

**Analyse dendroclimatique de l'épinette noire  
dans l'aire de nidification d'oiseaux boréaux  
au Québec – Phase 2**

*Rapport de recherche No R-1249*

*2011*



Photo J.-L. DesGranges

# 2010

## Analyse dendroclimatique de l'épinette noire dans l'aire de nidification d'oiseaux boréaux au Québec Phase 2

**Rapport technique préparé pour le compte  
d'Environnement Canada,  
Division de la recherche faunique et paysagère**

**Stéphanie Wicha<sup>1</sup>, Antoine Nicault<sup>1</sup>, Jean-Luc  
DesGranges<sup>2</sup>, Thibault Labarre<sup>1</sup> et Yves Bégin<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> INRS - Centre Eau Terre Environnement, Québec, Canada

Auteur de correspondance : [yves.begin@ete.inrs.ca](mailto:yves.begin@ete.inrs.ca)

<sup>2</sup> Chercheur scientifique, Environnement Canada, Québec

[jean-luc.desgranges@ec.gc.ca](mailto:jean-luc.desgranges@ec.gc.ca)

## Table des matières

1. Introduction.....	4
2. Sites d'étude.....	6
3. Méthodes .....	12
3.1 Standardisation .....	12
3.2 Classification hiérarchique .....	14
3.3 Fonctions de réponse de l'arbre au climat.....	14
4. Résultats et discussion .....	16
4.1 Analyse hiérarchique : affinités régionales .....	16
4.2 Analyse des relations cernes/climat.....	19
4.2.1 Fonctions de réponse aux températures .....	22
4.2.2 Fonctions de réponse aux précipitations .....	24
4.2.3 Analyse en composantes principales des fonctions de réponse.....	25
5. Conclusion .....	26
6. Références.....	27

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Inventaires des peuplements d'épinette noire étudiés.

Tableau 2 : Caractéristiques environnementales des sites échantillonnés.

Tableau 3 : Caractéristiques géographiques et écologiques des *clusters*.

## Liste des figures

Figure 1 : Localisation des sites d'échantillonnage.

Figure 2 : Méthode de standardisation par LOESS.

Figure 3 : Dendrogramme issu de l'analyse hiérarchique réalisée sur les séries dendrochronologiques standardisées.

Figure 4 : Répartition spatiale des trois groupes définis par l'analyse hiérarchique.

Figure 5 : Fonctions de réponse de la croissance radiale des arbres aux températures.

Figure 6 : Fonctions de réponse de la croissance radiale des arbres aux précipitations.

Figure 7 : Variabilité spatiale de la réponse des épinettes aux variables de températures.

Figure 8 : Analyse en composantes principales sur les résultats des fonctions de réponses aux températures et aux précipitations.

## 1. Introduction

Dans le cadre d'un programme de recherche d'Environnement Canada sur l'estimation des effets que pourrait avoir le changement climatique sur l'aire occupée par les oiseaux nicheurs en zone boréale, des modèles prédictifs des liens climat – habitats – oiseaux doivent être développés afin de permettre leur couplage éventuel aux simulations climatiques régionales réalisées par Ouranos ([www.ouranos.ca](http://www.ouranos.ca)). Il s'agit d'identifier les espèces d'oiseaux nicheurs les plus sensibles aux extrêmes climatiques en forêt boréale, de façon à orienter les efforts futurs en matière de conservation de la biodiversité aviaire (futurs aires protégées et mesures de protection pour les espèces en péril). Comme les données climatiques servant à caractériser le climat (variabilité et tendance) sont plutôt éparses et fragmentaires, nous avons recours à la dendrochronologie comme méthode permettant de caractériser le climat dans les régions d'échantillonnage.

Cette étude est la deuxième phase d'un projet consacré à l'établissement d'un réseau dendrochronologique le long de deux transects suivant les grands axes routiers sud-nord et est-ouest dans le Haut-Boréal au Québec. La première phase (Wicha *et al.*, 2009) avait pour objectif de mettre en valeur un échantillonnage réalisé par l'équipe d'Environnement Canada (dirigée par Jean-Luc DesGranges) et qui portait sur des peuplements d'épinette noire le long de deux transects boréaux : un premier latitudinal allant de Baie-Comeau sur la Moyenne-Côte-Nord à Fermont (49°33' et 53°64' N) et un second longitudinal allant de Fermont (Québec) à Rigolet sur la côte du Labrador (entre 58°67' et 70°48' O). Cette première analyse a permis de déterminer le potentiel dendrochronologique en caractérisant l'affinité spatiale interpeuplements, puis en analysant le comportement de ces peuplements vis-à-vis du climat.

Cette deuxième phase a pour objectif de mieux connaître la variabilité écologique des peuplements d'épinette noire, dans une aire géographique plus grande. L'aire couverte va de la baie de James au Labrador, elle représente ainsi pratiquement l'ensemble du Haut-Boréal de la péninsule Québec-Labrador. Cette étude devrait trouver son aboutissement lors d'une troisième et dernière phase consacrée au couplage des modèles climat – habitats – oiseaux (DesGranges et LeBlanc, en préparation).

La présente étude s'appuie, en grande partie, sur les données du réseau dendrochronologique du projet ARCHIVES (<http://archives.ete.inrs.ca>), cofinancé par le consortium Ouranos sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques et le Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG), qui viennent compléter les données recueillies dans le cadre de la première phase. Les objectifs de ce travail sont d'étudier les affinités géographiques entre les peuplements d'épinette noire et d'analyser leur comportement vis-à-vis du climat, afin, dans un dernier temps, de déterminer si l'on peut définir différentes régions bioclimatiques à partir des résultats obtenus.

## 2. Sites d'étude

Les 25 populations d'épinette noire (*Picea mariana* Mill. BSP) échantillonnées lors de la première phase ont été complétées par 68 populations issues du projet ARCHIVES. Ces populations ont été échantillonnées principalement le long de la route de la baie de James, de la route de Chisasibi, de la Transtaïga et de la Trans-Labrador. L'échantillonnage de plusieurs de ces populations a nécessité l'utilisation d'un hélicoptère. Les 93 sites étudiés à la phase 2 couvrent un vaste territoire au sein de la péninsule Québec-Labrador, ils se répartissent d'ouest en est de la longitude 58° 5' O à 79° 1' O, et du sud au nord de la latitude 49° 3' N à 54° 7' N. Le gradient latitudinal part de l'embouchure de la rivière Godbout pour arriver au nord du réservoir Caniapiscou (Figure 1; Tableau 1).

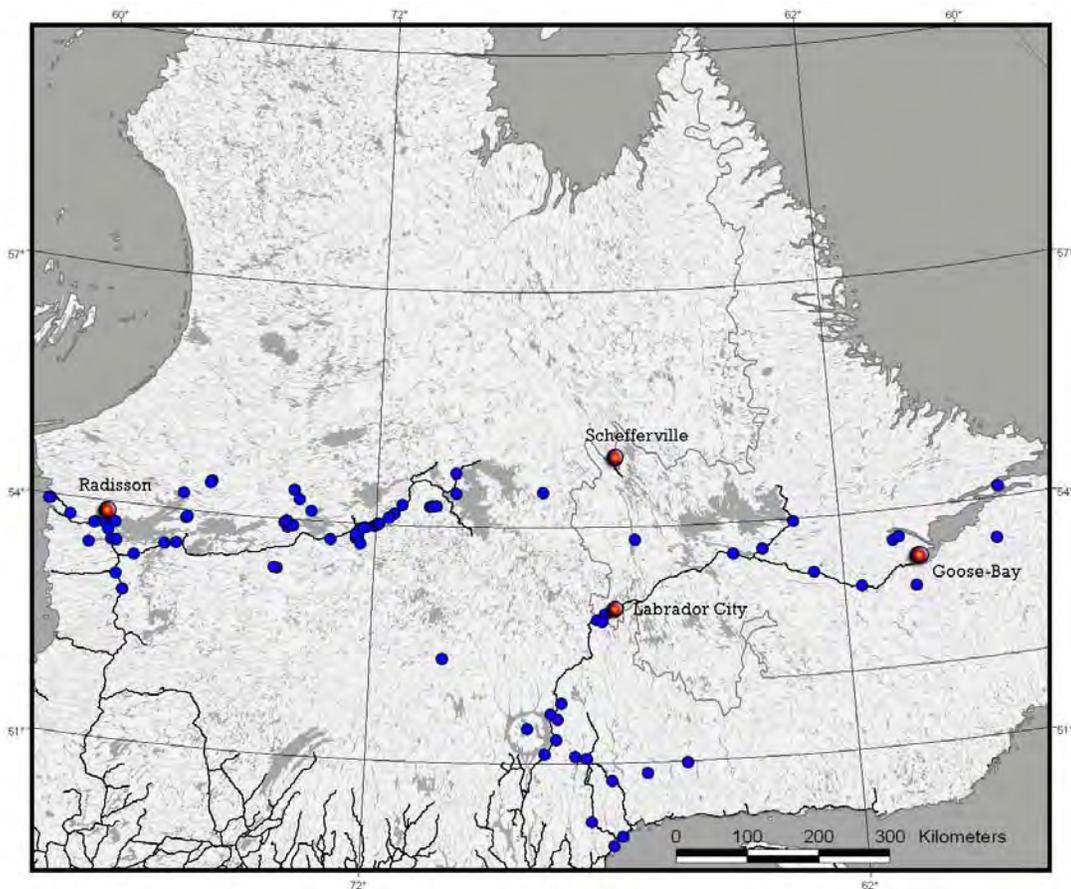


Figure 1 : Localisation des sites d'échantillonnage.

Les sites sont répartis du niveau de la mer (baie de James ou mer du Labrador) à une altitude de plus de 900 mètres au centre du Québec dans les secteurs des monts Groulx et Ottish. Les sites les plus maritimes sont situés à quelques kilomètres de la mer tandis que les sites les plus continentaux sont au centre de la péninsule Québec-Labrador à environ 480 km de la mer.

Les caractéristiques écologiques des peuplements d'épinette noire échantillonnés révèlent une grande variabilité (Tableau 1). Tout d'abord, l'âge des arbres échantillonnés est étalé de 60 à 300 ans. Les peuplements équiens sont généralement les plus jeunes. Ils sont issus directement de feux et donc les individus sont issus de graines. Les peuplements plus vieux sont le plus souvent inéquiens, et dans ce cas, une grande majorité d'individus sont issus de multiplication végétative (marcottage). On peut discriminer d'une part des pessières noires dites à lichens qui sont des peuplements généralement bien drainés et ouverts avec une strate buissonnante relativement éparse, et d'autre part, des pessières à mousses qui sont des peuplements généralement moins bien drainés, fermés et comportant généralement une strate buissonnante plus abondante. Plusieurs des peuplements étudiés sont hétérogènes et se situent entre ces deux structures types.

La nature et la qualité des données environnementales, associées à cet ensemble de sites, recueillies lors des nombreuses campagnes d'échantillonnage sont très hétérogènes. En effet, il existe de grandes différences entre les rubriques ayant guidé la collecte des données environnementales par chacun des projets. Au sein même du projet ARCHIVES, la qualité et la nature des données environnementales disponibles varient de façon importante d'un site à l'autre. Certains sites proviennent de projets antérieurs. Ainsi, certains sites sont très pauvres en données environnementales, alors que les derniers sites échantillonnés, notamment dans le cadre du mémoire de maîtrise de Thibault Labarre, ont fait l'objet d'une analyse environnementale (sol et végétation) complète.

Il ne sera donc pas possible, dans le cadre de cette étude, d'analyser de façon complète et rigoureuse l'influence des facteurs environnementaux sur la variabilité du comportement des arbres vis-à-vis du climat. Cette analyse ne pourra être faite qu'après l'homogénéisation des données environnementales pour tous les sites.

ID_site	Site	Latitude	Longitude	Année d'échantillonnage	Nombre d'individus	Nombre d'années	Origine des données
ABR	Abrupt, Sec	53.802	-72.406	juil-05	12	133	ARCHIVES
CANE	Caniapiscou Est, Mésique	54.437	-68.374	juil-05	14	239	ARCHIVES
CORILE	Corvette île	53.367	-74.051	Anterieur	21	267	ARCHIVES
CORPL	Corvette Rpl	53.369	-74.118	Anterieur	29	244	ARCHIVES
DA1M	DA1 Mésique	53.858	-72.409	oct-2005	15	240	ARCHIVES
DA1R	DA1 Rivage	53.858	-72.409	2006	17	235	ARCHIVES
DA1X	DA1 Sec	53.858	-72.409	juil-05	15	263	ARCHIVES
DW	Lac Duncan W	53.459	-78.101	Anterieur	23	312	ARCHIVES
ESK	Esker, Mésique	53.835	-72.352	juil-05	10	128	ARCHIVES
GR1EB	Grande Rivière 1	53.933	-79.033	Anterieur	11	251	ARCHIVES
GR1EN	Grande Rivière 1	53.933	-79.067	Anterieur	20	191	ARCHIVES
GR2	Grande Rivière 2	53.767	-78.567	Anterieur	20	124	ARCHIVES
GR3	Grande Rivière 3	53.717	-78.017	Anterieur	16	218	ARCHIVES
HER	Lac Hervey	54.417	-70.267	Anterieur	17	251	ARCHIVES
HH1	Lac Hurault Humide	54.242	-70.821	juin-04	30	257	ARCHIVES
HM1	Lac Hurault Mésique 1	54.251	-70.784	juin-04	25	271	ARCHIVES
HM2	Lac Hurault Mésique 2	54.243	-70.785	juin-04	25	245	ARCHIVES
HS1	Lac Hurault Sec	54.253	-70.688	juin-04	28	140	ARCHIVES
KANA	Rivière Kanaapscow A	54.400	-75.588	Anterieur	18	272	ARCHIVES
KANB	Rivière Kanaapscow B	54.375	-75.619	Anterieur	8	244	ARCHIVES
KAND	Rivière Kanapscow D	54.208	-76.186	juil-04	10	191	ARCHIVES
LJ1	Lac Jourdin1	54.372	-73.790	juin-06	14	164	ARCHIVES
LJ2	Lac Jourdin2	54.373	-73.790	juin-07	13	237	ARCHIVES
MEL	Mélanie	53.802	-72.386	oct-05	16	127	ARCHIVES
MU	Lac Muriel	54.253	-73.669	juin-06	12	99	ARCHIVES
NFL1V	NFLSec (Vieux)	53.519	-77.631	juil-06	23	276	ARCHIVES
NFL485	NFL485	52.902	-77.263	juil-06	10	101	ARCHIVES
NFL510	NFL510	53.098	-77.442	juil-06	5	122	ARCHIVES
NFL610	NFL610	53.750	-77.583	juil-06	10	244	ARCHIVES
NFLC20	NFLC20	53.706	-78.022	juil-06	4	125	ARCHIVES
NFLR1	NFLSec_rep1	53.633	-77.704	juil-06	22	250	ARCHIVES
NFLR2	NFLSec_rep2	53.572	-76.245	juil-06	30	197	ARCHIVES
NFLT25	NFLT25	53.360	-77.097	juil-06	10	175	ARCHIVES
NFM1	NFMHum	53.521	-77.631	juil-06	25	284	ARCHIVES
NFMT75	NFMT75	53.541	-76.482	juil-06	10	210	ARCHIVES
NLG4	Réservoir LG-4 nord	54.118	-73.390	juil-06	10	174	ARCHIVES
RH	Lac Roundeyed Humide	53.407	-70.873	juil-05	10	173	ARCHIVES
RM	Lac Roundeyed Mésique	53.407	-70.873	juil-05	10	146	ARCHIVES
RT426	Route Trans taïga Km 426	53.974	-72.025	juil-05	10	242	ARCHIVES
RT485	Route Trans taïga Km 485	54.259	-71.423	juil-05	15	248	ARCHIVES
RT630	Route 630, Mésique	54.672	-70.273	juil-05	13	216	ARCHIVES

Tableau 1a : Inventaires des peuplements d'épinette noire étudiés.

ID_site	Site	Latitude	Longitude	Année d'échantillonnage	Nombre d'individus	Nombre d'années	Origine des données
RX	Lac Roundeyed	53.407	-70.873	juil-05	10	146	ARCHIVES
T1	Lac Tilly1, Mésic	53.891	-73.888	juil-05	22	249	ARCHIVES
T4S	Lac Tilly 4, Sec	53.919	-73.770	juil-05	8	207	ARCHIVES
THH	Lac Thiers, Hum	53.737	-72.304	juil-05	23	226	ARCHIVES
TS	Lac Tilly 3, Sec	53.975	-73.907	juil-05	22	188	ARCHIVES
UKEN	Lac UKAW	53.900	-76.083	Anterieur	11	126	ARCHIVES
LAB17	Churchill_nord	53.966	-62.981	sept-09	14	316	ARCHIVES
LAB19	Trans_Lab	53.294	-62.619	sept-09	16	279	ARCHIVES
LAB32	Goose-bay	53.610	-60.886	sept-09	18	292	ARCHIVES
LAB35	Trans_Lab	53.065	-61.632	sept-09	14	244	ARCHIVES
LAB42	Esker_road	53.828	-66.396	sept-09	16	285	ARCHIVES
LAB50	Fermont	52.885	-67.072	sept-09	16	187	ARCHIVES
LAB56	Manic5	51.292	-68.119	sept-09	13	251	ARCHIVES
P22	Thibault22 (Lafo	54.140	-71.597	juil-09	15	73	ARCHIVES
P26	Thibault26 (Lafo	54.000	-71.921	juil-09	30	134	ARCHIVES
P263	Thibault263 (Laf	53.999	-71.951	juil-09	15	103	ARCHIVES
P28	Thibault 28 (Lg4	53.945	-72.216	juil-09	16	102	ARCHIVES
P33	Thibault 33 (Lg4	53.777	-72.953	juil-09	21	63	ARCHIVES
P38	Thibault 38 (Lg4	53.933	-72.276	juil-09	16	89	ARCHIVES
P39	Thibault 39 (Lg4	53.943	-72.222	juil-09	15	103	ARCHIVES
P41	Thibault 41 (Lg4	53.924	-72.319	juil-09	30	243	ARCHIVES
P49	Thibault 49 (Laf	54.089	-71.707	juil-09	30	173	ARCHIVES
P50	Thibault 50 (Laf	54.082	-71.722	juil-09	31	138	ARCHIVES
Pda1	Thibault Lac DA	53.862	-72.412	juil-09	15	270	ARCHIVES
7-43J2	montagne nord	50.860	-66.280	juil-07	5	72	ENV-CANA
7-33V1	Mont Babel	50.980	-65.460	juil-07	4	114	ENV-CANA
7-33V2	Mont Babel	51.430	-68.700	juil-07	4	165	ENV-CANA
7-33D1	Monts Groulx	51.550	-68.090	juil-07	3	114	ENV-CANA
7-33V3	Mont Babel	50.860	-68.700	juil-07	3	162	ENV-CANA
7-25V2	Camp forestier /	51.050	-67.500	sept-08	10	235	ENV-CANA
7-31V2	Rivière Hart-jaur	51.760	-68.010	sept-08	10	102	ENV-CANA
7-30D2	Rivière Cassée	52.810	-67.250	sept-08	10	133	ENV-CANA
7-34JDV1	Monts Otish	52.310	-70.480	juil-07	10	99	ENV-CANA
7-30V2	Monts Severson	52.790	-67.140	sept-08	10	120	ENV-CANA
8-27M2	Chûte Churchill	53.600	-64.310	sept-08	10	163	ENV-CANA
8-26J1	Réservoir Small	53.640	-63.680	sept-08	11	181	ENV-CANA
8-36M1	Rigolet	54.130	-58.500	06-juil-06	10	117	ENV-CANA
8-38J1	Grand Lake	53.640	-60.750	08-juil-08	10	86	ENV-CANA
8-39J3	Monts Mealy	53.480	-58.670	09-juil-08	10	118	ENV-CANA
8-33J1	Rivière Travers	53.000	-60.480	03-juil-08	10	206	ENV-CANA

Tableau 1b : Inventaires des peuplements d'épinette noire étudiés (suite).

ID_site	Altitude (m)	Exposition	Pente générale	Distance à la mer	Drainage	Description_site
ABR	406	nord	25°	371	2	peissière à lichens
CANE	688	ouest	nulle	450	3	peissière à lichens
CORILE	324	est	nulle	323	3	peissière à lichens
CORPL	324	est	nulle	328	4	peissière à mousses
DA1M	525	Nord	20°	367	3	peissière à lichens et à mousses
DA1R	523	Nord	5°	367	3	peissière à lichens et à mousses
DA1X	523	Nord	20°	367	2	peissière à lichens
DW	132	est	nulle	60	3	peissière à mousses
ESK	448	est	nulle	370	2	peissière à lichens
GR1EB	10	ouest	nulle	92	2	peissière à épinette blanche et lichens
GR1EN	10	ouest	nulle	5	2	peissière noire à lichens
GR2	44	ouest	nulle	34	3	peissière lichens, mousses et mélèzes
GR3	45	ouest	nulle	70	3	peissière noire mousses et lichens
HER	530	ouest	nulle	450	5	peissière à lichens en position riveraine
HH1	541	est	nulle	432	5	peissière à lichens inondée
HM1	551	ouest	15°	434	2	peissière à lichens
HM2	518	sud	5°	434	3	peissière à lichens et à mousses
HS1	681	nord	5°	437	1	arbres isolés sur croupes rocheuses
KANA	177	ouest	nulle	170	3	peissière à mousses et à lichens
KANB	177	ouest	nulle	170	3	peissière à mousses et à lichens
KAND	279	sud	nulle	158	3	peissière à lichens
LJ1	438	sud-sud-est	11°	261	3	peissière à lichens
LJ2	445	nord	6°	261	3	peissière à mousses et lichens
MEL	576	est	10°	371	2	peissière à lichens
MU	-	-	-	276	2	jeune peissière à lichens
NFL1V	218	-	moins de 5°	94	3	peissière à lichens
NFL485	218	-	nulle	102	-	peissière à lichens
NFL510	196	-	nulle	98	-	Jeune peissière à lichens
NFL610	170	-	Pente	94	-	peissière à lichens
NFLC20	142	-	Nulle	70	-	peissière à lichens
NFLR1	201	aucune	Varie de 5° à 10°	87	2	peissière à lichens
NFLR2	227	aucune	moins de 5°	94	2	peissière à lichens
NFLT25	230	-	Nulle	123	-	peissière à lichens
NFM1	148	aucune	moins de 5°		5	peissière à mousses
NFMT75	210	-	Nulle	173	-	peissière à mousses
NLG4	494	sud	15°	298	3	Peissières à mousses et Lichens
RH	528	ouest	nulle	480	5	peissière à lichens
RM	528	ouest	nulle	480	3	peissière à lichens
RT426	-	aucune	nulle	373	3	Péssière à lichens
RT485	447	aucune	3°	393	3	peissière à lichens
RT630	559	sud	nulle	448	2	peissière à lichens

Tableau 2a : Caractéristiques environnementales des sites échantillonnés.

ID_site	Altitude (m)	Exposition	Pente générale	Distance à la mer	Drainage	Description_site
RX	528	ouest	nulle	480	3	peSSIÈRE à lichens
T1	432	sud	nulle	294	2	peSSIÈRE à lichens
T4S	464	sud	nulle	296	4	peSSIÈRE à mousses
THH	556	Nord	20°	380	2	peSSIÈRE à lichens
TS	420	sud	nulle	284	2	peSSIÈRE à lichens
UKEN	203	ouest	nulle	190	2	PessiÈRE à lichen
LAB17	-	Nord	8	263	2	peSSIÈRE à lichens et mousses
LAB19	-	-	-	300	3	PéSSIÈRE à mousses, lichens
LAB32	-	SSW	6	200	2	peSSIÈRE à Mousse, lichen, vaccinium, Ledum,
LAB35	-	-	-	273	3	PessiÈRE à Lichens, mousses, sapins et mélèzes
LAB42	-	-	-	400	4	PessiÈRE à Mousses, Lichens(peu) et mélèzes
LAB50	-	-	-	294	3	PessiÈRE à Lichens et mousses
LAB56	-	Ouest	3	168	5	PessiÈRE noire à mousse et sapin
P22	455	2	16	490	1	PéSSIÈRE à lichen
P26	500	2	8	470	3	peSSIÈRE noire a mousse
P263	463	3	6	471	3	peSSIÈRE noire a mousse et lichens
P28	511	-	nulle	449	2	PéSSIÈRE à lichen
P33	406	2	21	400	2	PéSSIÈRE à lichen
P38	461	-	nulle	444	2	PéSSIÈRE à lichen
P39	510	1	8	448	6	peSSIÈRE noire a mousse
P41	485	-	nulle	442	3	peSSIÈRE noire a mousse
P49	458	2	10	487	3	peSSIÈRE noire a mousse et lichens
P50	469	2	18	486	2	peSSIÈRE noire a mousse et lichens
Pda1	529	1	29	380	4	peSSIÈRE noire a mousse
7-43J2	935	sommet	-	78	-	peSSIÈRE noire a mousse
7-33V1	924	-	-	182	-	peSSIÈRE noire et blanche
7-33V2	899	Est	-	184	-	peSSIÈRE noire a Sapin Baumier
7-33D1	905	-	-	168	-	peSSIÈRE noire a Sapin Baumier
7-33V3	805	-	-	-	-	peSSIÈRE noire a Sapin Baumier
7-25V2	488	-	-	115	-	peSSIÈRE noire a mousse
7-31V2	403	-	-	215	4	PessiÈRE noire à mousse et lichens
7-30D2	715	-	-	310	3	PessiÈRE mousses et lichens et meleze
7-34JDV1	923	-	-	365	-	peSSIÈRE noire a Sapin Baumier
7-30V2	635	-	-	300	3	PessiÈRE mousses et lichens et meleze
8-27M2	410	-	-	320	3	peSSIÈRE noire a mousse
8-26J1	513	-	-	290	4	peSSIÈRE noire a mousse
8-36M1	23.2	-	-	22	-	peSSIÈRE noire a Sapin Baumier
8-38J1	150	-	-	174	-	peSSIÈRE noire a lichen
8-39J3	571	-	-	90	-	peSSIÈRE noire a Sapin Baumier
8-33J1	301	-	-	200	-	peSSIÈRE noire a Sapin Baumier

Tableau 2b : Caractéristiques environnementales des sites échantillonnés (suite).

### 3. Méthodes

Afin d'atténuer l'effet d'hétérogénéité lié à un ensemble de données provenant de projets différents, la même méthode de standardisation a été appliquée à toutes les séries de données. Pour la même raison, le calcul des relations cernes-climat a été refait pour tous les sites sur une période temporelle similaire et avec un même jeu de données climatiques. L'ensemble des analyses a été réalisé sur la plateforme de calcul R-Project.

#### 3.1 Standardisation

L'étape de standardisation, qui est la transformation des épaisseurs de cernes brutes en indices, a deux objectifs principaux (Nicault *et al.*, 2010) :

- 1) Uniformiser les variations de croissance au cours du temps, indépendamment des différences d'âge et des différences de croissance inter-arbres.
- 2) Extraire des séries de largeurs de cernes, les composantes non stationnaires liées à l'âge, ou, inversement favoriser certains signaux dans les séries indicées, le climat par exemple.

Les valeurs d'indices sont obtenues par la division de la valeur mesurée ( $R_t$ ) par la valeur théorique de largeur du cerne correspondant ( $Y_t$ ).

$$I_t = \frac{R_t}{Y_t}$$

Les séries d'indices obtenues par division oscillent autour de la valeur de 1.

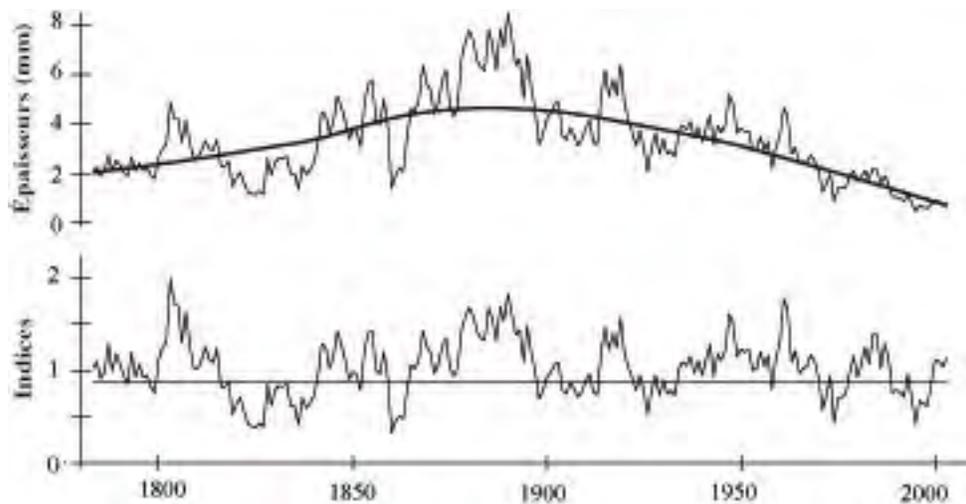


Figure 2 : Standardisation par LOESS avec un paramètre de lissage de 0,4 (40 % de la taille de la série dendrochronologique)

Dans le cadre de cette étude, nous avons calculé la courbe théorique de croissance par une méthode de lissage (*smoothing*), la LOESS (*local regression*) (Cleveland, 1979) (Cleveland & Delvin, 1988) (Figure 2). Alors qu'avec les fonctions splines on utilise une régression polynomiale de degré 3 dans une fenêtre prédéfinie, dans les modèles LOESS et LOWESS, on utilise une régression linéaire pondérée. LOESS est une régression linéaire locale qui utilise un modèle défini uniquement dans le voisinage du point  $x_t$  d'intérêt. En tout point  $x_t$ , on prend  $n$  voisins qui représentent un pourcentage de l'ensemble des points. Si le paramètre de lissage est trop faible, l'estimateur des paramètres manque de précision, car le voisinage est trop restreint. Si au contraire le voisinage couvre l'ensemble des observations (paramètre de lissage = 1), on obtient alors la droite d'ajustement linéaire (modèle de régression simple). L'importance de chacun des  $n$  voisins sera éventuellement pondérée en fonction de sa distance au point  $x_t$ . Enfin, on calcule la régression pondérée (polynomiale de faible degré, généralement 1 ou 2) pour chacun des points  $x_0$ . Le paramètre de lissage que nous avons utilisé est de 0,4. Il correspond à une fenêtre de 40 % du nombre d'années de la série dendrochronologique. Cette étape a été réalisée grâce à une fonction du Package Bioindic de la plateforme R. La standardisation a été réalisée pour chaque rayon. Ensuite, nous avons pu calculer la chronologie moyenne pour chaque site étudié.

### **3.2 Classification hiérarchique**

La classification hiérarchique est une représentation des affinités entre objets (ici les séries dendrochronologiques standardisées) par un dendrogramme (Everitt, 1974; Gordon, 1999). La mesure de ressemblance est calculée par une matrice de distances euclidiennes qui permet de comparer deux à deux les chronologies « maîtresses ». Ensuite, le groupement introduit des critères de décision qui permettent de déterminer si deux éléments sont suffisamment similaires pour être réunis dans une même unité (groupe). Le groupement (*clustering* en anglais) est une analyse multidimensionnelle qui vise à partitionner l'ensemble des objets. Celui-ci a été réalisé grâce à la méthode d'agglomération de Ward. Cette dernière minimise la variance à l'intérieur des groupes et tend à produire des dendrogrammes avec des groupes compacts de tailles égales. L'analyse a été réalisée sur la période commune à l'ensemble des chronologies moyennes (1920-1987) grâce à la plateforme de calcul R-project.

### **3.3 Fonctions de réponse de l'arbre au climat**

Le premier objectif d'une fonction de réponse en dendroclimatologie est d'estimer l'influence moyenne du climat sur la croissance annuelle des arbres. Et plus exactement de déterminer dans quelle mesure les paramètres climatiques peuvent influencer la croissance de l'arbre (Guiot et Nicault, 2010). Cependant, si la croissance des arbres est régie par un ensemble complexe de relations entre des facteurs climatiques et des processus physiologiques, seuls les facteurs climatiques les plus contraignants sont enregistrés de façon régulière dans les séries dendrochronologiques et seront révélés par les fonctions de réponse.

Le calcul de fonctions de réponse est utilisé ici dans l'optique de décrire les relations cernes-climat et non dans le but de produire une modélisation à vocation prédictive. L'objectif est donc de déterminer quels paramètres climatiques influencent la croissance, mais aussi quelles sont la nature et la force de la relation entre les variables climatiques mensuelles et la croissance. De façon générale, l'interprétation des relations cernes-climat doit reposer sur l'analyse de plusieurs sites, sur la cohérence régionale des résultats et sur la pertinence écophysologique des relations mises en évidence.

Dans les fonctions de réponse (régressions linéaires sur composantes principales), les données météorologiques sont les régresseurs ou variables indépendantes (températures, précipitations, etc.) et les données dendrochronologiques sont les variables dépendantes.

La reproduction des résultats est testée par la technique *bootstrap* (Efron, 1979; Till & Guiot, 1990). Les coefficients de la fonction de réponse et leurs intervalles de confiance sont donnés par la médiane sur ces itérations et par les 2,5<sup>e</sup> et 97,5<sup>e</sup> percentiles.

La fiabilité globale de la fonction de réponse est évaluée d'une part sur la base du coefficient moyen de corrélation des années de calibration (RMC) au carré qui exprime le pourcentage de variance expliquée par le modèle, et d'autre part par l'erreur standard (RMSE) qui exprime la robustesse du modèle. Le poids de chaque variable climatique dans la régression est évalué par le rapport entre chaque coefficient de régression partiel (associé à chaque variable climatique) et son écart-type (R/s). Le signe de ce coefficient de régression partielle précise également 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 à partir des données mensuelles des précipitations totales et des températures moyennes. Les données météorologiques sur grille (0,5° x 0,5°) ont été fournies par Dominique Tapsoba (Hydro-Québec). Les interpolations sur grille ont été réalisées grâce à la technique du krigeage avec dérive externe (Wackernagel, 1998; Tapsoba *et al.*, 2005) en se servant de la topographie comme dérive externe.

La formation du cerne étant finie à la fin d'août, les données mensuelles sont utilisées en années biologiques, c'est-à-dire d'octobre à septembre. Les douze mois de températures, et les douze mois de précipitation ont été utilisés successivement comme variables explicatives. Les calculs ont été réalisés à l'aide d'une fonction du module Bioindic dans R-project.

Les résultats (degré de signification des régresseurs) des fonctions de réponse ont ensuite été cartographiés et ont fait l'objet d'une analyse en composante principale dans le but de faciliter l'interprétation des résultats.

## 4. Résultats et discussion

### 4.1 Analyse hiérarchique : affinités régionales

L'analyse hiérarchique des séries standardisées de l'ensemble des sites étudiés a été réalisée sur la période commune de 1910 à 1990. Le dendrogramme obtenu montre que les populations d'épinette noire se répartissent en trois grands groupes : le groupe 1 qui regroupe 20 populations, le groupe 2 avec 38 populations, et enfin le groupe 3 avec 18 populations (Figure 3).

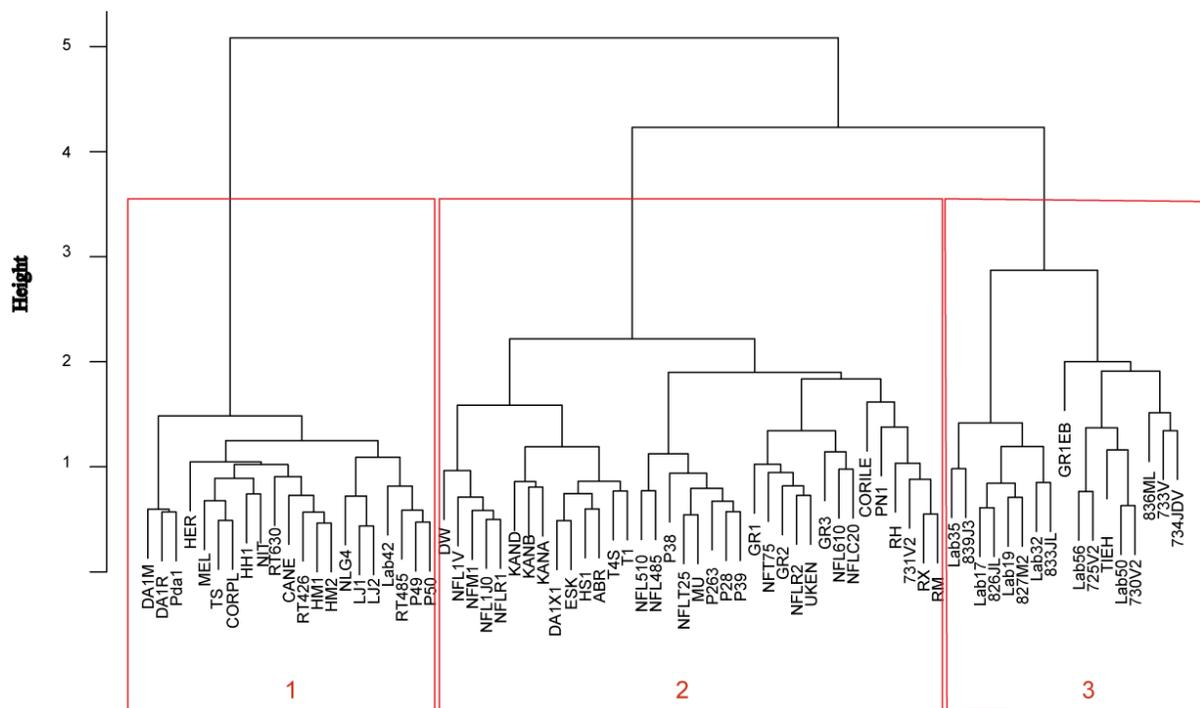


Figure 3 : Dendrogramme issu de l'analyse hiérarchique réalisée sur les séries dendrochronologiques standardisées.

Ces regroupements semblent montrer une certaine cohérence géographique. Afin de pouvoir interpréter en terme spatial les groupements observés, les populations appartenant aux différents groupes ont été placées sur une carte, avec pour chaque groupe un code de couleur différent (Package fields, R project) (Figure 4). La carte montre en effet une importante discrimination spatiale selon les trois groupes. Les populations du groupe 3 se retrouvent dans la partie est de l'aire d'étude principalement au Labrador et

au Québec dans la région de Manic 5 et Fermont. Ce groupe est bien individualisé dans l'espace et ne présente que très peu de recouvrement spatial avec les deux autres groupes.

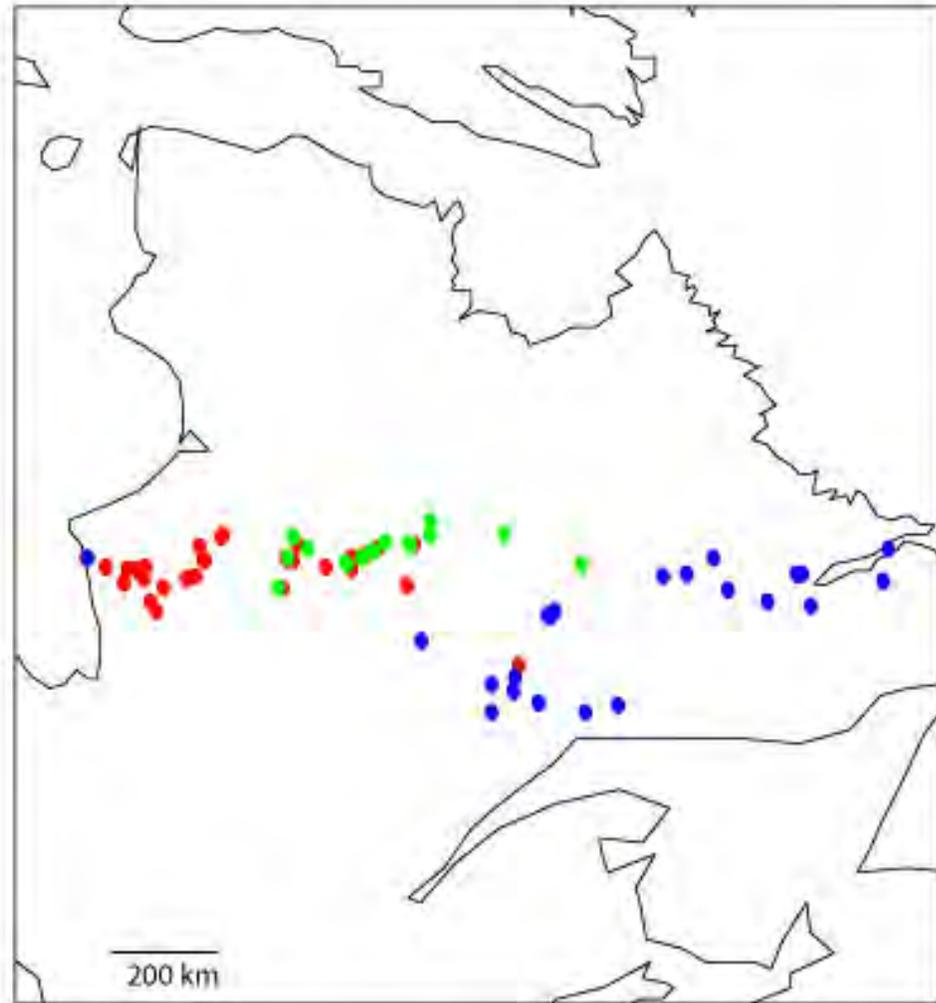


Figure 4 : Répartition spatiale des trois groupes définis par l'analyse hiérarchique (groupe 1 : vert; groupe 2 : rouge; groupe 3 : bleu).

Pour les deux autres groupes, la discrimination spatiale est plus complexe. On remarque, en effet, que les aires géographiques occupées par les deux groupes de populations se chevauchent. Les populations du groupe 2 occupent toutefois seules le secteur Baie de James-LG2 et les populations du groupe 1 occupent seules le secteur Centre-Nord du Québec au nord du réservoir Caniapiscau. L'aire de chevauchement s'étend de LG4 à Caniapiscau. Les contrastes climatiques et écologiques de cette zone, liés à un paysage

plus collinéen (les sommets de colline présentent un faciès subarctique), pourraient expliquer la répartition de populations voisines dans deux groupes différents.

En ce qui concerne l'altitude et la distance à la mer, les 3 groupes s'individualisent assez bien. Cependant, l'interprétation des *clusters* en terme d'altitude et de distance à la mer reste compliquée. En effet, ces caractéristiques sont attachées à des régions marquées ce qui nous empêche de discriminer l'influence d'un contraste climatique est/ouest d'une influence topographique ou continentale. En ce qui concerne le drainage des sites, le tableau montre qu'il n'influence pas ou peu les *clusters*. Quelque soit le groupe, on retrouve plus ou moins la même proportion de classe de drainage.

	groupe1	groupe2	groupe3
Nombre de sites	20	38	22
Distance à la mer moyenne	385	268	209
Altitude moyenne	502	333	575
Drainage1	0%	5%	0%
Drainage 2	35%	34%	14%
Drainage 3	50%	32%	27%
Drainage 4	15%	5%	5%
Drainage 5	10%	5%	5%
Drainage 6	0%	3%	0%
Drainage Inconnu	0%	16%	45%

Tableau 3 : Caractéristiques géographiques et écologiques des *clusters*.

Seule une étude écologique plus approfondie (en cours) permettra d'interpréter ces divisions en terme environnemental.

Ainsi, malgré le chevauchement des groupes 1 et 2, cette analyse suggère une forte cohérence géographique dans la répartition spatiale des populations appartenant à chacun des groupes définis par l'analyse hiérarchique. À partir de cette analyse, on peut donc définir trois grands ensembles bioclimatiques : un premier couvrant la zone Baie de James-LG2 et s'étendant de façon discontinue jusqu'à la région de Caniapiscau. Un deuxième couvrant la région Centre-Nord du Québec au nord du réservoir Caniapiscau, et enfin un troisième bien défini couvrant l'Est de la péninsule Québec-Labrador. L'analyse

des fonctions de réponse des arbres au climat va permettre d'évaluer si les variations du comportement des arbres vis-à-vis du climat suivent ces trois ensembles bioclimatiques.

#### **4.2 Analyse des relations cernes/climat**

Nous avons calculé les fonctions de réponse des largeurs de cernes moyennes dans chaque population aux variables climatiques mensuelles (températures et précipitations) de l'ensemble d'une année bioclimatique, soit d'octobre à septembre. Les fonctions de réponse seront principalement évaluées par le degré de signification de chacun des coefficients de régression qui informera sur l'influence respective de la température et des précipitations sur les variations interannuelles de la croissance (intensité et sens de la relation) et par le coefficient de détermination ( $r^2$ ) qui nous informe sur le pourcentage de variance de l'épaisseur des cernes expliquée par les températures et les précipitations (Figures 5 et 6).

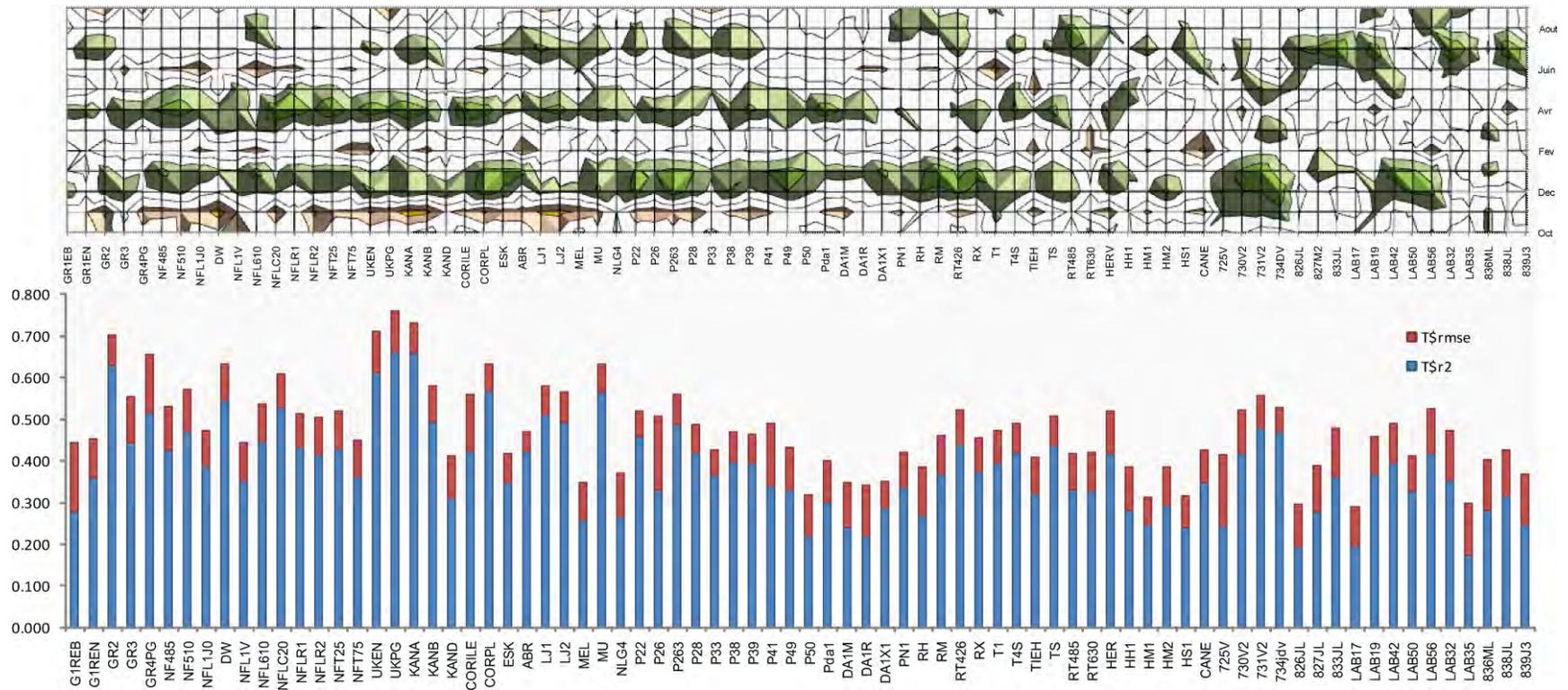


Figure 5 : Fonctions de réponse de la croissance radiale des arbres aux températures. Le graphique supérieur représente le degré de signification de l'influence des températures mensuelles sur la croissance et le sens de la relation (vert : influence directe, rouge influence inverse). Le graphique inférieur représente le  $r^2$  et l'erreur type (RMSE) associés à chaque modèle. Les populations indiquées en abscisse sont classées selon leur position en longitude, d'ouest en est.

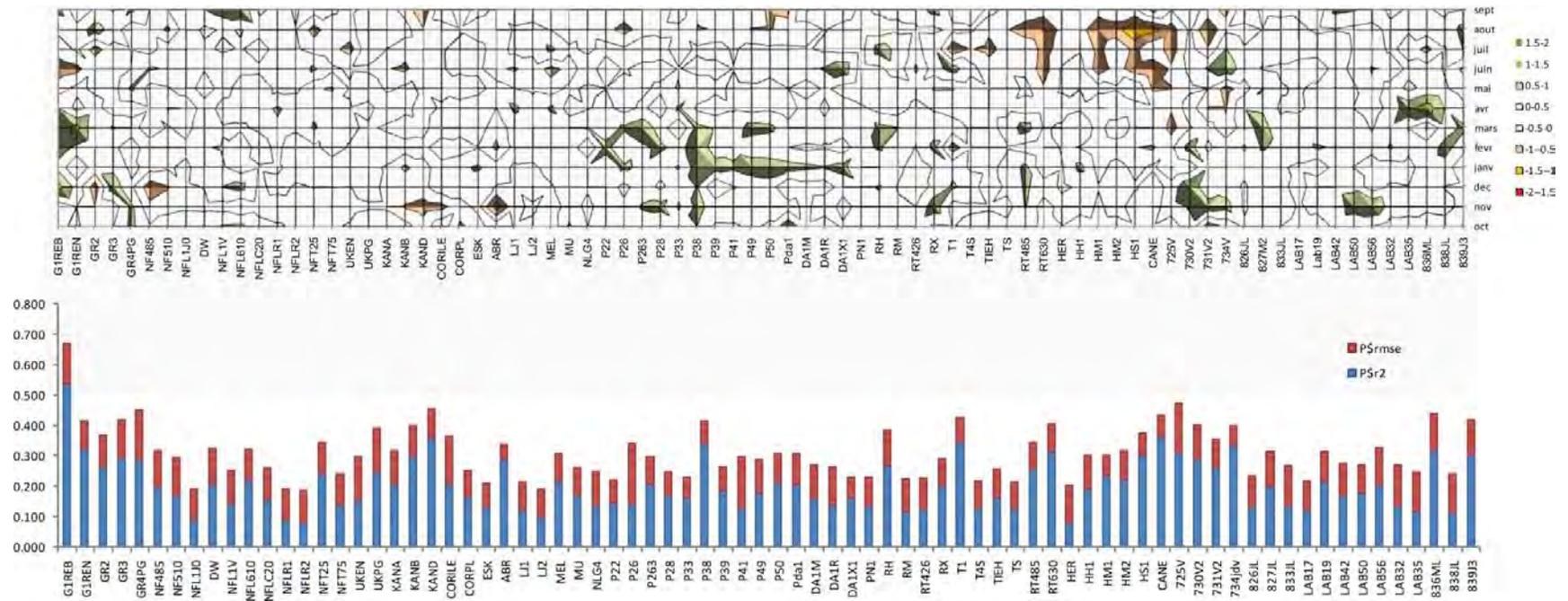


Figure 6 : Fonctions de réponse de la croissance radiale des arbres aux précipitations. Le graphique supérieur représente le degré de signification de l'influence des précipitations mensuelles sur la croissance et le sens de la relation (vert : influence directe, rouge influence inverse). Le graphique inférieur représente le  $r^2$  et l'erreur type (RMSE) associés à chaque modèle. Les populations indiquées en abscisse sont classées selon leur position en longitude, d'ouest en est.

### 4.2.1 Fonctions de réponse aux températures

La variance de la croissance radiale expliquée par les températures varie fortement selon les populations étudiées. Les valeurs du  $r^2$  varient de 0,2 à 0,6. D'une façon générale, les populations de l'Ouest de l'aire d'étude (Baie de James-LG2) semblent mieux répondre aux températures que les autres. L'étude des profils des fonctions de réponse montre que la réponse aux températures est complexe. En effet, durant plusieurs mois de l'année les températures semblent jouer un rôle dans les variations de croissance.

Les **températures du mois de novembre** influencent négativement la croissance des arbres (Figure 5). La figure 7 montre un fort contraste régional. Les populations le plus à l'ouest (des rives de la baie de James au réservoir LG4) répondent négativement aux températures de novembre tandis que les populations les plus à l'est sont insensibles ou bien réagissent plutôt positivement. L'interprétation de cette relation indirecte en termes d'écophysiologie est hasardeuse. Nous pouvons cependant émettre l'hypothèse suivante : les mois de novembre les plus froids permettront 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 janvier.

Les **températures des mois de décembre et janvier** influencent positivement la croissance des arbres. Si les températures des mois de décembre et janvier influencent la croissance des arbres sur tous les sites situés à l'ouest de l'aire d'étude de la baie de James, au secteur LG4 on retrouve ce type d'influence de façon sporadique sur l'ensemble de l'aire d'étude jusqu'au Labrador. L'interprétation de cette relation, très antérieure à la période de croissance, est également difficile. Nous pouvons penser que lorsque les mois de décembre et janvier sont très froids, d'une part le sol (s'il n'est pas suffisamment protégé par la neige) gèlera plus profondément et retardera au printemps le démarrage de la croissance, et d'autre part les froids intenses durant cette période pourront endommager les aiguilles et réduire le potentiel photosynthétique de l'arbre au cours de l'été suivant.

Les **températures du mois d'avril** influencent positivement la croissance des arbres. Comme pour les relations avec les températures du mois de novembre, on observe un fort gradient d'ouest en est. Les populations de l'Ouest du Québec sont positivement

influencées par les températures d'avril alors qu'aucune population du Centre et de l'Est du Québec ne semble être influencée significativement. On remarquera que pour les régions les plus à l'est l'influence des températures d'avril sur la croissance ont tendance à devenir négatives. Toujours difficile à interpréter, parce qu'indirect, le rôle des températures du mois d'avril pourrait être lié au développement des bourgeons foliaires favorisé par des températures élevées en avril ou inversement retardé par des températures froides, qui retarderait également le début de la période de végétation.

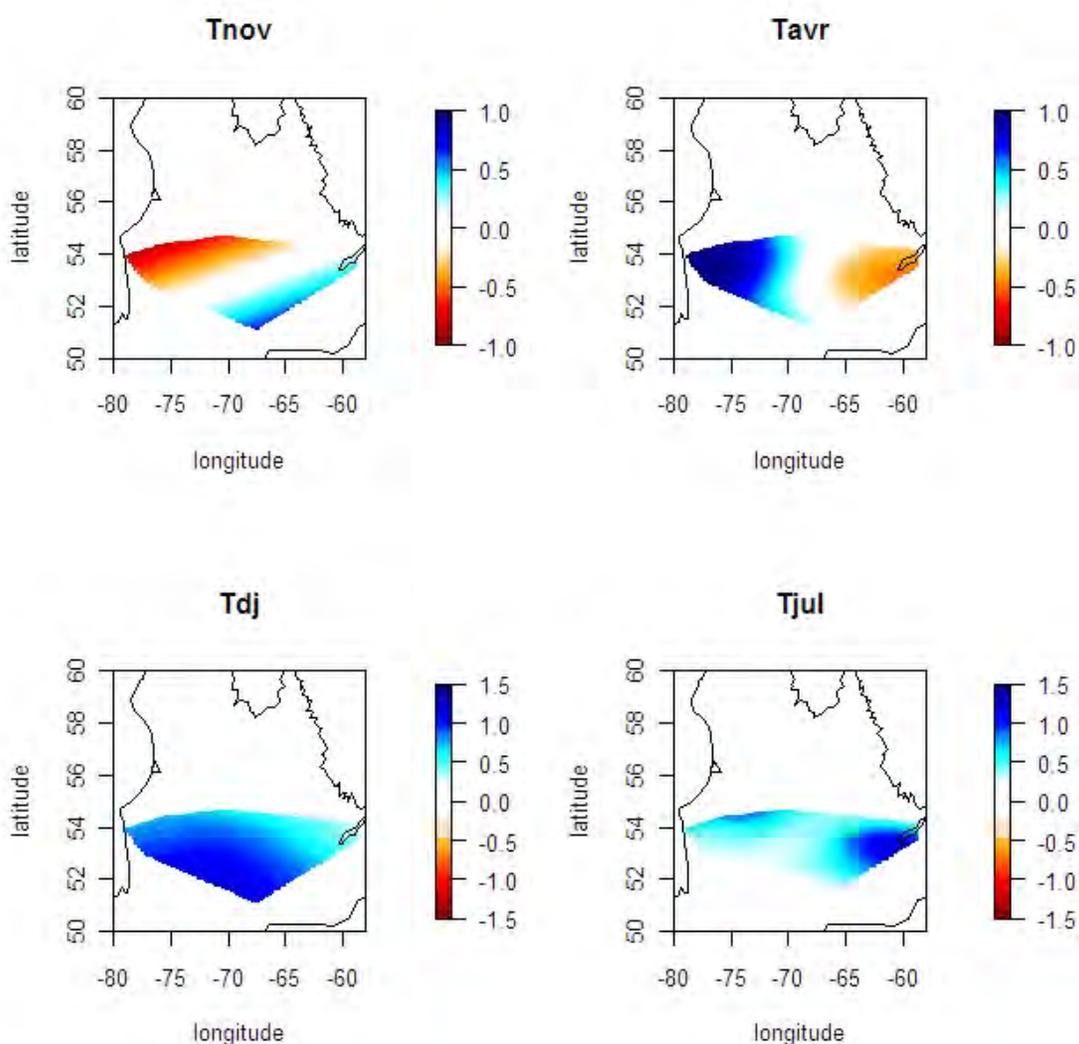


Figure 7 : Variabilité spatiale de la réponse des épinettes aux variables de températures.

L'influence des **températures de juillet** (et occasionnellement de juin ou août) sur la croissance ne semble pas être attribuable à une région ou une autre, même si elle semble plus marquée à l'est dans le secteur du Labrador (peut-être l'influence des courants froids de la mer du Labrador) et au nord vers les régions plus subarctiques. En résumé, on observe un gradient NNE-SSO qui s'apparente à celui observé pour l'influence des températures de décembre-janvier sur la croissance. L'interprétation de l'influence des températures est la plus simple et la plus directe en termes d'écophysiologie : plus les étés sont chauds, meilleure est l'efficacité de la photosynthèse et meilleure sera la croissance.

#### **4.2.2 Fonctions de réponse aux précipitations**

Les valeurs du coefficient de détermination associé aux fonctions de réponse des épaisseurs de cernes aux précipitations sont beaucoup plus faibles que pour les températures. Le coefficient varie entre des valeurs inférieures à 0,1 et 0,4, mais oscille généralement autour de 0,2. Les erreurs associées sont par ailleurs proportionnellement plus élevées.

Le profil des fonctions de réponse indique que les précipitations n'influencent que très faiblement les variations de croissance. Aucun patron régional ne peut être dégagé. Seules certaines populations proches de LG4 montrent une relation positive avec les précipitations de janvier. Ces relations pourraient être expliquées par l'effet protecteur du manteau neigeux. Quelques populations autour du réservoir Caniapiscaw montrent des relations inverses avec les précipitations des mois d'août et de juillet. Les étés pluvieux étant plus frais, moins d'énergie et moins de lumière parviennent aux épinettes et donc ces conditions diminuent l'efficacité de la photosynthèse. Ces deux observations isolées doivent être prises avec grande précaution.

Les très faibles relations entre les variations de l'épaisseur des cernes et les précipitations peuvent s'expliquer soit par le fait que l'arbre ne manque pas d'eau en été, soit par les patrons très hétérogènes d'accumulation de la neige sur le territoire, ou bien par la qualité des données de précipitations utilisées. En effet, le krigeage des précipitations reste une tâche difficile, les patrons spatiaux de précipitations étant très complexes. Il est fort probable que la faible sensibilité aux précipitations observée soit le résultat d'une combinaison des trois hypothèses mentionnées.

### 4.2.3 Analyse en composantes principales des fonctions de réponse

En complément, nous avons réalisé une analyse en composante principale sur la réponse des arbres aux températures et aux précipitations (Figure 8). Pour chaque site, nous avons utilisé comme variable le degré de signification des 12 variables de température et des 12 variables de précipitations.

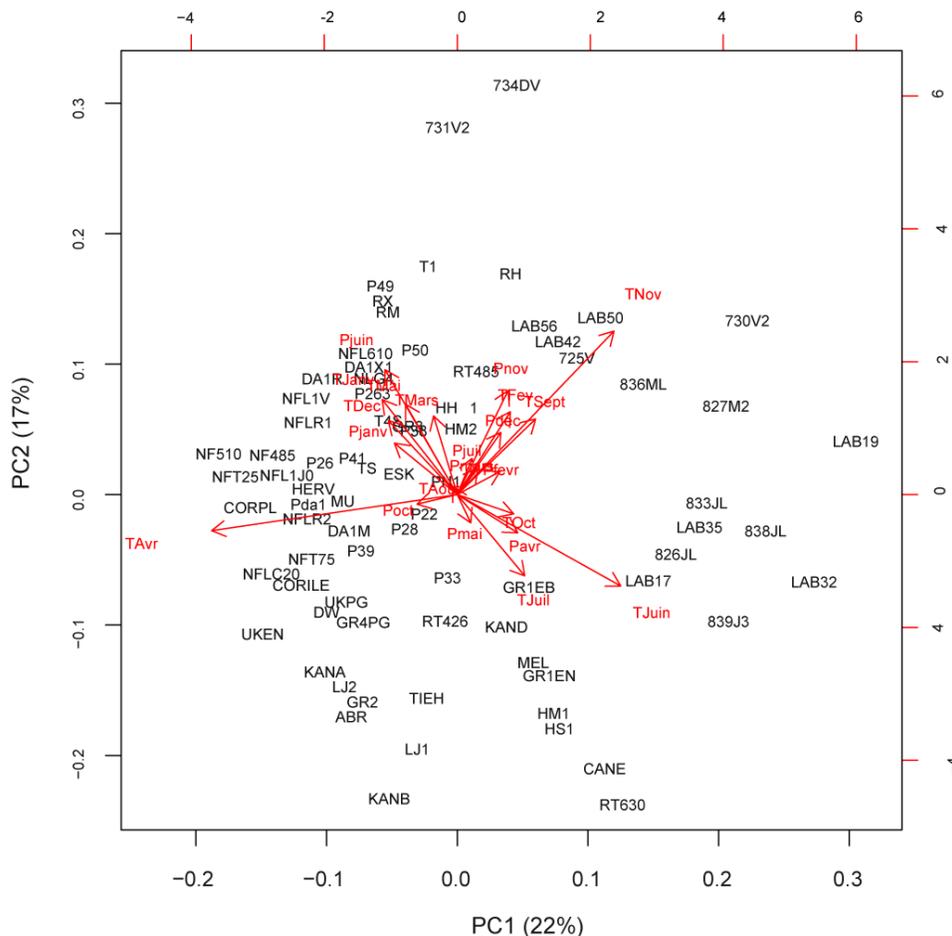


Figure 8 : Analyse en composantes principales sur les résultats des fonctions de réponses aux températures et aux précipitations.

La première composante explique seulement 22 % de la variation interstationnelle et la deuxième composante 17 %. La discrimination des sites les uns par rapport aux autres n'est donc pas très forte. Les populations semblent s'organiser selon les réponses aux températures. En effet, les réponses aux températures de novembre s'opposent aux températures d'avril tandis que les températures de juillet s'opposent aux températures de

décembre-janvier. Nous retrouvons ainsi les contrastes spatiaux observés à la figure 7. Cette dernière analyse confirme la forte discrimination spatiale de la réponse des arbres au climat.

## **5. Conclusion**

Ce projet avait pour principal objectif d'essayer de définir les grands ensembles bioclimatiques dans le Haut-Boréal de la péninsule Québec-Labrador à partir de l'analyse d'un vaste réseau de séries dendrochronologiques. Ce réseau couvre une région allant de Radisson à la baie de James à la région de Goose Bay au Labrador, donc un long gradient ouest-est. L'analyse hiérarchique réalisée sur l'ensemble des séries a pu montrer qu'il semble effectivement exister des régions bioclimatiques plus ou moins bien marquées. Une région bioclimatique bien marquée à l'Est de la péninsule Québec-Labrador, une autre à l'Ouest dans la région Baie de James-LG2, et une troisième moins marquée au Centre-Nord du Québec qui chevauche les deux autres.

Les chevauchements du Centre du Québec résultent probablement du regroupement de populations sensibles aux températures de juillet dans le groupe 1. La sensibilité aux températures de juillet n'étant pas des relations géographiques fortes, la zone définie par le groupe 1 est bien moins marquée géographiquement que les deux autres. Dans les zones 2 et 3, le comportement des épinettes vis-à-vis du climat est relativement contrasté. En effet, la croissance des arbres de la région Ouest est sensible aux températures de novembre et avril, alors que les arbres de la région Est ne le sont pas du tout.

Ainsi, la différence de comportement vis-à-vis du climat des sites étudiés laisse supposer que ces peuplements pourraient être susceptibles de répondre différemment aux changements climatiques, ce qui pourrait avoir une incidence sur la nidification des oiseaux, soit directement par leur acclimatation différentielle à la température ou bien indirectement par les effets qu'ont les extrêmes climatiques sur la disponibilité de la nourriture pour les nichées.

## 6. Références

- Briffa K. R., P. D. Jones, T. S. Bartholin, D. Eckstein, F. H. Schweingruber, W. Karlén, P. Zetterberg & M. Eronen, 1992. Fennoscandian summers from AD 500: Temperature changes on short and long timescales. *Climate Dynamics*, 7: 111-119.
- Cleveland, W. S., 1979. Robust locally weighted regression and smoothing scatter-plots. *Journal of the American Statistical Association*, 74: 829-836.
- Cleveland, W.S. & S. Devlin, 1988. Locally weighted regression: An approach to regression analysis by local fitting. *Journal of the American Statistical Association*, 83: 596-610.
- Cook, E. R. & K. Peters, 1981. The smoothing spline: A new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies. *Tree-Ring Bulletin*, 41: 45-53.
- Cook, E. R., 1985. A time series analysis approach to tree-ring standardization. Thèse de doctorat, University of Arizona, Tucson, Arizona.
- Efron, B., 1979. Bootstrap methods: Another look at the jackknife. *Annals of Statistics*, 7: 1-26.
- Everitt, B., 1974. *Cluster Analysis*. Heinemann Educ. Books, London.
- Gordon, A. D., 1999. *Classification*. Second Edition. Chapman and Hall / CRC, London.
- Guiot, J. et A. Nicault, 2010. Méthodes de dendroclimatologie à l'échelle continentale : fonctions de réponse et fonctions de transfert. Pages 229-254 *Dans* Payette, S. et L.Filion (éd.). *La dendroécologie : Principes, méthodes et applications*. Presses de l'Université Laval, Québec, Québec.
- Nicault, A., Y. Bégin et J. Guiot, 2010. La standardisation des séries dendrochronologiques. Pages 199-228 *Dans* Payette, S. et Filion, L. (éd.). *La dendroécologie : Principes, méthodes et applications*. Presses de l'Université Laval, Québec, Québec.
- Tapsoba, D., V. Fortin, F. Anctil et M. Haché, 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 / Canadian Journal of Civil Engineering*, 32: 289-297.
- Till, C. & J. Guiot, 1990. Reconstruction of precipitation in Morocco since A D 1100 based on *Cedrus Atlantica* tree-ring widths. *Quaternary Research*, 33: 337-351.
- Wackernagel, H., 1998. *Multivariate Geostatistics: an Introduction with Applications*. Second Edition. Springer, Berlin.

Wicha S., J.-L. DesGranges, Y. Bégin et A. Nicault, 2009. Analyse dendroclimatique de l'épinette noire dans l'aire de nidification d'oiseaux boréaux au Québec. INRS - Centre Eau Terre Environnement (rapport de recherche 1170) et Environnement Canada, Québec, Québec, 37 p.