

Projet ANHYCLI – Rapport Final

Financé par Ouranos
Juillet 2013-Juillet 2015

Sommaire

Intervenants

Antoine Nicault, nicault@eccorev.fr

Fédération de recherche ECCOREV (CNRS FR3098) , Aix-en-Provence, France

Dominique Paquin, paquin.dominique@ouranos.ca

Ouranos, Montréal, Canada,

Luc Perreault, perreault.luc@ireq.ca

IREQ, Varennes, Canada

Pierre Brigode, pierre.brigode@gmail.com

Ouranos, ETS, Canada ; Université de Nice

Etienne Boucher, boucher.etienne@uqam.ca

UQAM, Montréal, Canada

Jean-Jacques Boreux, jj.boreux@ulg.ac.be

Université de Liège, Arlon, Belgique,.

Joël Guiot, guiot@cerege.fr

Cerege, Aix en Provence, France

Introduction générale

Le Québec boréal est une des régions du globe où les changements climatiques ont été les plus marqués au cours des trente dernières années. La situation pourrait avoir des conséquences socio-économiques graves dans la mesure où près de 50% de la production hydroélectrique de la province provient précisément de cette région. Il importe de pouvoir situer la tendance récente des conditions hydro-climatiques dans une perspective à plus long terme que ne le permettent les courts registres météorologiques disponibles, de façon à mieux comprendre l'origine de la variabilité spatiale et temporelle des apports en eaux et ainsi espérer pouvoir améliorer les prévisions des apports en eau dans l'aire principale de production hydro-électrique et d'assurer la sécurité énergétique du Québec.

Depuis 8 ans, dans le cadre de deux projets « Recherche et Développement Conjoint » (RDC) (2004-2007 ; Archives : 2008-2013), financés par CRSNG/Ouranos/Hydro-Québec et dirigés par Yves Bégin (INRS ETE- Québec), plusieurs équipes universitaires québécoises et européennes ont collaboré dans le but d'étudier les variations hydrologiques et climatiques passées dans le nord du Québec (région du complexe La Grande et du réservoir Smallwood). Ces deux projets ont généré un très grand nombre de données et ont permis de réaliser plusieurs reconstitutions hydrologiques sur les 200 dernières années (Begin et al. 2007, Boucher et al. 2011 ; Nicault et al. 2014) et climatiques sur plus de 1000 ans (Genaretti et al. 2014 ; Naulier et al. 2015). Durant ces années, un gros effort en matière de traitement des données a également été réalisé (Guin et al. 2011 ; Boreux et al. 2009).

La banque de données « bio-indicateurs » n'a pu être exploitée entièrement durant la durée de ces projets. Elle est composée de chronologies d'épaisseurs de cernes (96 sites), de chronologies de densité maximale et minimale de cernes (47 sites), de séries isotopiques $\delta^{13}C$ et $\delta^{18}O$ (4 sites), et de séries de sédiments lacustres laminés annuellement (varves). L'objectif de ce projet sera donc de valoriser les données peu exploitées des précédents projet (notamment les densités de cernes), et de poursuivre les travaux de reconstructions hydrologiques et de compréhension de la variabilité temporelle des niveaux d'eaux. Le projet est articulé autour de trois volets distincts.

- **Volet 1** : Analyse du signal enregistré par les bioindicateurs. Ce volet concerne essentiellement les séries de densité maximale et minimale de cerne qui n'avaient été que très peu exploitée dans le projet Archives. Il comporte également une comparaison des différents proxies arbres (densité, épaisseurs de cerne, C13 et O18) et une analyse spatiale des sorties d'un modèle bayésien qui extrait le signal commun d'un ensemble de séries temporelles (JJ Boreux).
- **Volet2** : Reconstruction hydrologique et recherche des relations entre variabilité temporelle et spatiale des niveaux et circulation atmosphérique. Ce volet comprend les reconstructions hydrologiques pour tous les bassins du complexe La Grande et pour les bassins connexes (smallwood outardes manic etc....). Il comprend également une revue de littérature sur les relations entre hydrologie et circulation atmosphérique au Québec. La recherche du déterminisme atmosphérique sur la variabilité hydrologique et la reconstitutions des apports en eau à partir des réanalyses de pression atmosphériques

- **Volet 3** : comparaison des simulations de runoff par les GCM (CMIP5) et des reconstitutions hydrologiques pour quatre bassins sur la période 1850-2000

Volet 1 – Analyse des bio-indicateurs

Introduction

L'étude du signal porté par les bio-indicateurs a été réalisée en grande partie dans le cadre du projet ARCHIVES. Seules les données issues de l'analyse densitométrique n'avaient pas fait l'objet d'une étude approfondie. En effet, si plusieurs chronologies ont déjà été utilisées, un grand nombre n'ont pu être encore exploitées, les dernières données ayant été mesurées et intégrées dans la base de données qu'au début de l'année 2013. Dans ce volet, nous avons dans un premier temps analysé le signal climatique porté par les séries de densité maximale et minimale, dans un second temps nous avons comparé, sur 4 sites, les signaux climatiques portés les séries temporelles de densité au séries d'épaisseurs de cerne et aux séries dendro-isotopiques (C13 O18) et leur potentiel de reconstruction. Enfin dans ce premier volet, à dominante « écologie », nous avons poursuivi la mise en œuvre du modèle bayésien développé dans le cadre du projet Archives par Jean Jacques Boreux.

1 - Analyse des relations entre le climat et les séries temporelles de densité de cerne

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. Certaines mesures de densité avaient déjà été réalisées lors de projets antérieurs (sur une dizaine de sites), mais ces dernières mesures n'ont pas été retenues pour l'analyse, et pour la plus part ne figure pas dans la banque de données. En effet, si certaines séries seraient utilisables, leur vérification, correction et homogénéisation s'est avérée bien trop chronophage et a été abandonnée. Une partie des mesures réalisées dans le cadre du projet archives ont également été rejetée. D'autres séries sont également disponibles sur le secteur étudié ; elles proviennent d'un réseau de séries densitométriques développé par Fritz Schweingruber (Schweingruber et al., 1996 ; Briffa et al., 2001) et dont les données sont disponibles dans la banque de données mondiale ITRDB. Les données issues de ce réseau et couvrant notre région d'étude ont été intégrées à la banque de données mais n'ont pas été intégrées dans la présente étude.

Construction des séries temporelles de densité de cerne

Pour la mesure de la densité des cernes, nous avons suivi la procédure décrite par Schweingruber (1978, 1996) et Cournoyer (2010). La préparation des échantillons et les mesures de densité ont été réalisées par A. Nicault et T. Labarre.

Tout d'abord les sections transversales d'arbres exemptes de toute anomalie (pourriture, bois de réaction, déformations...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) afin d'extraire les substances opaques aux rayons X (résines, tanins...). Les échantillons obtenus sont radiographiés en conditions de température et d'humidité contrôlée. Les radiographies obtenues sont développées en collaboration avec le service radiographique d'un Hôpital. La mesure de la densité (g/cm^3) est ensuite réalisée sur les radiographies, grâce à un microdensitomètre optique (DENDRO 2003 microdensitometer (Walesch, Switzerland)).

L'analyse microdensitométrique permet d'obtenir le profil de densité du cerne duquel on peut extraire 8 valeurs de cerne 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, seule la densité maximale et la densité minimale du cerne ont été analysés.

Les séries obtenues ont été standardisées en utilisant la méthode des bandes d'âge (détaillée dans Briffa et al. 2001, planche 1 et Nicault et al. 2009) afin de préserver au mieux les variations de croissance de basses fréquences. A l'issue de cette procédure nous obtenons, pour chaque site, une chronologie maitresse standardisée de dimension comparable et débarrassée des signaux liés à l'âge l'arbre. Cette méthode permet de garder une grande partie des fluctuations de basses fréquences enregistrées dans les cernes.

Parmi la cinquantaine de site ayant fait l'objet d'une analyse densitométriques dans le cadre du projet Archives seulement 38 ont été retenus pour cette analyse (Fig 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 et aux mesures, pour quelques sites nous ne possédions pas un nombre assez grand de réplification pour réaliser une chronologie maitresse convenable. De plus, les séries mesurées dans le cadre d'une thèse de maitrise (abandon de l'étudiant) n'ont put être exploitées. Malheureusement ces sites se trouvaient presque exclusivement dans la région de LG2 et donc aucun site retenu ne couvre cette région.

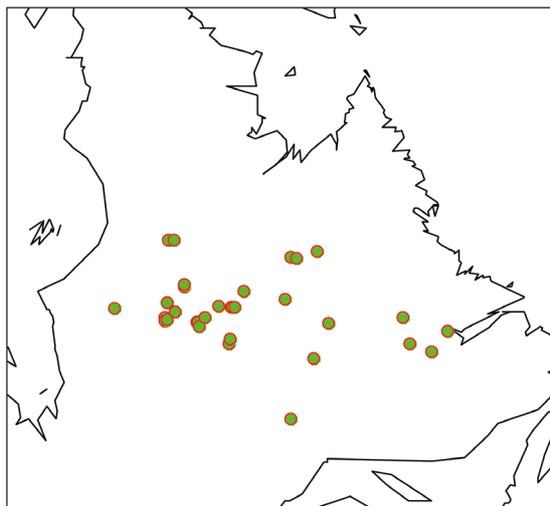


Figure 1 - Localisation des sites qui ont fait l'objet de mesure densitométriques et retenus pour dans le cadre de l'étude

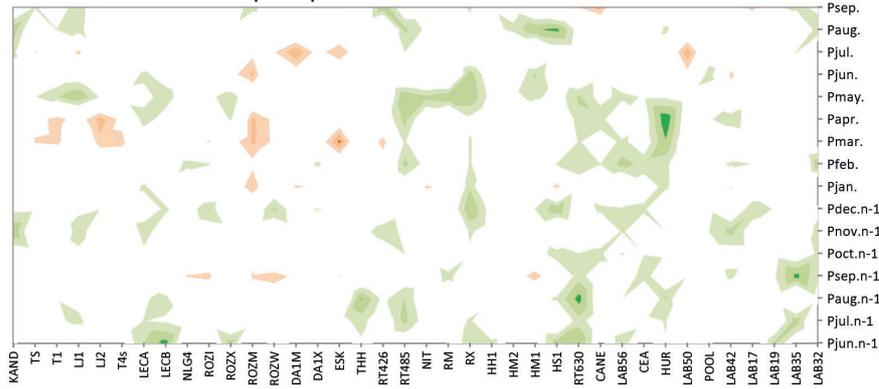
Les données météorologiques

Les données météorologiques utilisées sont des données sur grille (0.5°x 0.5°), fournies par Hydro-Québec (D. Tapsoba), qui couvrent l'ensemble de la région étudiée. Les interpolations sur grille ont été réalisées grâce à la technique du krigeage avec dérive externe (Wackernagel, 1998 ; Tapsoba & 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 grilles les plus proches des sites étudiés et extrait les données sur la période 1960-2001, commune aux cernes et aux données météorologiques. Les données utilisées sont la somme des précipitations mensuelles, les températures moyennes mensuelles, les températures minimales mensuelles, et les températures maximales mensuelles.

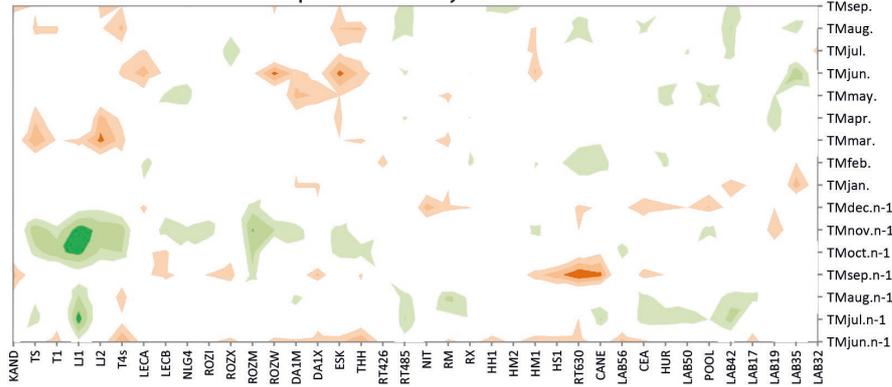
Analyse des relations entre densité et climat

Nous avons choisi d'étudier les relations entre la variabilité interannuelle de la densité et du climat par une analyse de fonction de corrélation associée à une procédure bootstrapp permettant d'évaluer la robustesse de la relation. Tous les calculs ont été réalisés sous R. Les fonctions de corrélations ont été réalisées à l'aide du Package Bootres (Zang, C., & Biondi, F. (2012)). 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 juin de l'année précédente à septembre de l'année en cours (16 mois)) et la densité des cernes représentés ici par les paramètres densité maximale et densité minimale. Les résultats sont présentés en graphiques de surfaces (les sites en abscisse, les paramètres climatiques en ordonnées et la valeur des corrélations sur le graphique) (Fig 2 et 3).

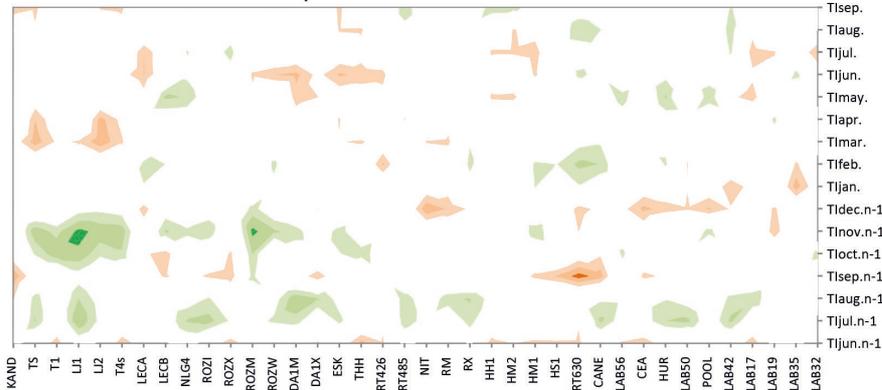
Densité minimale vs précipitations



Densité minimale vs températures moyennes



Densité maximale vs températures minimales



Densité minimale vs températures minimales

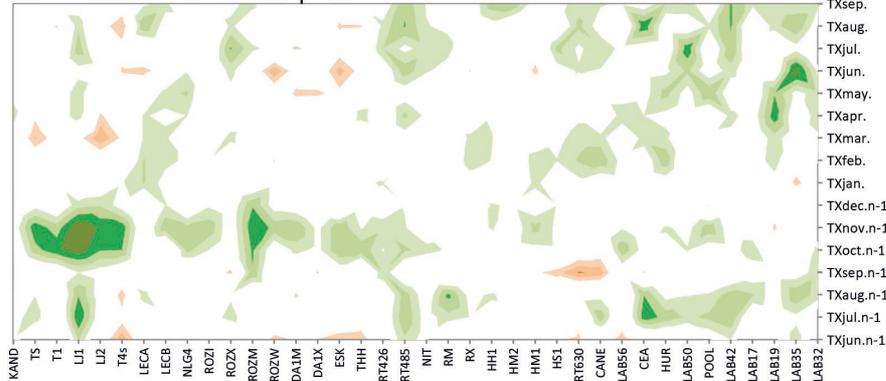
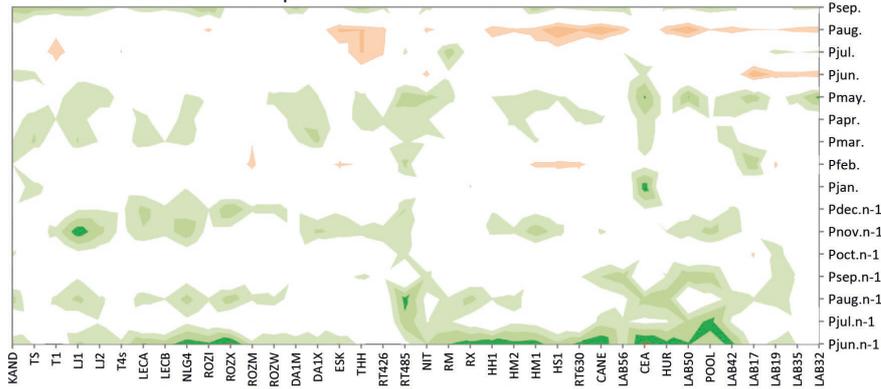
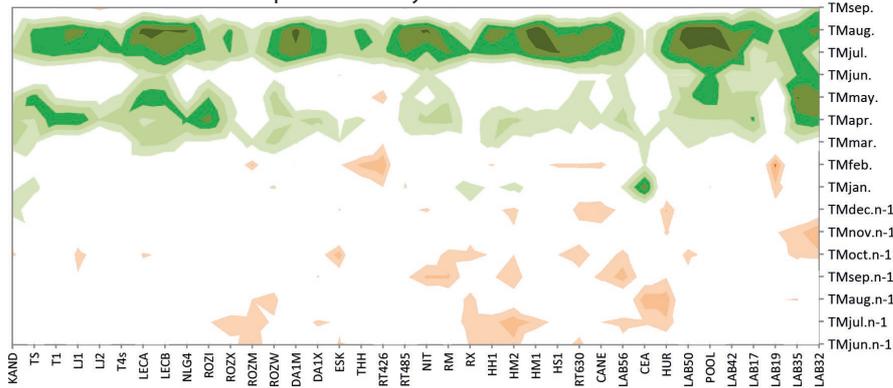


Figure 2 : corrélations (fonctions de corrélations) entre les séries de densité minimales et les températures (minimales, maximales moyennes) et précipitations estivales (TJAHQ).

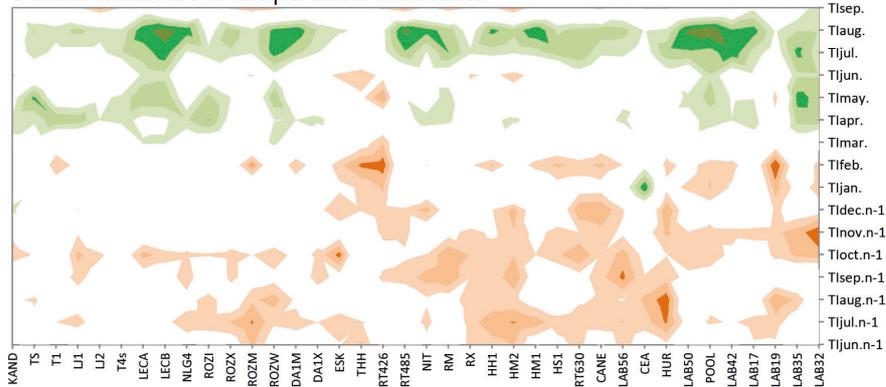
Densité maximale vs Précipitations



Densité maximale vs Températures moyennes



Densité maximale vs températures minimales



Densité maximale vs Températures maximales

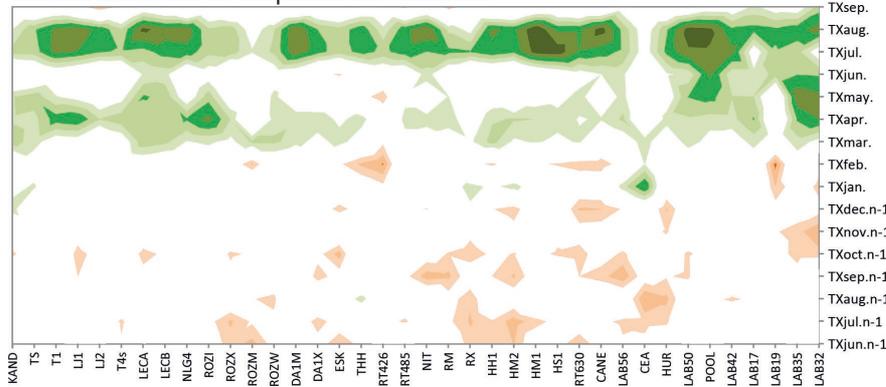


Figure 3 : Relation (fonctions de corrélations) entre les séries de densité maximales et les températures (minimales, maximales moyennes) et précipitations estivales (TJAHQ).

Densités minimales

Sur la période 1960-2001 les séries temporelles de densité minimales ne montrent pas ou très peu de relations significatives avec les températures et les précipitations (Fig 2). Les seules relations significatives cohérentes sur plusieurs sites l'influence (positive) des températures maximales de l'automne précédent sur la densité minimale des sites (une quinzaine) les plus à l'ouest qui couvrent essentiellement le secteur de LG4. Cette relation entre températures automnales et cerne de croissance a déjà été observé pour les épaisseurs des cernes de la même région (Nicault et al., 2014), cependant la relation était inverse. Ces relations avec les températures automnales serait peut être liées à la date d'enneigement. En effet un enneigement précoce pourrait vraisemblablement limiter le gel du sol en profondeur.

On pourra également noter une influence, certes faible, des précipitations des mois de mars avril et mai sur les populations du centre du Québec situées principalement autour du réservoir Caniapiscau. Bien que ces relations puissent paraître anecdotiques, les densités minimales avaient retenues, conjointement avec des séries glacielles, pour reconstruction des crues printanières dans la région de Caniapiscau (Boucher et al. 2011).

Le potentiel paléoclimatologique des séries de densité minimales s'avère donc assez faible. Cependant l'utilisation des séries d'épaisseur et de densité minimales sensibles aux températures automnales pourrait peut-être nous permettre d'essayer d'appréhender dans le passé les températures automnales et ainsi la variabilité de la date de début d'enneigement.

Densité maximales

Les relations entre la densité maximale et les précipitations s'avère assez faibles (bien que souvent, mais faiblement, significatives) (Fig 3). On peut observer une certaine cohérence entre 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 l'année précédente, des mois de novembre et décembre et des mois d'avril-mai. Certaines populations montrent une relation négative avec la précipitation du mois d'août. Ces relations sont difficilement interprétables et pas assez forte pour pouvoir utiliser les densités maximales comme un indicateur de précipitation.

Hormis l'apparition de relations négatives avec les températures minimales des mois d'automne et d'hiver précédent la période de végétation ; relation qui restent faibles et difficilement interprétables ; l'influence des températures sur la variabilité des séries temporelles de densité maximale est très marquée. En effet, on remarque pour l'ensemble des sites une influence significative voire très significative des températures moyennes des mois de juillet-août sur la variabilité temporelle de la densité maximale. Seul 1 site ne montre pas de relation entre température estivale et densité maximale. Pour une grande majorité des sites la température des mois d'avril-mai influence également significativement la densité des cernes.

Ces relations sont en adéquation avec les relations densité-climat trouvées dans la littérature. Les séries temporelles de densité ont servies de proxies dans plusieurs études paléoclimatologiques pour les reconstructions de températures maximales de la période avril-août (Briffa 98, REF). 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 temporelles des températures estivales. Cependant, bien que quasiment toutes les séries

temporelles soient significativement influencées par les températures estivales on remarque une assez grande variabilité dans la force de la relation. La cartographie de la sensibilité des séries de densité maximales aux températures ne montre pas de patrons spatiaux clairs (Fig. 4).

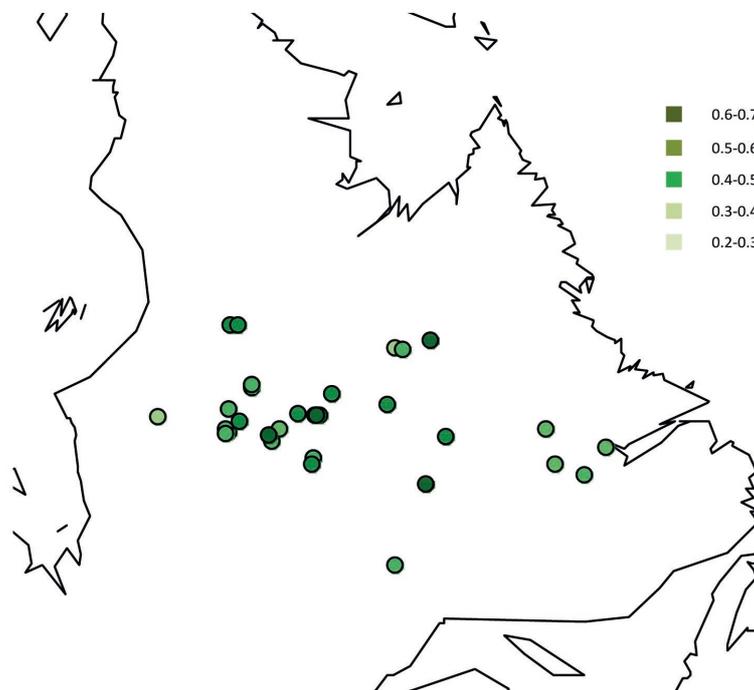


Figure 4: Cartographie des corrélations entre séries de densité maximales et températures estivales (TJA)

Sur la figure, seules les populations du centre semblent un peu plus sensibles. Nous avons voulu savoir si cette variabilité était la conséquence d'une ou plusieurs variables environnementales et/ou si elle 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, soulevés par plusieurs auteurs, (D'Arrigo 2008). Afin de rechercher un éventuel déterminisme environnemental dans cette variabilité nous avons réalisé une analyse canonique de redondance (RDA). Ensuite nous avons recherché un éventuel phénomène de divergence de la relation densité climat pour certaines séries en réalisant une analyse de corrélations mobiles.

Recherche d'un déterminisme environnemental de la variabilité interstationnelle de la relation densité maximale- température estivale

Afin de déterminer si certains facteurs environnementaux sont responsables de la variation interstationnelle des relations densité-climat, nous avons confronté les résultats des fonctions de corrélations entre la densité maximale et les températures moyennes à des variables environnementales (géographiques, écologiques, climatiques). Nous avons donc confronté une matrice avec les profils des fonctions de corrélations (Dmax vs Tmoy) à une matrice de données environnementales (variables explicatives) composée de la Latitude (LAT) et la Longitude (LONG), l'altitude (ELE), la distance à la mer (d.sea), les classes de drainage (D.class), la quantité

totale de neige (Sn.Tot), la température moyenne annuelle (Tm.An), le total de précipitation annuelle (Ptot), les minimorums (Tmin), et la somme des degrés jour de croissance supérieur à 5°C (gdd5). Nous avons utilisé le package Vegan pour réaliser la RDA et pour évaluer la part explicative de chacune des variables environnementale (fonction envfit).

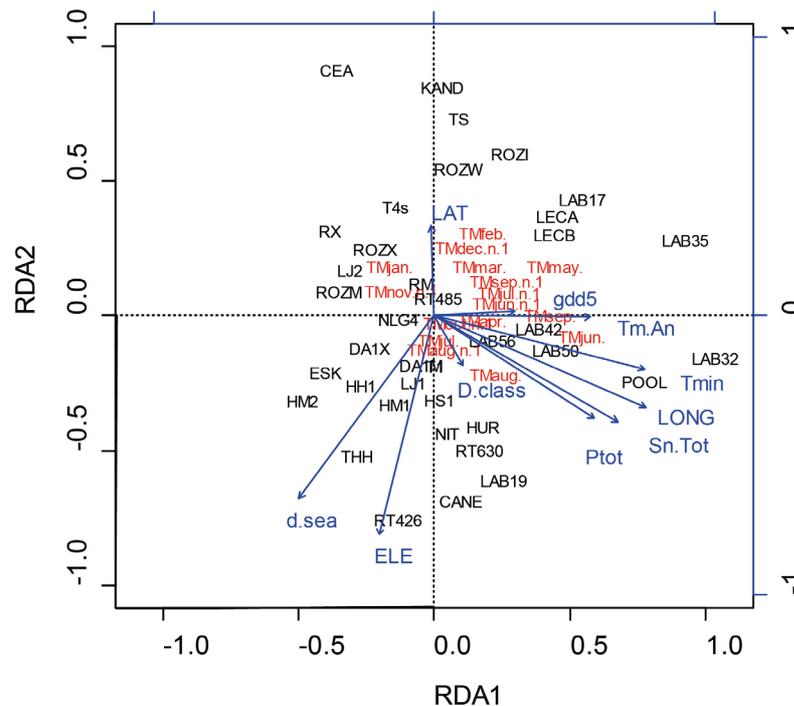


Figure 5 : Analyse canonique de redondance (RDA) entre la relation densité /climat et les variables environnementales

VAR	r2	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	0.65
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

Tableau 1 : Influence (R2) de l'environnementale sur la

chacune des variables relation densité climat (envfit)

La latitude, les classes de drainage et les degrés jours de croissance n'ont dans le cadre de notre étude aucune influence sur la relation entre densité maximales et températures. Le gradient latitudinal assez faible et contrarié par le relief explique probablement en parti l'absence d'influence de la latitude et du GDD5 (Fig 5 etTab 1).

Les variables les plus influentes sont la longitude associée aux minimorums et à la somme totale de neige (Axe RDA 1) sur l'autre axe, la distance à la mer et l'altitude jouent également un rôle important. Ce sont les populations poussant dans les zones les plus froides qui semblent donc être les plus sensibles. Cette tendance confirme en partie les observations faites à partir de la carte des résultats : les densité des cernes des populations centrales semblent être les plus significatives aux températures.

Recherche d'un éventuel phénomène de divergence dans les séries temporelles de densité maximale

Nous avons voulu savoir si la variabilité de sensibilité aux températures estivales reflétait pour certaines séries temporelles de densité maximale le phénomène de divergence des relations de la croissance et de la densité et des épaisseurs de cerne vis-à-vis du climat, observé par plusieurs auteurs (D'Arrigo 2008).

Nous avons réalisé une analyse en composante principale, d'une part sur les séries de densité maximale les moins corrélées aux températures estivales ($r < 0.35$; 12 pop) et d'autre part sur les séries de densité maximale les mieux corrélées aux températures estivales ($r > 0.5$; 13 pop). Ces analyses ont été réalisées sur la période 1900-2001. Nous avons ensuite comparé les premières composantes principales, issues des séries les moins sensibles (DXCP35) et des séries les plus sensibles (DXCP50), aux séries de température estivale (juillet-août) issue de la banque de donnée climatique BEST (TJABEST)(<http://berkeleyearth.org/>) pour la période 1900-2001 (Figure 6a et 6b). En parallèle une analyse de corrélation mobile a été réalisée entre DXPC35 et DXPC50 et la série TJABEST (Fig 6c).

La première composante principale DXCP50 suit la courbe des températures estivale sur toute la période exploré aussi bien au niveau haute fréquence que moyenne et basse fréquences. Seules les très basses fréquences des températures ne semblent pas être parfaitement synchrones avec les séries de densité maximales. En revanche, si La première composante principale DXCP35 est synchrone avec les températures estivales, au niveau haute fréquence basse fréquences, sur la période 1900-1960, sur la période plus récente (1960-2000) la relation entre la densité et les températures diminue fortement, essentiellement au niveau moyenne fréquence, bien que les corrélations restent significatives (Tab 2).

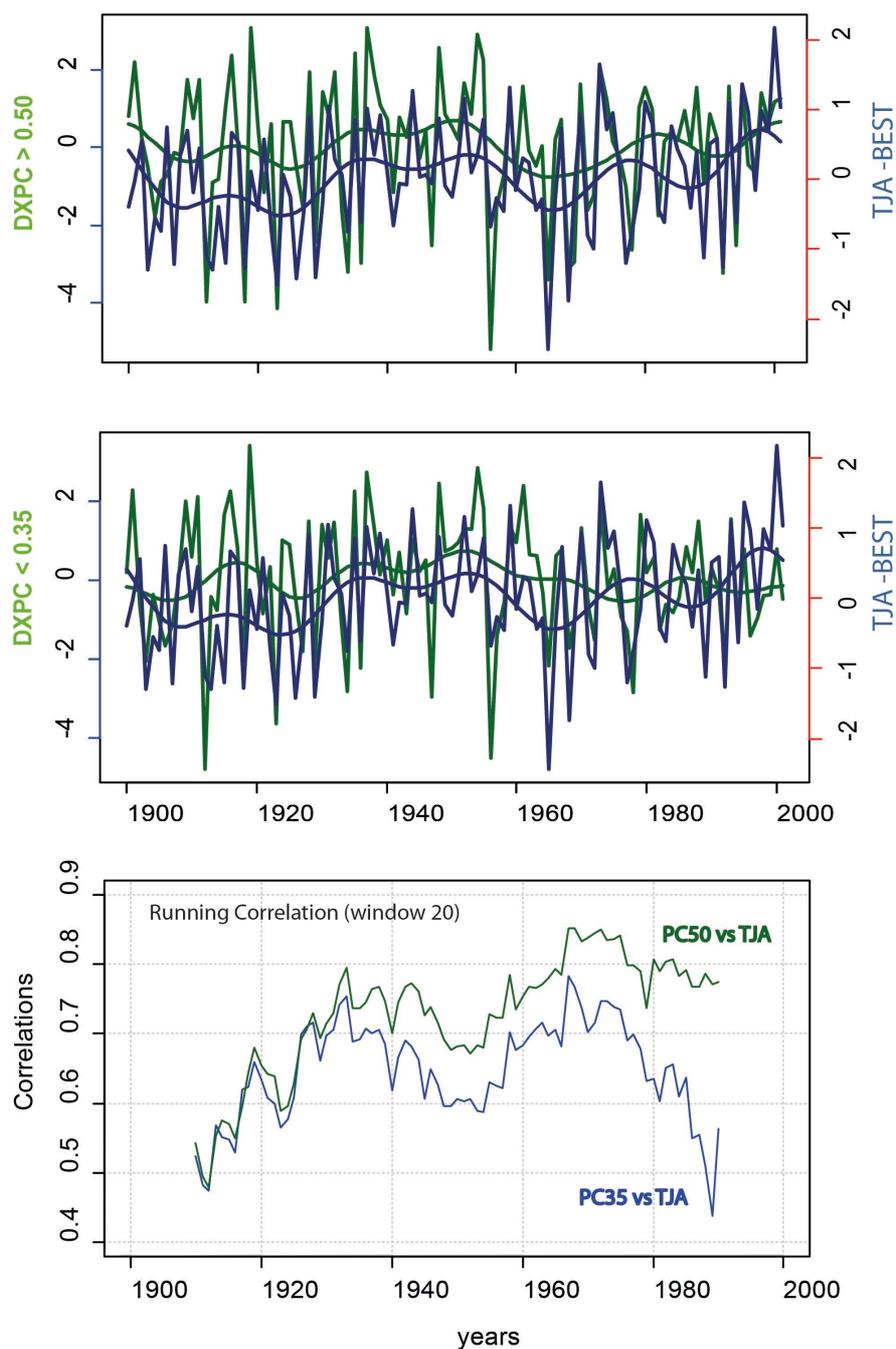


Figure 6: comparaison entre les premières composantes principales, issues des séries de densités les moins sensibles au climat (DXCP35) et des séries les plus sensibles (DXCP50), aux séries de température estivale (juillet-aout) issue de la banque de donnée climatique BEST (TJABEST)(<http://berkeleyearth.org/>) (Figure 6a et 6b). Corrélation mobile entre DXPC35, DXPC50 et la série TJABEST (Fig 6 c).

	1900-1960	1961-2001
DXCP >0.5	r = 0.63; pval: 3e-8	r = 0.81 ; pval: 4e-11
	r = 0.68 ; pval: 2e-15	
DXCP <0.35	r = 0.6 ; pval: 2e-07	r = 0.6 ; pval: 3e-5
	r = 0.56 ; pval: 6e-10	

Tableau 2 corrélations

En effet si les corrélations de DxCP0.35 et DXCP0.5 avec les températures sont similaires sur la période 1900-1960, sur la période 1900-2000 les corrélations entre DXCP35 sont sensiblement plus faibles que celle entre DXCP50 et les températures estivales (Tab 2).

L'analyse des corrélations mobiles (Fig. 6c) sur la même période confirme ces observations. Sur la période 1900- 1930 dans les deux cas les corrélations entre température et densité sont assez faibles ($0.45 < r < 0.6$). La faible corrélation observée au début du siècle peut s'expliquer, entre autre, par la qualité des séries de températures. En effet, en deçà de 1950 cette série a été construite avec des données éloignées de plus 1000 km. En revanche, on peut voir que quelle que soit la composante les corrélations sont très proches jusqu'au début des années 60, date à laquelle on observe un fort décrochement entre les deux courbes. Alors que les corrélations entre DXCP50 et TJABEST restent constantes sur cette période ($r > 0.75$), les corrélations entre DXCP 35 et TJABEST montrent, quant à elles, une très forte diminution (Fig. 6c).

Cette baisse de la sensibilité pourrait effectivement être interprétée comme une divergence de la relation sensibilité climat. Une des interprétations les plus courantes viendrait de la diminution du caractère limitant des températures estivale sur la variabilité des densités maximales en relation avec l'augmentation des températures. L'analyse précédente de RDA montre en effet que les séries de densité maximales les plus sensibles aux températures semblent être issues des arbres poussant dans les conditions les plus froides et donc dans des région ou le seuil de non limitation par les température ne serait pas encore atteint.

2 -Analyse comparée des séries temporelles de densités, d'isotopes (O18 et C13) et d'épaisseurs de cerne.

Lors du projet archives, sur 4 sites, les arbres ont fait l'objet de mesures d'épaisseur de cerne, de densité de cerne et d'isotopes ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$, (Bégin et al, 2015). Des reconstructions millénaires ont été réalisées à partir des épaisseurs (Gennaretti et al. , 2014) et du O18 (Naulier et al., 2015). Aucune analyse comparée n'a cependant été effectuée durant la durée de ce projet. Nous avons donc réalisé, sur ces 4 sites, une évaluation comparée du potentiel de chacun des « proxys arbres ». Tout d'abord, nous avons procédé à une analyse comparée de leur relation au climat puis dans un second temps nous avons comparé leur potentiel de reconstitution à partir de chacune des variables puis à partir de combinaisons entre variables.

Relations proxys climat comparée.

La méthode utilisée est la même que pour l'analyse des densités. Pour chaque site les fonctions de corrélations ont été calculées entre les chronologies moyennes de chacun des proxys et les données météorologiques (Tmax, Tmin, Tmoy et Precip) (Tapsoba et al 2005) des points les plus proches. Les relations ont été calculées sur la période 1960-2001. Le degré de signification a été calculé par méthode bootstrap et les résultats présentés sous forme de graphique de surface (Fig. 7).

Les précipitations ne semblent avoir quasiment aucune influence quelle que soit la variable « arbre » considérée. Seules les précipitations estivales montrent une petite influence négative sur les séries de densité maximales et sur les séries de $\delta^{13}\text{C}$. Ces relations ne sont probablement pas en relation directe avec la teneur en eau du sol mais illustrent indirectement la forte relation aux températures estivales. Les étés pluvieux sont en effet plus frais dans cette région.

Quelle que soit la variable température considérée, Tmin, Tmax ou Tmoy, le profil des réponses obtenus sont similaires pour les 4 sites (DA1, HM1, POOL, LAB32), seule l'intensité des relations change. On peut noter cependant que le site LAB 32 le plus éloigné géographiquement des autres réagit se détache un peu des autres.

Les séries temporelles de densité maximale, C13 et O18 montrent des profils de réponses aux températures très similaires. C'est principalement les températures estivales (essentiellement des mois de juillet à août) qui gouvernent leur variabilité temporelle. C'est la densité maximale qui est le plus fortement liée aux températures. Les corrélations entre séries de O18, C13 et les températures estivales apparaissent un peu moins importantes mais restent très significatives. Si dans le cas des densités la relation aux températures estivales est quasiment exclusive, dans le cas des séries isotopiques on observe également une relation négative avec les températures hivernales et positive avec les températures de l'été précédent. Pour les populations les plus à l'est, Pool mais surtout Lab 32, on observe une influence des températures, sur les trois proxys, durant une période plus longue incluant les températures printanières.

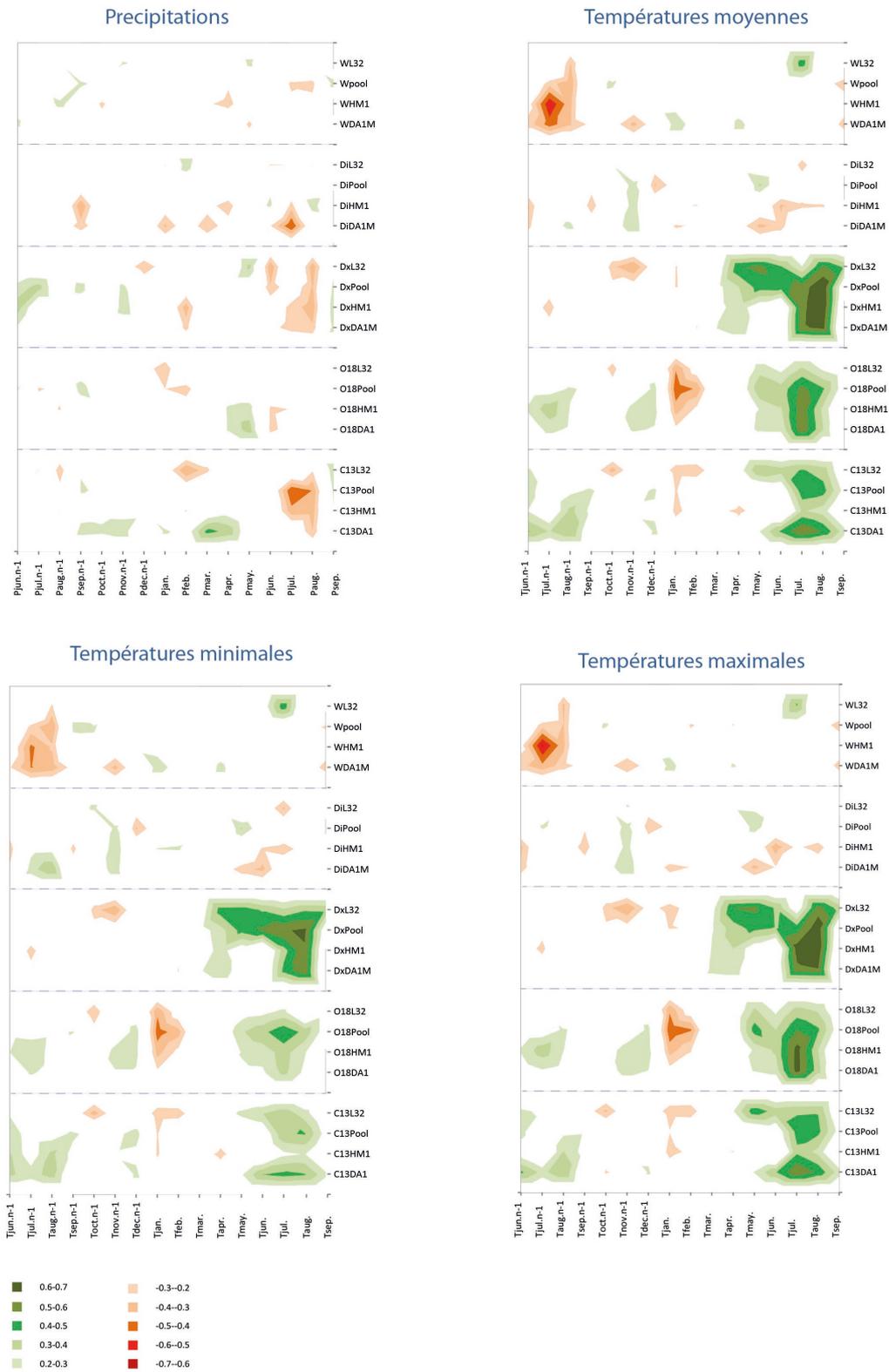


Figure 7 : Relation (fonctions de corrélations) entre les séries de densité, épaisseur, $\delta C13$, et $\delta O18$ issues des trois sites DA1, HM1, POOL, et les températures (minimales, maximales moyennes) et précipitations estivales (TJAHQ).

Si les trois proxies, densité O18 et C13, montrent un fort potentiel pour reconstituer les températures estivales, les séries d'épaisseurs de cernes ne montrent aucune relation avec les

températures de l'année en cours pour les sites Da1 HM1 et Pool. On observe pour ces trois sites seulement une influence négative des températures de l'été précédent. Cette relation difficilement interprétable ne peut en aucun cas être utilisée dans le cadre de reconstructions climatiques. En revanche, les séries temporelles d'épaisseur du site LAB32 montrent une relation très significative avec les températures du mois de juillet. Pour les épaisseurs ces résultats confirment les observations déjà réalisées dans le cadre du projet Archives (Nicault et al, 2014). L'absence de relation avec les températures estivales n'est pas systématique sur le secteur. En effet, Une reconstructions millénaire des températures estivales a déjà été réalisée dans le secteur (Gennaretti et al., 2014) et montre le potentiel des épaisseurs pour les reconstructions. Dans notre cas, cette absence de relation pourrait être due, comme dans le cas de certaines séries de densité à un phénomène de divergence. Notons que le choix systématique de vieux arbres pour les reconstructions peut conduire à ce type de conséquence. En effet, le potentiel photosynthétiques de vieilles épinette noire devient très faibles, ces dernières étant souvent presque complètement défoliée, ne gardant que quelques branche au sommet en guise de feuillage.

Afin de confirmer et de mieux discriminer le potentiel de reconstruction de chacun des proxies, nous avons réalisé une analyse en composante principale entre les séries de chaque proxies issues des trois sites « centraux » (DA1, HM1, POOL) et extrait la première composante principale. Pour chaque proxies nous avons ensuite confronté la CP1 extraite à la moyenne des températures des trois point de grilles associés a chacun des sites (FigXX).

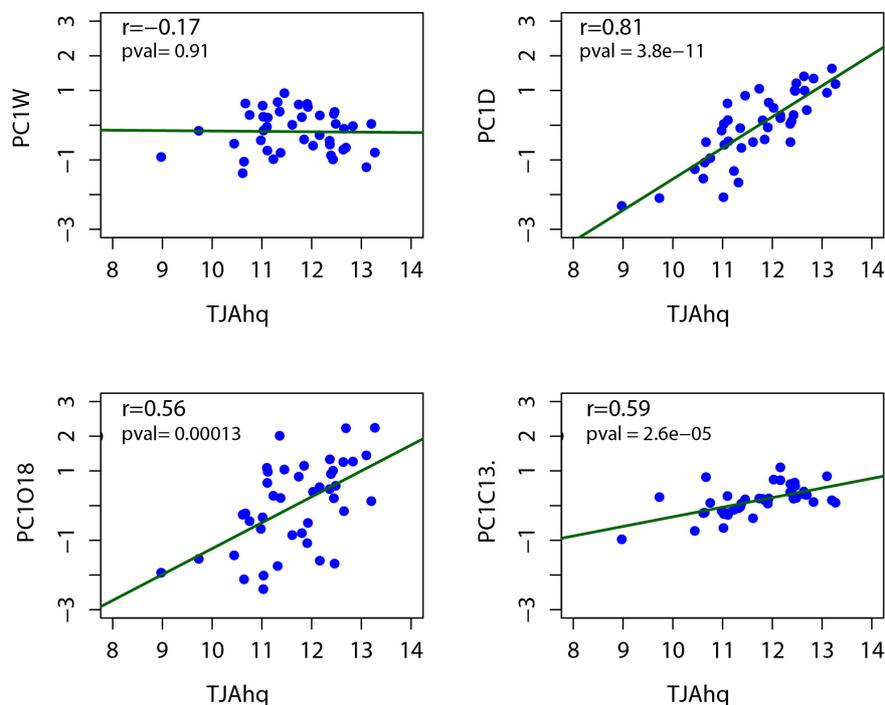


Figure8. Nuages de points entre la première composante calculée à partir des séries de densité, épaisseur, $\delta C13$, et $\delta O18$ issues des trois sites DA1, HM1, POOL, et les températures estivales (TJAHQ).

La figure 8 montre que la CP1 issue des chronologies de densité est la plus fortement corrélée ($r=0.81$) avec les températures estivales et donc présente un très fort potentiel de

reconstruction. Les CP1 issues des séries isotopiques montrent elles aussi de bonnes corrélations avec les températures estivales (O18 $r=0.56$ et C13 $r=0.59$) et donc un bon potentiel de reconstruction. Comme vu précédemment la CP1 épaisseurs n'est pas du tout corrélée aux températures estivales.

Comparaison de reconstructions mono et multi-proxies

Afin d'approfondir l'évaluation du potentiel de reconstruction des différents proxies, nous avons réalisé des reconstructions indépendamment avec chacun des proxies et ensuite l'ensemble des proxies retenus.

Les reconstructions ont été réalisées grâce à une PLS (Partial least Square regression) qui est une version améliorée de régression multiple sur composante principale avec optimisation dans le choix de la sélection des composantes. La robustesse des reconstructions est évaluée grâce à une procédure jackknife de tirage aléatoire qui permet d'extraire des données pour la vérification. Seules les proxies des trois sites centraux retenus ont été utilisés dans ces reconstructions. Les températures estivales utilisées (Juillet –Aout (TJA)) ont été obtenues en calculant la moyenne des températures des trois points de grilles associés à chacun des sites (FigXX). La calibration a été réalisée sur la période 1960-2001. 5 reconstructions des températures estivales (RECTJA) ont été réalisées sur la période 1800-2000. 4 ont été réalisées à partir d'un seul type de proxies (REC-DX, REC-W, REC-O18, REC-C13) et une à partir de plusieurs type de proxies (densité, O18 et C13, REC-MP).

Les résultats des statistiques issues de la calibration confirment les résultats précédents. C'est à dire le bon potentiel des séries isotopiques pour reconstituer les températures, et le très bon potentiel des séries de densité maximale. La reconstruction multiproxies montre quant à elle les meilleures statistiques. Cependant le R2 de vérification est à peine supérieur à celui obtenu par les seules séries de densité.

c	RECTWr2	RECTDxr2	RECTOr2	RECTCr2	RECTMPr2
R2	0,05	0,68	0,37	0,43	0,76
R2p	-0,11	0,62	0,24	0,34	0,63

Tableau 3 : résultats statistiques des reconstructions. R2 = coefficient de détermination entre données simulées et données observées. R2p = équivalent RE calculé à partir des données tirées pour vérification.

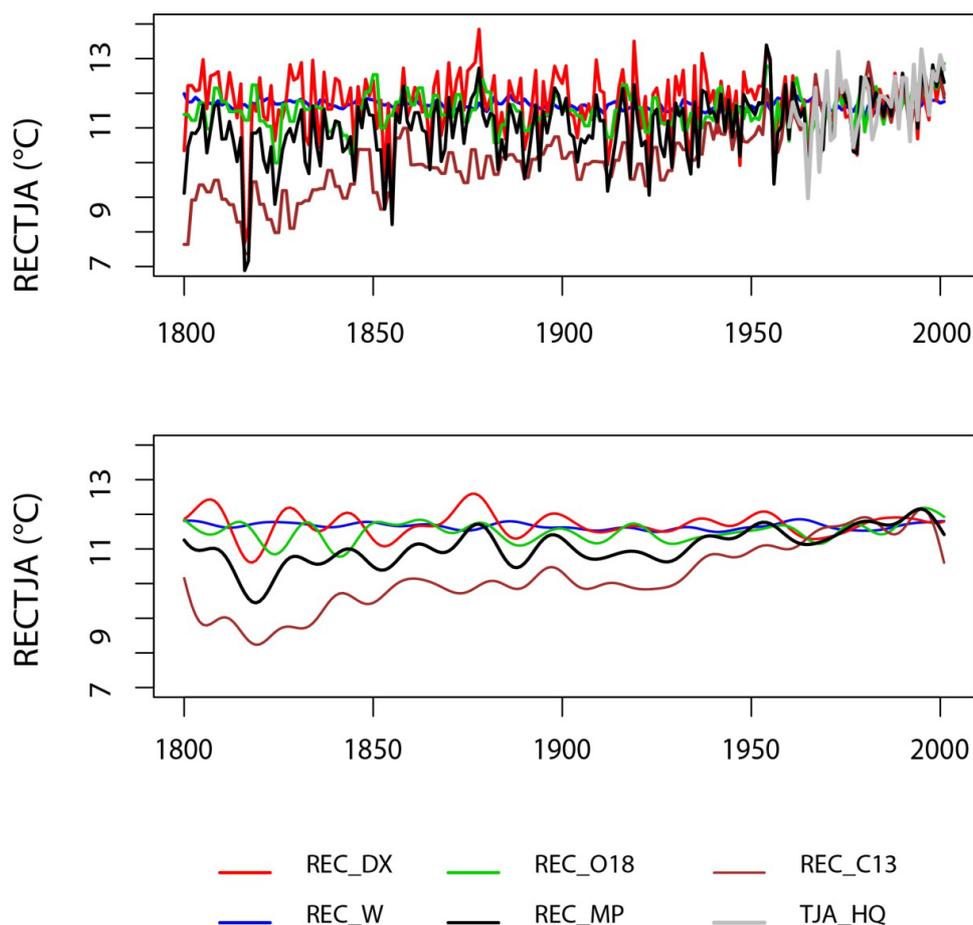


Figure 9 : reconstitution des températures estivales réalisées à partir des séries temporelles de densités (REC-DX), d'épaisseur (REC-W), de $\delta C13$ (REC-C13), de $\delta O18$ (REC-O18) et de l'ensemble des proxies (REC-MP).

Nous écartérons ici de la discussion les reconstructions réalisées à partir des épaisseurs. En effet, l'absence de relation avec les températures estivales ne donne qu'une courbe plate et sans variance (fig), associées à des statistiques nulles (Tab). La figure montre que si les variations de hautes fréquences et de moyennes fréquences sont relativement synchrones entre reconstructions, on observe en revanche de grandes différences au niveau tendance à long terme. Les reconstructions de températures réalisées à partir des densités et des séries O18 sont relativement similaires en terme de tendance à long terme et ne montre pas de grandes variations de températures au cours des 200 dernières années. La reconstruction réalisée à partir des isotopes du Carbone se dissocie nettement des deux autres et montre un début de XIX siècle très froid et une forte tendance à la hausse des températures depuis les années 1820. La reconstruction mutiproxies se situe entre toutes ces reconstructions, elle est synchrone avec les autres en terme de variations de moyenne et haute fréquence et montre une tendance à la hausse des températures mais moins importante que celle obtenue par les isotopes du carbone.

Nous avons comparé REC-MP à la reconstructions millénaire de température réalisée à partir des épaisseurs de cerne (STREC, Gennaretti et al., 2014), à la reconstructions millénaire de température (températures maximale estivales) réalisée à partir des isotopes de l'oxygène (STRECi, Naulier et al 2015) et à la série de température estivale (juillet-août) issue de la banque de donnée climatique BEST (TJABEST)(<http://berkeleyearth.org/>) (FigXX) . Jusque dans les années 1900 on peut considéré que les différentes reconstructions sont très proches les unes

des autres. Sur la période 1800-1900 on observe ne revanche quelques différences sensibles. La reconstruction STREC montre la plus grande amplitude dans les variations de températures avec une première moitié de XIX siècle plus froide et une fin de 19^{ème} plus chaude que les autres reconstructions. STRECI hormis une période plus chaude dans les années 1850 reste relativement proche des autres. La tendance a donner des températures plus chaude peut être liée au fait que c'est les températures maximales et non les températures moyennes qui sont reconstituées. RECMF et TJA BEST restent très proche, dans la même gamme de température, sur les 200 ans reconstitués. Cependant on observe à partir entre les années 1800 et 1870 une désynchronisation essentiellement en terme de moyenne fréquence. La bonne adéquation au niveau moyenne fréquences entre les trois autre reconstructions et le fait que TJA BEST est construite à partir de données de températures éloignée, pour la plus part, de plus de 5000 Km sur cette période, nous pouvons donner plus de confiance sur cette période à REC-MP qu'à TJA-BEST. Il difficile de trancher et nous ne pouvons avoir aucune certitude sur la véracité des reconstitutions, mais il apparaît que REC-MP pourrait constituer le meilleur compromis. Une nouvelle reconstruction millénaire intégrant les données utilisées pour SREC et STRECI ainsi que des données de densité mesurées sur les troncs subfossilles contribuerai grandement à améliorer la connaissance des variations passées des températures estivales.

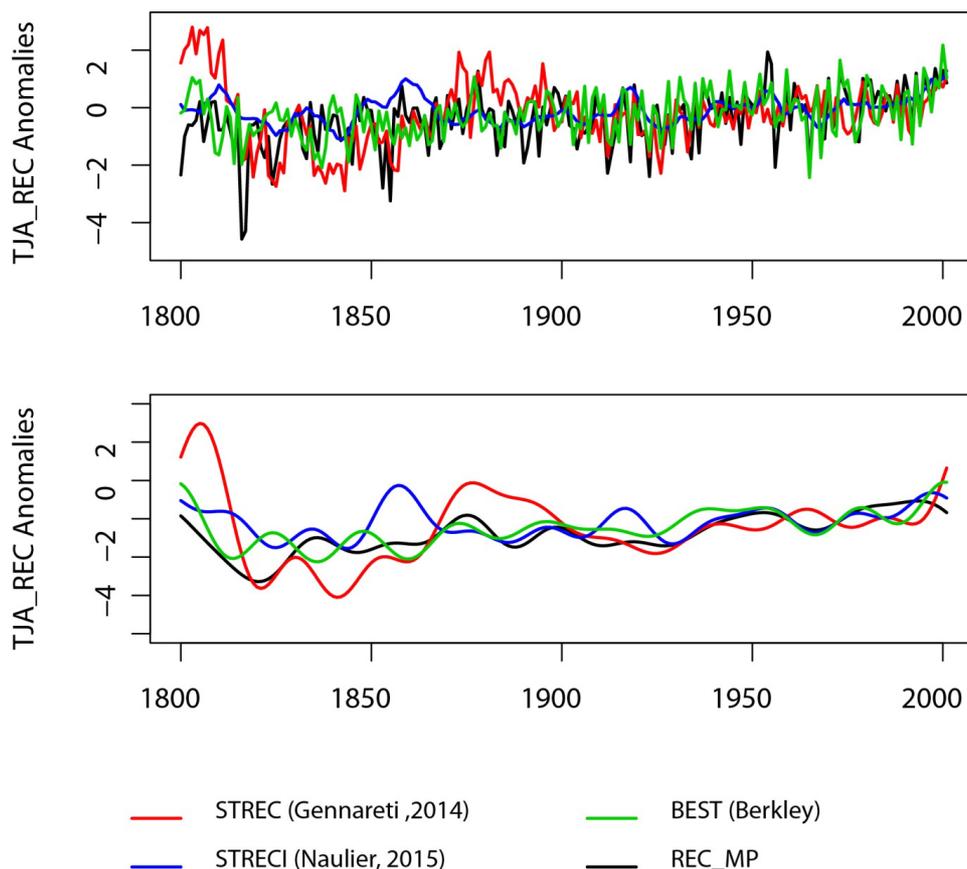


Figure 10 : Comparaisons des différentes reconstructions de température estivale réalisées sur la période 1800-1900

3 - Analyse spatiotemporelle du signal Z(t) issu du modèle hiérarchique Bayésien appliqué aux épaisseur de cernes.

Dans le cadre du projet Archives JJ Boreux a développé un modèle probabiliste Bayésien en vue d'extraire le signal commun d'un ensemble d'indicateurs sélectionnés (appelé signal Z(t)). Ce modèle possède de nombreux avantages, notamment la quantification des incertitudes et la possibilité d'une évaluation de chacune des séries intégrées dans la construction du signal commun. Cette approche faisait partie de l'effort d'innovation méthodologique du projet Archives. Il devait être 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, pouvant être liées à des régimes climatiques différents. La construction de ce modèle a rencontré plus de contraintes et de difficultés que prévu, et dans le cadre du projet Archives il n'a pas pu être exploité au mieux. Dans le cadre du projet ANHYCLI nous avons donc proposé de l'appliquer à l'ensemble des séries d'épaisseurs disponibles, ainsi que d'évaluer son application aux séries de densités. Ces analyses dirigées par Jean Jacques Boreux sont en cours.

Le modèle DENDRO-AR

Ce modèle hiérarchique bayésien (BHM) nommé DENDRO-AR(1) (Boreux et al., 2009) a été développé pour extraire une série caractéristique d'un ensemble de séries d'indices de croissance provenant d'un même site k. Pour éviter de traiter les données manquantes, on a limité l'analyse à leur période commune de longueur T_k (au moins le vingtième siècle). Ce BHM présente trois parties : un modèle de processus, un modèle de régression et un modèle d'échantillonnage soit dans l'ordre :

$$\begin{aligned} \forall t: Z_t &\sim \mathcal{N}\left(0, \frac{1}{1-\rho^2}\right) \\ \forall s, \forall t: h(Z_t | \mu_s, \lambda_s) &= \mu_s + \lambda_s Z_t \\ \forall s, \forall t: TGI_{st+1} &\sim \mathcal{N}(h_{st+1} + \phi_s(TGI_{st} - h_{st}), \sigma_s^2) \end{aligned}$$

Le modèle de régression $h(Z_t | \mu_s, \lambda_s)$ mesure la part de l'indice de croissance due au facteur commun Z_t qu'on n'a pas observée (variable latente ou cachée), mais que nous interprétons comme la résultante de tous les forçages climatiques et édaphiques. En particulier le produit $\lambda_s Z_t$ mesure la part de croissance de l'arbre s due au facteur commun Z_t .

La série commune au site k est donc la suite des variables aléatoires latentes $\mathbf{Z}_k = \{Z_t : t = 1, 2, \dots, T_k\}$. Le paramètre ρ mesure la dépendance temporelle entre deux variables latentes consécutives (processus autorégressif du premier ordre ou AR(1)) et les paramètres ϕ_s mesurent la dépendance spatiale (i.e. les épinettes noires) entre les résidus (AR(1)).

Application aux séries de densités.

L'application aux séries de densité a été essayé dans le cadre de se projet. Elle s'est confronté à plusieurs problèmes d'incompatibilités. En effet le modèle s'applique à un ensemble de séries continues possédant une période commune assez grande, alors que la difficulté des mesures de densité, impliquant de nombreux rejets sur des période variées, conduit à une forte variabilité temporelle de la réplication des données. Le modèle devra être retravaillé pour pouvoir être appliqué à des séries à comportant des lacunes.

Comparaison des sorties de modèle aux Chronologies d'épaisseurs de cernes. Comparaison des sorties du modèles et des chronologies maitresses d'épaisseurs de cernes.

Application aux épaisseurs de cerne

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.

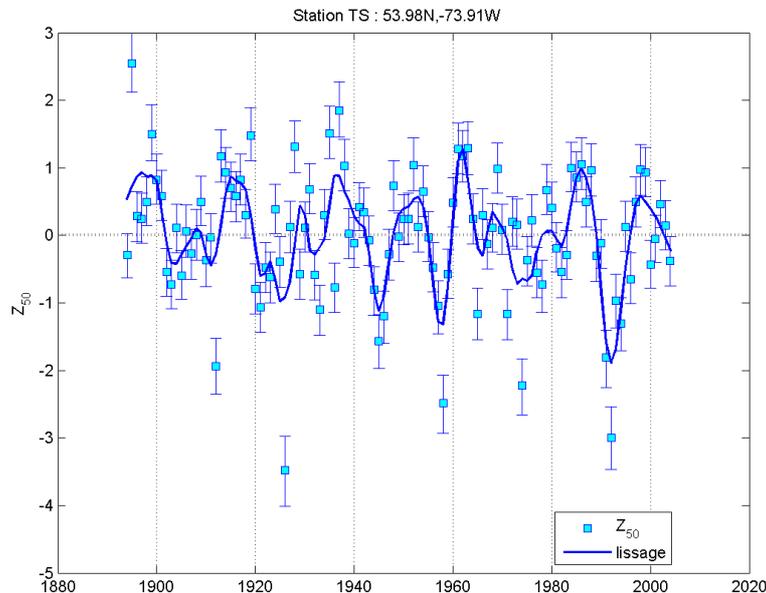


Fig 11: Série temporelle du signal $Z(T)$ obtenue pour le site site TS

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 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). Le dendrogramme obtenu (Fig) présente 4 groupes distincts qui se répartissent de façon structurée dans l'espace. 2 groupes sont composés des populations situées à l'extrême Est (CL4) et à l'extrême Ouest (CL3), et deux autres 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 (en mieux) que celle mise en évidence dans Nicault et al (2015). Ces résultats nous confortant sur la qualité des chronologies $Z(t)$ obtenues nous ont conduit à initier une analyse spatiale plus rigoureuse .

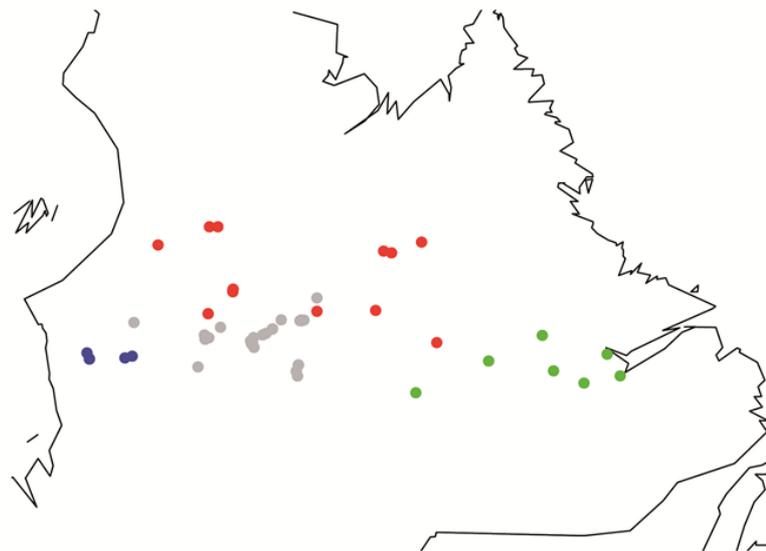
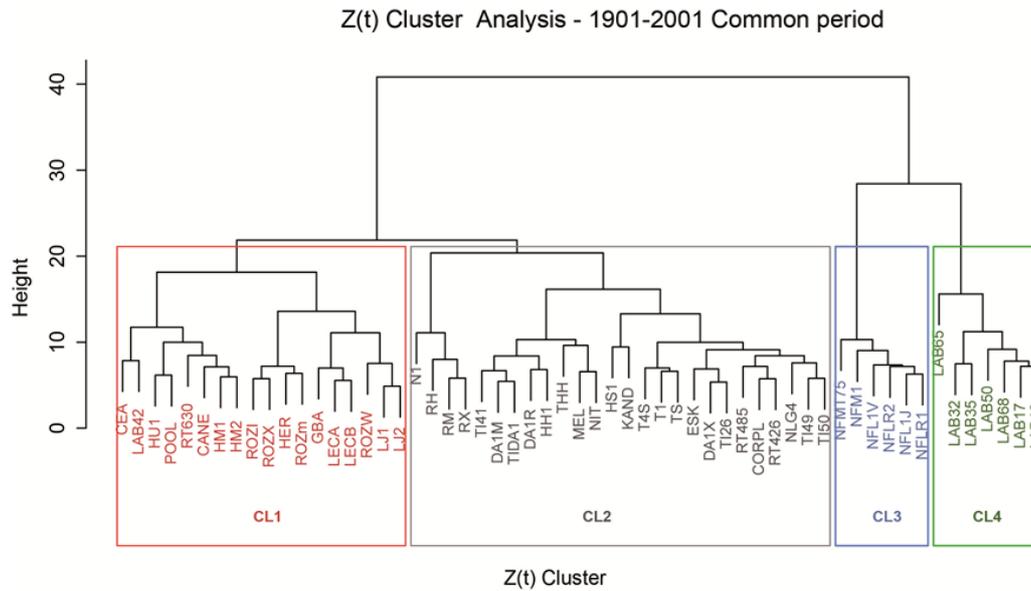


Figure 12 : analyse de classification ascendante hierarchique réalisée sur les série temporelle du signal $Z(t)$ et cartographie des résultats.

Analyse spatiale du Signal $Z(t)$

Ces analyses sont en cours avec la collaboration de dominique Tapsoba (IREQ) et Nicolas Jannée (Géovariance, France). Cependant des premières analyses spatiales ont déjà été réalisées afin de détecter des patrons spatiaux de croissance (donc de régimes climatiques ...) récurrents dans le temps (Boreux & Nicault, 2014). Les analyses ont été réalisées sur deux années aux caractéristiques hydrologiques très différentes, l'année 1979 caractérisée par des niveaux d'eau très haut, et l'année 1985 caractérisée par des niveaux d'eau très bas. La Figure XX montre que pour ces deux années la structure spatiale du signal $Z(t)$ est très différente. L'objectif est de réaliser l'analyse spatiale pour toute 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 à la lueurs des années ou l'on possède des observations et /ou en terme de patron de circulation atmosphérique.

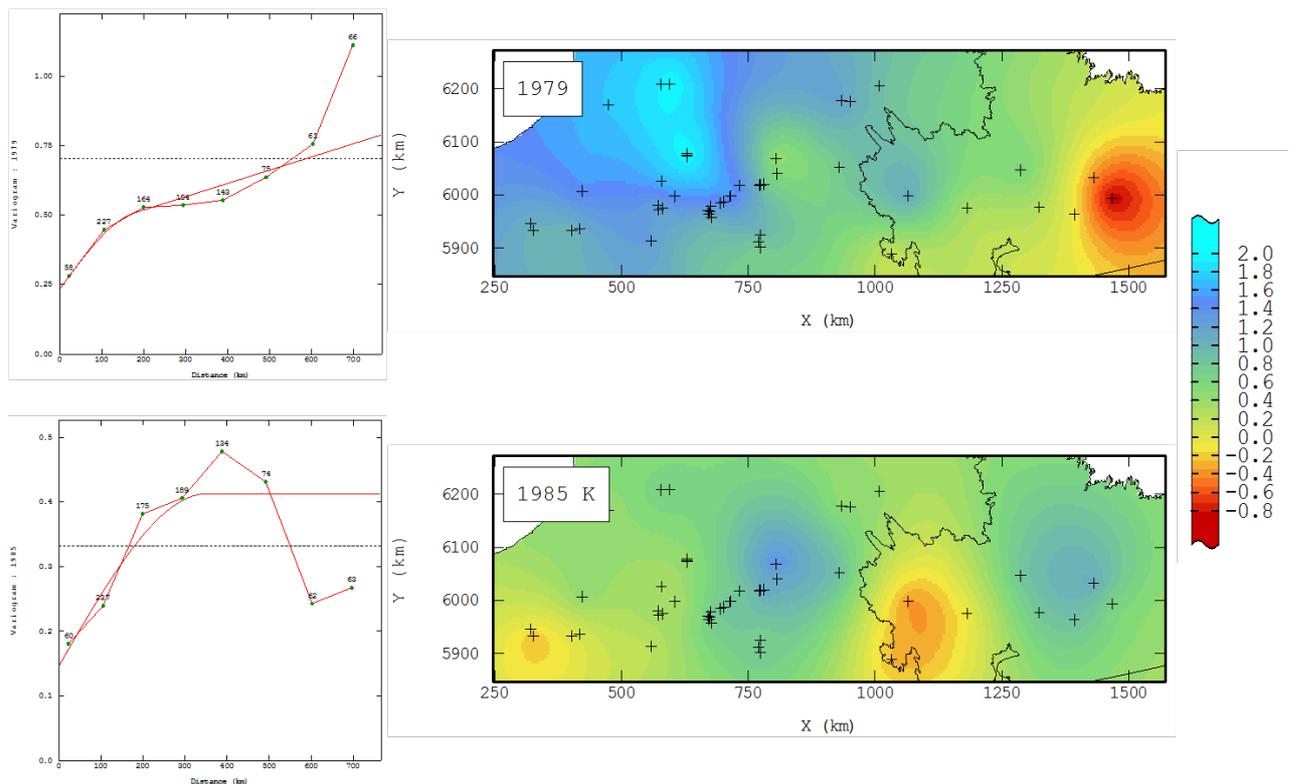


Figure 13: Analyse spatiale du signal $Z(t)$ pour les années 1979 (hautes eaux) et 1985 (basses eaux).

4- References Volet 1

Zang, C., & Biondi, F. (2012) Dendroclimatic calibration in R: The bootRes package for response and correlation function analysis. *Dendrochronologia* doi:10.1016/j.dendro.2012.08.001