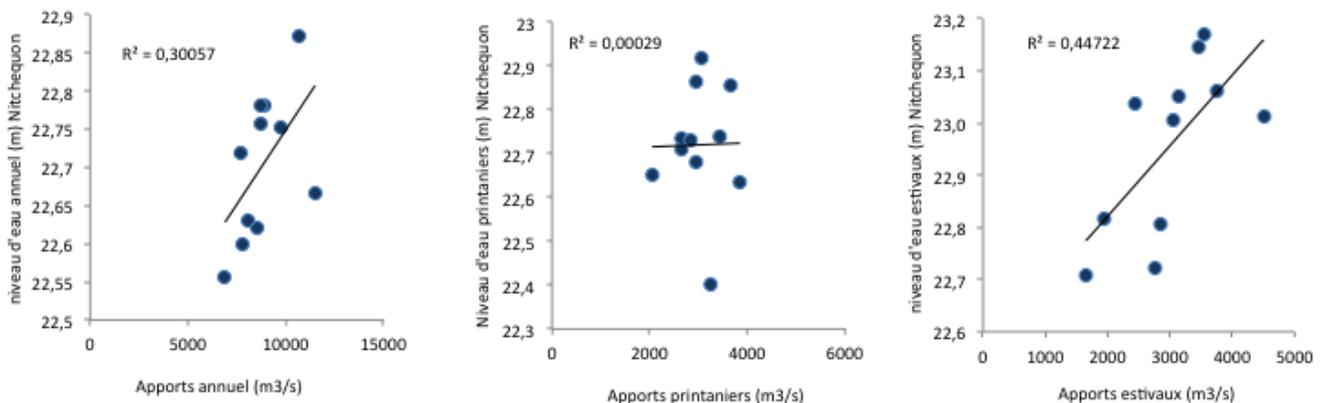
### Variabilité hydrologique au cours des deux derniers siècles

Quelle que soit la variable saisonnière, les reconstitutions hydrologiques réalisées n'ont pas mis en évidence de tendance générale des niveaux d'eau au cours des 200 dernières années, ni à la hausse, ni à la baisse. En revanche, elles ont mis en évidence des périodes bien marquées de hautes eaux et de basses eaux, ainsi que des changements au cours du temps dans l'amplitude de la variabilité interannuelle.

Quant à la variabilité des apports annuels en eau au cours des deux derniers siècles, trois périodes se distinguent particulièrement. La première est la décennie 1820-1830

qui est caractérisée par de faibles niveaux d'eau associés à une faible variabilité interannuelle. Les apports en eau sur cette période sont plus faibles que ceux mesurés durant les années 1990. La dernière partie du XIXe siècle est plutôt une période de forte hydraulicité avec un maximum dans les années 1870-1890. Cette période de hautes eaux est associée à une forte variabilité des apports. La troisième période remarquable, 1920-1950 est caractérisée par des apports en eau assez faibles mais surtout une très faible variabilité. D'autres événements plus ponctuels peuvent être aussi relevés comme par exemple des périodes de forte hydraulicité autour de 1840 et 1910 et une période de faible hydraulicité autour de 1850.

Il est plus difficile de dégager des périodes de hautes ou de basses eaux au sein des



**Figure 5. Vérification indépendante (1950-1960) : Reconstitutions combinées versus niveaux d'eau du lac Nitchequon.**

200 ans d'apports en eau estivaux reconstitués. Cependant, on peut noter une augmentation significative de la variabilité durant la deuxième moitié du XIXe siècle avec notamment des années de très forte hydraulité estivale.

Nos reconstructions réalisées à partir de séries dendrochronologiques sont cohérentes avec les reconstructions réalisées sur la même région, à partir des cicatrices glacielles (Chapitre 13). Sur la période 1850-1980, la corrélation entre les apports annuels reconstruits et la reconstruction réalisée par Boucher *et al.* (2011) est hautement significative ( $r = 0,42$ ,  $p < 0,001$ ). La période de hautes eaux des années 1860-1890 et celle de basses eaux de 1920-1960 se retrouvent dans les deux reconstructions réalisées à partir de données et de méthodes très différentes. D'autres études réalisées dans le Nord du Québec montrent également une hausse de l'activité glacielle à la fin du XIXe siècle et une baisse au milieu du XXe siècle (Lemay et Bégin, 2008; Bégin, 1999, 2000ab; Bégin et Payette, 1988; Tardif et Bergeron, 1997). Ces convergences entre les différentes reconstitutions tendent à confirmer la forte hydraulité de la fin du XIXe siècle et la faible hydraulité du milieu du XXe.

### Conclusion

La reconstitution des apports en eau à partir des bio-indicateurs "cernes" en milieu boréal posait des problèmes théoriques (l'eau n'est pas le facteur limitant principal) et pratiques (la très faible couverture spatiale et temporelle des observations hydrologiques). Afin d'optimiser les chances de produire des reconstitutions "solides", nous avons utilisé différents types de proxies "cernes" et plusieurs méthodes de reconstitution. Les reconstructions d'apports en eau annuels et estivaux, ainsi obtenues pour le réservoir Caniapiscou, sont statistiquement très satisfaisantes. De plus, bien que réalisée sur une très courte période, la vérification indépendante confirme la qualité de ces reconstructions pour ces deux

paramètres hydrologiques. En revanche la reconstitution des apports printaniers à partir des séries continues de cernes est beaucoup moins performante, la vérification indépendante montrant une corrélation nulle entre les apports printaniers au réservoir Caniapiscou et les niveaux d'eau du lac Nitchequon. Les reconstitutions hydrologiques obtenues n'ont pas mis en évidence de tendance générale des niveaux d'eau sur les 200 dernières années, ni à la hausse, ni à la baisse. En revanche, elles ont mis en évidence des périodes bien marquées de hautes eaux (fin XIXe siècle) et de basses eaux (1920-1940) ainsi que des changements au cours du temps dans l'amplitude de la variabilité interannuelle. Notons que nous avons observé des relations fortes entre la variabilité temporelle des apports en eau estivaux et l'indice de téléconnexion atmosphérique AO estival ( $r = 0,42$ ,  $p < 0,01$  sur la période 1900-2000; Nicault *et al.*, 2014), ainsi qu'entre les indices NAO hivernal et estival et les apports annuels ( $r = 0,3$ ,  $p < 0,01$  sur la période 1900-2000; Nicault *et al.*, 2014).

<https://doi.org/10.4095/328086>

### Références

- Bégin, C., Gingras, M., Savard, M.M., Marion, J., Nicault, A. et Bégin, Y., 2015. Assessing tree-ring carbon and oxygen stable isotopes for climate reconstruction in the Canadian northeastern boreal forest. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 423: 91-101.
- Bégin, Y., 1999. Tree-ring dating of extreme lake levels at the subarctic-boreal interface. *Quaternary Research*, 55: 133-139.
- Bégin, Y., 2000a. Reconstruction of subarctic lake levels over past centuries using tree rings. *Journal of Cold Regions Engineering*, 14: 192-212.
- Bégin, Y., 2000b. Ice-push disturbances in high-boreal and subarctic lakeshore ecosystems since AD 1830, northern Quebec, Canada. *The Holocene* 10 (2): 179-189.
- Bégin, Y. et Payette, S., 1988. Dendroecological evidence of lake-level changes during the last three centuries in Subarctic Quebec. *Quaternary Research*, 30: 210-220.
- Briffa, K.R., Osborn, T.J., Schweingruber, F.H., Harris, I.C., Jones, P.D., Shiyatov, S.G. et Vaganov, E.A., 2001.

- Low-frequency temperature variations from a northern tree ring density network. *Journal of Geophysical Research*, 106: 2929-2941.
- Boucher, É., Bégin, Y. et Arseneault, D., 2010. Dendrohydrologie en milieu boréal. In Payette, S. et Filion, L. (eds) *Dendroécologie : concepts, méthodes et applications*. Presses de l'Université Laval, Québec, pp. 573-592.
- Boucher É., Ouarda, T.B.M.J., Bégin, Y. et Nicault, A., 2011. Spring flood reconstruction from continuous and discrete tree ring series *Water Resources Research*, 47, W07516 doi:10.1029/2010WR010131
- Cournoyer, L., 2010. Imagerie numérique et analyse densitométrique du bois. In Payette, S. et Filion, L. (eds) *Dendroécologie : concepts, méthodes et applications*. Presses de l'Université Laval, Québec, pp. 283-310.
- Guiot J. et Nicault, A., 2010. Méthodes de dendroclimatologie à l'échelle continentale : fonctions de réponse et fonctions de transfert. In Payette, S. et Filion, L. (eds) *Dendroécologie : concepts, méthodes et applications*. Presses de l'Université Laval, Québec. pp. 229-253.
- Kundzewicz, Z.W., Mata, L.J., Arnell, N.W.P., Döll, P., Kabat, B., Jiménez, K., Miller, A., Oki, T., Sen, Z. et Shiklomanov, I.A., 2007. Freshwater resources and their management. In: *Climate Change: Impacts, Adaptation and Vulnerability: Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, pp. 173–210.
- Lemay, M. et Bégin, Y., 2008. Hydroclimatic analysis of an ice-scar tree-ring chronology of a high-boreal lake in Northern Quebec, Canada. *Hydrological Research*, 39: 451–464.
- Meko, D.M., Therrell, M.D., Baisan, C.H. et Hughes, M.K., 2001. Sacramento River flow reconstructed to AD 869 from tree rings. *Journal of the American Water Resources Association*, 37: 1029–1039.
- Nicault A., Bégin, Y. et Guiot, J., 2010. La standardisation des séries dendrochronologiques. In Payette, S. et Filion, L. (eds) *Dendroécologie : concepts, méthodes et applications*. Presses de l'Université Laval, Québec. pp. 199-227.
- Nicault, A., Boucher, É., Bégin, C., Guiot, J., Perreault, L., Roy, R., Savard, M.M. et Bégin, Y., 2014. Hydrological reconstruction from tree-ring multiproxies over the last two centuries at the Canipiscau Reservoir, northern Québec, Canada. *Journal of hydrology*, 513: 435-445.
- Nicault, A., Alleaume, S., Brewer, S. et Guiot, J., 2008. Mediterranean drought fluctuation during the last 500 years based on tree-ring data. *Climate Dynamics*, 31: 227–245. <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-007-0349-3>.
- Perreault, L., Parent, E., Bernier, J., Bobée, B. et Slivitzky, M., 2000. Retrospective multivariate Bayesian change-point analysis: a simultaneous single change in the mean of several hydrological sequences. *Stochastic Environmental Resources Risk Assessment Journal*, 14 (4). <http://dx.doi.org/10.1007/s004770000051>.
- Schweingruber, F.H., 1988. *Tree rings - basics and applications of dendrochronology*. Kluwer Academic Publishers. ISBN 90277244 58. 276 p.
- Schweingruber, F.H., Fritts, H.C., Bräker, O.U., Drew, L.G. et Schär, E., 1978. The X-ray technique as applied to dendroclimatology. *Tree-Ring Bulletin*, 38: 61–91.
- Tardif, J. et Bergeron, Y., 1997. Ice-flood history reconstructed with tree-rings from the southern boreal forest limit, western Quebec. *The Holocene*, 7: 291–300.
- Woodhouse, C.A., Meko, D.M., Griffin, D. et Castro, C.L., 2013. Tree rings and multiseason drought variability in the lower Rio Grande Basin, USA. *Water Resource Research*, 49: 1–7. <http://dx.doi.org/10.1002/wrcr.20098>.

# 17. Reconstitution des apports en eau et influence de la circulation atmosphérique sur la variabilité spatiotemporelle de l'hydrologie

Antoine Nicault, Étienne Boucher, Luc Perreault et Joël Guiot

## Résumé

Les apports en eau annuels et estivaux ont été reconstitués pour quatre grands bassins du Québec-Labrador, LG2, LG4, Caniapiscau et Churchill-Falls, en utilisant des variables dendrochronologiques (chronologies d'épaisseur de cernes, de densité maximale et de rapports isotopiques  $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{18}\text{O}$  sur la période 1800-2000). Ces reconstitutions ont permis de mettre en évidence des contrastes importants en termes de régimes hydrologiques entre l'est et l'ouest de la péninsule et de les relier à des indices de circulation atmosphérique. La variabilité des niveaux d'eau à l'ouest, principalement pour LG2, est très significativement corrélée à l'Oscillation Atlantique Multi décennale (AMO), alors que la variabilité des apports en eau des bassins les plus à l'est (Churchill-Falls) est fortement corrélée aux indices de l'Oscillation Nord-Atlantique (NAO) et de l'Oscillation Arctique (AO) hivernaux (décembre, janvier et février) et aux indices « Pacifiques » tels que ENSO sur la première partie du XXe siècle.

## Abstract

The annual and summer water supplies were reconstructed over the four large catchments, LG2, LG4, Caniapiscau and Churchill-Falls in Quebec-Labrador, using tree-ring proxies (chronologies of ring widths, maximum density and isotopic ratios  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  over the period 1800-2000). These reconstructions have made it possible to highlight important contrasts in terms of hydrological regimes between the east and west of the peninsula and to relay them with atmospheric circulation

indices. The variability of water levels in the western region, mainly LG2, is very significantly correlated with the Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) while the variability of the water supplies of the easternmost basins (Churchill-Falls) is strongly correlated with the winter (December, January and February) North Atlantic Oscillation (NAO) and Arctic Oscillation (AO) indices and with "Pacific" indices such as ENSO over the first part of the 20th century.

## Introduction

Après avoir montré qu'il est possible de reconstituer les apports en eau à partir des cernes de croissance des arbres en milieu boréal et de reconstituer les apports annuels, printaniers et estivaux sur la période 1800-2000 pour le réservoir Caniapiscau (Chapitre 16; Nicault *et al.*, 2014), dans le cadre du projet AnHyCli (financé par Ouranos), nous avons testé le potentiel de reconstruction des apports en eau pour tous les bassins du complexe La Grande, pour le bassin du réservoir Smallwood / Churchill Falls et pour les bassins adjacents à ces deux systèmes (Eastmain1, Manic 5 et rivière aux Outardes 4). Les résultats de cette pré-analyse ont montré le bon potentiel de reconstitution des apports annuels et estivaux pour les bassins LG2 et Churchill Falls et dans une moindre mesure pour les bassins LG3, LG4 et LA1. En revanche, concernant les apports printaniers (pour tous les bassins), et quelle que soit la variable considérée pour les bassins adjacents, le potentiel de reconstitution est très faible à partir du jeu de données existant (l'échantillonnage a été planifié pour l'étude des bassins de La Grande et de Churchill Falls). À la lueur des résultats de cette analyse, les

bassins de LG2, LG4 et Churchill Falls ont été choisis pour reconstituer les apports annuels et estivaux. L'objectif est de compléter ainsi les reconstitutions déjà réalisées pour le réservoir Caniapiscou afin de pouvoir analyser la variabilité spatiale et temporelle des niveaux d'eau des deux derniers siècles sur un gradient est-ouest allant de la baie de James à la mer du Labrador. Le but de cette analyse étant de déterminer si les différents bassins sont similaires, ou non, en termes de régime hydrologique. Est-ce que la variabilité hydrologique est cohérente et homogène sur l'ensemble du territoire ? Est-elle sujette à des contrastes spatiaux ? Dans un second temps, le rôle de la circulation atmosphérique et des téléconnexions atmosphère-océan dans le déterminisme des éventuelles variations spatiales et temporelles observées sera recherché.

#### Reconstitution des apports annuels et estivaux pour les bassins de LG2, LG4, Caniapiscou et Churchill Falls

Les reconstitutions d'apports annuels et estivaux pour les bassins de LG2, LG4 et Churchill-Falls ont été réalisées à partir des séries temporelles d'épaisseurs de cerne (Chapitre 9; Nicault *et al.*, 2015), de densités minimale et maximale (Chapitre 8; Boucher *et al.*, 2017) et des rapports isotopique  $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{18}\text{O}$  (Chapitre 15; Bégin *et al.*, 2015), couvrant la période 1800-2000. La calibration des relations cernes/climat a été réalisée sur la période 1960-2000. La méthode développée pour reconstituer les apports au réservoir Caniapiscou (Chapitre 16; Nicault *et al.*, 2014; Nasri *et al.*, 2020), c'est-à-dire la combinaison de trois approches différentes (i) PLS; (ii) PLS sur les variables sélectionnées par une régression pas à pas; (iii) méthode des meilleurs analogues (BAM) sur les variables sélectionnées par une régression pas à pas, a été appliquée à ces trois bassins. Les reconstructions obtenues à partir

de ces trois approches sont ensuite combinées, grâce à une procédure de ré-échantillonnage dans l'espace des paramètres, pour fournir la reconstruction composite finale. La procédure suivie étant la même, la reconstitution réalisée précédemment pour Caniapiscou peut être ainsi intégrée à la suite de l'analyse.

Notons que des efforts importants ont été faits pour intégrer les séries sédimentaires (laminées annuellement) de Grand Lake aux reconstitutions des apports au bassin de Churchill-Falls. Malheureusement, lors de l'étude, il restait trop d'incertitudes quant à la précision de ces séries. De plus, les varves enregistrent principalement l'intensité des crues printanières (non reconstituée ici), tandis que les cernes sont de bons proxys pour les apports annuels et estivaux. Les séries sédimentaires n'améliorant pas nos reconstitutions, elles n'ont donc finalement pas été retenues dans le cadre de cette analyse.

Les statistiques associées aux reconstitutions (toutes ne sont pas présentées dans ce chapitre, voir Nasri *et al.*, 2020) des apports annuels et des apports estivaux montrent un degré de confiance élevé pour toutes les reconstitutions. Les statistiques obtenues pour les bassins LG2, LG4 et Churchill sont toutes plus significatives que celles obtenues pour Caniapiscou et confirment donc la pertinence de ces reconstitutions hydrologiques. Les  $R^2$  entre la reconstitution composite finale et les apports observés varient entre 0,64 et 0,77 pour les apports annuels (Figure 1) et entre 0,75 et 0,86 pour les reconstitutions d'apports estivaux (Figure 2). Malheureusement, vu la rareté des observations dans la région, aucune vérification indépendante n'a pu être réalisée. Cependant la bonne adéquation entre données observées et données modélisées nous incite à considérer ces reconstitutions comme acceptables et utilisables pour la suite de l'étude.

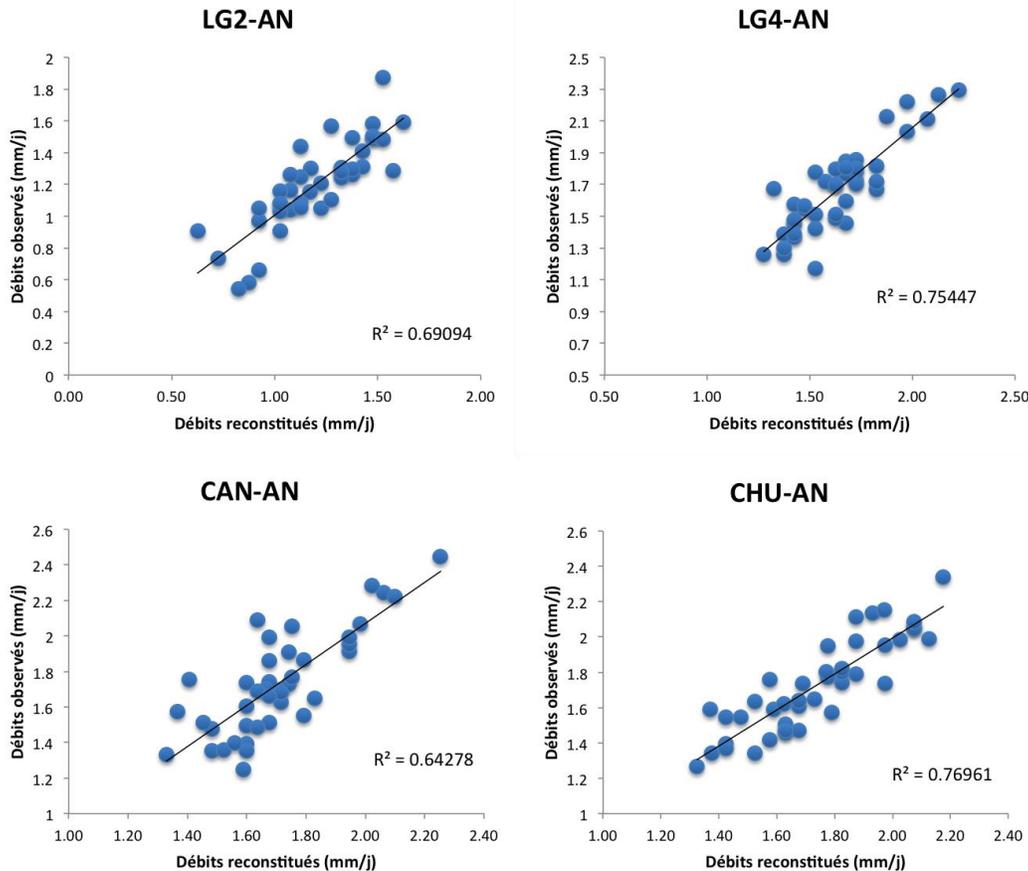


Figure 1. Relation entre apports annuels reconstitués (COMBI) et apports annuels observés pour les bassins de LG2, LG4, CAN et CHU.

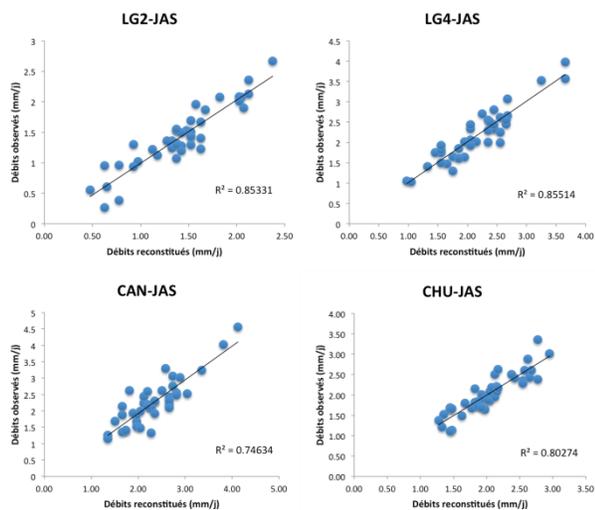
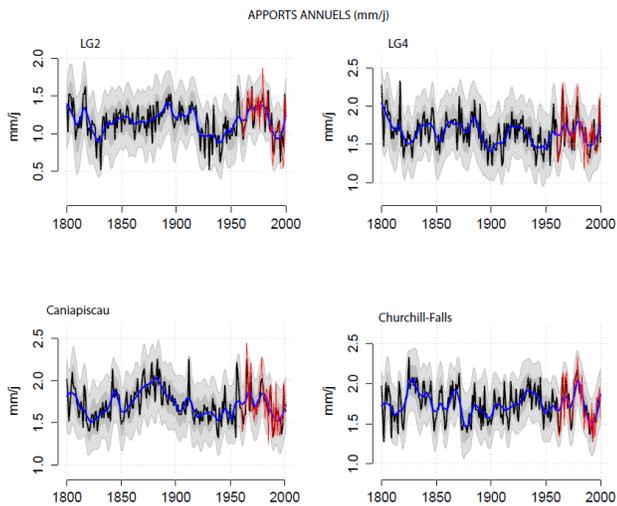


Figure 2. Relation entre apports estivaux (JAS, mm/j) reconstitués (COMBI) et apports estivaux (JAS, mm/j) observés pour les bassins de LG2, LG4, CAN et CHU.

### Analyse de la variabilité inter-bassins

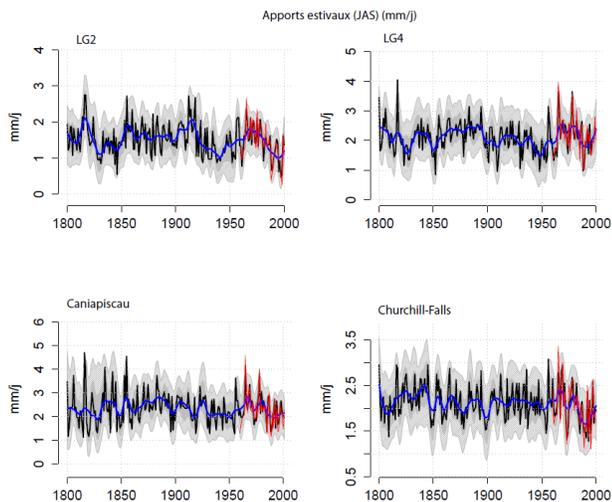
Il n'y a pas de grandes tendances dans l'ensemble des reconstitutions, ni à la baisse, ni à la hausse sur les 200 dernières années, quels que soient les bassins et les variables considérés. En revanche, on observe une assez grande variabilité inter-bassins dans les variations de moyenne fréquence (Figures 3 et 4) particulièrement marquée entre les deux bassins les plus distants, LG2 à l'ouest et Churchill Falls à l'est. Ces différences sont plus grandes pour les apports annuels que pour les apports estivaux. Le tableau 1 montre en effet que les corrélations entre les deux bassins les plus éloignés (LG2 et CHU) sont de 0,25 concernant les apports annuels et de 0,51 pour les apports estivaux. À la figure 3, on peut observer que la variabilité temporelle des apports annuels est très différente entre LG2 et Churchill Falls, sur certaines

périodes les niveaux d'eau sont même en opposition (autour des années 1820 et autour des années 1940).



**Figure 3. Reconstitution des apports annuels (mm/j) pour les quatre bassins LG2, LG4, Caniapiscou et Churchill-Falls.**

Afin de caractériser les changements de « régime » historiques présents dans les séries reconstituées, un modèle de détection de rupture a été appliqué aux reconstitutions d'apports en eau annuels. Ces analyses s'appuient sur des modèles bayésiens de type mélanges de lois de probabilité, auxquels est ajoutée une dépendance temporelle (voir Chapitre 14). Ces modèles sont particulièrement



**Figure 4. Reconstitution des apports estivaux (mm/j) pour les quatre bassins LG2, LG4, Caniapiscou et Churchill-Falls.**

adaptés pour représenter des jeux de données où les observations peuvent provenir de plusieurs populations statistiques distinctes.

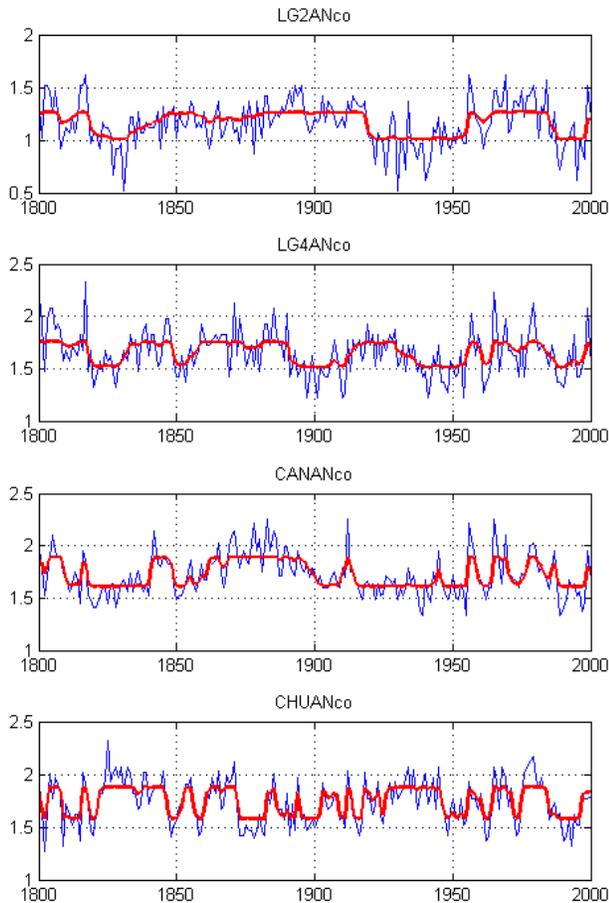
**Tableau 1. Corrélations entre les apports annuels et estivaux reconstitués aux différents bassins.**

r	LG2ANco	LG4ANco	CANANco	CHUANco
LG2ANco	1			
LG4ANco	0,500	1		
CANANco	0,648	0,594	1	
CHUANco	0,246	0,505	0,482	1

r	LG2JASco	LG4JASco	CANJASco	CHUJASco
LG2JASco	1			
LG4JASco	0,563	1		
CANJASco	0,522	0,697	1	
CHUJASco	0,507	0,596	0,697	1

Les résultats (Figure 5, équivalente à la figure 10 du Chapitre 14) donnent pour chacun des bassins des régimes à deux composantes. La figure met en évidence les différences observées entre les bassins. Les caractéristiques des régimes hydrologiques de LG2 et Churchill Falls sont contrastées: d'une part les périodes de hautes eaux et de basses eaux ne sont pas synchrones entre les deux bassins et même quelques fois en antiphase, et d'autre part, la fréquence des changements de régimes est très différente. En effet, tandis que les niveaux d'eau à LG2 peuvent persister dans un type de régime plusieurs dizaines d'années (*p. ex.* persistance en condition de hautes eaux une grande partie du XIXe siècle), on observe, au niveau de Churchills Falls, une fréquence beaucoup plus élevée de changements de régime, le même régime (hautes eaux ou basses eaux) ne durant jamais plus de 15-20 ans. La variabilité des régimes de LG4 et Caniapiscou est relativement similaire et présente en termes de fréquence de changement une situation intermédiaire aux deux bassins précédents.

Est-ce que ces différences importantes, exprimées par une forte augmentation des changements de régime d'ouest en est, sont liés à une faiblesse dans les reconstitutions ou bien à un réel contraste Est-Ouest dans la va-



**Figure 5. Analyse des changements de régimes pour les bassins LG2, LG4, Caniapiscau et Churchill Falls. Résultats produits à partir de la méthode bayésienne décrite au Chapitre 14.**

riabilité des apports en eau sachant qu'au Québec-Labrador, la variabilité hydroclimatique sur des échelles de temps décennales à multi-décennales peut, au moins en partie, être liée aux interactions océan-atmosphère se produisant dans l'ouest de la région de l'Atlantique Nord (O'Reilly *et al.*, 2017)?

### Recherche de l'influence de la circulation atmosphérique sur la variabilité spatiotemporelle de l'hydrologie

Des relations fortes ont été mises en évidence entre la variabilité temporelle des apports en eau estivaux et l'indice de téléconnexion atmosphérique AO estival ( $r = 0,42$ ,  $p < 0,01$  sur la période 1900-2000; Nicault *et al.*, 2014), entre les crues printanières et

l'indice AO printanier ( $r = 0,56$ ; Boucher *et al.*, 2009) et ainsi qu'entre les indices NAO hivernal et estival et les apports annuels ( $r = 0,3$ ,  $p < 0,01$  sur la période 1900-2000; Nicault *et al.*, 2014). Plusieurs autres études ont également soulevé des relations entre la circulation atmosphérique et la variabilité hydrologique au Québec (Assani *et al.*, 2008; Sveinsson *et al.*, 2008ab; Déry *et al.*, 2009, 2011; Brown *et al.*, 2010; Fortier *et al.*, 2011; Boucher *et al.*, 2017). Toutes les études montrent que les relations entre circulation atmosphérique et variabilité hydrologique, sont très complexes, variables dans l'espace et dans le temps et donc difficiles à mettre en évidence (Kingston *et al.*, 2006ab).

De façon exploratoire et afin de caractériser les relations entre variabilité hydrologique et circulation atmosphérique, une analyse de corrélation a été réalisée, sur une période temporelle large de 100 ans, prenant en compte la dimension spatiale est-ouest de l'étude. Les corrélations ont été calculées entre les apports (annuels et estivaux) des bassins LG2, LG4, Caniapiscau et Churchill Falls et les indices de circulations atmosphériques annuels et saisonniers « Atlantique » (Multidecadal Atlantic Oscillation (AMO; Ramankutty, 1994), AO; Thompson et Wallace, 1998, NAO; Hurrell, 1995; Jones *et al.*, 1997) et « Pacifique » (El Niño Southern Oscillation (ENSO; Curtis et Adler, 2000), Pacific decadal Oscillation (PDO; Mantua, 2002), et North Pacific Index (NPA; Trenberth et Hurrell, 1994)).

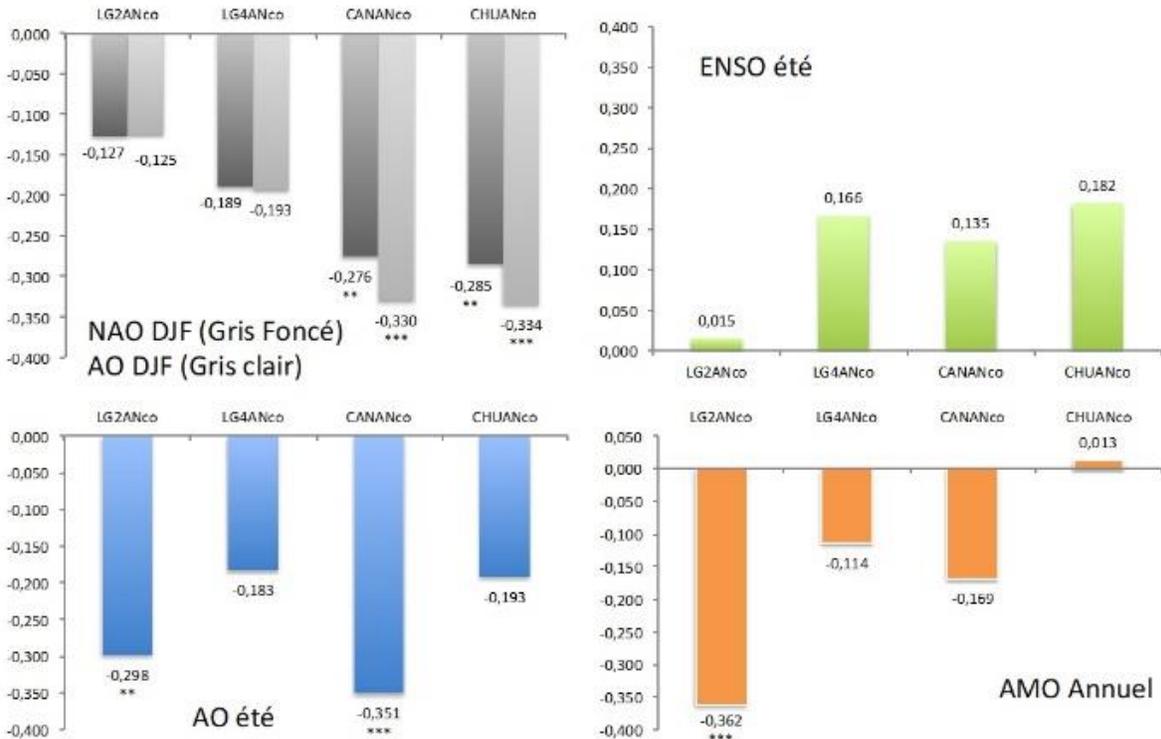
**Les relations entre indices atmosphériques et variabilité hydrologique varient dans l'espace**

L'analyse des corrélations entre les apports (annuels et estivaux) et les indices de circulation atmosphérique montre, tout d'abord, que plusieurs indices semblent jouer un rôle dans la variabilité des apports annuels et des apports estivaux (Figures 6 et 7). Ces indices sont quasiment les mêmes quelle que soit la période considérée, année ou été, seule l'intensité de la relation varie. On observe une influence prédominante des indices « atlantiques » AO, NAO et AMO sur les variations de niveau d'eau, alors que l'influence des indices « pacifiques » semble bien plus faible voire nulle. Seul l'ENSO estival montre une influence significative sur la variabilité des apports en eau estivaux des réservoirs centraux LG4 et Caniapiscou.

De plus, un très fort contraste est-ouest est mis en évidence. En effet, les apports annuels et estivaux des bassins à l'ouest, princi-

palement LG2, sont très significativement corrélés à Oscillation Atlantique Multi décennale (AMO) alors que la variabilité des apports en eau des bassins les plus à l'est (Churchill Falls) ne semble pas du tout influencée par cet indice. Inversement, la variabilité des apports en eau des bassins les plus à l'est (Churchill Falls et Caniapiscou) est fortement corrélée aux indices NAO et AO hivernaux (DJF), alors que les bassins à l'ouest n'y sont pas sensibles.

Seul l'indice AO estival semble exercer une influence sur l'ensemble des bassins étudiés. Cette influence est bien plus marquée sur les apports estivaux que sur les apports annuels. Concernant les apports estivaux, notons les corrélations significatives entre l'ENSO estival et les apports en eau estivaux des bassins centraux. C'est la seule influence significative visible des phénomènes de circulation atmosphérique pacifique sur les apports en eau dans le Nord du Québec.



**Figure 6. Corrélations entre les indices de circulation atmosphérique et les apports en eau annuels calculés sur la période 1900-2000.**

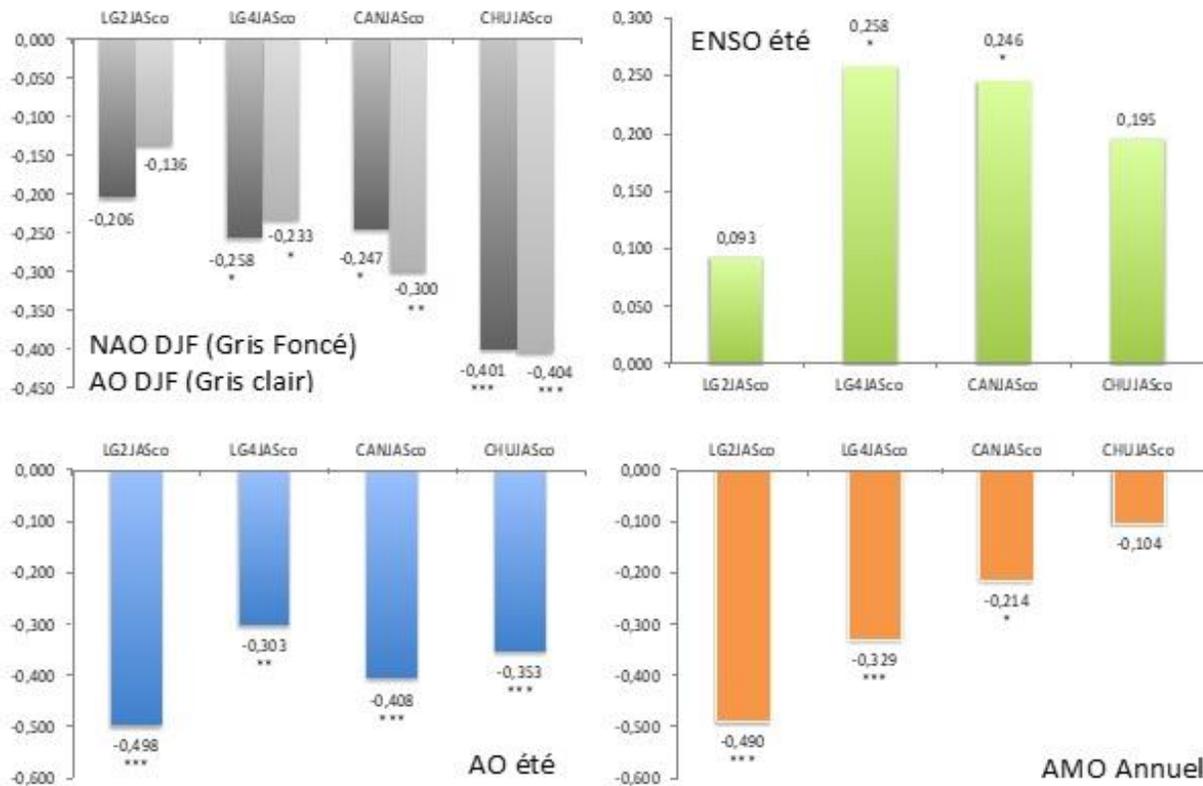


Figure 7. Corrélations entre les indices de circulation atmosphérique et les apports en eau estivaux calculés sur la période 1900-2000.

### Les relations entre indices atmosphériques et variabilité hydrologique varient dans le temps

Dans la littérature plusieurs auteurs ont fait mention de points de rupture, c'est-à-dire de changements soudains dans l'intensité et la nature des relations entre l'hydrologie et la circulation atmosphérique (Bonsal et Shabbar, 2008; Kingston *et al.*, 2006ab). Ainsi, afin de détecter d'éventuelles ruptures sur le Nord québécois, l'évolution des corrélations dans le temps entre les apports annuels et les différents indices a été analysée pour chaque bassin. Pour chaque indice mensuel des corrélations mobiles ont été calculées sur des périodes de trente ans en décalant la fenêtre d'une année à chaque fois, sur l'ensemble de la période 1900-2000. La signification des corrélations a été évaluée par procédure bootstrap. L'analyse a été réalisée pour les apports annuels de tous les bassins avec tous les indices.

Les résultats (Figure 8) montrent que les relations entre niveaux d'eau et indices de circulation atmosphérique varient au cours du temps, mais il est difficile de déceler des relations claires de cette analyse. En effet, quasiment tous les indices sont corrélés, à un moment ou à un autre, en alternance ou bien en combinaison, avec les apports annuels mais souvent sur des périodes trop courtes pour que l'on puisse en tirer des enseignements précis sur l'influence des schémas de circulation atmosphérique à grande échelle sur la variabilité temporelle des niveaux d'eau. De plus, comme il a été montré dans le paragraphe précédent, ces relations diffèrent ou évoluent d'un bassin à l'autre. Néanmoins quelques relations plus robustes se dégagent et peuvent être mises en avant :

- Pour tous les bassins la variabilité des apports des 20 dernières années (1980-

2000) semble être régie par les mêmes variables atmosphériques, le AO et le NAO estival;

- L'influence des indices « pacifiques », PDO, ENSO mais aussi NPA, sur les apports annuels est de plus en plus importante au fur et à mesure que l'on se déplace d'ouest en est. À Churchill Falls, les apports en eau de la première moitié du XX<sup>e</sup> siècle sont régis exclusivement par les caractéristiques de circulation atmosphérique provenant du Pacifique;
- Pour les bassins LG4 et Caniapiscau, la variabilité temporelle des apports annuels est expliquée principalement par les indices AO et NAO, avec cependant une période, très courte (1960-1980), durant laquelle ENSO exerce une influence très significative;
- À LG2, on retrouve l'influence dominante de AMO sur la variabilité des apports sur toute la période 1900-2000 excepté pour la période 1920-1940, caractérisée par des niveaux d'eau bas, durant laquelle l'ENSO hivernal est le seul indice corrélé très significativement aux apports.

## Conclusion

Les apports en eau annuels et estivaux des quatre grands bassins, LG2, LG4, Caniapiscau et Churchill-Falls, ont été reconstitués, à partir de proxies « cernes de croissance », sur la période 1800-2000 et nous ont ainsi permis de prolonger de 160 années supplémentaires les données sur les régimes hydrologiques du nord de la péninsule Québec-Labrador. À partir de ces reconstitutions, nous avons également pu mettre en évidence des contrastes importants en termes de régimes hydrologiques entre l'est et l'ouest de la péninsule, notamment en termes de fréquence des changements de régime. À LG2, les niveaux d'eau peuvent persister sur un type de régime plu-

sieurs dizaines d'années alors que, au niveau de Churchills Falls, une fréquence très élevée de changement de régime (15-20 ans) est observée.

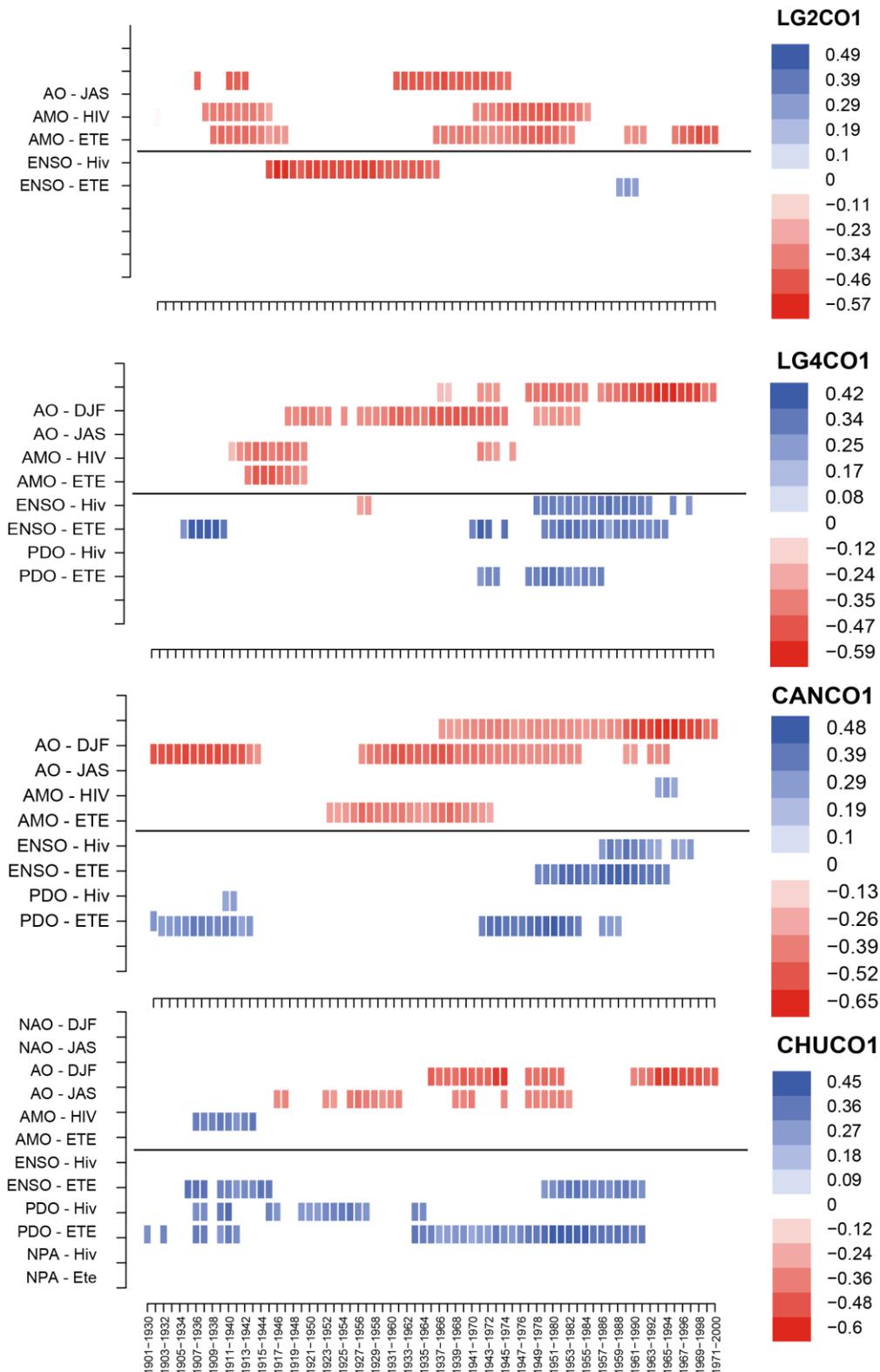
L'analyse du rôle de la circulation atmosphérique à grande échelle, appréhendée à travers des indices de circulation atmosphérique, a montré un fort contraste spatial et une grande variabilité temporelle de la relation entre indices atmosphériques et variabilité hydrologique. À LG2, l'AMO semble expliquer une grande partie de la variabilité hydrologique, et notamment de son caractère persistant, alors que la variabilité des apports en eau des bassins les plus à l'est (Churchill Falls) est fortement corrélée aux indices NAO et AO hivernaux (DJF) sur les 30 dernières années et aux indices PDO et ENSO sur une grande partie du XX<sup>e</sup> siècle. Ces forts contrastes est-ouest observés confirment et précisent, pour le secteur, les forts contrastes est-ouest et nord-sud déjà mis en évidence par Déry *et al.* (2009) et Brown (2010). Bien qu'encore exploratoire, l'analyse de ces modes oscillatoires confirme néanmoins leur pertinence potentielle pour la prévisibilité des débits dans la péninsule du Québec-Labrador (Sveinsson *et al.*, 2008ab).

<https://doi.org/10.4095/328090>

## Références

- Assani, A., Landais, D., Mesfioui, M. et Matteau, M., 2010. Relationship between the Atlantic Multidecadal Oscillation index and variability of mean annual flows for catchments in the St. Lawrence watershed (Quebec, Canada) during the past century. *Hydrology Research*, 41(2): 115-125.
- Bégin, C., Gingras, M., Savard, M.M., Marion, J., Nicault, A. et Bégin, Y., 2015. Assessing tree-ring carbon and oxygen stable isotopes for climate reconstruction in the Canadian northeastern boreal forest. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 423 : 91-101.
- Bonsal, B. et Shabbar, A., 2008. Impacts of large-scale circulation variability on low streamflows over Canada: a review. *Canadian Water Resources Journal*, 33(2) : 137-154.

## 17. Influence de la circulation atmosphérique sur la variabilité de l'hydrologie



**Figure 8. Analyse des corrélations entre les apports annuels moyens à LG2, LG4, Caniapiscau et Churchill Falls et les indices atmosphériques. Analyse de corrélations mobiles : fenêtre de 30 ans avec déplacement de 1 an. Seules les fenêtres de corrélations significatives sont représentées sur le graphique.**

- Boucher, É., Bégin, Y. et Arseneault, D., 2009. Hydroclimatic analysis of mechanical breakups reconstructed from tree-rings, Necopastic watershed, northern Québec, Canada. *Journal of hydrology*, 375(3-4) : 373-382.
- Boucher, É., Nicault, A., Arseneault, D., Bégin, Y. et Karami, M.P., 2017. Decadal Variations in Eastern Canada's Taiga Wood Biomass Production Forced by Ocean-Atmosphere Interactions. *Scientific Reports*, 7(1) : 1-13.
- Brown, R.D., 2010. Analysis of snow cover variability and change in Québec, 1948–2005. *Hydrological processes*, 24(14): 1929-1954.
- Curtis, S. et Adler, R., 2000. ENSO indices based on patterns of satellite-derived precipitation. *Journal of Climate*, 13(15) : 2786-2793.
- Déry, S.J., Hernández-Henríquez, M.A., Burford, J.E. et Wood, E.F., 2009. Observational evidence of an intensifying hydrological cycle in northern Canada. *Geophysical Research Letters*, 36(13), DOI:1029/2009GL038852.
- Déry, S.J., Mlynowski, T.J., Hernández-Henríquez, M.A. et Straneo, F., 2011. Interannual variability and interdecadal trends in Hudson Bay streamflow. *Journal of Marine Systems*, 88(3): 341-351.
- Fortier, C., Assani, A.A., Mesfioui, M. et Roy, A.G., 2011. Comparison of the interannual and interdecadal variability of heavy flood characteristics upstream and downstream from dams in inversed hydrologic regime: case study of Matawin river (Québec, Canada). *River Research and Applications*, 27(10): 1277-1289.
- Hurrell, J.W., 1995. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation and relationships to regional temperature and precipitation. *Science* 269: 676-679.
- Jones, P.D., Jónsson, T. et Wheeler, D., 1997. Extension to the North Atlantic Oscillation using early instrumental pressure observations from Gibraltar and South-West Iceland. *International Journal of Climatology*, 17: 1433-1450.
- Kingston, D.G., McGregor, G.R., Hannah, D.M. et Lawler, D.M., 2006a. River flow teleconnections across the northern North Atlantic region. *Geophysical Research Letters*, 33 (14). DOI:1029/2006GL026574.
- Kingston, D.G., Lawler, D.M. et McGregor, G.R., 2006b. Linkages between atmospheric circulation, climate and streamflow in the northern North Atlantic: research prospects. *Progress in Physical Geography*, 30(2): 143-174.
- Mantua, N.J. et Hare, S.R., 2002. The Pacific decadal oscillation. *Journal of oceanography*, 58(1): 35-44.
- Nasri, B.R., Boucher, É., Perreault, L., Rémillard, B.N., Huard, D., Nicault, A. et ARCHIVES-PERSISTENCE projects, 2020. Modeling Hydrological Inflow Persistence Using Paleoclimate Reconstructions on the Québec-Labrador (Canada) Peninsula. *Water Resources Research*, 56(5), e2019WR025122.
- Nicault A., Boucher É., Bégin, C., Guiot, J., Perreault, L., Roy, R., Savard, M.M. et Bégin, Y., 2014. Hydrological reconstruction from tree-ring multiproxies over the last two centuries at the Caniapiscau Reservoir, northern Québec, Canada. *Journal of hydrology*, 513: 435-445.
- Nicault, A., Boucher, É., Tapsoba, D., Arseneault, D., Bégin, C., Berninger, F., DesGranges, J.-L., Guiot, J., Marion, J., Wicha, S. et Bégin, Y., 2015. Spatial analysis of black spruce (*Picea mariana* [Mill] B.S.P.) radial growth response to climate in northern Québec-Labrador Peninsula, Canada. *Canadian Journal of Forest Research* 45: 343–352, dx.doi.org/10.1139/cjfr-2014-0080
- O'Reilly, C.H., Woollings, T. et Zanna, L., 2017. The dynamical influence of the Atlantic multidecadal oscillation on continental climate. *Journal of Climate*, 30(18) : 7213–7230.
- Schlesinger, M. E. et Ramankutty, N., 1994. An oscillation in the global climate system of period 65–70 years. *Nature*, 367(6465) : 723-726.
- Sveinsson, O.G., Lall, U., Fortin, V., Perreault, L., Gaudet, J., Zebiak, S. et Kushnir, Y., 2008a. Forecasting spring reservoir inflows in Churchill Falls basin in Quebec, Canada. *Journal of Hydrologic Engineering*, 13(6) : 426-437.
- Sveinsson, O.G., Lall, U., Gaudet, J., Kushnir, Y., Zebiak, S. et Fortin, V., 2008b. Analysis of climatic states and atmospheric circulation patterns that influence Québec spring streamflows. *Journal of Hydrologic Engineering*, 13(6) : 411-425.
- Thompson, D.W. et Wallace, J.M., 1998. The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophysical research letters*, 25(9) : 1297-1300.
- Trenberth, K.E. et Hurrell, J.W., 1994. Decadal atmosphere-ocean variations in the Pacific. *Climate Dynamics*, 9(6) : 303-319.

## 18. Longues séries dendrochronologiques établies à partir de troncs subfossiles

Fabio Gennaretti, Julia Autin, Yves Bouthillier et Dominique Arseneault

### Résumé

Les longues séries dendrochronologiques sont souvent utilisées pour produire des reconstitutions paléoécologiques et paléoclimatiques. Cependant dans certaines régions du globe, comme dans l'est de l'Amérique du Nord, les longues séries dendrochronologiques sont rares ou absentes. Un des objectifs du projet ARCHIVES a été de développer un réseau de longues séries dendrochronologiques en utilisant des troncs subfossiles d'épinette noire qui ont été récupérés dans six lacs de la forêt boréale du Québec. Un grand nombre des spécimens récoltés (1832 troncs) a été datés par dendrochronologie à l'année près, ce qui a permis de construire six longues séries dendrochronologiques couvrant aux moins 1238 années. À l'échelle locale ces séries témoignent de l'influence des incendies du dernier millénaire sur le recrutement des troncs subfossiles dans les lacs et sur la croissance des forêts riveraines. De plus, ces séries ont montré une bonne correspondance avec les températures observées de juillet-août durant le dernier siècle. Les séries ont donc été utilisées pour produire une reconstitution des températures estivales, laquelle montre clairement un Optimum Climatique Médiéval (environ 910-1250 ap. J.-C.) plus chaud que la période récente, suivi du Petit Âge Glaciaire (environ 1300-1900 ap. J.-C.) et du réchauffement récent. Les décennies plus froides et de plus faible croissance des forêts riveraines ont été observées suite aux grandes éruptions volcaniques du dernier millénaire comme celle du Kuwae en 1452 et celle du Tambora en 1815.

### Abstract

Long tree-ring chronologies are often used in paleoecological and paleoclimatic reconstructions. However, in some regions of the World, such as Eastern North America, these chronologies are scarce. One objective of the ARCHIVES project was to develop a network of long tree-ring chronologies using black spruce subfossil logs collected in six lakes of the Quebec boreal forest. A large number of the sampled logs (1832 specimens) were successfully crossdated, which allowed the development of six long tree-ring chronologies spanning at least 1238 years. At the local scale, these chronologies show the influence of past wildfires on subfossil log recruitment in the lakes and on riparian forest growth. Furthermore, these chronologies are strongly correlated with observed July-August mean temperatures during the last century. These local chronologies were thus used to reconstruct past summer temperatures in the region. A well-expressed Medieval Warm Period (around AD 910-1250), which was warmer than recent conditions, was followed by the Little Ice Age (around AD 1300-1900) and by recent warming. The coldest decades of the last millennium, corresponding to the lowest riparian forest growth, were observed after the strong Kuwae and Tambora volcanic eruptions in AD 1452 and 1815, respectively.

### Les longues séries dendrochronologiques

Une série dendrochronologique est une chronologie qui montre les variations annuelles de croissance des arbres, c'est-à-dire les variations de la largeur de leurs cernes. Dans certains cas, ces chronologies peuvent être longues de plusieurs siècles, voire des millé-

naires si on utilise des espèces d'arbres ayant une grande longévité, par exemple le pin *bristlecone* dans le sud-ouest américain, ou si on utilise un grand nombre d'arbres vivants et d'arbres provenant de restes subfossiles et archéologiques interdatés entre eux (Encart 1).

Aujourd'hui les longues séries dendrochronologiques sont utilisées dans plusieurs domaines comme par exemple pour la datation de restes archéologiques et d'œuvres d'art et pour la calibration des datations radiocarbone (Kuniholm, 2000; Friedrich *et al.*, 2004). En paléoécologie, ces séries permettent de reconnaître et comprendre les processus importants qui ont déterminé la structure et la composition des forêts, comme les épidémies d'insectes et les incendies du passé (Swetnam *et al.*, 2009; Boulanger *et al.*, 2012a). De plus, les séries dendrochronologiques sont reconnues comme les meilleurs indicateurs de résolution annuelle du climat de l'Holocène et sont souvent utilisées pour les reconstitutions climatiques (Jansen *et al.*, 2007). En effet, les cernes de croissance des arbres sont des indicateurs climatiques uniques qui permettent d'analyser des variations à court (annuelles) et long terme (centenaires; Briffa, 2000; Esper *et al.*, 2002).

### Les longues séries dendrochronologiques dans le monde

Dans les écosystèmes tempérés et boréaux, il a été possible de construire plusieurs séries dendrochronologiques millénaires en utilisant des arbres vivants, des troncs subfossiles et des restes archéologiques. Par exemple, nous pouvons citer les séries de plus de 7000 ans produites en Scandinavie en utilisant des restes de pins sylvestres puisés dans des lacs (Eronen *et al.*, 2002), les séries millénaires de mélèze développées en Sibérie et dans les Alpes (Hantemirov et Shiyatov, 2002; Büntgen *et al.*, 2005), les séries plurimillénaires de chêne du centre et du nord de l'Europe (Friedrich *et al.*, 2004), et les chronologies de pin *bristlecone* dans le sud-ouest américain qui remontent à 8500 ans (Ferguson et Graybill, 1983).

Cependant, dans son rapport de 2007, le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) a souligné la mauvaise couverture spatiale et le manque de réplification des séries dendrochronologiques qui permettent de reconstituer l'histoire du climat au cours du dernier millénaire (Jansen *et al.*, 2007). Ce manque de données génère beaucoup d'incertitude lorsque l'on cherche à comparer le réchauffement climatique du dernier siècle avec la variabilité naturelle du climat du

#### Encart 1. L'interdatation

La dendrochronologie permet de connaître à l'année près la date de formation des cernes des arbres, même s'il s'agit de restes subfossiles morts depuis plusieurs siècles. Dans les régions tempérées et boréales, les arbres forment des cernes annuels de croissance, le cerne le plus récent recouvrant les précédents de l'intérieur vers l'extérieur des tiges. La comparaison des variations interannuelles de la largeur des cernes des arbres vivants et subfossiles permet ensuite de dater les séries des arbres subfossiles si la période de chevauchement avec les séries des arbres vivants est suffisamment longue (pour l'épinette noire le chevauchement minimum qui permet la datation est d'environ 50 ans). Ce processus est appelé interdatation et il permet de produire des séries dendrochronologiques de plus en plus longues au fur et à mesure que des arbres de plus en plus anciens sont ajoutées à la série maîtresse calée sur l'échelle calendaire. Pour améliorer les datations, des cernes diagnostiques peuvent être aussi utilisés comme repères chronologiques. Ces derniers sont des cernes caractéristiques formés durant des saisons de croissance défavorables par plusieurs arbres d'un site forestier (cernes pâles, étroits ou fendus).

dernier millénaire.

En particulier, la forêt boréale canadienne est une des régions pour lesquelles les longues séries dendrochronologiques sont actuellement très rares (Arseneault *et al.*, 2013), à cause de la courte longévité des arbres (la plus vieille épinette noire répertoriée avait 504 ans (Payette *et al.*, 1985), mais ces arbres ont rarement plus de 300 ans) et de la haute fréquence des incendies forestiers (Boulanger *et al.*, 2012b). En considérant que les réchauffements actuels et prévus dans les hautes latitudes nord sont extrêmement prononcés par rapport aux derniers siècles (GIEC 2007), la rareté d'indicateurs climatiques permettant la comparaison avec le passé est particulièrement problématique.

### Le réseau de longues séries dendrochronologiques du projet ARCHIVES

En forêt boréale, les arbres morts qui tombent dans l'eau dans des zones lacustres aux caractéristiques favorables peuvent se conserver des siècles voire des millénaires (Arseneault *et al.*, 2013). Malgré une grande abondance de lacs dans la zone boréale d'Amérique du Nord, ce matériel n'avait pas encore été exploité pour l'élaboration de longues séries dendrochronologiques.

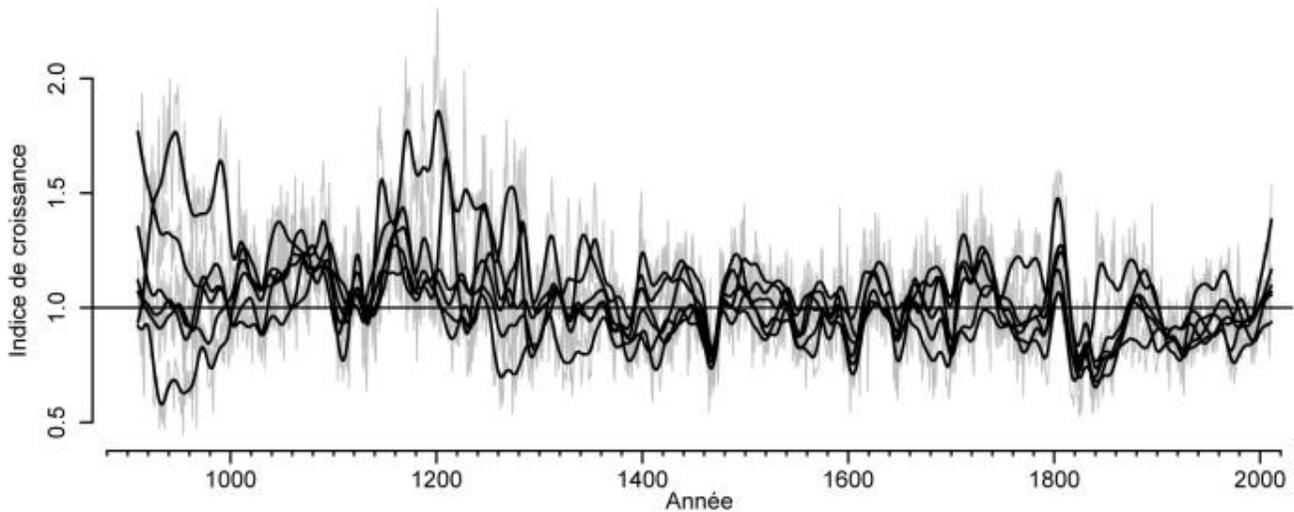
Un des objectifs du projet ARCHIVES a été de créer un réseau de longues séries dendrochronologiques dans le secteur boréal nor-

dique du Québec pouvant être utilisé pour reconstituer les températures du dernier millénaire et pour répondre à des questions écologiques clés. Pour la mise en place de ce réseau, 2565 troncs subfossiles ont été récupérés dans six lacs de la forêt boréale du Québec localisés entre les latitudes 53,8° N et 54,6° N et les longitudes 70,2° W et 72,5° W (Tableau 1). Le caractère exceptionnel des sites échantillonnés est témoigné par le grand nombre d'échantillons récoltés en parfait état de conservation (Tableau 1).

Dans une portion de la zone littorale de chaque lac, l'ensemble des troncs subfossiles dans l'eau et dans la couche superficielle des sédiments a été récupéré par un plongeur aidé par deux ou trois assistants. Une fois apporté sur la rive, une section transversale de chaque tronc a été prélevée. Au laboratoire, les sections transversales ont été poncées, les espèces ont été identifiées par l'anatomie du bois (épinette noire, sapin baumier ou mélèze laricin) et seulement les épinettes noires (*Picea mariana* (Mill.) BSP.) ont été retenues. Deux rayons ont été ensuite numérisés à 6400 DPI afin de mesurer la largeur des cernes annuels de croissance à l'écran d'un ordinateur. L'interdatation des échantillons (71% des troncs ont été datés à l'année près) a permis de produire six chronologies locales, une pour chaque lac, couvrant au moins 1238 ans et composées d'un nombre de troncs subfossiles variant entre 105 et 622 (Figure 1, Tableau 1).

**Tableau 1. Troncs subfossiles prélevés dans les six lacs sélectionnés dans le Québec boréal nordique.**

Site	Latitude (°)	Longitude (°)	Longueur de la portion de rive échantillonnée (m)	Nb. de troncs subfossiles récupérés	Nb. de troncs d'épinette interdatés à l'année près (subfossiles/vivants)	Nb. moyen de cernes mesurés dans les épinettes interdatées	Intervalle couvert par la série dendrochronologique (Années apr. J.-C.)
L1	+53,86	-72,41	360	305	194/25	106	642-2011
L12	+54,46	-70,39	540	294	234/25	101	572-2011
L16	+54,10	-71,63	320	97	80/25	112	774-2011
L18	+54,25	-72,38	1150	627	426/25	105	596-2011
L20	+54,56	-71,24	1010	850	597/25	102	653-2011
L22	+54,15	-70,29	1120	392	301/25	104	650-2011



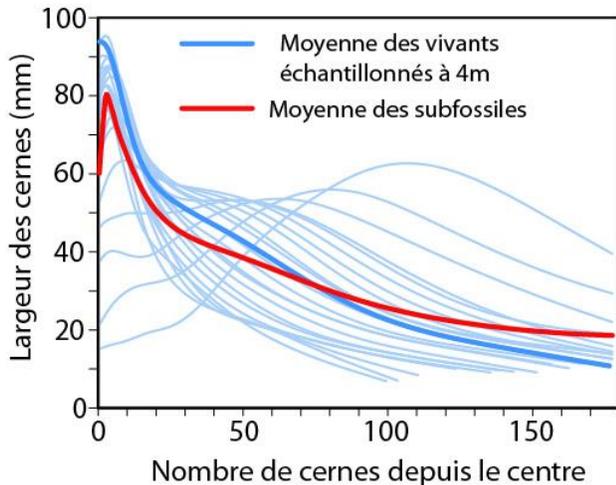
**Figure 1.** Les six longues séries dendrochronologiques locales RCS (Encart 2), une pour chaque lac (seulement les 1100 dernières années qui sont caractérisées par une bonne réplification des troncs subfossiles sont montrées). Le graphique montre les séries brutes (ligne grises) et lissées (ligne noires; splines avec fenêtre de 20 ans).

Ce réseau a permis d'améliorer la couverture spatiale et temporelle du réseau de séries dendrochronologiques utilisées pour les reconstitutions climatiques du dernier millénaire dans l'Hémisphère Nord. De plus, les incendies qui ont affecté les forêts riveraines dans chaque site ont été datés grâce à la découverte d'échantillons portant des traces de feu. Ceci a permis d'étudier l'influence des incendies aussi bien sur les apports de restes d'arbres dans les zones littorales des lacs que sur la croissance des forêts riveraines.

### Les arbres vivants dans les séries

Pour produire une longue reconstitution climatique à partir des cernes de croissance des arbres à courte longévité comme l'épinette noire, on doit combiner des arbres riverains vivants et des subfossiles plus anciens. Les cernes annuels de croissance des spécimens vivants sont habituellement mesurés sur des échantillons prélevés dans la partie basale des arbres pour maximiser la longueur des séries individuelles de cernes, alors que les subfossiles correspondent souvent à des portions de tiges sans souche dont on ne connaît pas la hauteur de provenance sur les tiges originales. Cette différence de hauteur peut être

problématique si la largeur des cernes varie avec la hauteur sur les tiges et qu'on utilise en plus la méthode de standardisation RCS (Encart 2) pour extraire le signal climatique contenu dans les séries de croissance. Une étude détaillée de 15 arbres prélevés en bordure de lacs montre que la croissance des arbres riverains varie systématiquement en fonction de la hauteur de provenance des échantillons, mais que la différence entre les arbres riverains et les subfossiles est minimisée lorsque les vivants sont échantillonnés à une hauteur de 4 m, même si une légère différence persiste (Figure 2). Pour réaliser les longues reconstitutions dendroclimatiques en combinant des arbres subfossiles et vivants, nous avons donc échantillonné 25 arbres riverains en bordure de chacun des six lacs, en prenant bien soin de prélever les échantillons à une hauteur de 4 m et d'apporter une correction pour la différence avec les subfossiles qui persiste tout de même à cette hauteur (Figure 2).

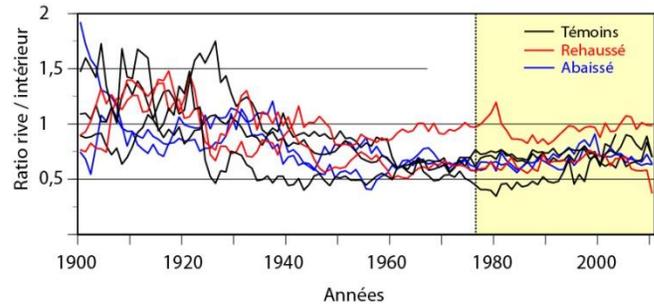


**Figure 2. Comparaison de la largeur des cernes annuels de croissance des arbres vivants pour différentes hauteurs à partir du sol. Les traits bleus pâles réfèrent à toutes les hauteurs de tiges espacées de 40 cm entre 0 cm et 880 cm du sol chez les arbres riverains. Pour générer ses courbes les séries provenant d'arbres individuels sont alignées et moyennées selon l'ordre des cernes depuis le centre des échantillons. De cette manière, on fait ressortir une tendance de croissance biologique, liée à la position des cernes depuis le centre des arbres, et qui doit être éliminée avec la méthode RCS (Encart 2) avant d'extraire le signal climatique. La figure indique que les arbres riverains vivants doivent être échantillonnés à une hauteur de 4m du sol (ligne bleue foncée) afin de maximiser la ressemblance avec les subfossiles (ligne rouge) et qu'une correction supplémentaire doit être apportée pour combler la différence qui persiste tout de même.**

### L'effet du niveau des lacs sur les séries

Étant donné que les tiges subfossiles correspondent à des arbres qui ont poussé sur les rives, on a vérifié si la croissance des épinettes noires riveraines est influencée par les fluctuations des niveaux d'eau des lacs. Nous avons considéré des arbres riverains et des arbres poussant en retrait dans la forêt pour des lacs dont le niveau a été soit abaissé soit rehaussé par des digues ou des routes, ainsi que pour des lacs témoins non-affectés. Les résultats de cette analyse indiquent que ni la distance au lac ni les changements de niveaux n'influencent la croissance des arbres de ma-

nière détectable dans les séries de largeur des cernes annuels de croissance (Figure 3). On en conclut que l'on peut reconstituer les températures du passé à partir des subfossiles sans effet confondant associé à la proximité d'un lac.



**Figure 3. Croissance des arbres riverains divisée par la croissance d'arbres échantillonnés en retrait de la rive dans des sites avec niveaux d'eau rehaussés ou abaissés et dans des sites témoins. Chaque courbe a été établie à partir de 10 arbres riverains et 10 arbres non riverains, tous échantillonnés à une hauteur de 4 m au-dessus du sol. La section jaune correspond à la période pendant laquelle les niveaux ont été modifiés.**

### L'influence des incendies du passé sur les séries

Les incendies sont la principale perturbation naturelle et la principale cause de changements écologiques en forêt boréale (Payette *et al.*, 2008). La variation de leur intensité et de leur fréquence a des répercussions sur les interactions entre écosystèmes terrestres et lacustres (Marchand *et al.*, 2009), sur la structure des peuplements forestiers et sur la répartition spatiale des espèces forestières (Johnstone et Chapin, 2006).

Malgré que des portions littorales avec de très vieilles forêts riveraines aient été sélectionnées pour mettre en place le réseau de longues séries dendrochronologiques, la découverte d'échantillons calcinés a permis de conclure qu'au moins 14 incendies ont affecté les forêts riveraines dans les sites à l'étude durant les 1400 dernières années (Gennaretti *et al.*, 2013). Ces incendies ont eu des réper-

**Encart 2. La méthode de standardisation RCS**

Une des difficultés les plus importantes en dendroclimatologie est l'extraction du signal climatique contenu dans les séries de croissance radiale des arbres. Ce signal est presque toujours entremêlé avec des signaux biologiques dont le plus important est une décroissance généralisée de la largeur des cernes annuels à partir du centre vers l'extérieur des troncs (Figure 2). Une des seules méthodes qui permet d'éliminer cette tendance sans affecter le signal climatique de basse fréquence est la méthode de standardisation RCS (Regional Curve Standardization). Cette approche consiste à déterminer un modèle mathématique qui décrit la décroissance moyenne de la largeur des cernes du centre vers l'extérieur des tiges pour l'ensemble des individus dans un site ou une région. Ce modèle mathématique est déterminé par un ajustement sur la moyenne des courbes de tous les individus du site ou de la région, après les avoir aligné à partir de leur premier cerne (situé au centre des échantillons). La courbe de croissance de chaque arbre individuel est ensuite standardisée par division ou soustraction relativement à la courbe moyenne de décroissance décrite par le modèle mathématique, de manière à obtenir un indice de croissance. Les indices de croissance ainsi standardisés sont finalement réalignés selon l'échelle calendaire et moyennés entre les individus pour produire une chronologie dite chronologie RCS. Pour utiliser cette méthode de manière optimale, il faut disposer d'un grand nombre d'échantillons et ces derniers doivent avoir poussé sous des conditions environnementales uniformes.

cussions importantes sur le recrutement de troncs subfossiles et sur les séries dendrochronologiques locales. Les effets détectés ont été extrêmement variables, probablement à cause de la sévérité variable de ces incendies. Dans la majorité des cas, suite aux incendies le recrutement de troncs subfossiles a été fortement réduit et plusieurs décennies ont été nécessaires pour un retour à la normale. Dans quelques cas, les incendies ont provoqué des apports massifs d'arbres morts dans l'eau. La figure 4 montre comment les incendies du dernier millénaire ont affecté le recrutement de troncs subfossiles, la réplification des échantillons et la croissance de la forêt riveraine au site L18. Suite à un incendie aux alentours de l'année 1250, les apports de troncs subfossiles dans l'eau ont été drastiquement réduits pendant deux siècles. Une interruption si longue s'explique par l'occurrence successive de deux incendies sévères, celui de 1250 et un autre quelques décennies plus tard qui a détruit la régénération du premier feu. D'autres incendies ont ensuite affecté la forêt riveraine de L18 durant le XVII<sup>e</sup> siècle et le début du XVIII<sup>e</sup> siècle. Comme ces incendies ont été moins sévères que ceux du XIII<sup>e</sup> siècle, ils ont laissé beaucoup d'arbres survivants sur la rive car le recrutement de troncs dans l'eau n'a pas été

significativement perturbé. Cependant, tous les incendies ont eu des effets sur la croissance de la forêt riveraine à L18 et sur la série dendrochronologique locale. En effet, après ces événements, des anomalies de croissance positives ont été observées dans la série de L18 par rapport aux autres chronologies.

**Dendroséries et températures estivales du dernier siècle**

Les arbres riverains des lacs sélectionnés ont été très sensibles aux températures estivales de la région d'étude. Les températures reconstituées à partir des six séries dendrochronologiques locales reproduisent assez bien l'augmentation observée des températures moyennes de juillet-août au cours du dernier siècle (Figure 5), surtout une fois que les valeurs ont été lissées (voir glossaire "Lissage"). Malgré que le réchauffement du dernier siècle ait été particulièrement fort dans le Québec boréal nordique (Mitchell et Jones, 2005), aucune divergence n'est présente entre valeurs reconstituées et observées durant les dernières décennies. En dendroclimatologie, on appelle divergence la tendance de plusieurs reconstitutions dendroclimatiques à sous-estimer les températures observées depuis 1950 (D'Arrigo *et al.*, 2008).

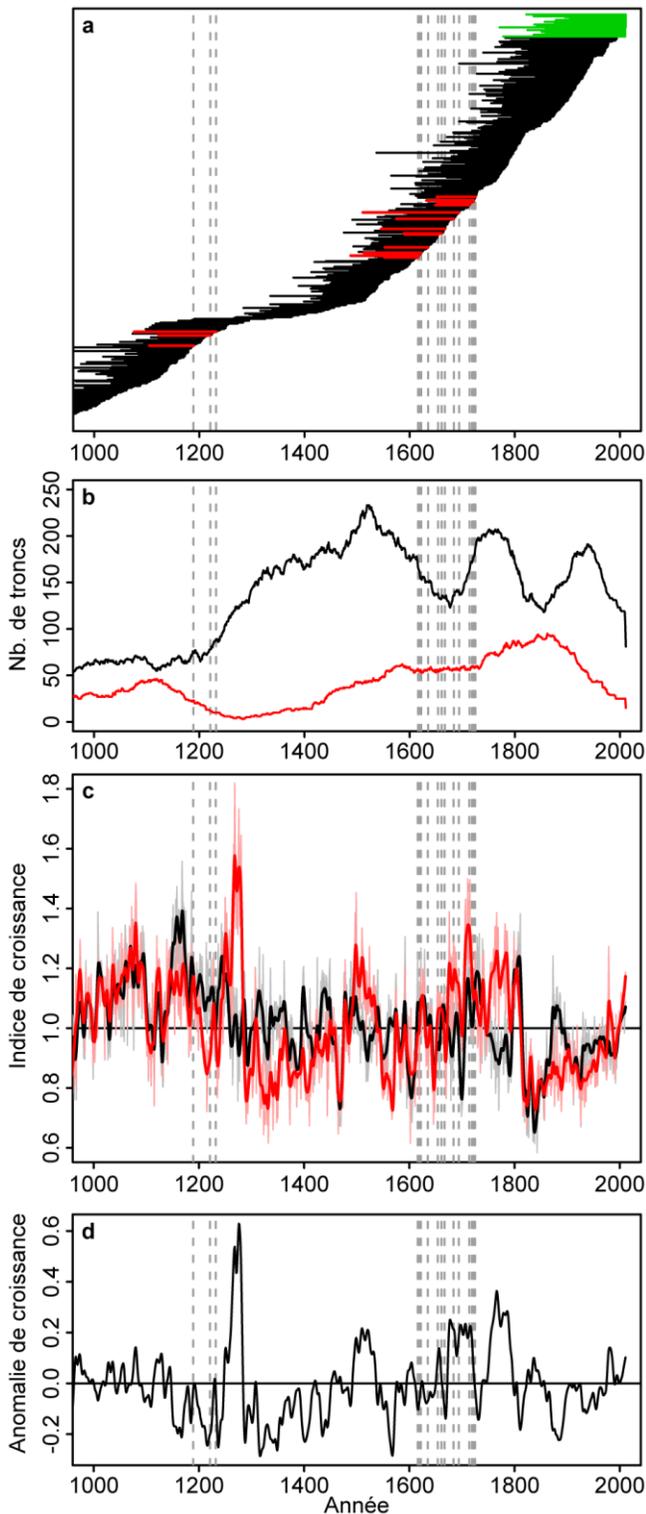


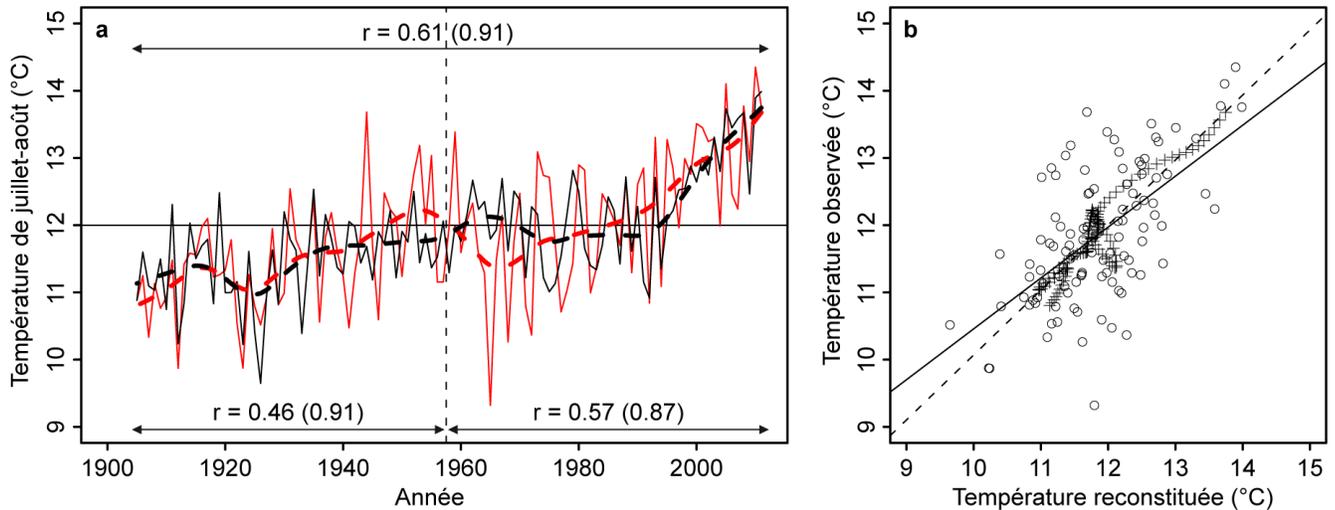
Figure 4. Effets des incendies du dernier millénaire au site L18. Le graphique a montre la période de vie des troncs subfossiles (lignes noires) et des arbres vivants (lignes vertes) interdatés à l'année près. Dans ce graphique, chaque ligne horizontale se réfère à un tronc et sa longueur indique le nombre de cernes dans le tronc. Les troncs calcinés sont indiqués par des lignes rouges. Le graphique b montre la réplification des troncs au site L18 (ligne rouge) et dans les tous les autres sites (ligne noire). Dans le graphique c, la série dendrochronologique RCS de L18 brute (ligne rouge claire) et lissée (ligne rouge foncée; spline avec fenêtre de 10 ans) est comparée à la série médiane brute (ligne grise) et lissée (ligne noire) des autres sites. Le graphique d montre les anomalies de croissance de la série lissée de L18 par rapport à la série médiane lissée des autres sites. Dans tous les graphiques, les lignes verticales pointillées indiquent l'année du dernier cerne d'un tronc avec des traces de feu.

Ce problème ne semble pas être présent dans notre reconstitution, malgré que des problèmes de divergence ont déjà été observés pour d'autres espèces d'épinette au Canada (Porter et Pisaric, 2011).

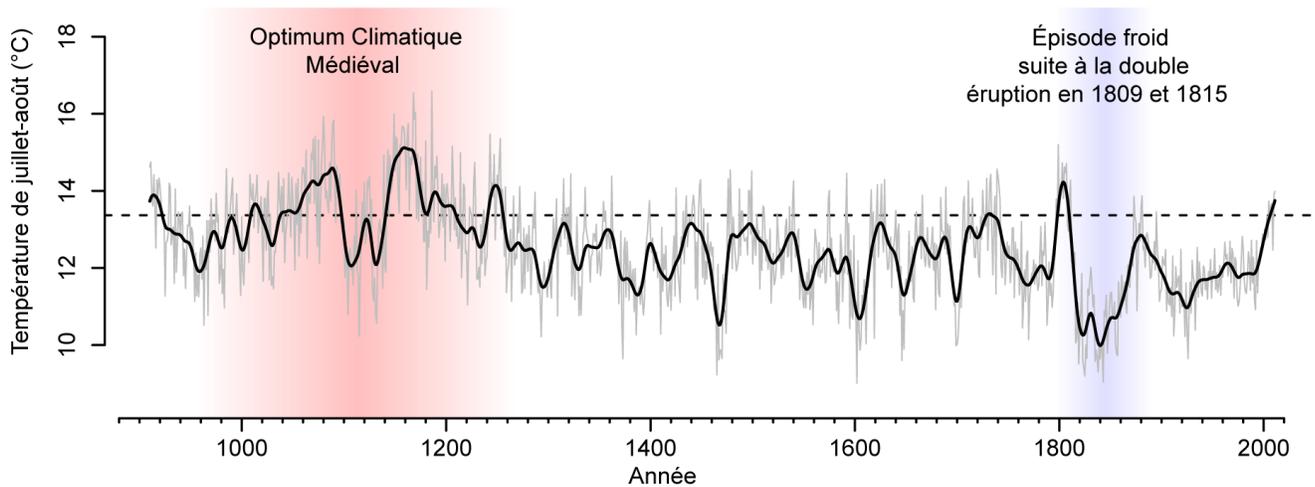
#### Dendroséries et climat du dernier millénaire

Les longues séries dendrochronologiques produites à partir des troncs subfossiles interdatés ont permis de reconstituer les températures moyennes de juillet-août au cours du dernier millénaire dans le Québec boréal nordique (Figure 6).

L'importance de produire des reconstitutions ayant une validité locale ou régionale vient du fait que certaines fluctuations climatiques du passé, comme l'Optimum Climatique Médiéval (voir glossaire "Optimum Climatique Médiéval"), se sont produites durant des périodes différentes selon la région considérée.



**Figure 5. Températures observées et reconstituées durant le dernier siècle. Le graphique a montre les températures moyennes de juillet-août observées dans la région d'étude (lignes rouges; CRU TS3.20) et reconstituées à partir des six longues séries dendrochronologiques locales (lignes noires) durant le dernier siècle. Le graphique montre les valeurs brutes (lignes continues) et lissées (lignes pointillées; splines avec fenêtre de 20 ans). Les corrélations entre valeurs observées et reconstituées sont indiquées (les valeurs entre parenthèses se réfèrent aux valeurs lissées). Le graphique b montre la relation entre les valeurs observées et reconstituées en utilisant les données brutes (cercles et ligne continue) et lissées (croix et ligne pointillée).**



**Figure 6. Reconstitution des températures moyennes de juillet-août au cours du dernier millénaire dans le Québec boréal nordique à partir des six longues séries dendrochronologiques locales. Les valeurs brutes (ligne grise) et lissées (ligne noire; splines avec fenêtre de 20 ans) sont représentées dans le graphique. La ligne pointillée horizontale indique la valeur moyenne des températures de juillet-août de la dernière décennie.**

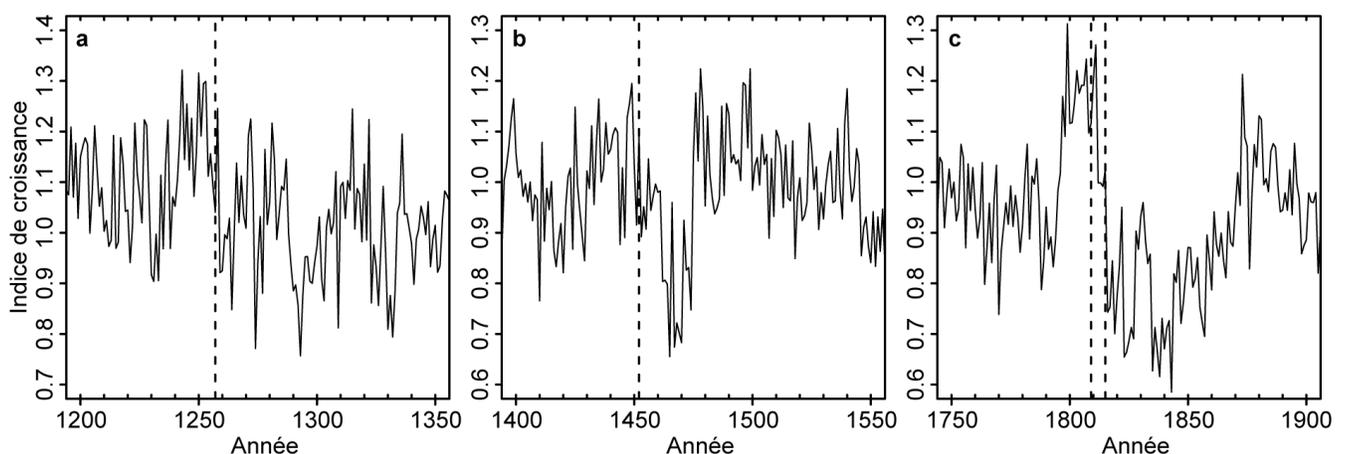
Pour cette raison, les reconstitutions hémisphériques, qui utilisent plusieurs séries dendrochronologiques dispersées à quelques points sur le globe, peuvent sous-estimer l'importance de ces fluctuations climatiques (D'Arrigo *et al.*, 2006). De plus, le réseau de longues séries dendrochronologiques du projet ARCHIVES permet d'effectuer la première reconstitution dendroclimatique des températures du dernier millénaire dans l'Est de l'Amérique du Nord.

Cette reconstitution (Figure 6) montre que, dans le Québec boréal nordique, les dernières décennies n'ont pas été les plus chaudes du dernier millénaire. Des températures plus chaudes ont été observées durant les XI<sup>e</sup> et XII<sup>e</sup> siècles pendant l'Optimum Climatique Médiéval. Par la suite, une transition vers des températures plus froides a marqué le début du Petit Age glaciaire vers l'an 1250 dans la région d'étude. Les températures estivales moyennes sont par la suite restées basses et marquées par des épisodes froids de quelques dizaines d'années, comme durant la période la plus froide du dernier millénaire entre les années 1815 et 1860. Durant le dernier siècle une remontée partielle des températures a été ob-

servée mais avec des valeurs moyennes encore très basses en comparaison de l'Optimum Climatique Médiéval.

### Les séries et le volcanisme

Le réseau de longues séries dendrochronologiques du projet ARCHIVES et la reconstitution des températures de juillet-août qui lui est associée montrent que le forçage volcanique a été la principale cause des fluctuations des températures et de la croissance des forêts à l'échelle des décennies dans le Québec boréal nordique. L'effet refroidissant sur le climat global des cendres volcaniques et des gouttelettes d'acide sulfurique émises dans l'atmosphère lors des grandes éruptions volcaniques est connu, malgré les désaccords qui existent sur la force et la durée de ces effets (Miller *et al.*, 2012; Esper *et al.*, 2013).



**Figure 7.** Effets des trois éruptions volcaniques les plus fortes du dernier millénaire sur la médiane des six longues séries dendrochronologiques RCS dans le Québec boréal nordique. Les lignes pointillées verticales montrent la date de l'éruption du Samalas en 1257 dans le graphique a, la date de l'éruption du Kuwae en 1452 dans le graphique b, l'éruption de 1809 et la date de l'éruption du Tambora en 1815 dans le graphique c.

Nos données montrent par ailleurs qu'il y a une concordance frappante entre les dates des éruptions volcaniques les plus fortes des derniers siècles (déduites à partir des dépôts sulfurés dans des carottes glaciaires, voir Gao *et al.*, 2008) et les réductions de croissance dans les séries dendrochronologiques. Par exemple, quelques décennies de faible croissance ont été observées dans le Québec boréal nordique suite aux trois éruptions volcaniques les plus fortes du dernier millénaire (Figure 7), l'éruption du Samalás en 1257, l'éruption du Kuwae en 1452/1453, et la double éruption du Tambora en 1815 et d'un volcan encore non-identifié en 1809 (Cole-Dai *et al.*, 2009).

<https://doi.org/10.4095/328091>

## Références

- Arseneault, D., Dy, B., Gennaretti, F., Autin, J. et Bégin, Y., 2013. Developing millennial tree ring chronologies in the fire-prone North American boreal forest. *Journal of quaternary science*, 28: 283-292.
- Boulanger, Y., Arseneault, D., Morin, H., Jardon, Y., Bertrand, P. et Dagneau, C., 2012a. Dendrochronological reconstruction of spruce budworm (*Choristoneura fumiferana*) outbreaks in southern Quebec for the last 400 years. *Canadian Journal of Forest Research*, 42: 1264-1276.
- Boulanger, Y., Gauthier, S., Burton, P.J. et Vaillancourt, M.A., 2012b. An alternative fire regime zonation for Canada. *International Journal of Wildland Fire*, 21: 1052-1064.
- Briffa, K.R., 2000. Annual climate variability in the Holocene: interpreting the message of ancient trees. *Quaternary Science Reviews*, 19: 87-105.
- Büntgen, U., Esper, J., Frank, D.C., Nicolussi, K. et Schmidhalter, M., 2005. A 1052-year tree-ring proxy for Alpine summer temperatures. *Climate Dynamics*, 25: 141-153.
- Cole-Dai, J., Ferris, D., Lanciki, A., Savarino, J., Baroni M. et Thieme, M.H., 2009. Cold decade (AD 1810-1819) caused by Tambora (1815) and another (1809) stratospheric volcanic eruption. *Geophysical Research Letters*, 36: L22703.
- D'Arrigo, R., Wilson, R. et Jacoby, G., 2006. On the long-term context for late twentieth century warming. *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres*, 111: D03103
- D'Arrigo, R., Wilson, R., Liepert, B. et Cherubini, P., 2008. On the 'Divergence Problem' in Northern Forests: A review of the tree-ring evidence and possible causes. *Global and Planetary Change*, 60: 289-305.
- Eronen, M., Zetterberg, P., Briffa, K.R., Lindholm, M., Merilainen, J. et Timonen, M., 2002. The supralong Scots pine tree-ring record for Finnish Lapland: Part 1, chronology construction and initial inferences. *The Holocene*, 12: 673-680.
- Esper, J., Cook, E.R. et Schweingruber, F.H., 2002. Low-frequency signals in long tree-ring chronologies for reconstructing past temperature variability. *Science*, 295: 2250-2253.
- Esper, J., Schneider, L., Krusic, P.J., Luterbacher, J., Büntgen, U., Timonen, M., Sirocko, F. et Zorita, E., 2013. European summer temperature response to annually dated volcanic eruptions over the past nine centuries. *Bulletin of Volcanology*, 75: 1-14.
- Ferguson, C.W. et Graybill, D.A., 1983. Dendrochronology of Bristlecone Pine: A Progress Report. *Radio-carbon*, 25: 287-288.
- Friedrich, M., Remmele, S., Kromer, B., Hofmann, J., Spurk, M., Kaiser, K.F., Orsel, C. et Kuppers, M., 2004. The 12,460-year Hohenheim oak and pine tree-ring chronology from central Europe - A unique annual record for radiocarbon calibration and paleoenvironment reconstructions. *Radio-carbon*, 46: 1111-1122.
- Gao, C., Robock, A. et Ammann, C., 2008. Volcanic forcing of climate over the past 1500 years: An improved ice core-based index for climate models. *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres*, 113: D23111.
- Gennaretti, F., Arseneault, D. et Bégin, Y., 2013. Millennial stocks and fluxes of large woody debris in lakes of the North American taiga. *Journal of Ecology*, doi: 10.1111/1365-2745.12198
- Hantemirov, R.M. et Shiyatov, S.G., 2002. A continuous multimillennial ring-width chronology in Yamal, northwestern Siberia. *The Holocene*, 12: 717-726.
- Jansen, E., Overpeck, J., Briffa, K.R., Duplessy, J.-C., Joos, F., Masson-Delmotte, V., Olago, D., Otto-Bliesner, B., Peltier, W.R., Rahmstorf, S., Ramesh, R., Raynaud, D., Rind, D., Solomina, O., Villalba, R. et Zhang, D., 2007. Palaeoclimate. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge and New York, pp. 433-497.
- Johnstone, J.F. et Chapin, F.S., 2006. Fire interval effects on successional trajectory in boreal forests of northwest Canada. *Ecosystems*, 9: 268-277.
- Kuniholm, P.I., 2000. Dendrochronology (Tree-Ring Dating) of Panel Paintings. Pages 206-215 in W. S.

## 18. Longues séries dendrochronologiques établies à partir de troncs subfossiles

- Taft et J. W. Mayer (ed.). *The Science of Paintings*. Springer-Verlag, New York.
- Marchand, D., Prairie, Y.T. et del Giorgio, P.A., 2009. Linking forest fires to lake metabolism and carbon dioxide emissions in the boreal region of Northern Quebec. *Global Change Biology*, 15: 2861-2873.
- Miller, G.H., Geirsdóttir, A., Zhong, Y., Larsen, D.J., Otto-Bliesner, B.L., Holland, M.M., Bailey, D.A., Refsnider, K.A., Lehman, S.J., Southon, J.R., Anderson, C., Björnsson, H. et Thordarson, T., 2012. Abrupt onset of the Little Ice Age triggered by volcanism and sustained by sea-ice/ocean feedbacks. *Geophysical Research Letters*, 39: L02708.
- Mitchell, T.D. et Jones, P.D., 2005. An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *International journal of climatology*, 25: 693-712.
- Payette, S., Filion, L. et Delwaide, A., 2008. Spatially explicit fire-climate history of the boreal forest-tundra (Eastern Canada) over the last 2000 years. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363: 2301-2316.
- Payette, S., Filion, L., Gauthier, L. et Boutin, Y., 1985. Secular climate change in old-growth tree-line vegetation of northern Quebec. *Nature*, 315: 135-138.
- Porter, T.J. et Pisaric, M.F.J., 2011. Temperature-growth divergence in white spruce forests of Old Crow Flats, Yukon Territory, and adjacent regions of northwestern North America. *Global Change Biology*, 17: 3418-3430.
- Swetnam, T.W., Baisan, C.H., Caprio, A.C., Brown, P.M., Touchan, R., Anderson, R.S. et Hallett, D.J., 2009. Multi-millennial fire history of the Giant Forest, Sequoia National Park, California, USA. *Fire Ecology*, 5: 120-150.



Portion de tronc d'arbre fossile repêchée du fond du lac L16.  
Photo de A. Nicault.

# 19. Traitement et production d'une série dendro-isotopique millénaire

Maud Naulier, Martine M. Savard, Christian Bégin et Dominique Arseneault

## Résumé

Les isotopes stables contenus dans les cernes d'arbres constituent une remarquable source d'information sur le climat passé d'une région. Dans le nord-est canadien, où les reconstitutions climatiques de plus de 500 ans sont très rares et où aucune n'est basée sur les isotopes des arbres, il est possible de recourir à l'utilisation de tiges subfossiles provenant du fond des lacs boréaux pour produire de longues séries isotopiques. Les étapes cruciales dans la production d'une série isotopique millénaire consistent à sélectionner minutieusement le matériel d'étude (lacs, arbres vivants tiges subfossiles), mais également à choisir une méthode de découpe des cernes permettant d'obtenir une résolution temporelle maximale et de produire une reconstitution climatique représentative pour le site d'étude. La signification climatique des rapports isotopiques a été déterminée par corrélation avec divers paramètres climatiques, telle qu'attestée par nos connaissances des mécanismes de réponses physiologiques et pédogéochimiques. Dans notre étude, les corrélations significatives entre les valeurs  $\delta^{18}\text{O}$  et la moyenne des températures maximales des mois de juin à août ont permis de reconstituer les variations de température du dernier millénaire à partir de tiges subfossiles prélevées dans un lac boréal. Cette nouvelle série millénaire, la première série isotopique dans le nord-est canadien, est une des rares au monde à utiliser les valeurs  $\delta^{18}\text{O}$  comme indicateurs du climat. Elle apporte de nouvelles connaissances sur le climat passé du nord-est québécois en mettant en évidence que la période chaude médiévale (1000-1250 AD) montre des températures similaires à celle

des trois dernières décennies mais également que le réchauffement observé depuis les années 1970 est parmi les plus importants du dernier millénaire.

## Abstract

The stable isotopic ratios of carbon and oxygen in tree rings are remarkable paleoclimatic data. In northeastern Canada, where climatic reconstructions longer than 500 years are very rare and where none is based on tree-ring isotopes, subfossil stems from boreal lakes can be used to produce long isotopic series. The most important steps in producing millennial isotopic series consist in selecting the material to study (lakes, living trees, subfossil stems) and the method to sample tree rings in order to obtain a climate reconstruction of high temporal resolution. The climatic significance of the isotopic ratios was determined by correlations with climatic parameters, and validated by our understanding of the physiological and pedogeochemical response mechanisms. The significant correlation obtained for the  $\delta^{18}\text{O}$  series with summer maximal temperature has allowed reconstructing the mean of June-July maximum temperature over the last millennium by using subfossil stems recovered from a boreal lake. This new millennial series, the first isotopic series in northeastern Canada, is one of the first in the world to use  $\delta^{18}\text{O}$  values as a proxy for climate. It brings new knowledge of the past climate for northeastern Quebec by highlighting that the medieval warm anomaly (1000-1250 AD) was as warm as the last three decades and the warming observed since 1970 is one of the most important of the last millennium.

## Introduction

Les archives naturelles (glaciers, coraux, sédiments lacustres, arbres, spéléothèmes) peuvent servir à reconstituer la variabilité naturelle du climat passé et à pallier au manque de données directes. La croissance annuelle des arbres permet d'obtenir une datation absolue et les mesures de la densité et de la largeur de leurs cernes, ainsi que les analyses des isotopes stables du carbone ( $\delta^{13}\text{C}$ ) et de l'oxygène ( $\delta^{18}\text{O}$ ) de leur cellulose ont déjà montré leur intérêt comme indicateurs du climat. Contrairement aux autres indicateurs, les séries isotopiques ne nécessitent pas de traitement pour retirer les tendances non climatiques (hormis l'effet juvénile sur les vingt premières années). Elles permettent ainsi de conserver plus facilement les variations à long terme du climat (basses fréquences). De plus, avec cette approche, un nombre restreint d'arbre (entre trois et dix) est requis.

Remonter le plus loin possible dans le passé nécessite de travailler avec des arbres dont la durée de vie s'étend sur plusieurs siècles dans le meilleur des cas, ou à défaut, d'utiliser des bois subfossiles provenant d'anciennes constructions, ou des tiges préservées dans des tourbières, ou de fonds de lacs. Dans le nord-est du Canada, la forêt boréale est dominée par l'épinette noire dont la durée de vie ne s'étale que sur quelques siècles. Le nombre remarquable de lacs dans cette région permet d'entrevoir l'utilisation de tiges subfossiles comme une approche pratique pour établir une série millénaire. Le but de notre étude était de reconstituer une première chronologie isotopique millénaire pour le nord-est canadien, en vue de reconstituer les températures du dernier millénaire.

## Échantillonnage et traitement des échantillons

*Sélection du site d'étude, des échantillons vivants et subfossiles*

Plusieurs étapes de terrain et de laboratoire ont été nécessaires préalablement aux analyses isotopiques. Un lac (site L20; 54°56'31" N; 71°24'10" W) extrêmement propice à l'accumulation du bois mort au cours du dernier millénaire a été retenu à partir d'un réseau de plusieurs sites (Chapitre 18). Le prélèvement de quatre épinettes noires vivantes riveraines sur deux hauteurs (1 et 4 m) et de centaines de tiges subfossiles, et leur interdatation ont été accomplis par l'équipe ARCHIVES (Chapitre 18). Afin de vérifier que l'intégrité des rapports isotopiques était préservée au sein des tiges subfossiles, la différence entre les rapports  $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{18}\text{O}$  de la cellulose et de la lignine pour différents degrés de préservation du bois subfossile a été préalablement analysée (Savard *et al.*, 2012). Les parties d'un échantillon présentant une forte altération renferment une plus faible proportion de cellulose que les parties saines et sont accompagnées d'une importante baisse des rapports  $\delta^{18}\text{O}$ . Il est toutefois facile de présélectionner visuellement la texture du bois de manière à ne travailler qu'avec le matériel adéquat pour l'étude isotopique subfossile (Savard *et al.*, 2012). Ainsi, seules les tiges subfossiles avec des largeurs de cernes supérieures à 2 mm et bien conservées ont été retenues pour la reconstitution millénaire.

## *Influence du climat sur la variation des rapports isotopiques*

Nous avons sélectionné divers paramètres climatiques dont les séries provenaient pour la plupart des données du Climatic Research Unit (CRU) et d'autres comme les précipitations, ont été calculées à partir des données des stations météorologiques de Wabush Lake, Nitchequon et Schefferville qui ont été standardisées par rapport à leur période commune (1949-2010) en une seule série régionale. Des corrélations ( $r$  Pearson) ont été établis entre les séries  $\delta^{18}\text{O}$  et  $\delta^{13}\text{C}$  et les séries climatiques afin de déterminer la série qui se-

rait le meilleur indicateur du climat pour notre région d'étude. Nous avons ensuite évalué la stabilité temporelle de ces relations statistiques (Naulier *et al.*, 2015a). Les meilleures corrélations ont été obtenues pour les séries  $\delta^{18}\text{O}$  et la température estivale maximale ( $r = 0,64$ ) ainsi qu'avec l'indice climatique régional (I.C =  $\Sigma$ précipitation -  $\mu$ températures maximales), calculé par notre équipe et qui reflète des ambiances contrastées (chaudes et sèches ou froides et humides dans le cas de notre région;  $r = -0,61$ ; Naulier *et al.*, 2014). Pour des raisons d'ordre pratique (comparaison avec les reconstitutions des températures estivales abondantes dans la documentation scientifique), et d'effort analytique (optimisation du traitement en laboratoire), la série  $\delta^{18}\text{O}$  a été retenue pour établir la chronologie millénaire des températures maximales d'été.

### Sélection d'une méthode de découpe pour les tiges subfossiles

Construire une chronologie millénaire requiert de traiter un nombre important d'échantillons, selon l'une de trois approches possibles. La première consiste à jumeler les cernes annuels d'un seul individu par blocs de deux, cinq ou dix cernes, voire davantage, et de répéter cet exercice de manière à produire plusieurs séries qui sont par la suite moyennées (Treydte *et al.*, 2007). La seconde consiste à jumeler des blocs de cernes provenant de plusieurs individus pour obtenir une seule série

représentative d'un ensemble d'arbres (Leavitt *et al.*, 2010). Ces deux méthodes ont le désavantage de ne refléter que les changements de basses fréquences du climat. La troisième méthode, plus récente, consiste à découper sur cinq tiges des blocs de cinq cernes annuels, décalés d'un an d'une tige à l'autre. Un ensemble de cinq arbres représente une cohorte. La chronologie millénaire est alors construite sur un ensemble de cohortes successives se chevauchant sur cinq ans. Chaque cohorte est ensuite corrigée grâce à l'utilisation de « segments de jonction », équivalent à un ensemble de blocs de 5 cinq ans provenant de 10 à 25 tiges et échantillonnés sur la période de chevauchement (voir méthode détaillée dans Boettger et Friedrich (2009) et Gagen *et al.* (2012)). Dans le cadre de notre étude, nous avons privilégié la troisième méthode qui permet de conserver les basses fréquences et d'obtenir en plus les rapports isotopiques de cinq arbres annuellement sur l'ensemble du millénaire.

### Traitement en laboratoire

En laboratoire, nous avons découpé les cernes manuellement à l'aide de lames de rasoirs sous loupe binoculaire, broyé chaque échantillon séparément, puis extrait la cellulose alpha (Bégin *et al.*, 2015). Nous avons ainsi généré un total de treize cohortes, une pour la période moderne (cinq arbres) et douze de tiges subfossiles (60 arbres), ainsi que 176

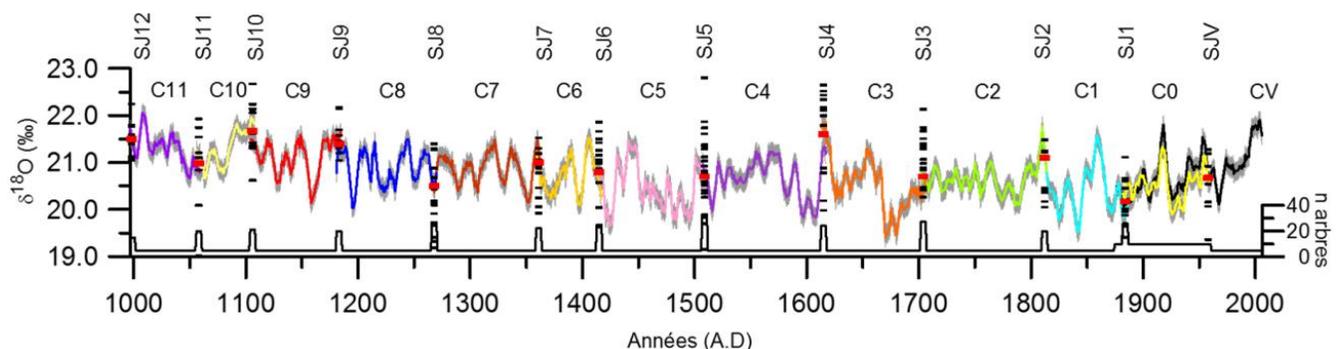


Figure 1. Chronologie millénaire des rapports  $\delta^{18}\text{O}$  : cohortes subfossiles (lignes colorées) et vivante (courbe noire), segments de jonction (points noirs), moyennes des segments de jonction (points rouges), écart-moyen sur l'analyse (bandes grises).

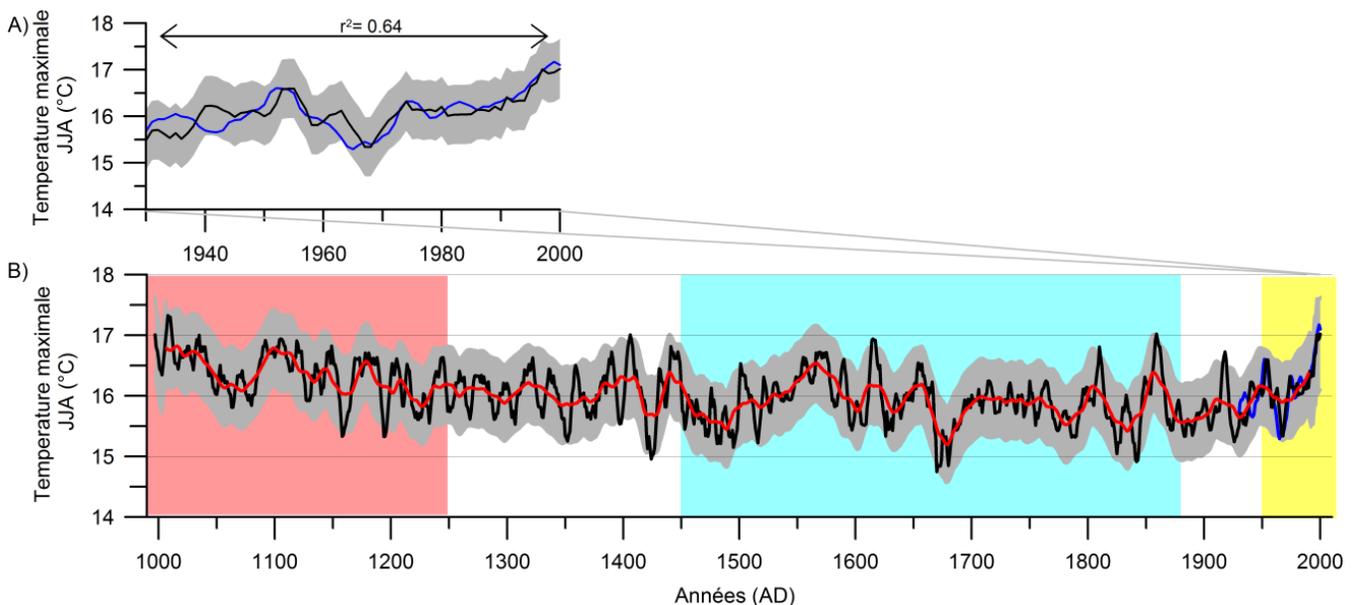
segments de jonction (176 arbres) pour un total de 1377 sous-échantillons (Figure 1). Les séries isotopiques sont ensuite mesurées en mode dynamique à l'aide d'un TC-EA-IRMS (thermal combustion - elemental analyzer - isotope ratio mass spectrometer) pour les valeurs  $\delta^{18}\text{O}$ .

### Reconstitution climatique millénaire

Nous avons effectué une fonction de réponse entre la série isotopique et la série de température maximale sur la période instrumentale 1930-2010 (données du CRU TS 3.1). L'équation dérivant de ce modèle a ensuite été testée suivant les procédures de calibration-vérification communément utilisées en dendrochronologie (Guiot et Nicault, 2011). La période instrumentale a été divisée en deux parties égales (1930-1970 et 1971-2000), l'une servant d'abord de période de calibration du modèle et l'autre de vérification, puis inversement. Après avoir testé deux modèles statistiques (*linear scaling* et régression linéaire simple), nous avons décidé de moyenner les

résultats obtenus pour les deux afin d'obtenir une reconstitution qui conserve la variance réelle observée (Figure 2).

La reconstitution des températures maximales pour le nord-est du Canada à partir des isotopes contenus dans les arbres (i-STREC; Naulier *et al.*, 2015b) montre une chute des températures de  $0,6^\circ\text{C}$  / millénaire. Elle met également en évidence trois grandes périodes climatiques contrastées sur le dernier millénaire. La période chaude médiévale (1000-1250 AD) avec une moyenne de  $16,5^\circ\text{C}$  montre des températures similaires à celles observées sur les trois dernières décennies (1970-2000). De plus, il apparaît que depuis 1970, l'augmentation des températures ( $+0,8^\circ\text{C}$  / décennie) est parmi les plus importantes du dernier millénaire. La dernière période mise en évidence correspond au Petit Âge Glaciaire, et à la période climatique la plus froide (moyenne de  $16,1^\circ\text{C}$ ). Ces résultats étant en accord avec la seule autre reconstitution climatique du nord-est québécois récemment publiée



**Figure 2. Reconstitution de la Tmax estivale millénaire (i-STREC). A) Comparaison entre la température observée (courbe bleue; CRU TS 3.1) et reconstituée (ligne noire) pour la période 1930-2000. B) Température maximale JJA reconstituée avec les trois périodes climatiques mises en évidence que sont la période chaude médiévale (rectangle rose; 1000-1250 AD), le petit âge glaciaire (enveloppe bleue; 1450-1880 AD) et la période moderne (rectangle jaune; 1950-2000). Un filtre de 21 ans a été appliqué (ligne rouge). Sur les deux figures, l'enveloppe grise représente  $\pm 1$ RMSE.**

(STREC; Gennaretti *et al.*, 2014), cela confirme que les isotopes sont complémentaires aux largeurs des cernes d'arbre.

### Conclusion

La méthode de découpe utilisée a permis d'évaluer une nouvelle voie pour pallier au manque de données et étendre notre compréhension du système climatique. Notre étude a permis de renforcer les résultats obtenus dans les études dendrochronologiques basées sur les propriétés physiques de cernes de croissance, et d'apporter un regard nouveau quant à l'influence du climat sur les arbres de la forêt boréale.

<https://doi.org/10.4095/328092>

### Références

- Bégin, C., Gingras, M., Savard, M.M., Marion, J., Nicault, A. et Bégin, Y., 2015. Assessing tree-ring carbon and oxygen stable isotopes for climate reconstruction in the Canadian northeastern boreal forest. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 423: 91–101
- Boettger, T. et Friedrich, M., 2009. A new serial pooling method of shifted tree ring blocks to construct millennia long tree ring isotope chronologies with annual resolution. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 45(1): 68-80.
- Gagen, M., McCarroll, D., Jalkanen, R., Loader, N.J., Robertson, I. et Young, G.H.F., 2012. A rapid method for the production of robust millennial length stable isotope tree ring series for climate reconstruction. *Global and Planetary Change*, 82: 96-103.
- Gennaretti, F., Arseneault, D., Nicault, A., Perreault, L. et Bégin, Y., 2014. Volcano-induced regime shifts in millennial tree-ring chronologies from Northeastern North America, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(28), 10077-10082,
- Leavitt, S.W., 2010. Tree-ring C-H-O isotope variability and sampling. *Science of the Total Environment* 408, 5244-5253.
- Naulier, M., Savard, M.M., Bégin, C., Marion, J., Arseneault, D. et Bégin, Y., 2014. Carbon and oxygen isotopes of lakeshore black spruce trees in northeastern Canada as proxies for climatic reconstruction. *Chemical Geology*, 374: 37-43.
- Naulier, M., Savard, M. M., Bégin, C., Marion, J., Nicault, A. et Bégin, Y., 2015a. Temporal instability of isotopes–climate statistical relationships – A study of black spruce trees in northeastern Canada. *Dendrochronologia*, 34, 33-42
- Naulier, M., Savard, M. M., Bégin, C., Gennaretti, F., Arseneault, D., Marion, J., Nicault, A. et Bégin, Y., 2015b. A millennial summer temperature reconstruction for northeastern Canada using oxygen isotopes in subfossil trees. *Climate of the Past Discussions*, 11(1), 521-553.
- Savard, M.M., Bégin, C., Marion, J., Arseneault, D. et Bégin, Y., 2012. Evaluating the integrity of C and O isotopes in sub-fossil wood from boreal lakes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 348–349(0): 21-31.
- Treydte, K., Schleser, G.H., Schweingruber, F.H. et Winiger, M., 2001. The climatic significance of delta C-13 in subalpine spruces (Lotschental, Swiss Alps) - A case study with respect to altitude, exposure and soil moisture. *Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology*, 53(5): 593-611.

## 20. Les archives paléo-hydrologiques de Grand Lake, Labrador

David Fortin et Pierre Francus

### Résumé

Les sédiments accumulés au fond du lac Grand Lake, situé à proximité des communautés de North West River et de la Première nation innue de Sheshatshiu, au Labrador, constituent des archives paléo-environnementales exceptionnelles. En effet, les sédiments s'y accumulent sous la forme de couches annuelles (varves) qui, une fois prélevées, peuvent être analysées de façon similaire aux anneaux de croissance annuels des arbres. Ces couches annuelles se forment en raison de la grande profondeur du lac (> 200 mètres) et de la grande quantité de particules fines charriées par son affluent principal en période de crue. L'analyse des sédiments prélevés en divers endroits au fond du lac nous indique que l'épaisseur des varves a connu un déclin au cours des 150 dernières années et que la variabilité interannuelle des crues a également diminué considérablement au cours de cette période. Nous attribuons ces changements à une diminution du couvert de neige et de l'intensité de la fonte printanière au cours de la période à l'étude.

### Abstract

Sediments accumulated at the bottom of Grand Lake, located near the communities of North West River and the Innu First Nation of Sheshatshiu, Labrador, constitute an exceptional paleo-environmental archive. Their thin annual layers (varves) were analyzed in a manner similar to the annual growth rings of trees. The varves are formed due to the great depth of the lake (> 200 meters) and the large quantity of fine particles carried by its main tributary during flood periods. Analysis of sediments collected from various locations on the lake-

bottom indicates that the varve thickness has declined over the past 150 years and that the interannual variability of floods has also decreased considerably during this period. We attribute these changes to a decrease in snow cover and in the intensity of the spring melt during the study period.

### Introduction

Les sédiments qui s'accumulent au fond des lacs boréaux contiennent une manne d'informations sur les conditions passées de leurs bassins versants. Lorsque le substrat de ces bassins versants contient des sédiments clastiques fins, cette matière minérale est transportée par les cours d'eau jusqu'au lac où elle se dépose. Si les conditions limnologiques sont favorables, des couches annuelles que l'on appelle des varves clastiques se forment (Chapitre 4). Dans la plupart des cas, la structure de ces varves reflète les principaux événements hydrologiques et climatiques survenus au cours d'une année soit, dans le cas de la forêt boréale : (1) la fonte printanière associée à de forts débits et à un transport de particules plus grossières (silts, sables), (2) d'éventuelles fortes précipitations estivales ou automnales qui réactivent le transport sédimentaire, et (3) une période de quiescence hivernale, sous couvert de glace, durant laquelle les particules les plus fines présentes dans la colonne d'eau sédimentent lentement. Les varves constituent des archives naturelles exceptionnelles puisqu'elles permettent, en mesurant la quantité annuelle de sédiments déposée dans un lac, d'appréhender la variabilité des conditions hydro-climatiques à l'échelle annuelle ou saisonnière, et ce, sur plusieurs centaines d'années, voire quelques millénaires (Zo-

litschka *et al.*, 2015).

Nous présentons ici l'analyse de carottes sédimentaires prélevées à Grand Lake dans le cadre du projet ARCHIVES. Nous présenterons dans un premier temps les conditions particulières qui font des sédiments du Grand Lake un excellent traceur des changements hydrologiques de son bassin versant. Dans un deuxième temps, nous présenterons les méthodes d'analyse des sédiments, les résultats et les interprétations paléo hydrologiques qui en découlent.

### Grand Lake, un lac aux conditions limnologiques exceptionnelles

Grand Lake est situé à proximité des communautés de North West River et de la Première nation innue de Sheshatshiu, au Labrador. Le lac est situé en amont du Lac Melville, un estuaire saumâtre dans lequel se jette la rivière Churchill qui s'écoule depuis le réservoir hydro-électrique Smallwood. Le lac possède la morphologie typique d'un fjord, c'est-à-dire un surcreusement de vallée glaciaire se terminant par un verrou morainique (Trottier *et al.*, 2020). Long de près de 60 km et d'une largeur moyenne de 3 km, Grand Lake a une profondeur excédant 300 mètres. Alimenté à sa tête (Nord-Ouest) par deux principaux affluents, les rivières Beaver et Naskaupi, le lac est situé à une altitude d'environ 2 mètres au-dessus du niveau de la mer. Cette faible altitude, la proximité avec l'estuaire saumâtre Melville et sa grande profondeur sont responsables des conditions limnologiques et sédimentaires exceptionnelles de Grand Lake.

En effet, durant les périodes de grandes marées et lorsque les vents sont favorables, la direction de l'écoulement de l'effluent du lac se renverse et les eaux saumâtres du lac Melville pénètrent le lac. Cette eau, plus dense que l'eau du lac en raison de sa salinité, plonge en profondeur et forme une couche d'eau plus saline sous les 100 premiers mètres d'eau douce. Cette superposition de couches eau

douce/eau salée crée une grande stabilité de la colonne d'eau qui empêche le mélange des deux masses d'eau et ainsi le renouvellement de l'oxygène en profondeur et donc la présence d'une faune benthique. Ainsi, les sédiments du fond sont très bien préservés (Zolitschka *et al.*, 2015).

Depuis la dernière glaciation, le niveau de la mer a varié pour atteindre, dans la région, une altitude de 135 mètres au-dessus du niveau du lac actuel (Fitzhugh, 1973). Durant la période transgressive postglaciaire, qui s'est produite entre 9000 et 6000 ans environ, une grande partie du bassin versant était donc située sous le niveau de la mer. Ainsi, une importante quantité de sédiments marins (argiles, silts, sable) se sont déposés dans les vallées des rivières Beaver et Naskaupi. Ces sédiments marins aujourd'hui émergés sont facilement remobilisés chaque année par les rivières en crue et redéposés dans le lac. C'est la combinaison de la stabilité de la masse d'eau et de la grande disponibilité de sédiments qui est responsable de la formation et de la préservation des varves clastiques.

### Du fond du lac au laboratoire

Les sédiments lacustres sont échantillonnés par carottage (Glew *et al.*, 2001) : on enfonce un tube dans les sédiments que l'on remonte en surface rempli d'une colonne sédimentaire intacte, en refermant le sommet du tube par un clapet ou un autre système similaire. Les sédiments de Grand Lake ont été échantillonnés à deux périodes différentes : (1) en été, à partir d'une embarcation à l'aide d'un carottier de type gravitaire c'est-à-dire qui pénètre les sédiments par la seule force exercée par son poids, et (2) à l'aide un carottier à percussion, opéré en hiver sur la glace. Le carottier à percussion est muni d'un maillet relié à une corde que l'opérateur actionne pour pénétrer plus profondément dans les sédiments.

Une fois ramenées à la surface, les carottes de sédiments sont ramenées au labora-

toire où une première analyse non-destructive est faite sur le tube entier par *tomodensitométrie* (St-Onge *et al.*, 2007). Cette analyse permet d'obtenir des images radiographiques en 3D de l'ensemble de la carotte; ainsi, il est possible d'obtenir des images en coupes longitudinales des variations de densité d'une carotte. Ces images permettent l'identification de la structure du sédiment et donc des perturbations dues au carottage, ou une instabilité du milieu de dépôt. Cette analyse permet donc de choisir les carottes les plus aptes à contenir une séquence sédimentaire non perturbée et continue (Figure 1).

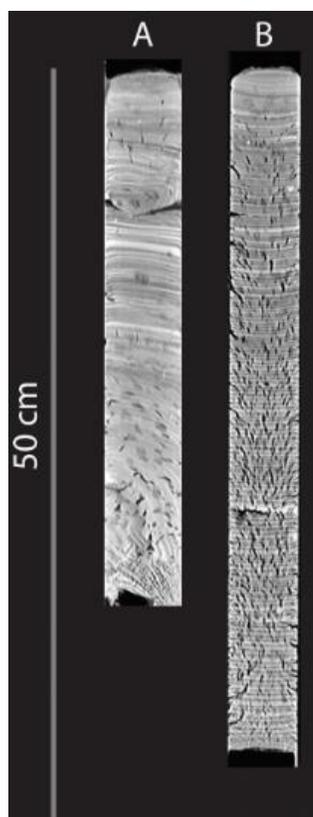


Figure 1. Exemples de coupes longitudinales de carottes sédimentaires obtenues par tomodensitométrie. Les variations de ton de gris sont fonctions des changements de densité du sédiment, où les tons plus foncés représentent l'air et les zones les plus pales le matériel le plus dense (sédiment minéraux fins). A. Carotte perturbée prélevée en zone peu profonde à Grand Lake. B. Carotte non perturbée prélevée en zone profonde à Grand Lake, les taches noires représentent des poches de gaz présentes dans le sédiment et les couches horizontales sont les varves.

Les carottes choisies sont alors coupées en deux dans le sens de la longueur et photographiées. Elles sont ensuite analysées par fluorescence-X, laquelle permet d'obtenir la composition chimique semi-quantitative du sédiment toujours sans destruction de matière (Löwemark *et al.*, 2019). L'appareil utilisé dans notre étude permet donc d'obtenir un profil de variation des principaux éléments du sédiment avec une résolution de 100 microns. Enfin, des blocs de sédiments sont prélevés dans la carotte et imprégnés de résine époxy (Lamoureux, 1994). Ces blocs sont ensuite indurés et collés sur des lames de verre puis polis jusqu'à une épaisseur de 30  $\mu\text{m}$  pour former des *lames minces*. Ces lames minces permettent de voir et caractériser les structures sédimentaires, la taille des grains de matière minérale au microscope optique ou électronique. Elles servent également à reconnaître, identifier et mesurer l'épaisseur des couches annuelles de sédiments (Figure 2).

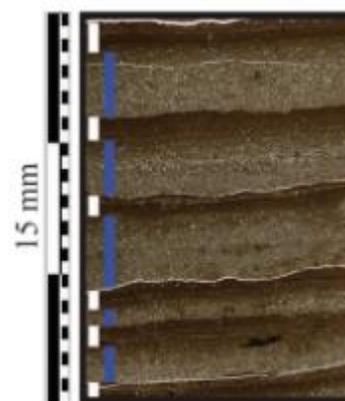


Figure 2. Image à haute résolution obtenue par la numérisation d'une lame mince. Sur cette image, cinq varves formées de deux couplets chacune peuvent être observées. Les barres horizontales bleues représentent l'épaisseur de la couche minérale de printemps et les barres blanches représentent l'épaisseur de la couche argileuse-organique déposée en fin d'été et durant l'hiver.

### Interpréter les données du passé à la lumière des données récentes

Une multitude d'approches statistiques, allant de régressions linéaires à des modèles numériques complexes, peuvent être utilisées afin d'extraire un signal paléoclimatique au moyen d'un indicateur climatique naturel ou « *proxy* » tels que l'épaisseur des varves ou de cernes d'arbres (Chapitres 2, 3 et 4). Un des facteurs limitant la comparaison entre les indicateurs naturels et les données instrumentales est souvent l'absence de données climatiques ou hydrologiques locales de qualité. Dans notre cas, les données des débits quotidiens du principal affluent de Grand Lake, la rivière Naskaupi, sont disponibles depuis 1976.

Nos analyses ont montré que l'épaisseur des varves était particulièrement bien corrélée ( $R^2 = 0,46$ ,  $p < 0,01$ ) avec le nombre de jours durant lesquels le débit de la rivière Naskaupi égale ou excède 200 mètres cubes par seconde. Ces débits ne sont en général atteints qu'au printemps et sont ceux qui sont nécessaires au transport de sédiments grossiers par la rivière jusqu'au lac. Sous ce seuil, la rivière Naskaupi transporte principalement des sédiments fins qui ne contribuent que peu à la formation de la structure de printemps au sein d'une varve (Figure 3). Nous pouvons interpréter la variabilité de l'épaisseur des varves de Grand Lake comme étant reliée à l'intensité de la crue printanière comme cela a déjà été montré dans d'autres sites (Heideman *et al.*, 2015; Zolitschka *et al.*, 2015).

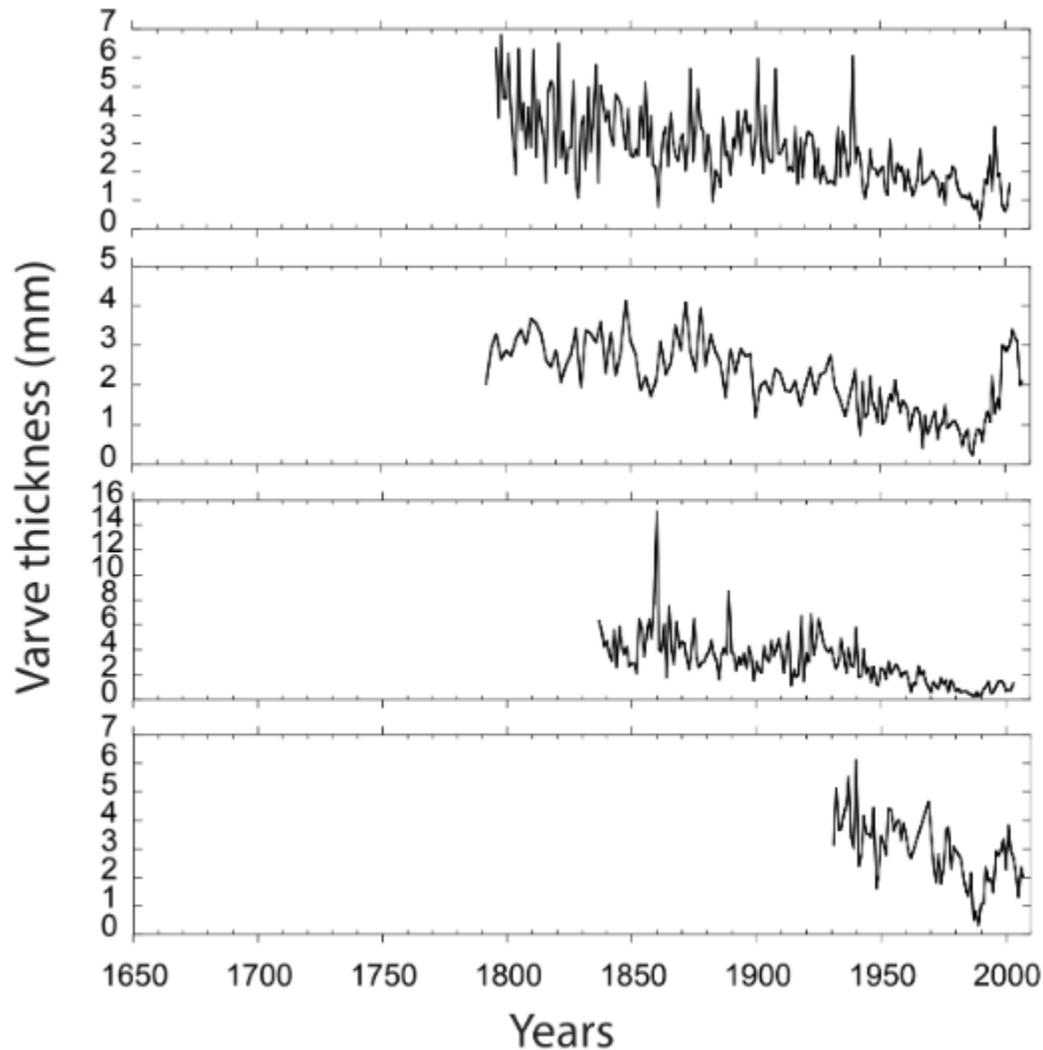
#### Un déclin des débits de crue depuis 150 ans?

La figure 4 présente les mesures d'épaisseur de varves de 4 carottes. De ces mesures, deux observations principales peuvent être faites : (1) l'épaisseur des varves a connu un déclin au cours des 150 dernières années, et (2) la variabilité interannuelle des crues a également diminué considérablement. Est-ce qu'un déclin des pics de crues signifie que la région de Grand Lake connaît une dimi-



**Figure 3. Relation entre l'épaisseur des varves et les débits de l'affluent principal de Grand Lake, la rivière Naskaupi pour la période 1978-2007.  $R^2 = 0,46$ ,  $p < 0,01$ .**

nution de ses apports hydriques depuis 150 ans? La réponse doit être nuancée : nos données indiquent que les pics de crue, qui correspondent principalement à la crue printanière occasionnée par la fonte de la neige, ont connu une diminution significative durant cette période. Toutefois, les varves de Grand Lake sont peu ou pas sensibles aux conditions estivales, sauf lorsque des crues exceptionnelles ont lieu. Il serait donc envisageable que les précipitations sous forme de neige aient connu une baisse significative durant cette période, mais que les précipitations estivales n'aient pas diminué, limitant ainsi l'impact des changements de conditions hivernales sur l'environnement forestier. La diminution des pics de crues peut également, du moins en partie, être attribuable à des conditions printanières de fonte changeantes; une moins forte nébulosité associée à une plus grande sublimation du couvert de neige peut être responsable d'une diminution des débits. C'est afin de répondre à ces questions complexes que la comparaison entre les données d'autres indicateurs paléo environnementaux s'avère essentielle.



**Figure 4. Mesures préliminaires d'épaisseur de varves de 4 carottes sédimentaires depuis 1790. La tendance commune montre une baisse des taux d'accumulation depuis les 150 dernières années. Les différences inter-annuelles et intra-annuelles entre les carottes pour une même année sont attribuées à la marge d'erreur temporelle due aux erreurs de comptages par une seule personne.**

### Perspectives

Cette étude des sédiments de Grand Lake est préliminaire. Des résultats plus complets et détaillés seront disponibles dans de prochaines publications avec des chronologies améliorées par des analyses au microscope électronique (Gagnon-Poiré *et al.*, sous presse). Nos travaux futurs s'attacheront aussi à allonger notre enregistrement paléoclimatique dans le temps et à tester d'autres indicateurs que l'épaisseur des varves pour reconstruire d'autres paramètres climatiques, comme par exemple la présence et l'intensité des crues estivales et automnales.

### Conclusion

Les archives sédimentaires de Grand Lake sont exceptionnelles dans le contexte du Nord-Est de l'Amérique du Nord. Nous avons vu que leurs structures annuelles nous renseignent sur la durée et l'intensité des crues printanières au cours des 200 dernières années. Toutefois, l'interprétation de ces résultats doit se faire à la lumière des données obtenues par d'autres indicateurs.

<https://doi.org/10.4095/328093>

## Références

- Fitzhugh, W., 1973. Environmental Approaches to the Prehistory of the North. Washington Academy of Science, 1973. 39-53.
- Gagnon-Poiré, A., Brigode, P., Francus, P., Fortin, D., Lajeunesse, P., Dorion, H. et Trottier, A.P., 2020. Reconstructing past hydrology of eastern Canadian boreal catchments using clastic varved sediments and hydro-climatic modeling: 160 years of fluvial inflows. *Climate of the Past Discussions* 2020: 1-40.
- Glew, J.R., Smol, J.P. et Last, W.M., 2001. Sediment Core Collection and Extrusion. In: *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments: Basin Analysis, Coring, and Chronological Techniques* (Eds. Last, W.M. and Smol, J.P.), pp. 73-105. Springer Netherlands, Dordrecht.
- Heideman, M., Menounos, B. et Clague, J.J., 2015. An 825-year long varve record from Lillooet Lake, British Columbia, and its potential as a flood proxy. *Quaternary Science Review* 126: 158-174
- Lamoureux, S.F., 1994. Embedding unfrozen lake sediments for thin section preparation. *Journal of Paleolimnology* 10, 2: 141-146.
- Löwemark, L., Bloemsa, M., Croudace, I., Daly, J.S., Edwards, R.J., Francus, P., Galloway, J.M., Gregory, B.R.B., Steven Huang, J.-J., Jones, A.F., Kylander, M., Löwemark, L., Luo, Y., Maclachlan, S., Ohlendorf, C., Patterson, R.T., Pearce, C., Profe, J., Reinhardt, E.G., Stranne, C., Tjallingii, R. et Turner, J.N., 2019. Practical guidelines and recent advances in the Itrax XRF core-scanning procedure. *Quaternary International*, 514: 16-29.
- St-Onge, G., Mulder, T., Francus, P. et Long, B., 2007. Continuous Physical Properties of Cored Marine Sediments. In: *Developments in Marine Geology* (Eds. Hillaire-Marcel, C. and De Vernal, A.), 1, pp. 63-98. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- Trottier, A.-P., Lajeunesse, P., Gagnon-Poiré, A. et Francus, P., 2020. Morphological signatures of deglaciation and postglacial sedimentary processes in a deep fjord-lake (Grand Lake, Labrador). *Earth Surface Processes and Landforms*, 45, 4: 928-947.
- Zolitschka, B., Francus, P., Ojala, A.E.K. et Schimmelmann, A., 2015. Varves in lake sediments – a review. *Quaternary Science Review*, 117, 0: 1-41.

## 21. Comparaison entre les apports hydrologiques naturels observés, reconstitués et simulés

Dominique Paquin, Antoine Nicault, Luc Perreault, Patrick Grenier, René Roy et Étienne Boucher

### Résumé

Cette section présente une comparaison entre trois sources d'apports pour les bassins Caniapiscau et Churchill Falls dans la péninsule du Québec-Labrador, soit les observations, les reconstitutions ARCHIVES et des simulations climatiques régionales du MRCC4 piloté par les réanalyses ERA40C (1960-2000) et globales MCG-CMIP3 (1850-2100). Sur la période plus récente, 1960-2000, la simulation régionale produite sur un domaine restreint (Québec) reproduit bien les caractéristiques des observations et reconstitutions, tandis que celle sur un grand domaine (Amérique du Nord) elle diffère significativement de la distribution observée. Pour la période 1850-2000, les simulations de MCG incluant tous les forçages (naturels et anthropiques) génèrent des apports en eau dont certaines propriétés statistiques importantes se rapprochent des séries d'apports reconstitués par dendrochronologie.

### Abstract

This section presents a comparison between three sources of inflows for the Caniapiscau and Churchill Falls basins in the Quebec-Labrador peninsula, namely observational data, ARCHIVES reconstructions and climatic simulations, whether regional from CRCM4 driven ERA40C (1960-2000) or global from CMIP3's GCM (1850-2100). Over the most recent period, 1960-2000, the regional simulation produced on a small domain (Quebec) reproduces rather well the characteristics of observations and reconstructions, while over a large domain (North America) it differs significantly from the observed distribution. For the period 1850-2000, the GCM simulations includ-

ing all the forcings (natural and anthropogenic) generate water inputs whose certain important statistical properties are similar to the series of inputs reconstituted by dendrochronology.

### Introduction

Depuis le début des années 1960, Hydro-Québec calcule par bilan hydrique, soit à partir d'observations hydrologiques telles le niveau du réservoir, le débit turbiné, etc., les apports naturels des bassins versants d'intérêt situés dans le nord québécois. Si l'on remonte plus loin dans le passé, les données hydrologiques dans cette région sont pratiquement inexistantes. Pour pallier à ces lacunes, le projet ARCHIVES a produit des reconstitutions d'apports en eau (ci-après RCCO; Nicault *et al.*, 2014) à partir de cernes d'arbres pour la période 1800-2000 (Chapitre 17), et les a validés par comparaison aux valeurs d'apports naturels fournies par Hydro-Québec depuis 1960. Cependant, puisque ces mêmes apports naturels ont servi à la calibration des relations statistiques utilisées à des fins de reconstitutions, la validation de celles-ci n'est pas indépendante pour la période 1960-2000. L'utilisation des modèles climatiques (Encart 1) permet de disposer d'une source d'information supplémentaire sur les apports passés, et s'avère fort utile notamment pour les régions ou les périodes sans observations. De plus, les simulations fournissent de l'information climatique supplémentaire telle que des variables non observées, non reconstituées ou encore sur le rôle de l'activité solaire, volcanique ou celui de l'évolution des gaz à effet de serre. L'idée centrale de ce volet du projet ARCHIVES est de vérifier conjointement la qualité des apports simulés (ruissellement) provenant des modèles

de climat et des apports reconstitués. L'approche adoptée évalue dans un premier temps le signal simulé dans les meilleures conditions possibles, soit pour une période pour laquelle des observations sont disponibles, de façon à pouvoir évaluer les résultats du modèle climatique régional (résolution de 45 km) piloté par des réanalyses (Encart 1). Cette évaluation est effectuée pour la période 1960-2000. Pour cette même période, le ruissellement simulé par des modèles climatiques globaux (résolution de l'ordre de 250 km) est également analysé. Dans un deuxième temps, sur la période 1850 à 2000, seul le ruissellement simulé par des modèles globaux est comparé aux apports reconstitués, aucune simulation de modèle régional n'étant disponible pour la période 1850 à 1960.

### Descriptions des simulations régionales et globales

Les simulations climatiques effectuées

avec des modèles climatiques régionaux, de par leur grille à plus haute définition que celle des modèles globaux, permettent une meilleure caractérisation des phénomènes climatiques locaux et des bassins de la taille de ceux du projet ARCHIVES. Le modèle régional se devant d'être relié au reste du globe (Encart 1), l'utilisation de réanalyses comme pilote permet de fournir de l'information se rapportant à l'état observé de l'atmosphère à la frontière du domaine simulé et ainsi de diriger (de manière limitée) le modèle régional vers l'état observé de l'atmosphère. Cette méthode de pilotage permet de retrouver une corrélation temporelle appréciable au niveau des grands cycles hydrologiques annuels entre les simulations régionales et les observations. C'est ce que nous recherchons dans un premier temps avec l'analyse des simulations régionales pilotées par des réanalyses.

#### Encart 1. Les modèles climatiques

Les modèles climatiques, ou modèles physiques du climat, sont d'abord composés des équations qui régissent le comportement de l'atmosphère et de l'océan en obéissant aux lois fondamentales de la physique. Ce système, parce que non-linéaire et de nature chaotique, est résolu de façon numérique en transposant les équations sur des grilles en trois dimensions spatiales, ce qui permet de limiter les simplifications. À cette représentation de base du système climatique s'ajoutent de nombreux paramétrages physiques qui permettent de considérer les processus plus fins (non résolus) que la maille de la grille de calcul. Basés sur l'état des connaissances, l'importance relative et la puissance de calcul demandé pour chaque processus climatique, ces paramétrages vont de la simple relation empirique à la description détaillée des processus physiques complexes décrits par de nombreuses équations.

Selon le type de grille de calcul, deux familles de modèles sont utilisées pour faire des simulations climatiques, résultat de l'exécution du modèle pour une période allant de quelques années à plusieurs millénaires. La grille des modèles climatiques globaux (MCG) couvre la planète entière tandis que celle des modèles régionaux du climat (MRC) ne couvre qu'une sous-région. Les simulations de MCG représentent la variabilité climatique due soit à des processus internes naturels résultat des interactions entre les composantes du système climatique, soit à des forçages externes anthropiques (gaz à effet de serre) ou naturels (solaire, volcanique). L'intérêt principal d'un MRC réside dans le fait qu'en limitant l'intégration à un domaine d'intérêt plus petit que le globe, il devient possible d'un point de vue temps de calcul nécessaire d'augmenter la résolution spatiale passant ainsi d'une résolution de l'ordre de 250 km entre chaque point de grille pour un MCG à quelques dizaines de km pour un MRC. L'information aux frontières du domaine du MRC, provenant d'un MCG ou de réanalyses (une combinaison d'observations et de modèle numérique de prévision météorologique reproduisant la séquence temporelle réelle des événements météorologiques) permet de rester en lien avec le climat planétaire. On dit ainsi d'un modèle régional qu'il est piloté par un MCG ou des réanalyses.

**Tableau 1. Nom des bassins étudiés, nombre de points de grille couvrant le bassin et résolution pour les deux simulations du MRCC et les 22 simulations de différents MCG.**

Bassin	MRCC		MCG – CMIP3	
	nb points de grille	résolution	nb point de grille	résolution (variable selon le MCG)
Caniapiscou	23	~ 45 km	1	de 200 à 350 km
Churchill Falls	33	~ 45 km	1	de 200 à 350 km

Il est important de noter que pour les simulations de MCG comme tels ou encore celles de modèles régionaux pilotées par un Modèle Climatique Global (MCG), il n’y a pas de correspondance entre les années réelles et simulées. Ces simulations n’étant aucunement reliées à la météorologie réelle, elles ne peuvent pas reproduire les variations interannuelles observées. Par contre, elles peuvent espérer reproduire les distributions sur de longues périodes ainsi que les patrons spatiaux. Nous allons donc rechercher le signal de variation temporelle dans des simulations de MCG sur de longues périodes, auxquelles correspondent diverses variations de forçages, changements de concentration de gaz à effet de serre, éruptions volcaniques ou variations solaires.

Les tableaux 1 et 2 donnent les caractéristiques des simulations du Modèle Régional Canadien du Climat (MRCC; Paquin, 2010; Music *et al.*, 2009) utilisées, de même que quelques informations sur les simulations des différents MCG du *World Climate Research Programme's (WCRP's) Coupled Model Intercomparison Project phase 3 (CMIP3) multi-model dataset* (Meehl *et al.*, 2007) utilisés. Les deux simulations MRCC utilisent la même version de modèle (4.2.3), la même résolution (45 km vrai à 60 °N) et le même pilote (les réanalyses ERA40C; Uppala *et al.*, 2005). La diffé-

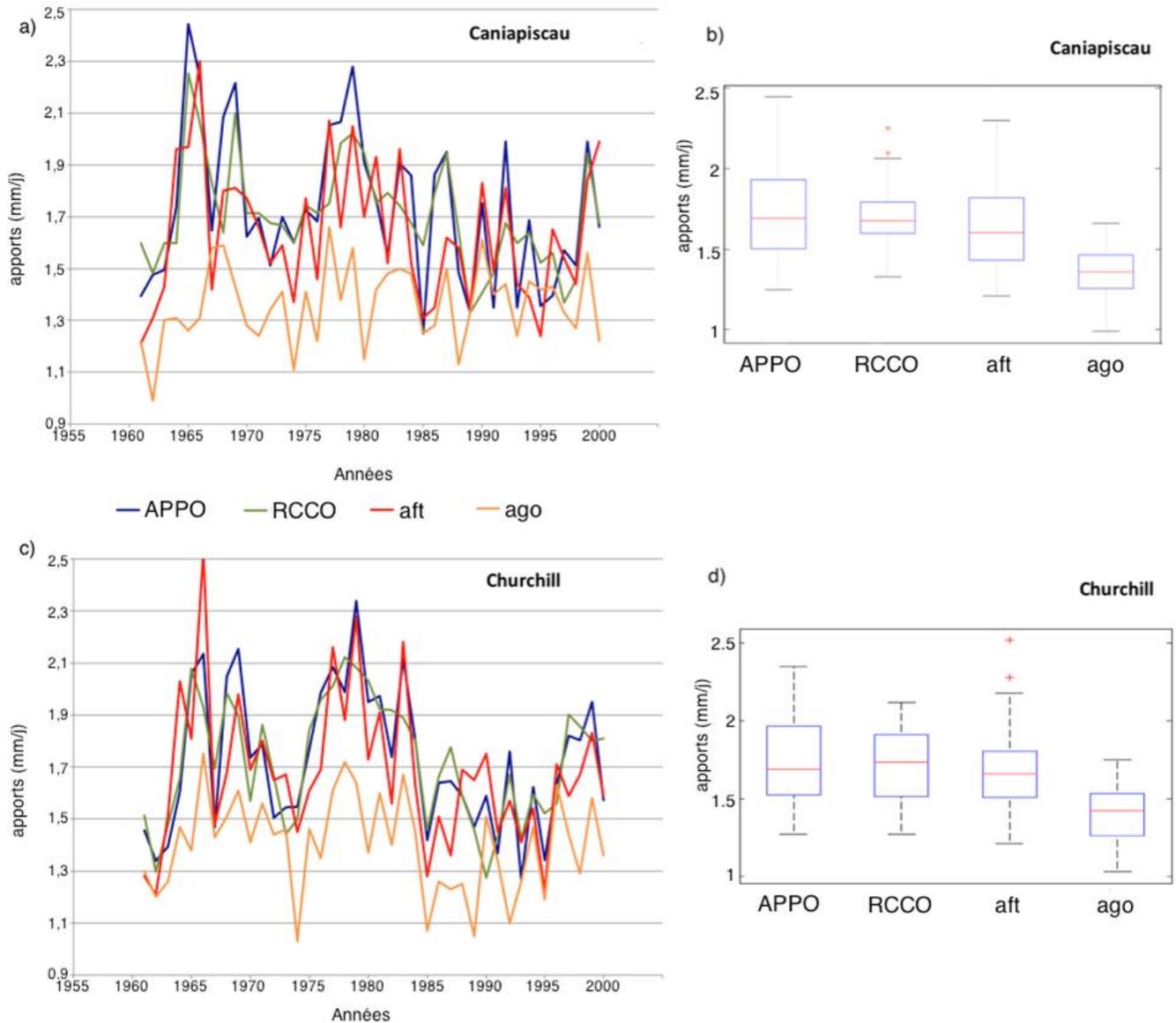
**Tableau 2. Caractéristiques des simulations MRCC**

Nom	Domaine	# points de grille
aft	Québec	112 x 88
ago	Amérique du Nord	201 x 193

rence entre les deux simulations du MRCC provient de la taille du domaine, qui couvre l’ensemble de l’Amérique du nord (simulation ago) ou uniquement le Québec (simulation aft). De par sa plus petite taille, la simulation aft est plus contrainte par l’information fournie aux frontières par le pilote. De nombreuses références décrivent en détail le MRCC version 4.2.3, parmi elles, Paquin (2010) pour l’évaluation générale du modèle sur la simulation du passé récent et Music *et al.* (2009) pour l’évaluation du ruissellement (apports) simulé.

### Évaluation sur la période 1960-2000

Notre étude ne porte que sur les apports annuels. Les apports printaniers et estivaux ont également fait l’objet de quelques analyses, mais le MRCC (et les MCG) n’ayant pas de schéma de routage, la précipitation se retrouve directement dans le ruissellement sans le délai réel. Il s’ensuit donc un décalage des apports rendant plus difficile l’évaluation. Les apports annuels représentant l’intégrale du ruissellement, le problème de décalage ne se présente pas.



**Figure 1. Comparaison entre les apports annuels (mm/j) observés (APPO), les reconstitutions (RCCO), et les simulations MRCC (aft et ago) pour la période 1960-2000. Pour chacun des bassins, Caniapiscou et Churchills Falls, les valeurs sont représentées sous forme de séries temporelles (a, c) et de diagrammes à moustaches (b, d). Pour cette dernière représentation, la ligne rouge indique la médiane de la distribution, les limites de la boîte les 25<sup>ième</sup> et 75<sup>ième</sup> percentiles et les valeurs moustaches les points les plus extrêmes qui ne sont pas des valeurs aberrantes (croix rouges).**

Les figures 1a et 1c montrent les apports annuels observés (APPO - bleu), reconstitués (RCCO - vert) et simulés (aft - rouge et ago - orange) sur les bassins voisins des rivières Caniapiscou et Churchill Falls. On remarque d'abord une certaine similitude entre les apports observés des deux bassins, soit deux périodes de forte hydraulicité dans les années 1960, suivies d'une décennie avec des valeurs

plus près des moyennes (1970), d'un retour à une forte hydraulicité au début des années 1980 et enfin des années avec des valeurs généralement assez faibles depuis cette période<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Ce constat, préoccupant pour Hydro-Québec, a fait l'objet de plusieurs études traitant des changements de régimes dans les séries de données hydrologiques (cf. Chapitre 14). Le résultat de ces études a d'ailleurs motivé en partie le projet ARCHIVES.

Les reconstitutions, construites pour reproduire les observations, représentent bien les variations interannuelles et l'amplitude observées. Rappelons que ces reconstitutions ont été calibrées à partir de ces mêmes données observées pour cette période, contrairement aux simulations qui sont indépendantes des observations. La simulation aft (rouge) simule bien les apports observés sur les deux bassins, avec une bonne représentation tant des années de forte hydraulicité (1965, 1977, 1999) que des années avec des apports moins élevés (1967, 1972, 1984, 1993). Par contre, la simulation ago (orange) sous-estime de façon quasi-systématique les apports, notamment les années de forte hydraulicité. Music *et al.* (2009) effectue une analyse de cette sous-estimation dans les apports sur le domaine nord-américain. Les coefficients de corrélation  $r$  des reconstitutions et des simulations avec les apports observés sont présentés dans le tableau 3. Les valeurs de 0,73 et 0,8 obtenues pour la simulation aft et de 0,8 et 0,86 pour les reconstitutions indiquent une bonne reproduction des variations annuelles des apports. On peut voir dans les corrélations simulations-observations un estimé de la corrélation maximale qu'il est possible d'atteindre, la simulation étant régionale, pilotée par des réanalyses et réalisée sur un domaine de taille restreinte.

**Tableau 3. Coefficients de corrélation  $r$  entre les apports annuels (mm/j) observés (APPO) et les reconstitutions (RCCO) et entre les apports observés (APPO) et les simulations MRCC aft et ago calculés sur la période 1960-2000, pour les bassins Caniapiscau et Churchill Falls.**

Bassin	RCCO	aft	ago
Caniapiscau	0.80	0.73	0.37
Churchill Falls	0.86	0.80	0.67

Les figures 1b et 1d montrent sous forme de diagrammes à moustaches (« boxplot ») les distributions des apports annuels. Pour le bassin de la Caniapiscau, les apports reconstitués (RCCO) ne permettent pas de reproduire correctement la variabilité des apports observés (Figure 1b). La dispersion des apports annuels est clairement sous-estimée et les valeurs extrêmes observées dans l'historique ne sont pas atteintes par les reconstitutions. En revanche, les apports reconstitués (RCCO) représentent bien la valeur centrale de la distribution des apports observés. Dans le cas du bassin de Churchill Falls, la reconstitution présente une distribution dont les caractéristiques de tendance centrale et de dispersion se rapprochent de celles des observations (Figure 1d). On note tout de même, mais à un degré moindre pour Caniapiscau, que les valeurs extrêmes maximums sont mal reproduites. La simulation aft tend à sous-estimer les extrêmes maximums, mais globalement donne une représentation fidèle de la distribution observée, particulièrement pour le réservoir Caniapiscau. Nous cherchons à déterminer si les distributions des apports hydrologiques simulés diffèrent significativement des observations. Pour ce faire, nous comparons dans le tableau 4 les seuils observés  $p$  ( $p$ -values) du test d'hypothèses statistique de Kolmogorov-Smirnov. Les valeurs obtenues pour les recons-

**Tableau 4. Seuils observés  $p$  ( $p$ -values) du test statistique de Kolmogorov-Smirnov pour les reconstitutions (RCCO) et les simulations MRCC aft et ago calculés sur la période 1960-2000, pour les bassins Caniapiscau et Churchill Falls.**

Bassin	RCCO	aft	ago
Caniapiscau	0,7	0,5	~0,0
Churchill Falls	0,9	0,2	~0,0

titutions (RCCO) et la simulation aft ne permettent pas de rejeter l'hypothèse selon laquelle les distributions sont semblables si l'on considère un seuil théorique  $\alpha$  fixé à 5% ou à 1% (probabilité de rejeter à tort l'hypothèse que les distributions soient identiques). Par contre, les seuils observés  $p$  quasi nuls pour la simulation ago indiquent que la distribution diffère significativement de la distribution observée.

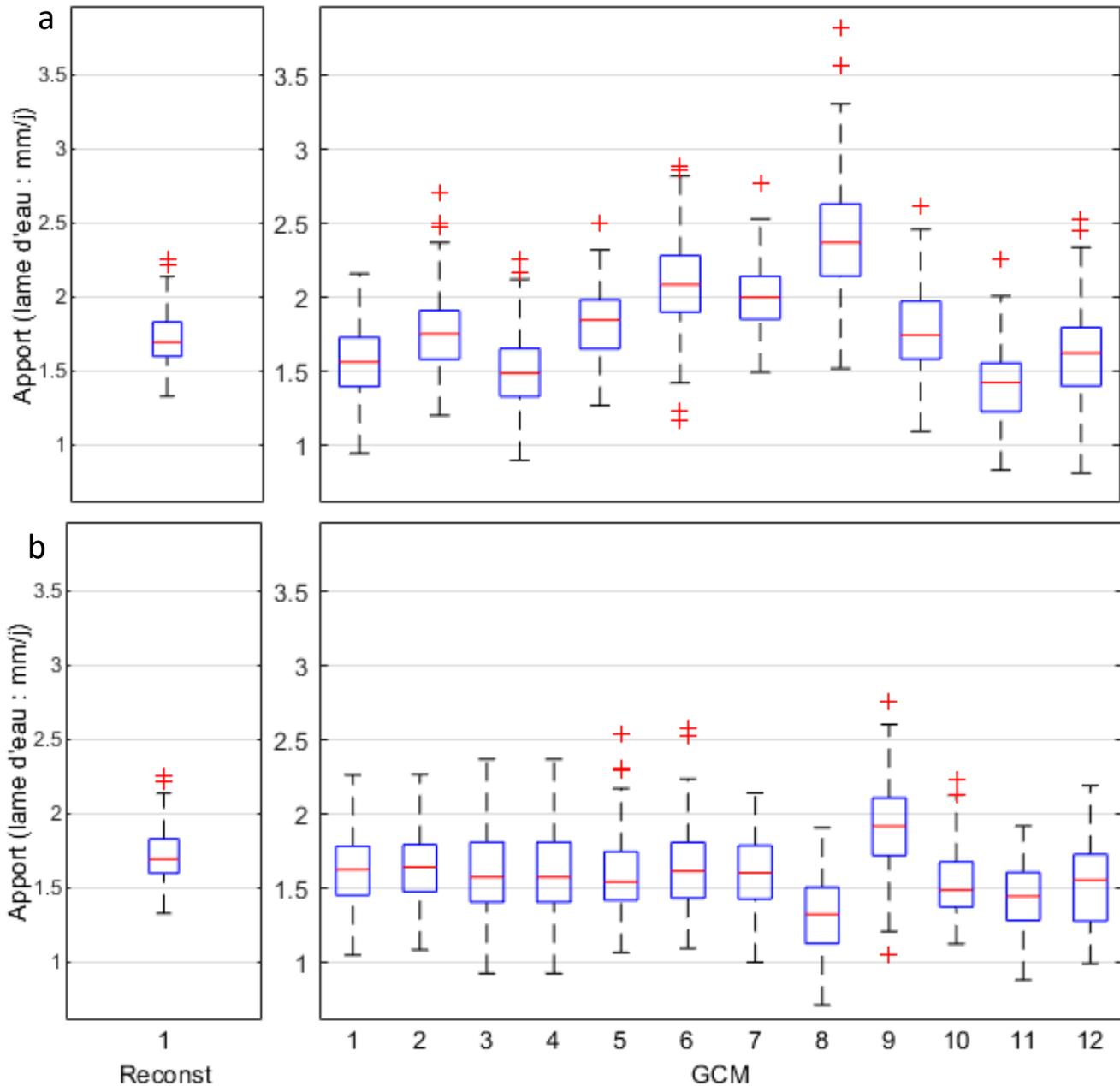
Pour compléter l'analyse sur la période 1960-2000, nous avons utilisé 22 simulations MCG de CMIP3 et comparé les distributions simulées à celle observée. Ceci nous permet d'avoir un estimé de la capacité des modèles à reproduire la distribution avant de faire des analyses sur la période antérieure, pour laquelle il n'y pas d'observations. Des 22 simulations disponibles (une simulation par modèle différent), 10 ne considèrent que le forçage anthropique -FA- (augmentation des gaz à effet de serre et variations de la concentration des aérosols) et 12 intègrent à la fois le forçage anthropique et les forçages naturels -FAN- (solaire et volcanique). Nous avons profité des différences de forçages entre les 2 groupes de simulation pour rechercher des relations entre les apports simulés et reconstruits, et les forçages (cycles solaires, éruptions volcaniques, anthropiques) et oscillations (de type ENSO ou NAO). Des régressions linéaires univariées et multivariées ont montré de faibles corrélations entre les apports reconstitués et les influences solaire (cycle de 10-11 ans) et volcanique comparativement à celles obtenues pour le forçage anthropique (lié aux changements de concentration de gaz à effet de serre) ainsi que pour les oscillations de type ENSO ou NAO. De plus, une analyse de Fourier n'a révélé aucune pointe spectrale saillante dans les séries temporelles des apports observés autour de la période de 10-11 ans. Les forçages solaires et volcaniques semblent toutefois importants pour la représentation de la distribution. En effet, les seuils observés  $p$  du test de Kolmogorov-Smirnov qui compare les distributions de

probabilité des apports annuels observés 1961-2000 avec celles des reconstitutions ARCHIVES et des 22 séries de ruissellement annuel total simulées par les 22 MCG montrent que plus de simulations FAN ont des valeurs supérieures au seuil de 0,1, soient quatre sur un total de cinq pour Caniapiscau et six sur un total de neuf pour Churchill Falls.

### Évaluation sur la période 1850-2000

Il aurait été intéressant d'analyser de longues simulations régionales pilotées par des MCG. Malheureusement, ces simulations sont très coûteuses en temps de calcul et n'ont pu être réalisées dans le cadre du projet ARCHIVES. Des analyses de longues séries n'ont donc été faites que sur les 22 simulations de MCG déjà mentionnées.

La figure 2 montre les distributions (diagrammes à moustaches) des apports reconstitués et simulés par les simulations MCG (un seul point de grille par bassin par simulation) sur la période 1850-2000 pour le bassin Caniapiscau. La figure 2a montre les simulations avec forçages anthropiques (FA) uniquement tandis que la figure 2b montre les simulations avec tous les forçages (FAN). Les distributions des simulations FA affichent à la fois une plus grande variabilité et une valeur moyenne plus élevée que les simulations FAN et les apports reconstitués. Puisque ce ne sont pas les mêmes modèles qui ont produit les simulations FA et FAN, il est impossible de savoir si les différences proviennent des modèles ou du changement de forçages. Dans une suite au projet ARCHIVES, l'analyse prévue de simulations du projet CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project phase 5) dans lequel certains modèles ont produit des simulations avec et sans les forçages naturels permettra d'éclaircir ce point. Les résultats (non montrés) pour le bassin Churchill Falls sont similaires à ceux obtenus pour le bassin Caniapiscau, avec toutefois plus de variabilité inter-modèle.



**Figure 2.** Diagrammes à moustaches des reconstitutions ARCHIVES et des séries simulées par différents MCG de ruissellement annuel total pour 1850-2000 sur le bassin de Caniapiscou (a) forçages anthropiques; (b) forçages naturels et anthropiques.

### Conclusion

Le projet ARCHIVES a permis une première comparaison entre trois sources d'apports pour le nord du Québec, soient les observations, les reconstitutions ARCHIVES et des simulations issues de modèles climatiques régionaux et globaux. Les apports provenant

des simulations régionales MRCC pilotées par des réanalyses ERA40C sur le domaine Québec reproduisent bien les observations sur la période 1960-2000. Cette simulation référence indique le potentiel du MRCC pour les périodes plus anciennes sans observations, sous certaines conditions. Notamment, l'utilisation d'un domaine régional limité (Québec plutôt

qu'Amérique du Nord) est conseillée pour éviter une sous-estimation de la variance ainsi que de la moyenne des apports hydrologiques (Music *et al.*, 2009). De plus, l'analyse préalable du pilote au modèle régional est nécessaire afin de s'assurer que le pilote représente de façon adéquate la distribution des apports. Nos travaux montrent que pour la période 1850-2000, les simulations de MCG incluant tous les forçages (naturels et anthropiques) génèrent des apports en eau dont certaines propriétés statistiques importantes se rapprochent des séries d'apports reconstitués par dendrochronologie. La vérification de cette hypothèse doit toutefois être validée par l'étude de simulations avec et sans forçages naturels produites par les mêmes modèles. Cela nous rappelle donc qu'au cours des derniers 150 ans, les variations hydrologiques reconstituées au nord du Québec ne sont pas uniquement attribuables à la variabilité interne du climat, mais que certains forçages externes (*p. ex.* gaz à effet de serre, volcanisme, rayonnement solaire) peuvent également être responsables d'une part de la variabilité.

<https://doi.org/10.4095/328095>

## Références

- Meehl, G.A., Covey, C., Taylor, K.E., Delworth, T., Stouffer, R.J., Latif, M., McAvaney, B. Mitchell, J.F.B., 2007. The WCRP CMIP3 Multimodel Dataset: A New Era in Climate Change Research. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88: 1383–1394. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-88-9-1383>
- Music, B., Frigon, A., Slivitzky, M., Musy, A., Caya, D. et Roy, R., 2009. Runoff modelling within the Canadian Regional Climate Model (CRCM): analysis over the Quebec/Labrador watersheds. *New Approaches to Hydrological Prediction in Data-Sparse Regions*, International Association of Hydrological Sciences, Publication 33: 183-194
- Nicault, A., Boucher, É., Bégin, C., Guiot, J., Perreault, L., Roy, R., Savard, M.M. et Bégin, Y., 2014. Hydrological reconstruction from tree-ring multiproxies over the last two centuries at the Canipiscau Reservoir, northern Québec, Canada. *Journal of hydrology*, 513 : 435-445.
- Paquin, D., 2010. Évaluation du MRCC4 en passé récent (1961-1999). Ouranos, Équipe Simulations climatiques. Rapport interne no 15, octobre 2010, 45 p. 61 p. avec annexes. Disponible sur demande à [paquin.dominique@ouranos.ca](mailto:paquin.dominique@ouranos.ca)
- Uppala, S.M., Kållberg, P.W., Simmons, A.J., Andrae, U., Bechtold, V.D.C., Fiorino, M., Gibson, J.K., Haseker, J., Hernandez, A., Kelly, G.A., Li, X., Onogi, K., Saarinen, S., Sokka, N., Allan, R.P., Andersson, E., Arpe, K., Balmaseda, M.A., Beljaars, A.C.M., Berg, L. Van D., Bidlot, J., Bormann, N., Caires, S., Chevallier, F., Dethof, A., Dragosavac, M., Fisher, M., Fuentes, M., Hagemann, S., Holm, E., Hoskins, B.J., Isaksen, I., Janssen, P.A.E.M., Jenne, R., McNally, A.P., Mahfouf, J-F., Morcrette, J-J., Rayner, N.A., Saunders, R.W., Simon, P., Sterl, A., Trenberth, K.E., Untch, A., Vasiljevic, D., Viterbo, P., et Woollen, J., 2005. The ERA-40 re-analysis, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 131: 2961-3012.

## Conclusion et perspectives

Le projet ARCHIVES visait à reconstituer, sur au moins les deux derniers siècles, les variables hydro-climatiques servant au calcul et à la prévision des apports en eau dans les bassins hydro-électriques du Moyen-Nord du Québec. Le projet était structuré sous trois grands objectifs:

- 1) reconstituer à haute résolution temporelle les apports en eau et les variables climatiques utilisées en prévision hydrologique pour les bassins d'intérêt pour la production hydroélectrique,
- 2) analyser la variabilité spatiale et temporelle du climat boréal du Québec-Labrador,
- 3) confronter les reconstitutions aux sorties des modèles climatiques.

### Un vaste territoire à l'étude

L'étude s'est déroulée sur un territoire couvrant le nord de la forêt boréale du Québec et du Labrador (600 000 km<sup>2</sup>). L'échantillonnage des populations d'arbres s'est appuyé sur un ensemble de travaux préliminaires mais aussi sur les nombreuses années d'expérience des chercheurs dans les régions nordiques. Par exemple, on a sondé le potentiel dendrochronologique de quelques espèces conifériennes (épinette noire, pin gris), de populations riveraines boréales et subarctiques, des cicatrices glacielles en vue de reconstituer les crues printanières, des paléoindicateurs des feux (cicatrices, mortalité), etc. Un travail de terrain soutenu a permis de constituer un savoir écologique et de construire des bases de données sur ce vaste territoire.

### Les feux : d'incontournables perturbations limitant les travaux de reconstitution dendrochronologique

Les feux de forêts ont particulièrement attiré notre attention. Il s'agit du principal fac-

teur de dynamique des paysages dans le nord québécois, surtout dans la portion occidentale du territoire du Complexe hydroélectrique La Grande où une grande partie de nos recherches se sont déroulées. On a pu démontrer par exemple que la taille et la fréquence des incendies passés correspondent à l'histoire des sécheresses depuis deux siècles. En marge du réservoir LG2, on a montré que la taille des feux est inversement reliée aux apports en eau.

### Un historique hydrologique

Nos travaux ont permis la reconstitution sur deux siècles de variables clés pour la gestion de la production hydro-électrique (volume, durée, moment de la crue printanière). En se basant sur l'utilisation de marqueurs comme les blessures (cicatrices) infligées aux arbres riverains par les glaces flottantes lors du passage de crues extrêmes, on a reconstitué le volume et l'amplitude (débit maximal) des crues passées. Par exemple, dans le secteur de LG4, après une période de faibles apports entre 1850 et 1930, une augmentation progressive des apports est survenue à partir de 1930 –période culminant dans les années 1960 et 1970- suivie d'une diminution progressive entre 1985 et 2000. Par ailleurs, au réservoir Caniapiscau, les apports ont oscillés autour de 1000 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> entre 1850 et 1900. Puis, entre 1900 et 1945, de faibles apports (entre 750 et 900 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>) à faible variabilité interannuelle ont été enregistrés. Enfin, on note une augmentation considérable des apports printaniers depuis 1950; ils sont aussi plus variables mais plus abondants (moyenne de 1200 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>). On a aussi conclu que la crue printanière tend à se produire de manière plus hâtive dans le secteur de Caniapiscau.

### Nouvelles approches : des modèles écophysio- logiques inversés

Au moyen de modèles écophysio-  
logiques et de leur inversion on a cherché à bali-  
ser les reconstitutions hydro-climatiques pro-  
duites à partir d'indicateurs dendrochronolo-  
giques (largeur des cernes, densité du bois,  
rapports isotopiques du carbone et de  
l'oxygène) dans le but d'augmenter la robus-  
tesse des reconstitutions hydro-climatiques  
produites à partir des chronologies de cernes  
de l'épinette noire. Dans un premier temps, on  
a procédé à la modélisation des propriétés du  
cerne à partir de séries météorologiques et de  
chronologies multi-indicateurs. Dans un deu-  
xième temps, on a développé un algorithme  
d'inversion permettant de contraindre les re-  
constitutions hydro-climatiques à partir de la  
modélisation du cerne. Les premières simula-  
tions ont été réalisées dans le secteur amont  
du complexe La Grande. Le modèle arrive à  
reproduire deux des trois grands indicateurs  
dendrochronologiques (les deux isotopes  
stables ( $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{18}\text{O}$ ) et les largeurs de cernes).

### Premières séries dendroisotopiques

Parallèlement à l'étude des paramètres  
physiques des cernes de croissance (largeur et  
densité des cernes), nous avons testé pour la  
première fois dans la partie nord-est de  
l'Amérique du Nord les rapports isotopiques du  
carbone et de l'oxygène des cernes pour re-  
constituer les conditions hydro-climatiques des  
deux derniers siècles. Trois sites géographi-  
quement représentatifs de la partie centrale de  
la péninsule Québec-Labrador ont été retenus  
pour les analyses isotopiques (sites HM1, DA1  
et POOL). Au total, 1799 analyses  $\delta^{13}\text{C}$  et 1798  
analyses  $\delta^{18}\text{O}$  ont été produites. Les séries iso-  
topiques moyennes du carbone et de l'oxygène  
ont montré une grande sensibilité à plusieurs  
paramètres hydro-climatiques surtout lorsque  
l'on combine les deux isotopes. Sur la base des  
paramètres hydro-climatiques les mieux corrélés  
aux rapports isotopiques, nous avons re-

constitué, à l'aide de fonctions de transfert, les  
températures maximales des mois d'été ( $T_{\text{max}}$   
juin à août) et les débits des grandes rivières  
de la région (Ashuanipi, Churchill et Caniapis-  
cau) pour les mois de juillet à novembre (hy-  
drologie régionale) sur les deux cents dernières  
années. La reconstitution des débits est par  
ailleurs essentielle pour comprendre les chan-  
gements de régimes hydrologiques dans le  
secteur amont du bassin de La Grande Rivière.  
Les séries reconstituées ont mis en évidence  
des conditions très contrastées, marquées par  
une alternance d'ambiances climatiques ty-  
piques des étés boréaux québécois, où des  
périodes chaudes et sèches succèdent à des  
conditions froides et humides. Elles ont aussi  
permis de documenter des événements clima-  
tiques particuliers tels le refroidissement qui a  
suivi l'éruption du Tambora en 1815.

### Des reconstitutions « multi-proxies »

Les apports en eau annuels et saison-  
niers des réservoirs LG2, LG4, Caniapiscau et  
Churchill Falls ont été reconstitués sur la pé-  
riode de 1800 à 2000. Ces reconstitutions pa-  
léo-hydrologiques ont été réalisées à partir de  
différents « proxies », soit des largeurs de  
cernes annuels pour tous les sites, des séries  
de densités (minimale et maximale) de cernes  
pour un grand nombre de sites, et les séries  
dendroisotopiques  $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{18}\text{O}$  pour quatre  
sites. La méthode de reconstruction a été dé-  
veloppée sur le bassin de tête du complexe  
LaGrande, au réservoir Caniapiscau. Les rela-  
tions entre les arbres et les apports en eau  
étant indirectes et les séries de données ob-  
servées étant très courtes (1960-2000), l'effort  
pour produire les reconstructions les plus  
fiables possibles a été laborieux. En effet, il  
résulte de la courte période d'observation, une  
période de calibration très courte ne laissant  
que très peu de place à la validation indépen-  
dante. Malgré ces nombreux défis, nous avons  
pu reconstituer les apports annuels, printaniers  
et estivaux au réservoir Caniapiscau. Les ap-

ports annuels et estivaux reconstitués sont fiables d'un point de vue statistique et ont pu, par ailleurs, être validées de façon indépendante avec les niveaux d'eau du Lac Nitchequon (lac de tête de la Grande Rivière) sur une période antérieure à la période de calibration (1950-1959). En revanche, bien que statistiquement significatives, les reconstitutions des apports printaniers apparaissent beaucoup moins fiables. Les reconstitutions hydrologiques réalisées n'ont pas mis en évidence la tendance générale des niveaux d'eau sur les 200 dernières années, ni à la hausse, ni à la baisse. En revanche, elles ont mis en évidence des périodes bien marquées de hautes eaux et de basses eaux, ainsi que des changements au cours du temps dans l'amplitude de la variabilité interannuelle.

### Des téléconnexions atmosphériques influentes

Le projet a permis de mettre en évidence des relations fortes entre la variabilité temporelle des apports en eau estivaux et l'indice de téléconnexion atmosphérique AO (oscillation arctique) estival, entre les crues printanières et l'indice AO printanier et ainsi qu'entre les indices NAO (oscillation nord atlantique) hivernal et estival et les apports en eau. Dans le cadre d'ARCHIVES et par la suite dans le cadre d'un projet parallèle (Projet ANHYCLI (Ouranos- Université Aix-Marseille)), une telle analyse a été appliquée à tous les bassins de l'aire d'étude (LG1, LG2, LG3, LG4, LA1, Churchill Falls), ainsi qu'à des bassins voisins (Eastmain, Manic 5, Outardes 4) et des variables atmosphériques utilisées pour les prévisions hydrologiques saisonnières. Ces résultats (article en cours de rédaction) montrent une grande variabilité temporelle et spatiale dans les apports. La variabilité temporelle des apports à LG2 (à l'ouest) étant régie par des forçages internes du climat très différents de ceux de Churchill Falls (à l'est).

### Détection des grands gradients et des zones climatiques

La variabilité spatiale du climat et son influence sur la croissance des arbres a fait l'objet d'une attention particulière, pour éventuellement utiliser les arbres pour déceler des patrons climatiques passés entre la Baie de James et la mer du Labrador. La première étape a été de produire une analyse des affinités entre les dendroséries. Dans un premier temps une analyse de classification hiérarchique a été réalisée. La mesure de ressemblance a été calculée sur la période commune entre les séries (1920-1987) par le calcul de la distance euclidienne et la méthode de groupement qui vise à partitionner l'ensemble des objets. Le dendrogramme issu de l'analyse montre que les populations d'épinette noire se divisent en 4 groupes principaux: 1) populations subarctiques situées au nord-ouest dans le secteur de la baie d'Hudson, 2) populations côtières de la Baie de James jusqu'au réservoir LG2, 3) populations de la tête du complexe LaGrande, et 4) populations du Labrador/Schefferville. La deuxième étape a été l'analyse des relations cernes-climat. Pour chacun de la centaine de sites étudiés, nous avons calculé les fonctions de réponses de la croissance au climat. La fonction de réponse en dendroclimatologie est définie comme étant la fonction linéaire qui relie le climat et la croissance annuelle des arbres. Les fonctions de réponse ont été calculées sur la période 1961-2005. Les douze mois de températures, et les douze mois de précipitations ont été utilisés successivement comme variables explicatives. Nous avons utilisé des données météorologiques sur grille (0.5°x 0.5°), fournies par Hydro-Québec, qui couvrent l'ensemble de la région étudiée. Les interpolations sur grille ont été réalisées grâce à la technique du krigeage avec dérive externe (topographie). L'analyse des fonctions de réponse montre que la croissance radiale des épinettes noires est beaucoup plus sensible aux températures qu'aux

précipitations. Cependant les relations entre la variabilité de la croissance et le climat apparaissent complexes. Au moins quatre variables de températures, dont trois précédant la saison de croissance, jouent un rôle important dans la variabilité interannuelle de la croissance des épinettes. On observe une grande variabilité interstationnelle et régionale dans les patrons de réponse aux températures. Les résultats mettent en évidence deux gradients distincts dans la réponse des arbres au climat, un gradient Nord-Sud, et un gradient Est-Ouest. Cette affinité géographique montre que la discrimination entre sites semble être plus déterminée par la variabilité climatique régionale que par les caractéristiques écologiques stationnelles.

### De nouvelles approches pour tester la robustesse temporelle des séries dendrochronologiques

La modélisation bayésienne hiérarchique a été utilisée afin d'extraire le signal commun d'un ensemble d'indicateurs sélectionnés. Le modèle développé se nomme DENDRO-AR(1). Il a permis de produire une série caractéristique d'un ensemble de séries d'indices de croissance provenant d'un même site. Ce modèle a été appliqué à 57 sites d'épinette noire et les résultats ont permis de confirmer des patrons régionaux de croissance, de même que la cohérence temporelle des séries dendrochronologiques.

### Des dendroséries millénaires mises à jour

Le projet ARCHIVES a aussi servi à établir un réseau de longues séries dendrochronologiques dans le secteur boréal nordique du Québec. Au total, 2565 troncs subfossiles ont été récupérés dans six lacs à l'amont du Complexe hydroélectrique La Grande, entre les latitudes 53,8°N et 54,6°N et les longitudes 70,2°W et 72,5°W. L'interdatation des échantillons sur l'échelle calendaire a permis de produire six chronologies locales, une pour chaque lac, couvrant aux moins 1238 années et com-

posées d'un nombre de troncs subfossiles variant entre 105 et 622. Ce réseau de longues dendro-séries a permis d'effectuer la première reconstitution dendro-climatique des températures du dernier millénaire dans l'Est de l'Amérique du Nord. Les températures reconstituées reproduisent assez bien l'augmentation observée des températures moyennes de juillet-août au cours du dernier siècle. Cependant, elles montrent aussi que les dernières décennies n'ont pas été les plus chaudes du dernier millénaire. Des températures plus chaudes ont été observées durant les XI<sup>e</sup> et XII<sup>e</sup> siècles pendant l'Optimum Climatique Médiéval (OCM). Une transition vers des températures plus froides a ensuite marqué le début du Petit Age Glaciaire (PAG) vers l'an 1250. Les températures estivales sont par la suite restées basses et ont été marquées par des épisodes froids de quelques dizaines d'années. Dans l'ensemble, nos données montrent une concordance frappante entre les dates des éruptions volcaniques les plus fortes des derniers siècles et les réductions de croissance dans les séries dendrochronologiques. Ces constats ont été appuyés par des analyses statistiques permettant de détecter des ruptures dans les séries temporelles.

### Première série dendroisotopique millénaire

C'est dans le projet ARCHIVES qu'ont été produites les premières séries dendroisotopiques couvrant l'ensemble du dernier millénaire dans le nord-est canadien. L'utilisation combinée d'arbres vivants et de plusieurs générations d'arbres subfossiles pour construire des séries isotopiques continues et cohérentes comportait de nombreux défis méthodologiques. On a d'abord vérifié l'intégrité des signaux isotopiques au sein des tiges subfossiles montrant différents degrés d'altération puis adapté une méthode de sous-échantillonnage des cernes permettant d'obtenir une résolution temporelle maximale et de produire une reconstitution climatique représentative pour le site

d'étude. Sur la base des relations statistiques entre les valeurs isotopiques et les données climatiques il a été établi que la série  $\delta^{18}\text{O}$  offre le meilleur potentiel pour reconstituer les températures maximales estivales du dernier millénaire. La reconstitution basée sur les dendroisotopes montre que les températures ont chuté de  $0,6^\circ\text{C}$  sur l'ensemble du millénaire et que celles de la période médiévale (1000-1250 AD) étaient similaires à celles observées sur les trois dernières décennies (1970-2000) bien que l'augmentation des températures depuis 1970 ( $+0,8^\circ\text{C}$  / décennie) soit parmi les plus importantes du dernier millénaire.

### Séquences sédimentaires varvées en appui aux reconstitutions dendrochronologiques

Le projet ARCHIVES a aussi considéré la reconstitution des écoulements à partir du signal sédimentaire (apports sédimentaires annuels dans quelques lacs constituant des varves) et de la comparer aux reconstructions dendrochronologiques. En chiffres, ce sont 51 lacs visités, 70 carottes pour 55 mètres de sédiments, 57 lames minces, 41 profils CT-Scan, 41 GEOTEK, 21 profils Itrax, 3 profils de datations  $^{137}\text{Cs}/^{210}\text{Pb}$  et 127 granulométries par analyse d'image. Au total, sur les 27 lacs retenus pour des sondages, 8 présentaient des laminations. On a d'abord montré que les conditions limnologiques et donc les conditions de préservation des troncs fossiles n'ont pas significativement changé au cours des deux derniers millénaires, ce qui confirme que les données paléo-climatiques extraites des troncs fossiles peuvent être utilisées. Par ailleurs, Grand Lake, un lac très profond ( $> 200\text{m}$ ) du Labrador, a livré des sédiments varvés sur plus de 220 ans. Les analyses physiques, chimiques, et granulométriques ont permis d'établir un lien avec les données instrumentales de la rivière Naskaupi, et plus particulièrement avec les pointes de débit du principal affluent.

### Des séries reconstituées versus simulées

La comparaison des séries simulées par les modèles climatiques et de celles reconstituées par la dendrochronologie a été réalisée dans une optique de co-validation des reconstitutions et des simulations des modèles climatiques. Les résultats montrent que les reconstitutions et les simulations réalisées sur le domaine « Québec » sont comparables et représentent bien les variations interannuelles et l'amplitude observées. En revanche, une simulation réalisée sur le domaine « Amérique du Nord » sous-estime de façon quasi-systématique les apports en eau, notamment les années de forte hydraulité. Par ailleurs, en étendant la comparaison sur la période 1850 à 2000, il n'était pas possible d'avoir des séries de modèle régional simulées sur une si longue période. L'analyse a donc porté sur la comparaison des distributions simulées et observées. Des 22 simulations disponibles (une simulation par modèle différent), 10 ne considèrent que le forçage anthropique (FA, augmentation des gaz à effet de serre et variations de la concentration des aérosols) et 12 intègrent à la fois le forçage anthropique et les forçages naturels (FAN, solaire et volcanique). Les résultats montrent que les distributions des simulations FA affichent à la fois une plus grande variabilité et une valeur moyenne plus élevée que les simulations FAN et les apports reconstitués. Les simulations FAN et les reconstitutions sont en revanche comparables.

### Détection des changements de régime

Le problème de changements de régime dans les séries hydro-météorologiques a suscité beaucoup de questionnements à Hydro-Québec ces dernières années. Les débits et les précipitations annuels de certains bassins versants québécois présentent en alternance des séquences d'années humides et d'années sèches. Pour situer ces ruptures observées dans un contexte temporel plus large, l'un des objectifs du projet ARCHIVES a été d'étudier les

changements de « régimes » historiques présents dans les séries chronologiques issues de la dendrochronologie. Pour ce faire, nous nous appuyons sur des modèles bayésiens de type mélanges de lois de probabilité, auxquels nous avons ajouté une dépendance temporelle afin de tenir compte de la persistance inter-annuelle. Cette approche a été appliquée à diverses séries temporelles produites dans le projet ARCHIVES (reconstitutions climatiques, signaux communs extraits des largeurs de cernes, reconstitutions hydrologiques, etc.). Ces applications nous ont permis d'identifier des changements de régimes qui sont cohérents spatialement, ainsi que des ruptures qui correspondent à des événements particuliers survenus historiquement, notamment des changements brusques à la baisse du niveau des températures estivales qui coïncident avec de fortes éruptions volcaniques.

### ARCHIVES aura constitué un premier réseau dendrochronologique boréal dans l'Est canadien

ARCHIVES aura construit le premier réseau de séries dendrochronologiques permettant de reconstituer les hydro-climats des deux derniers siècles (voire des deux derniers millénaires pour le complexe LaGrande) dans le nord-est de l'Amérique du Nord. Le projet a permis de préciser les régimes climatiques des derniers siècles et du dernier millénaire (réchauffement récent, Petit Âge Glaciaire, Optimum climatique médiéval), d'évaluer l'importance relative des principaux forçages externes du climat (orbital, solaire, volcanique, anthropique) et d'évaluer l'ampleur du réchauffement récent par rapport à la variabilité naturelle du dernier millénaire. Ces travaux sont déjà en voie d'être intégrés aux prochaines reconstitutions hémisphériques des températures (Pages 2k), pour lesquelles ils contribueront à corriger la faible représentation du nord-est de l'Amérique du Nord dans les synthèses du GIEC en paléoclimatologie. ARCHIVES

a ouvert la porte à de nouvelles études sur l'hydraulicité au cours du dernier millénaire dans le Nord du Québec, ce qui est d'un grand intérêt pour le partenaire industriel de ce projet. En effet, Hydro-Québec se préoccupe des potentielles sécheresses de longue durée qui pourraient avoir un impact sur la sécurité de l'approvisionnement en électricité en contexte de changements climatiques. Les travaux menés par cette équipe ont contribué à jeter un nouvel éclairage sur la variabilité multi-décennale des apports en eau principalement dans le secteur La Grande. Ils ont focalisé sur l'événement hydrologique le plus important -la crue printanière- dans le contexte de l'exploitation intensive d'un parc de centrales hydro-électriques. La crue printanière est le principal événement permettant le remplissage des réservoirs hydro-électriques et une bonne connaissance de la variabilité temporelle des approvisionnements printaniers en eau est fondamentale pour une planification optimale de la production hydro-électrique. ARCHIVES aura réalisé le maillage des approches méthodologiques entre les modélisateurs chargés de projeter la connaissance dans le futur et d'anticiper les régimes à venir dans un contexte de changement climatique et les paléo-environnementalistes chargés de reconstituer le passé. Dans les deux cas, la juste quantification des incertitudes est rendue difficile par une couverture peu dense et courte des observations servant à calibrer les reconstitutions et à paramétrer les modèles. ARCHIVES aura marqué un pas important dans le couplage des approches.

### Perspectives

En gardant comme objectif de reculer plus loin dans le temps pour mieux comprendre le fonctionnement des écosystèmes nordiques, le projet ARCHIVES a mis au jour les premières chronologies millénaires hautement répliquées. Le projet PERSISTANCE qui a pris la relève d'ARCHIVES a multi-

plié ces chronologies millénaires dans l'espace, en développant de nouvelles dendroséries, notamment dans la région de Manic-5 et Grand Lake pour les séquences sédimentaires. La suite logique est maintenant de s'attaquer à l'Ère Commune dans son ensemble. En effet, les plus récentes publications sur le sujet montrent que le premier millénaire 1-1000 CE présente de nombreuses analogies avec la période actuelle, au moins en ce qui a trait aux températures estivales. Ainsi, il pourrait être intéressant de préciser comment fonctionnait l'hydroclimat dans une période aussi chaude que l'actuelle (et que celle à venir?). Cela serait notamment utile pour mieux anticiper les conséquences du changement climatique sur les géo-écosystèmes nordiques. On a accordé beaucoup d'importance à la variabilité climatique elle-même dans les projets ARCHIVES-PERSISTANCE, mais il reste également à comprendre tout l'impact qu'ont pu avoir ces fluctuations (continues et abruptes, ex. éruptions volcaniques) à long terme sur les systèmes périglaciaires, le pergélisol, les changements dans la structure et la composition des forêts, la dynamique des lacs et des cours d'eau, etc.; autant de systèmes sensibles aux paramètres hydro-climatiques reconstitués à partir des proxies dendrochronologiques et sédimentaires.

Accroître la résolution des indicateurs est aussi un enjeu important dans les recherches futures. Le Diable est dans les détails, dit-on, et alors que la dendrochronologie s'intéresse aux variations dites climatiques, les arbres eux, réagissent d'abord à l'échelle météorologique / journalière. En fait, ce continuum temporel météo-climat demeure sous-exploité en dendrochronologie. Par exemple, alors qu'on s'affaire à reconstituer les variations à long terme dans les réserves en eau annuelles, sur de grands territoires comme la péninsule Québec-Labrador, certains aspects sont encore mal maîtrisés, par exemple lorsqu'il s'agit de prévoir l'effet à court terme des

sécheresses sur la croissance d'un peuplement forestier, voire d'un individu de cette région. L'impact net qu'aura une sécheresse sera susceptible de varier selon tant de facteurs : disponibilité des ressources en eau précédentes, disponibilités des réserves mobilisables sous forme de carbohydrates, saturation de l'appareil photosynthétique, etc. Or, une meilleure connaissance (monitorage) de la réponse « instantanée » des arbres à l'échelle journalière ou saisonnière serait bénéfique non seulement pour prévoir l'effet de la variabilité météo sur les paramètres de la croissance, mais également pour raffiner (et s'approcher des échelles météo) nos reconstitutions. Donc remonter plus loin dans le temps, certes, mais aussi à une plus haute résolution temporelle.

ARCHIVES aura lancé une première exploration de la réponse de l'épinette noire au climat au moyen de modèles. Modéliser sa réponse de manière déterministe nous amène tout naturellement à l'idée d'intégrer cette connaissance de manière transparente à l'intérieur de modèles écophysologiques tels que MAIDENiso ou autres. Les travaux publiés montrent que les relations cernes-climat sont hautement non linéaires et non stationnaires. Or, les modèles écophysologiques permettent justement d'aborder la réponse de manière formelle et dynamique, à partir d'un ensemble de règles et d'équations déterministes. Ces modèles sont très puissants, mais encore mal adaptés à la forêt boréale canadienne. Leur utilisation en mode direct (« forward ») et inverse demeure marginale / expérimentale, et ils n'ont pas encore été validés à grande échelle. Les travaux menés récemment portent précisément sur cet aspect, et un des espoirs que nous avons est de mettre en valeur le réseau ARCHIVES-PERSISTANCE pour contraindre ces modèles et augmenter notre capacité de prédiction à toutes les échelles de temps, de l'échelle journalière à l'échelle millénaire. Nous visons à contraindre les modèles climatiques sur le dernier millénaire avec les séries dendro.

Ces modèles écophysologiques représentent le chaînon manquant entre les modèles climatiques et les indicateurs dendro. En effet, la chaîne mécaniste liant le climat et les cernes est pratiquement complète. Les modèles existants (PMIP ou CMIP) simulent un climat que les modèles écophysologiques peuvent utiliser directement, ce qui ouvre la porte à des comparaisons modèle-données entièrement dimensionnelles, sans mise à l'échelle, sans transformations statistiques *a posteriori*. Ces comparaisons modèles-données pourraient entre autres permettre, avec ou sans assimilation de données, de mieux comprendre les variations du climat à l'échelle des derniers millénaires, de préciser les mécanismes externes et internes impliqués dans ces fluctuations, et de diminuer l'écart qui persiste entre les modèles et les proxies en ce qui a trait à l'impact climatique des grandes éruptions volcaniques tropicales et extra-tropicales.

Il importe aussi de valoriser les chronologies produites à l'échelle nationale et internationale. Les séries séculaires et millénaires produites par le projet ARCHIVES (et PERSISTANCE) ont été développées dans un cadre précis, celui d'un partenariat entre le milieu académique et les producteurs hydro-électriques. Alors que les récentes études ont permis de gagner en connaissances sur l'évolution climatique, et dans une certaine mesure d'améliorer la prévision hydrologique à moyen terme sur le territoire en exploitation au Québec et au Manitoba, elles n'ont pas encore livré tous leurs secrets. En effet, quels sont les « drivers » de la variabilité hydrologique à long terme sur ce territoire ? Comment évoluent les extrêmes humides / secs ? Comment a évolué le risque de faible hydraulicité persistante au cours du dernier millénaire ? Quelle est la probabilité qu'une période de faible hydraulicité pluri-décennale survienne en climat actuel et en climat futur ? Le projet PERSISTANCE aura amené quelques réponses préliminaires à ces questions, essentiellement

sous forme de preuve de concept, mais le gros du travail reste devant, et il faudra alimenter ces analyses à partir de séries couvrant le dernier millénaire. Et la valeur de ces séries dépasse désormais leur utilité dans le contexte même de la production hydro-électrique. Les chronologies millénaires ainsi construites, parmi les mieux répliquées et les plus robustes au monde, offrent un véritable ancrage temporel à tout un lot de chercheurs intéressés par la dynamique des systèmes naturels au Québec-Labrador: écologie, sciences forestières, sciences du climat, géomorphologie, glaciologie, océanographie, anthropologie / archéologie. Il faudra saisir ces opportunités de collaboration dans le futur, tout en continuant de mettre à jour et d'actualiser notre savoir-faire.

De nouveaux projets se dessinent; des projets dérivés qui intéressent d'autres partenaires et collaborateurs que ceux initialement impliqués dans le projet ARCHIVES. Par exemple, l'un deux concerne la reconstitution des variations hydrologiques millénaires dans le Nord-Est de l'Amérique du Nord: une approche modèle. L'approche de modélisation sera appliquée à la plus longue dendrosérie sensible aux précipitations : la chronologie de cèdres blancs du lac Duparquet en Abitibi (1100-2014). Un autre de ces projets intitulés en anglais « *Forward and inverse modelling of Black spruce trees in Northeastern North America : applications in paleohydrology and paleoclimatology* » propose une amélioration conceptuelle et méthodologique de la technique de modélisation directe et inverse afin de l'adapter à la réalité du Nord québécois. Le projet « *Response of high-latitude white spruce forests to a warmer and CO<sub>2</sub>-enriched atmosphere: tree-ring records and process-based models* » vise à modéliser l'effet des changements climatiques et de l'augmentation de la concentration en CO<sub>2</sub> atmosphérique sur la croissance de l'épinette blanche, une espèce retrouvée à la limite des arbres, d'un océan à l'autre. Un autre projet intitulé « *Les lacs pro-*

*fonds de la Côte-Nord : des archives paléoenvironnementales à explorer* » a démarré à la fin de 2013 et a pour but de faire l'état des lieux des lacs profonds de la Côte Nord qui ont été découverts en marge d'ARCHIVES. L'étude des sédiments varvés de Grand Lake a permis d'établir un lien entre les débits moyens et l'épaisseur des varves, et les débits maximums et la granulométrie des varves. Dans le cadre du projet PERSISTENCE, les chercheurs sont sur le point d'établir une série millénaire à partir des sédiments de ce lac. À comparer avec les séquences d'arbres, on note une grande récurrence des événements extrêmes. Cette ouverture initiée par le projet ARCHIVES mènera l'équipe à réaliser une étude biogéochimique de cette séquence pour obtenir une reconstitution de la température de l'eau, du couvert de glace et de l'évolution de l'état trophique du lac. L'équipe explore aussi la possibilité de faire de la modélisation inversée qui consiste en la numérisation du dépôt des varves à partir d'un modèle hydrologique, forcé lui-même par un modèle climatique. Le résultat pourra être comparé avec les modèles issus d'arbres (modèles écophysologiques inversés). Enfin, un carottage profond de Grand Lake est envisagé pour obtenir 8000 ans d'histoire climatique : on vise ici la plus longue reconstruction du NAO de ce côté de l'Atlantique.

ARCHIVES aura été le fer de lance de plusieurs autres projets en raison de la richesse des idées mises de l'avant par son équipe pluridisciplinaire. La création de ce groupe de recherche a permis à ses participants de développer une expertise originale. Par exemple, à la Commission géologique du Canada, il a été possible de mettre de l'avant une expertise forte et unique en analyse dendroisotopique appliquée à l'étude des changements climatiques et d'inscrire un volet paléoclimatologie/paléohydrologie dans son programme sur

les changements climatiques. De nouveaux projets découlent de l'initiative ARCHIVES. Par exemple, le projet PERSISTENCE et la participation de chercheurs de la CGC dans le cadre de son programme de recherche sur les changements climatiques, appliquent maintenant l'approche paléo-hydroclimatique à d'autres bassins au Québec et au Labrador pour une meilleure compréhension de la variabilité spatio-temporelle de ces changements. L'approche dendroisotopique développée à la CGC dans le cadre d'ARCHIVES est maintenant appliquée dans le nord du Manitoba (en collaboration avec Manitoba Hydro) pour reconstituer les conditions hydrologiques de la région de Thompson. On étend aussi ces travaux (dendro et isotopes) à d'autres espèces boréales (mélèze laricin) pour évaluer leur potentiel et la complémentarité des signaux climatiques avec ceux de l'épinette. Dans la foulée d'ARCHIVES nous avons aussi mené des travaux de recherche afin de distinguer les effets climatiques des impacts anthropiques sur la stratégie foliaire (iWUE) de l'épinette noire et présenté une revue synthèse des causes et modes d'évitement des divergences isotopes-climat.

Enfin, les perspectives de recherche qu'ouvre une équipe multidisciplinaire sont infinies. La quarantaine de maîtres, docteurs et post-doctorants formés depuis l'initiative ARCHIVES représente une relève de grande expertise pour les partenaires d'origine du projet. En investissant le temps et les idées de leurs experts, leur capacité de développement et leurs données, les partenaires initiaux d'ARCHIVES que sont Hydro-Québec, Ouranos et la Commission géologique du Canada, ont lancé une nouvelle génération d'experts sur une voie originale et utile dont tous bénéficient aujourd'hui.

## Liste des auteurs

- Arseneault, Dominique** (Département de biologie, chimie et géographie, Université du Québec à Rimouski)
- Autin, Julia** (Département de biologie, chimie et géographie, Université du Québec à Rimouski)
- Bégin, Christian** (Commission géologique du Canada, Ressources naturelles Canada)
- Bégin, Yves** (Institut national de la recherche scientifique, Québec)
- Berninger, Frank** (Department of Forest Sciences, University of Helsinki, Finland)
- Boreux, Jean-Jacques** (Département des Sciences et Gestion de l'Environnement de l'université de Liège, site d'Arlon (ex-FUL), Belgique)
- Boucher, Étienne** (Département de géographie et GÉOTOP, Université du Québec à Montréal)
- Bouthillier, Yves** (Centre Eau Terre Environnement, Institut national de la recherche scientifique)
- Cournoyer, Luc** (Centre d'études nordiques, Université Laval, Québec)
- Erni, Sandy** (Centre Eau Terre Environnement, Institut national de la recherche scientifique et Université du Québec à Rimouski)
- Fortin, David** (Centre Eau Terre Environnement, Institut national de la recherche scientifique)
- Francus, Pierre** (Centre Eau Terre Environnement, Institut National de la Recherche Scientifique)
- Gennaretti, Fabio** (Université du Québec en Abitibi Témiscamingue, Institut de Recherche sur les Forêts)
- Gingras, Mathieu** (Centre Eau Terre Environnement, Institut national de la recherche scientifique)
- Grenier, Patrick** (Consortium OURANOS)
- Guay, Frédéric** (Institut de recherche d'Hydro-Québec)
- Guiot, Joël** (Aix Marseille Université, CNRS, IRD, INRA, Collège de France, CEREGE, Aix-en-Provence, France)
- Héon, Jessie** (Département de biologie, chimie et géographie, Université du Québec à Rimouski)
- Labarre, Thibault** (Centre d'études nordiques, Université Laval, Québec)
- Lemay, Mickaël** (Centre d'études nordiques, Université Laval, Québec)
- Marion, Joëlle** (Commission géologique du Canada, Ressources naturelles Canada)
- Naulier, Maud** (Centre Eau Terre Environnement, Institut national de la recherche scientifique)
- Nicault, Antoine** (Association pour l'Innovation et la Recherche au service du Climat, AIR Climat, Marseille, France)
- Paquin, Dominique** (Consortium OURANOS)
- Perreault, Luc** (Institut de recherche d'Hydro-Québec)
- Rodrigue, Gabriel** (Centre Eau Terre Environnement, Institut national de la recherche scientifique)
- Roy, René** (Institut de recherche d'Hydro-Québec et Consortium OURANOS)
- Savard, Martine M.** (Commission géologique du Canada, Ressources naturelles Canada)
- Tapsoba, Dominique** (Institut de recherche d'Hydro-Québec)