

$$P'(t) = \frac{r}{k} P(t)(b - P(t))$$
$$V_{AE,ik} = \beta_1 d h p_{ik}^{\beta_2} H_{ik}^{\beta_3} + \varepsilon_{2,ik}$$



# Sensibilité de la croissance radiale des arbres en forêt boréale en réponse aux sécheresses ponctuelles et à la variabilité interannuelle du bilan hydrique climatique

par Louis Duchesne, Éric Domaine, Alexis Schab et Loïc D'Orangeville

MÉMOIRE DE RECHERCHE FORESTIÈRE N° 185

DIRECTION DE LA RECHERCHE FORESTIÈRE



# **Sensibilité de la croissance radiale des arbres en forêt boréale en réponse aux sécheresses ponctuelles et à la variabilité interannuelle du bilan hydrique climatique**

par Louis Duchesne, ing.f., M. Sc., Éric Domaine, biol., M. Sc., Alexis Schab, ing.f., M. Sc. et Loïc D'Orangeville, Ph. D.

MÉMOIRE DE RECHERCHE FORESTIÈRE N° 185

DIRECTION DE LA RECHERCHE FORESTIÈRE

Auteur de correspondance : [louis.duchesne@mffp.gouv.qc.ca](mailto:louis.duchesne@mffp.gouv.qc.ca)

# Mandat de la DRF

La Direction de la recherche forestière a pour mandat de participer activement à l'orientation de la recherche et à l'amélioration de la pratique forestière au Québec, dans un contexte d'aménagement forestier durable, en réalisant des travaux de recherche scientifique appliquée. Elle acquiert de nouvelles connaissances, du savoir-faire et du matériel biologique et contribue à leur diffusion ou à leur intégration au domaine de la pratique. Elle subventionne aussi des recherches en milieu universitaire, le plus souvent dans des créneaux complémentaires à ses propres travaux.

## Les mémoires de recherche forestière de la DRF

Depuis 1970, chacun des Mémoires de recherche forestière de la DRF est révisé par au moins trois pairs indépendants. Cette publication est produite et diffusée à même les budgets de recherche et de développement, comme autant d'étapes essentielles à la réalisation d'un projet ou d'une expérience. Ce document est disponible dans le site Internet du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs à l'adresse : <https://mffp.gouv.qc.ca/le-ministere/publications/>.

Pour obtenir des renseignements complémentaires, veuillez vous adresser à :

Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs  
Direction de la recherche forestière  
2700, rue Einstein, Québec (Québec)  
Canada, G1P 3W8  
Courriel : [recherche.forestiere@mffp.gouv.qc.ca](mailto:recherche.forestiere@mffp.gouv.qc.ca)  
Internet : [mffp.gouv.qc.ca/les-forets/connaissances/recherche-developpement/](https://mffp.gouv.qc.ca/les-forets/connaissances/recherche-developpement/)

© Gouvernement du Québec

On peut citer ce texte en indiquant la référence. Citation recommandée :

Duchesne, L., É. Domaine, A. Schab et L. D'Orangeville, 2020. *Sensibilité de la croissance radiale des arbres en forêt boréale en réponse aux sécheresses ponctuelles et à la variabilité interannuelle du bilan hydrique climatique*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 185, 70 p.

Toutes les publications produites par la Direction de la recherche forestière du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, sont protégées par les dispositions de la Loi sur le droit d'auteur, les lois, les politiques et les règlements du Canada, ainsi que par des accords internationaux. Il est interdit de reproduire, même partiellement, ces publications sans l'obtention préalable d'une permission écrite.

ISSN : 1183-3912  
ISBN (PDF) : 978-2-550-88076-9  
G.F.D.C. : 422.2 (714)  
L.C. : SD 390.5 396

## Notes biographiques



**Louis Duchesne** est ingénieur forestier depuis 1996 et détient une maîtrise en sciences forestières décernée par l'Université Laval en 1999. Depuis, il occupe un poste de chercheur expert au sein du créneau de recherche sur les écosystèmes et l'environnement à la Direction de la recherche forestière. Il

supervise les activités de suivis environnementaux de bassins versants forestiers menés par le ministère des Forêts, de la Faune, et des Parcs (MFFP) depuis plus de 30 ans. Ses travaux spécialisés dans l'étude de la croissance et de la nutrition des forêts visent principalement à mieux comprendre et à anticiper les impacts des facteurs de stress environnementaux sur la dynamique forestière.



**Éric Domaine** a obtenu un baccalauréat en biologie de l'Université Laval en 2006. Par la suite, il a réalisé une maîtrise en sciences forestières à l'Université Laval en 2009. De 2015 à 2020, il a été professionnel pour le MFFP et a participé à l'évaluation de la vulnérabilité des forêts du Québec aux changements climatiques et à

l'élaboration d'une stratégie d'adaptation des forêts aux changements climatiques.



**Alexis Schab** est ingénieur forestier depuis 2016. Il est titulaire d'une maîtrise en sciences forestières décernée par l'Université Laval en 2020. Depuis 2019, il travaille sur l'optimisation des orientations d'aménagement au sein de la Direction de l'aménagement et de l'environnement forestiers du MFFP.



**Loïc D'Orangeville** est titulaire d'une maîtrise en sciences biologiques de l'Université de Montréal et d'un doctorat en sciences des ressources naturelles de l'Université McGill. Il est professeur adjoint à la Faculté de foresterie et de gestion de l'environnement de l'Université du Nouveau-Brunswick depuis 2018. Ses travaux

portent sur les impacts des changements climatiques sur la croissance forestière.



## Résumé

En réponse à un mandat confié par le Service des orientations d'aménagement de la Direction de l'aménagement et de l'environnement forestiers du Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP), nous avons évalué la sensibilité des arbres aux sécheresses ponctuelles et à la variabilité inter-annuelle du bilan hydrique climatique. L'analyse a porté sur les mesures de cernes de croissance de près de 70 000 arbres-études échantillonnés dans le cadre du programme ministériel d'inventaire écoforestier du Québec méridional. La réduction relative de croissance lors de déficits hydriques historiques (1961-2000) a servi à déterminer la sensibilité des arbres à la sécheresse. Les analyses révèlent que la sensibilité des arbres varie selon l'essence, les conditions climatiques et le milieu physique de la station. Les résultats montrent que le pin rouge (*Pinus resinosa* Aiton), le pin blanc (*Pinus strobus* Linnaeus), le peuplier à grandes dents (*Populus grandidentata* Michaux) et le thuya occidental (*Thuja occidentalis* Linnaeus) sont les essences les plus sensibles à la sécheresse. Par contraste, l'épinette noire (*Picea mariana* (Miller) Britton, Sterns & Poggenburgh), le sapin baumier (*Abies balsamea* (Linnaeus) Miller), le bouleau à papier (*Betula papyrifera* Marshall) et l'épinette rouge (*Picea rubens* Sargent) sont les moins sensibles. Chez plusieurs essences, les sécheresses peuvent

être défavorables dans les milieux qui reçoivent moins de précipitations et dont le bilan hydrique climatique est plus faible; en même temps, elles peuvent être favorables dans des milieux qui reçoivent plus de précipitations et dont le bilan hydrique est plus élevé. De manière générale, les sécheresses sont associées à des croissances plus faibles que la normale dans les territoires où la température annuelle moyenne est élevée. En revanche, dans les territoires caractérisés par des températures annuelles moyennes plus faibles, les sécheresses sont moins sévères et peuvent même être associées à des croissances supérieures à la normale. Pour certaines essences, les arbres sont plus sensibles à la sécheresse sur les sols minces ou très pierreux (milieu physique 0) ainsi que sur les sols de texture grossière et dont la classe de drainage synthèse est xérique ou mésique (milieu physique 1). La sensibilité des arbres a été compilée par essence et par milieu physique pour chaque territoire des guides de reconnaissance des types écologiques produits par le MFFP. Ces connaissances peuvent contribuer à l'évaluation locale de la vulnérabilité des essences forestières aux changements climatiques et à l'élaboration de stratégies d'adaptation visant à réduire les impacts des changements climatiques sur la productivité des forêts.

Mots-clés : arbres, croissance, sécheresse, sensibilité, SPEI

## Abstract

To fulfill a mandate received from the Service des orientations d'aménagement of the Direction de l'aménagement et de l'environnement forestiers of Quebec's Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP), we assessed tree sensitivity to sporadic droughts and to interannual variability of the climatic water balance. For this analysis, we used growth rings measurements from nearly 70,000 study trees sampled as part of the department's ecological forest inventory program for southern Quebec. The relative growth reduction during past water deficits (1961–2000) served to determine tree drought sensitivity. Analyses reveal that this sensitivity varies according to species, climatic conditions and the station's physical environment. Results show that the species most sensitive to drought are red pine (*Pinus resinosa* Aiton), eastern white pine (*Pinus strobus* Linnaeus), large-toothed aspen (*Populus grandidentata* Michaux) and eastern white cedar (*Thuja occidentalis* Linnaeus). In contrast, black spruce (*Picea mariana* (Miller) Britton, Sterns & Poggenburgh), balsam fir (*Abies balsamea* (Linnaeus) Miller), paper birch (*Betula papyrifera* Marshall) and red spruce (*Picea*

*rubens* Sargent) are the least sensitive. For several species, droughts can be unfavorable in environments receiving less precipitation and with a lower climatic water balance. At the same time, they can be favorable in environments receiving more precipitation and with a higher water balance. Generally, droughts are associated with below-normal growth in areas where the average annual temperature is high. Conversely, in areas characterized by lower average annual temperatures, droughts are less severe and may even be associated with above-normal growth. For some species, trees are more sensitive to drought when they grow on shallow or very stony soils (physical environment 0) as well as on coarse-textured soils in the xeric or mesic synthetic drainage class (physical environment 1). Tree sensitivity was compiled by species and by physical environment for each territory considered in the ecological type recognition guides produced by the MFFP. This knowledge can facilitate the local assessment of tree species vulnerability to climate change and support the development of adaptation strategies aimed at reducing the impacts of climate change on forest productivity.

*Keywords: drought, growth, sensitivity, SPEI, trees*

# Table des matières

<b>Résumé</b> .....	v
<b>Abstract</b> .....	vi
<b>Liste des tableaux</b> .....	ix
<b>Liste des figures</b> .....	x
<b>Liste des annexes</b> .....	xi
<b>Remerciements</b> .....	xiii
<b>Introduction</b> .....	1
<b>Chapitre 1 – Matériel et méthodes</b> .....	3
1.1 Date de disparition du couvert nival .....	3
1.2 Indices de sécheresses météorologiques .....	3
1.3 Variations interannuelles de la croissance des arbres .....	4
1.4 Analyse de la sensibilité de la croissance des arbres à la sécheresse .....	5
<b>Chapitre 2 – Résultats et discussion</b> .....	7
2.1 Indices de sécheresses météorologiques .....	7
2.2 Gradients climatiques .....	7
2.3 Variations interannuelles de la croissance des arbres .....	9
2.4 Sensibilité des arbres à la sécheresse .....	12
2.4.1 Sensibilité moyenne des essences .....	12
2.4.2 Influence du climat local et du milieu physique .....	13
2.5 Limites de l'analyse .....	16
<b>Conclusion</b> .....	23
<b>Références bibliographiques</b> .....	25
<b>Annexes</b> .....	29



# Liste des tableaux

<b>Tableau 1.</b> Échelle d'intensité des sécheresses proposée par Wang <i>et al.</i> (2019) selon la valeur de l'indice standardisé de précipitations et d'évaporation (SPEI) .....	4
<b>Tableau 2.</b> Fréquence des sécheresses estivales et mesures de dispersion de l'indice de sécheresse (SPEI <sub>3 mois</sub> , juin à août) par sous-domaine bioclimatique, au cours de la période 1950-2019 .....	7
<b>Tableau 3.</b> Statistiques descriptives des indices de croissance annuels retenus pour l'analyse .....	10
<b>Tableau 4.</b> Sensibilité des essences à la sécheresse exprimée par les variations de croissance moyennes associées aux sécheresses (SPEI <sub>1 mois</sub> < -1, % ± 95 % IC) et les coefficients de corrélation de Pearson moyens (± 95 % IC) entre les indices de croissance et les variations du bilan hydrique climatique mensuel standardisé (SPEI <sub>1 mois</sub> ) pour la période 1961-2000 .....	12

# Liste des figures

<b>Figure 1.</b>	Jour de l'année moyen correspondant à la disparition du couvert nival pour la période de 1999 à 2018 .....	3
<b>Figure 2.</b>	Indices de sécheresses moyens pour les mois de juin, juillet et août (SPEI <sub>3 mois</sub> : <i>Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index</i> ) par sous-domaine bioclimatique, pour la période de 1950 à 2019 .....	8
<b>Figure 3.</b>	Température (T), précipitations (P), évapotranspiration potentielle (ETP) et bilan hydrique climatique (B) moyens pour la saison estivale (juin, juillet et août) au cours de la période de 1961 à 2000 .....	9
<b>Figure 4.</b>	Répartition des arbres retenus pour l'analyse .....	10
<b>Figure 5.</b>	Indices de croissance des arbres individuels retenus pour l'analyse .....	11
<b>Figure 6.</b>	Variations de croissance moyennes (pour chaque arbre individuel, %) associées aux sécheresses du mois de mai (SPEI <sub>1 mois</sub> < -1) survenues au cours de la période de 1961 à 2000 .....	14
<b>Figure 7.</b>	Coefficients de corrélation de Pearson (pour chaque arbre individuel) entre la variation interannuelle de l'indice de croissance et celle de la disponibilité en eau au mois de mai (SPEI <sub>1 mois</sub> ) au cours de la période de 1961 à 2000 .....	15
<b>Figure 8.</b>	Variations de croissance moyennes (pour chaque arbre individuel, %) associées aux sécheresses du mois de juin (SPEI <sub>1 mois</sub> < -1) survenues au cours de la période de 1961 à 2000 .....	16
<b>Figure 9.</b>	Coefficients de corrélation de Pearson (pour chaque arbre individuel) entre la variation interannuelle de l'indice de croissance et celle de la disponibilité en eau au mois de juin (SPEI <sub>1 mois</sub> ) au cours de la période de 1961 à 2000 .....	17
<b>Figure 10.</b>	Variations de croissance moyennes (pour chaque arbre individuel, %) associées aux sécheresses du mois de juillet (SPEI <sub>1 mois</sub> < -1) survenues au cours de la période de 1961 à 2000 .....	18
<b>Figure 11.</b>	Coefficients de corrélation de Pearson (pour chaque arbre individuel) entre la variation interannuelle de l'indice de croissance et celle de la disponibilité en eau au mois de juillet (SPEI <sub>1 mois</sub> ) au cours de la période de 1961 à 2000 .....	19
<b>Figure 12.</b>	Variations de croissance moyennes (pour chaque arbre individuel, %) associées aux sécheresses du mois d'août (SPEI <sub>1 mois</sub> < -1) survenues au cours de la période de 1961 à 2000 .....	20
<b>Figure 13.</b>	Coefficients de corrélation de Pearson (pour chaque arbre individuel) entre la variation interannuelle de l'indice de croissance et celle de la disponibilité en eau au mois d'août (SPEI <sub>1 mois</sub> ) au cours de la période de 1961 à 2000 .....	21

# Liste des annexes

<b>Annexe A.</b> Variations de croissance moyennes des essences (%) associées aux sécheresses ( $SPEI_{1\text{ mois}} < -1$ ) survenues au cours de la période de 1961 à 2000, et coefficients de corrélations moyens entre les indices de sécheresses mensuels ( $SPEI_{1\text{ mois}}$ ) et les indices de croissance des arbres individuels, en fonction des normales climatiques (1961-2000), du milieu physique et du domaine bioclimatique qui caractérisent les stations .....	29
<b>Annexe B.</b> Variations de croissance moyennes des arbres (%) associées aux sécheresses des mois de mai à août ( $SPEI_{1\text{ mois}} < -1$ ) survenues au cours de la période de 1961 à 2000, et coefficients de corrélation moyens entre les indices de croissance des arbres et les indices du bilan hydrique ( $SPEI_{1\text{ mois}}$ ) des mois de mai à août au cours de cette même période .....	54



# Remerciements

Nous tenons à remercier le personnel de la Direction des Inventaires forestiers du MFFP qui supervise les programmes et diffuse les données d'inventaires forestiers, ainsi que tous les entrepreneurs qui ont effectué les mesures des placettes-échantillons au fil des ans. De plus, nous remercions M<sup>me</sup> Marie-Claude Lambert pour la génération des données climatiques à l'aide du logiciel BioSIM, ainsi que M. Jean Noël

pour sa participation au traitement des données cartographiques. Nous remercions aussi M<sup>me</sup> Marie-Claude Lambert pour son travail comme responsable de la révision scientifique et les réviseurs anonymes qui ont commenté le manuscrit. Finalement, nous remercions M. Alexandre Dallaire-Théroux, M<sup>me</sup> Denise Tousignant et M<sup>me</sup> Maripierre Jalbert pour l'édition, la mise en page et la conception graphique de ce document.



# Introduction

Au cours du dernier siècle, l'augmentation de la concentration de CO<sub>2</sub> atmosphérique et le réchauffement de la température de l'air qui en découle ont bouleversé plusieurs aspects du système terrestre. En plus de l'activité humaine, les écosystèmes forestiers jouent un rôle important dans le bilan du CO<sub>2</sub> atmosphérique. À l'échelle mondiale, la quantité de carbone (C) emmagasinée dans les sols et la végétation des écosystèmes forestiers est approximativement équivalente à celle contenue dans l'atmosphère. Depuis la fin du 20<sup>e</sup> siècle, les écosystèmes forestiers ont capté plus de C qu'ils en ont émis et ont séquestré presque autant de C que les océans, soit environ le tiers des émissions anthropiques de C (Ballantyne *et al.* 2012, Pan *et al.* 2013). La séquestration de C accrue par les écosystèmes forestiers a ralenti l'augmentation du CO<sub>2</sub> atmosphérique causée par l'activité humaine. Elle résulte apparemment des effets positifs de l'augmentation du CO<sub>2</sub> atmosphérique et de la température de l'air sur la croissance des arbres (Graven *et al.* 2013, Forkel *et al.* 2016, Nemani *et al.* 2003, Zhu *et al.* 2016). L'augmentation anticipée du CO<sub>2</sub> atmosphérique et de la température de l'air pourrait donc continuer de stimuler la croissance des arbres dans l'avenir, particulièrement dans des environnements nordiques où les températures sont limitantes (Boisvenue et Running 2006, Sitch *et al.* 2008).

Toutefois, certains appréhendent que l'augmentation des températures engendre aussi une augmentation de la fréquence, de la durée et de l'intensité des sécheresses. Celles-ci pourraient à leur tour affecter la croissance et la mortalité des arbres ainsi que la productivité des forêts et la captation du C par les écosystèmes forestiers (Allen *et al.* 2010, Bobbink *et al.* 2010, Brodrigg *et al.* 2020, Ma *et al.* 2012, Peng *et al.* 2011). La croissance et la mortalité des arbres semblent cependant moins influencées par les sécheresses dans la forêt boréale du Québec que dans celle de l'ouest du Canada, qui est caractérisée par un climat nettement plus aride (D'Orangeville *et al.* 2016, Ma *et al.* 2012, Peng *et al.* 2011). Au Québec, la croissance de l'épinette noire (EPN, *Picea mariana* (Miller) Britton, Sterns & Poggenburgh) dans la zone boréale semble être favorisée par des températures élevées et des précipitations peu abondantes (D'Orangeville *et al.* 2016). Il en est de même pour la croissance annuelle du bouleau à papier (BOP, *Betula papyrifera* Marshall), du peuplier faux-tremble (PET, *Populus tremuloides* Michaux) et du pin gris

(PIG, *Pinus banksiana* Lambert) dans les milieux nordiques, qui profitent tous des températures hivernales et printanières plus élevées que la normale. En revanche, la croissance de ces essences est défavorisée lorsque ces mêmes conditions prévalent dans le sud de la province (Huang *et al.* 2010). Dans la forêt tempérée du nord-est de l'Amérique du Nord, l'impact des sécheresses sur la croissance radiale des arbres dépend principalement du moment où celle-ci survient au cours de la saison de croissance et de la demande atmosphérique locale en eau (D'Orangeville *et al.* 2018b). Les analyses semblent indiquer que les arbres de la forêt tempérée du Québec sont moins vulnérables à la sécheresse que ceux de la forêt tempérée dans des territoires plus au sud, caractérisés par des climats plus chauds où la demande atmosphérique en eau est plus forte (D'Orangeville *et al.* 2018b). Cette variabilité de la réponse des arbres aux variations interannuelles du climat s'observe aussi à l'échelle mondiale, puisque la réponse des arbres au climat varie principalement selon les gradients latitudinal et altitudinal de température (Babst *et al.* 2019). Les arbres croissant dans des environnements chauds sont généralement plus contraints par la disponibilité en eau que par la température. En revanche, dans des environnements plus froids, la température représente une contrainte plus grande que la disponibilité en eau. Par ailleurs, l'augmentation anticipée des températures et celle de la demande atmosphérique en eau qui en découle pourraient accroître la vulnérabilité des arbres à la sécheresse (D'Orangeville *et al.* 2018b). À l'échelle mondiale, il a d'ailleurs été démontré que la superficie des forêts dont la croissance est limitée par la température a diminué au cours du dernier siècle, et que de plus en plus de forêts sont limitées par la demande atmosphérique en eau (Babst *et al.* 2019).

Malgré ces nouvelles connaissances, la vulnérabilité des arbres à la sécheresse est méconnue pour plusieurs essences de la forêt boréale québécoise. Il importe de quantifier cette vulnérabilité afin de pouvoir anticiper précisément les effets des changements climatiques sur la croissance des arbres. De telles connaissances sont nécessaires à l'élaboration de stratégies d'adaptation visant à réduire les impacts des changements climatiques sur la productivité des forêts et leur apport aux grands cycles écologiques planétaires. À cet égard, le ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP) a entrepris d'évaluer la vulnérabilité des

essences forestières aux changements climatiques afin de déterminer les risques et les possibilités de gestion et d'aménagement des forêts. Cette évaluation tient compte d'une série d'indicateurs, y compris la vulnérabilité à la sécheresse, qui permettront ultimement de classer les essences en fonction de leur vulnérabilité aux changements climatiques. C'est dans ce contexte que le Service des orientations d'aménagement de la Direction de l'aménagement et de l'environnement forestiers du MFFP nous a mandatés pour évaluer la vulnérabilité des arbres de la forêt boréale à la sécheresse.

Le présent mémoire présente nos travaux visant à quantifier la sensibilité de la croissance radiale des principales essences forestières de la forêt boréale québécoise aux sécheresses ponctuelles (c.-à-d. mensuelles) et à la disponibilité en eau (c.-à-d. le bilan hydrique climatique). Nous avons utilisé la réduction relative de croissance radiale lors de déficits hydriques historiques (1961-2000) pour déterminer la sensibilité des arbres à la sécheresse. Nous visons aussi à explorer l'influence des conditions environnementales sur la sensibilité des arbres aux sécheresses. Pour y parvenir, nous avons étudié les variations interannuelles de la croissance historique de plusieurs milliers d'arbres provenant des réseaux d'inventaires provinciaux en relation avec les variations interannuelles des conditions climatiques historiques.

# Chapitre 1 – Matériel et méthodes

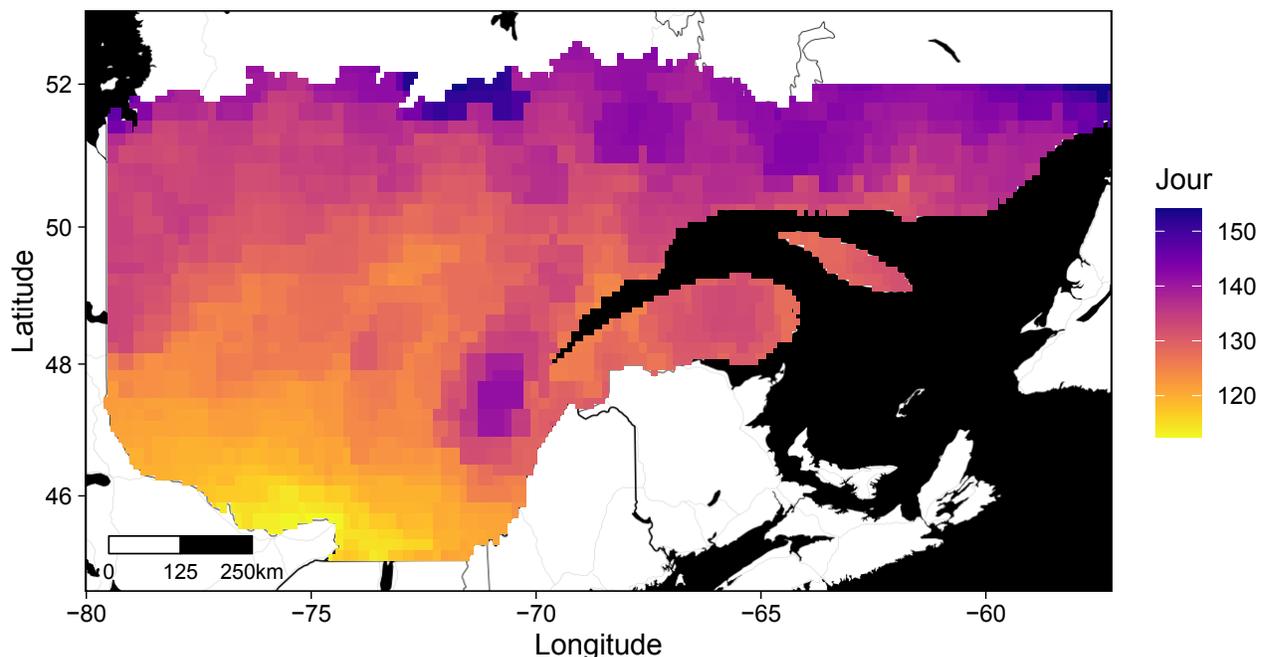
## 1.1 Date de disparition du couvert nival

Les données sur le couvert nival journalier compilées par le Centre météorologique canadien (Brown et Brasnett 2010) ont servi à documenter la date moyenne à laquelle le couvert nival disparaît sur le territoire à l'étude pour la période 1999-2018, à partir des données prises à chaque point d'un quadrillage de 5 minutes de latitude par 5 minutes de longitude. Nous avons ainsi déterminé la saison pendant laquelle les arbres sont potentiellement susceptibles à la sécheresse.

En moyenne, au cours de la période 1999-2018, la date de disparition du couvert nival a varié du jour 112 (21-22 avril), dans le sud de la province, au jour 154 (2-3 juin), à la limite nordique de la forêt aménagée (figure 1). La variabilité spatiale associée à la date de disparition du couvert nival sur le territoire est apparemment influencée à la fois par le gradient latitudinal de température et le gradient longitudinal des précipitations. La neige disparaît plus tôt là où les températures sont plus chaudes et les précipitations, moins abondantes. Puisque tout le territoire est généralement couvert de neige en avril, nous n'avons considéré que les mois de mai à août pour l'analyse de l'influence des sécheresses sur la croissance des arbres.

## 1.2 Indices de sécheresses météorologiques

Une sécheresse est un écart par rapport au climat moyen régional qui correspond à une pénurie d'eau résultant de précipitations anormalement faibles, de températures anormalement chaudes, ou d'une combinaison des deux (Clark *et al.* 2016). Pour un site donné, la disponibilité en eau peut être qualifiée en utilisant les valeurs absolues ou relatives de la quantité de précipitations, du bilan hydrique climatique ( $B$ , soit la différence entre les précipitations et l'évapotranspiration potentielle :  $B = P - ETP$ ) ou du contenu en eau du sol. Les valeurs absolues peuvent servir à caractériser la disponibilité en eau dans le temps et dans l'espace. Les mesures relatives, quant à elles, expriment l'écart de la disponibilité en eau par rapport aux conditions moyennes du site. Par exemple, un site qui reçoit 50 % moins de précipitations qu'un autre est plus sec de manière absolue. Par contre, si les deux sites enregistrent une baisse de 50 % des précipitations pour une année particulière, les mesures relatives de la disponibilité en eau seraient identiques, même si un site est nettement plus sec que l'autre. La distribution spatiale des essences dépend notamment de leur adaptation aux conditions climatiques locales et aux caractéristiques des sites. Les arbres tendent



**Figure 1.** Jour de l'année moyen correspondant à la disparition du couvert nival pour la période de 1999 à 2018. Les données sont diffusées par le Centre météorologique canadien (Brown et Brasnett 2010). La disparition du couvert nival varie, en moyenne, du jour 112 (21-22 avril) dans le sud de la province au jour 154 (2-3 juin) à la limite nordique du territoire.

aussi à ajuster leur morphologie (p. ex. : biomasse aérienne, profondeur d'enracinement) en fonction des conditions hydriques locales (Fan *et al.* 2017, Jump *et al.* 2017). Ainsi, les mesures relatives de la disponibilité en eau sont plus appropriées pour qualifier les conditions climatiques qui divergent des conditions climatiques moyennes auxquelles les espèces et les individus sont localement adaptés. Les mesures relatives sont aussi plus appropriées pour qualifier les sécheresses qui, par définition, correspondent à un écart par rapport au climat moyen régional (Clark *et al.* 2016). De plus, elles sont plus appropriées pour comparer la sévérité des sécheresses pour des sites caractérisés par des climats distincts (Vicente-Serrano *et al.* 2010). À noter que D'Orangeville *et al.* (2018a) ont récemment documenté l'influence des conditions climatiques locales (incluant l'aridité) sur la croissance absolue des arbres pour les principales essences de la forêt boréale québécoise. L'analyse de l'influence de ces conditions sur la croissance ou la répartition des arbres nous renseigne sur les contraintes environnementales qui ont influencé la performance des essences sur le territoire. En comparaison, l'analyse de la sensibilité des arbres aux événements climatiques extrêmes comme les sécheresses nous informe sur la vulnérabilité des essences à ces événements ponctuels.

Les mesures relatives de sécheresse incluent notamment l'indice de sévérité de sécheresse de Palmer (*Palmer Drought Severity Index*, PDSI), l'indice standardisé de précipitations (*Standardized Precipitation Index*, SPI) et l'indice standardisé de précipitations et d'évaporation (*Standardized Precipitation Evapotranspiration Index*, SPEI). Nous avons utilisé le SPEI pour caractériser les sécheresses historiques, car cet indice a l'avantage de pouvoir être calculé à différentes échelles de temps contrairement au PDSI. De plus, le SPEI tient compte de la température de l'air, contrairement au SPI (Vicente-Serrano *et al.* 2010). Le SPEI correspond aux valeurs standardisées du bilan hydrique

climatique (Vicente-Serrano *et al.* 2010). L'intensité des sécheresses peut-être définie selon les valeurs de SPEI (Wang *et al.* 2019, tableau 1).

Nous avons estimé la température (T), les précipitations (P), l'évapotranspiration potentielle (ETP; en utilisant la méthode de calcul de Hargreaves et Samani [1985]), le bilan hydrique climatique (B) et les indices de sécheresse (SPEI<sub>1 mois</sub> et SPEI<sub>3 mois</sub>) mensuels pour chaque placette-échantillon à l'aide du logiciel BioSIM (Régnière 1996, Vicente-Serrano *et al.* 2010). Celui-ci permet de reconstituer les conditions climatiques à un lieu donné à partir d'un réseau d'environ 350 stations météorologiques réparties majoritairement dans le sud de la province (Régnière 1996). Les variables climatiques ont été générées pour chaque placette-échantillon à partir des 4 stations météorologiques les plus proches. Nous avons aussi estimé les variables climatiques mensuelles pour l'ensemble du territoire en générant des données à chaque point d'un quadrillage de 5 minutes de latitude par 5 minutes de longitude. À partir de ces dernières données, nous avons d'abord tracé le portrait des sécheresses estivales historiques (SPEI<sub>3 mois</sub>; juin, juillet, août) par sous-domaine bioclimatique<sup>1</sup> au cours de la période 1950-2019 afin d'illustrer la variabilité spatiale et temporelle des sécheresses sur le territoire. Les SPEI<sub>1 mois</sub> de chaque placette-échantillon pour les mois de mai, juin, juillet et août ont ensuite servi à analyser l'influence potentielle des sécheresses sur la variabilité interannuelle de la croissance des arbres au cours de la période 1961-2000.

### 1.3 Variations interannuelles de la croissance des arbres

Nous avons documenté les variations interannuelles historiques de la croissance des arbres à l'aide des mesures de la largeur des cernes annuels de croissance provenant des carottes entières prélevées sur les arbres-études dans les placettes-échantillons des réseaux de placettes temporaires et permanentes. En avril 2018, cette base de données incluait plus de 23 millions de mesures de cernes provenant de plus de 332 000 arbres répartis dans plus de 117 000 peuplements. Les critères de sélection des arbres-études dans les placettes-échantillons varient selon les réseaux d'inventaires (Duchesne *et al.* 2017, MFFP 2016a, 2016b). Des carottes entières sont prélevées uniquement pour les résineux, le bouleau à papier et les peupliers, totalisant 20 essences. Pour les feuillus d'essences

**Tableau 1.** Échelle d'intensité des sécheresses proposée par Wang *et al.* (2019) selon la valeur de l'indice standardisé de précipitations et d'évaporation (SPEI).

Valeur du SPEI	Intensité de la sécheresse
$-0,5 < \text{SPEI}$	Nulle
$-1,0 < \text{SPEI} \leq -0,5$	Légère
$-1,5 < \text{SPEI} \leq -1,0$	Modérée
$-2,0 < \text{SPEI} \leq -1,5$	Sévère
$\text{SPEI} \leq -2,0$	Extrême

<sup>1</sup> Une carte illustrant les domaines bioclimatiques du Québec est disponible à l'adresse : <https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/zone-vegetation-2003.pdf>.

commerciales autres que le bouleau à papier et les peupliers, seule une section de 6 cm de longueur est prélevée (MFFP 2016a, 2016b). Nous avons analysé seulement les 12 essences les plus abondantes parmi les 20 pour lesquelles des carottes entières sont prélevées, soit l'épinette noire, le sapin baumier (SAB, *Abies balsamea* (Linnaeus) Miller), l'épinette blanche (EPB, *Picea glauca* (Moench) Voss), le thuya occidental (THO, *Thuja occidentalis* Linnaeus), le bouleau à papier, le peuplier faux-tremble, le pin gris, le pin blanc (PIB, *Pinus strobus* Linnaeus), l'épinette rouge (EPR, *Picea rubens* Sargent), la pruche du Canada (PRU, *Tsuga canadensis* (Linnaeus) Carrière), le peuplier à grandes dents (PEG, *Populus grandidentata* Michaux) et le pin rouge (PIR, *Pinus resinosa* Aiton). Les autres essences n'ont pas été retenues pour l'analyse en raison du faible nombre d'échantillons. L'analyse a été réalisée sur une période de 40 ans (1961-2000) de manière à maximiser le nombre d'arbres disponibles sur une période commune à tous les arbres.

L'échantillonnage de carottes dans le cadre des inventaires forestiers vise principalement à déterminer l'âge des arbres pour dériver un indice de qualité de station. En général, il y a moins de répétitions à l'échelle de la placette-échantillon que dans un échantillonnage dendrochronologique classique, et les mesures ne font pas l'objet d'une validation permettant d'assurer la justesse de la datation des cernes de croissance. Des cernes mal datés dans la base de données peuvent miner le signal de la variabilité interannuelle de la croissance des arbres. Cela peut compromettre le potentiel de ces données pour toute étude nécessitant la connaissance de l'année exacte associée à la mesure de croissance.

Afin de pallier ce problème, nous avons suivi une procédure de validation *a posteriori* pour distinguer les carottes qui partagent un signal commun de celles dont les mesures sont mal datées (Duchesne et al. 2017). Les données ont d'abord été standardisées afin d'éliminer le signal de basse fréquence pour ne conserver que le signal à court terme des séries chronologiques. Pour ce faire, nous avons paramétré un modèle de type *spline*, dans lequel 50 % de l'amplitude du signal est éliminé pour une fenêtre de 10 ans. Chaque mesure annuelle de largeur des cernes a ensuite été divisée par la valeur correspondante du modèle pour en dériver un indice de croissance. Les séries stationnaires obtenues, sans tendance, correspondent aux variations interannuelles de la croissance des arbres (indices de croissance).

Nous avons ensuite calculé des coefficients de corrélation de Spearman entre chaque série

individuelle et la chronologie moyenne de l'ensemble des séries de l'essence dans la région écologique<sup>2</sup> correspondante. Les séries individuelles positivement corrélées à la chronologie moyenne ( $p < 0,01$ ) ont été conservées pour générer de nouvelles chronologies moyennes « raffinées » par essence et par région écologique. De nouveaux coefficients de corrélation ont été calculés entre chaque série individuelle et ces chronologies « raffinées ». Une fois de plus, nous n'avons retenu que les séries positivement corrélées ( $p < 0,01$ ) pour recomposer de nouvelles chronologies « raffinées ». Les séries composant les chronologies régionales ont été comparées une à une à leur chronologie respective, pour ne retenir que les séries positivement corrélées à cette dernière. Nous avons répété cette étape jusqu'à ce que toutes les séries composant la chronologie régionale soient positivement corrélées à celle-ci. Ultimement, les seules séries conservées étaient celles formant une chronologie régionale ayant un signal exprimé dans la population supérieur à 0,85 (*expressed population signal*, EPS). Cette statistique, qui quantifie la robustesse d'une chronologie, est intimement liée au nombre d'arbres qui la compose (Mérian et Lebourgeois 2011, Wigley et al. 1984). Pour une essence et une région écologique donnée, lorsque les indices de croissance étaient éloignés des quartiles d'une distance supérieure à 3 fois l'intervalle interquartile, la valeur a été considérée comme aberrante, et la série correspondante a été rejetée.

L'algorithme utilisé pour standardiser les données génère des séries dont la moyenne par arbre est près de 1, sans toutefois y être équivalent (moyenne des indices moyens par arbres  $\pm 1$  écart-type :  $0,9916 \pm 0,0072$ ). Les indices ont donc été corrigés par l'ajout ou la soustraction d'une constante correspondant à la différence entre la moyenne des indices de chaque série et la valeur de 1. Ainsi, la moyenne des indices de chaque arbre équivaut à 1.

#### 1.4 Analyse de la sensibilité de la croissance des arbres à la sécheresse

Rappelons que la sensibilité des arbres à la sécheresse est exprimée ici comme leur réduction de croissance lors de déficits hydriques mensuels historiques au cours de la période 1961-2000 (Lloret et al. 2011). Les analyses dendroclimatologiques reposent généralement sur la formation de séries maîtresses compilées à l'échelle du peuplement ou de la région. Ces séries maîtresses,

<sup>2</sup> Une carte illustrant les régions écologiques du Québec méridional est disponible à l'adresse : <https://mffp.gouv.qc.ca/forets/inventaire/pdf/carte-regions-ecologiques.pdf>.

qui correspondent à la moyenne des indices de croissance de la population étudiée, visent à filtrer le bruit associé aux arbres individuels de manière à mettre en évidence les signaux régionaux tel que le climat. Ici, le nombre d'arbres-étude analysés dans chacune des placettes-échantillons est insuffisant pour générer des séries maîtresses à l'échelle des peuplements. De plus, la formation de séries maîtresses à l'échelle régionale ne permet pas de documenter l'influence de facteurs locaux (caractéristiques des stations, facteurs physiologiques, compétition, etc.) sur la sensibilité des arbres au climat. Considérant le grand nombre d'échantillons disponibles, nous avons plutôt opté pour une approche d'analyse par arbre individuel pour documenter la sensibilité des arbres à la sécheresse et explorer les principaux facteurs qui peuvent l'influencer (Trouillier *et al.* 2018).

Deux approches complémentaires nous ont permis de documenter la sensibilité des arbres à la sécheresse. Premièrement, nous avons compilé la moyenne des indices de croissances des arbres associés aux années caractérisées par des sécheresses mensuelles modérées à extrêmes ( $\text{SPEI}_{1 \text{ mois}} < -1$ ). Exprimées en pourcentage, ces moyennes quantifient la variation de croissance annuelle associée aux sécheresses par rapport à la tendance à long terme. Nous avons analysé la sensibilité des arbres aux sécheresses modérées à extrêmes, car notre portrait régional a révélé que les

sécheresses sévères et extrêmes ( $\text{SPEI}_{3 \text{ mois}} < -1,5$ ) ont été rarissimes dans certaines régions au cours de la période étudiée (voir la section suivante). À l'inverse, les sécheresses légères ( $-0,5 < \text{SPEI}_{3 \text{ mois}} \leq -1,0$ ) ont été fréquentes, mais on anticipe qu'elles ont eu peu d'effets sur la croissance des arbres. Deuxièmement, nous avons analysé la corrélation linéaire de Pearson entre les indices de sécheresses mensuels et les indices de croissance des arbres individuels. Cette deuxième analyse vise à documenter, de manière plus générale, l'influence de la disponibilité en eau sur les variations de croissances interannuelles des arbres. Nous avons ensuite documenté l'influence des variables de station (température annuelle moyenne [T], précipitations totales annuelles moyennes [P], évapotranspiration totale moyenne [ETP], bilan hydrique annuel moyen [B], milieu physique, domaine bioclimatique) sur la sensibilité des arbres à la sécheresse en stratifiant la population d'arbres en fonction de gradients climatiques et écologiques.

Les analyses ont été réalisées dans l'environnement R (R Core Team 2019), en utilisant notamment les progiciels *dplyr* pour le traitement des mesures de largeurs de cernes de croissance (Bunn 2008), *dplyr* pour la manipulation des données (Wickham *et al.* 2019), *ggplot2* pour la production des graphiques (Wickham 2016) et *ggmap* pour la production des cartes (Kahle et Wickham 2013).

## Chapitre 2 – Résultats et discussion

### 2.1 Indices de sécheresses météorologiques

Les indices de sécheresses estivales ( $SPEI_{3\text{ mois}}$ , juin, juillet, août) illustrent la variabilité spatiale et temporelle des sécheresses par rapport aux conditions normales (figure 2). À l'échelle de l'ensemble des domaines bioclimatiques 1 à 6, on observe que les années 1953, 1955, 1983 et 1995 correspondent aux étés les plus secs au cours de la période 1950-2019 ( $SPEI_{3\text{ mois}} < -1$ ; figure 2). À l'inverse, les années 1958, 1992 et 1994 ont eu des étés où l'eau était plus abondante que la normale. Ces indices moyens masquent cependant la variabilité spatiale des sécheresses sur le territoire. Les étés anormalement secs ( $SPEI_{3\text{ mois}} < -1$ ) surviennent en moyenne plus fréquemment au sud de la province comparativement au nord (9 années pour les domaines 1 à 4, comparativement à 6 années pour les domaines 5 et 6; tableau 2). Les sécheresses estivales surviennent aussi plus souvent à l'ouest de la province qu'à l'est (8,8 années en moyenne pour les sous-domaines 2 Ouest, 3 Ouest, 4 Ouest, 5 Ouest et 6 Ouest, comparativement à 6,8 années pour les sous-domaines orientaux correspondants). Le contraste entre l'est et l'ouest est plus grand dans le domaine le plus septentrional (domaine 6). Ainsi, le sous-domaine de l'ouest a enregistré 10 sécheresses estivales au cours de la période 1950-2019, comparativement

à 2 sécheresses dans le sous-domaine de l'est au cours de la même période. De plus, les sécheresses sont plus intenses dans l'ouest que dans l'est de la province (5<sup>e</sup> centile moyen des  $SPEI_{3\text{ mois}} = -1,43$  à l'ouest et  $-1,20$  à l'est; fréquence d'une fois tous les 20 ans). Quant à elles, les anomalies d'abondance en eau sont plus intenses au sud de la province qu'au nord (95<sup>e</sup> centile de la distribution des  $SPEI_{3\text{ mois}} = 1,27$  pour les domaines 1 à 3 et 1,1 pour les domaines 4 à 6; fréquence d'une fois tous les 20 ans). Les sous-domaines 2 Ouest, 3 Ouest et 6 Ouest sont caractérisés par des sécheresses plus fréquentes et plus intenses que les autres sous-domaines (tableau 2, figure 2). En plus de la fréquence et de l'intensité, les sécheresses peuvent aussi être caractérisées quant à leur durée. De 1984 à 1988, les sous-domaines 4 Ouest, 5 Ouest et 6 Ouest ont été caractérisés par une série d'étés moins secs que la normale (figure 2).

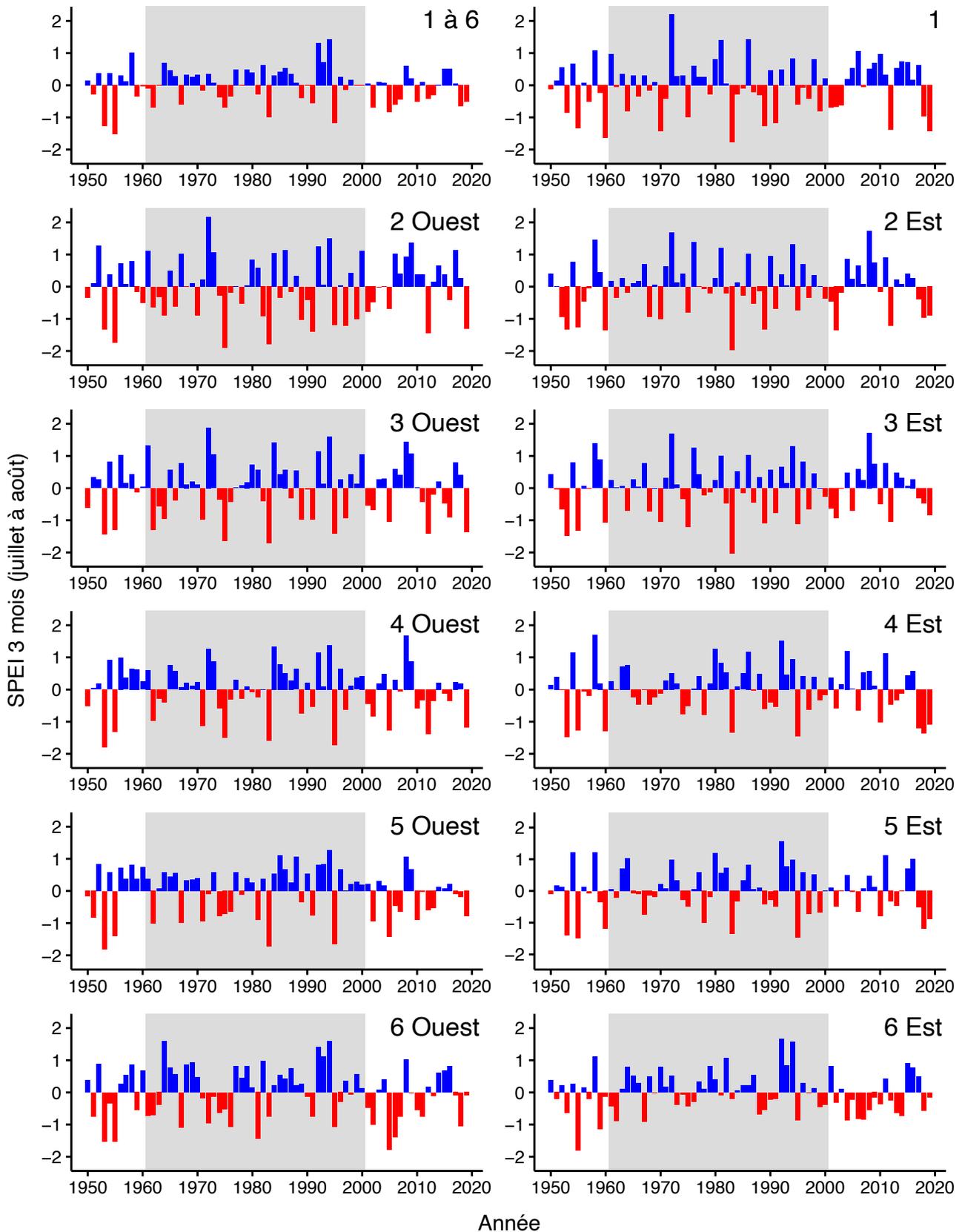
### 2.2 Gradients climatiques

La figure 3 présente la température, les précipitations, l'évapotranspiration potentielle et le bilan hydrique climatique moyens pour la saison estivale (juin, juillet et août) au cours de la période 1961-2000. La température estivale moyenne varie (centiles 1 % et 99 %, excluant 2 % des valeurs extrêmes) de 10,6 °C, dans les secteurs les plus

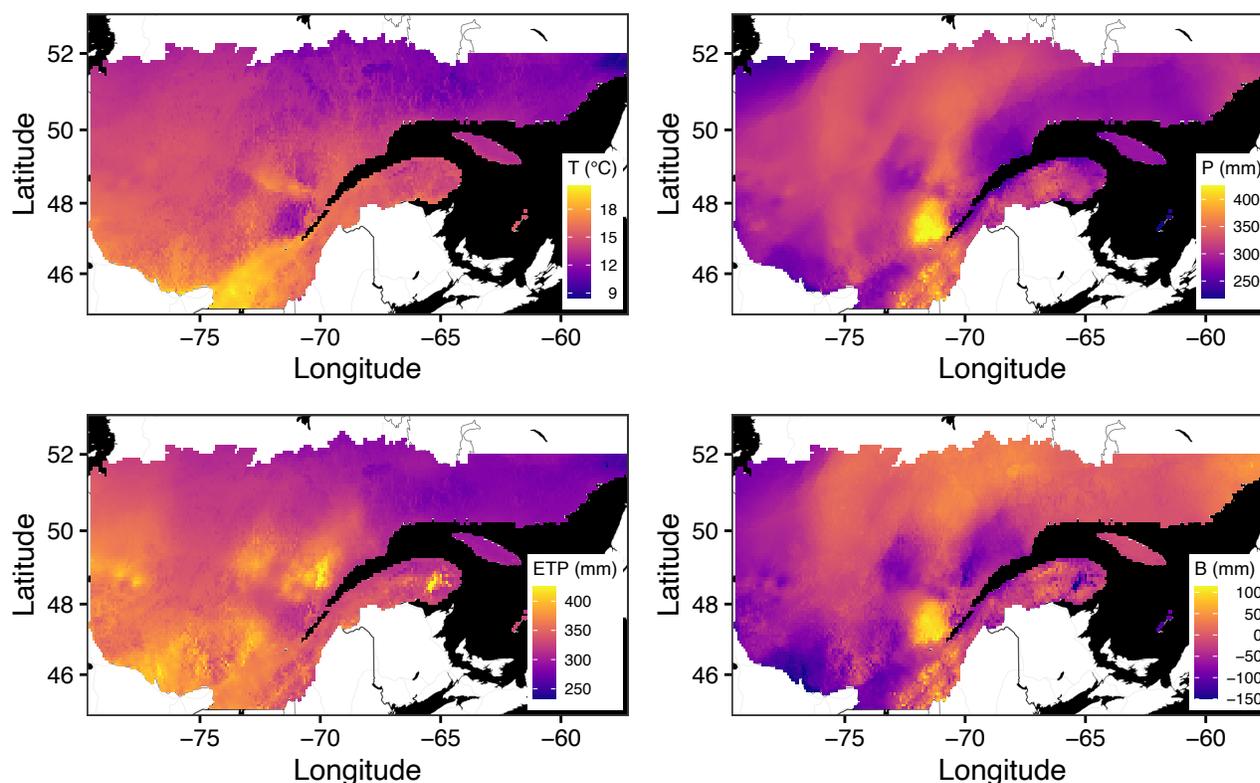
**Tableau 2.** Fréquence des sécheresses estivales et mesures de dispersion de l'indice de sécheresse ( $SPEI_{3\text{ mois}}$ , juin à août) par sous-domaine bioclimatique, au cours de la période 1950-2019.

Sous-domaine*	Fréquence des sécheresses estivales		Dispersion du $SPEI_{3\text{ mois}}$	
	$SPEI_{3\text{ mois}} < -1$	$SPEI_{3\text{ mois}} < -1,5$	5 <sup>e</sup> centile	95 <sup>e</sup> centile
1	9	2	-1,40	1,08
2 Est	8	1	-1,34	1,35
2 Ouest	10	3	-1,42	1,26
3 Est	9	1	-1,16	1,28
3 Ouest	9	2	-1,42	1,37
4 Est	9	0	-1,32	1,19
4 Ouest	9	4	-1,45	1,22
5 Est	6	0	-1,29	1,16
5 Ouest	6	3	-1,42	0,97
6 Est	2	1	-0,87	0,99
6 Ouest	10	3	-1,42	1,07
<b>1 à 6</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>-0,92</b>	<b>0,71</b>

\* Du sud au nord : 1 = érablière à caryer cordiforme (sans division en sous-domaines Est et Ouest); 2 = érablière à tilleul; 3 = érablière à bouleau jaune; 4 = sapinière à bouleau jaune; 5 = sapinière à bouleau blanc; 6 = pessière à mousses.



**Figure 2.** Indices de sécheresses moyens pour les mois de juin, juillet et août ( $SPEI_{3\text{ mois}}$  : *Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index*) par sous-domaine bioclimatique, pour la période de 1950 à 2019. La zone grise indique la période retenue pour l'analyse de la sensibilité des arbres à la sécheresse. Les données ont été générées à l'aide du logiciel BioSIM à chaque point d'un quadrillage de 5 minutes de latitude par 5 minutes de longitude. Voir le tableau 2 pour la définition des codes de domaines bioclimatiques.



**Figure 3.** Température (T), précipitations (P), évapotranspiration potentielle (ETP) et bilan hydrique climatique (B) moyens pour la saison estivale (juin, juillet et août) au cours de la période de 1961 à 2000. Les données ont été générées à l'aide du logiciel BioSIM à chaque point d'un quadrillage de 5 minutes de latitude par 5 minutes de longitude.

froids du nord-est de la forêt aménagée, à 19,2 °C, dans les secteurs les plus chauds du sud de la province. Le gradient de température moyenne estivale est intimement lié au gradient altitudinal qui caractérise le territoire. Les précipitations estivales varient généralement de 250 mm à plus de 400 mm. La région de la réserve faunique des Laurentides et celle des hauts sommets des Appalaches reçoivent les plus fortes précipitations. Dans la partie nordique de la forêt aménagée, les précipitations sont, en moyenne, plus abondantes au centre de la province que plus à l'ouest ou plus à l'est. Les régions de la Côte-Nord, des basses terres du Saint-Laurent, de l'Outaouais, de l'Abitibi-Témiscamingue et du Nord-du-Québec (nord-ouest de la forêt aménagée) reçoivent le moins de précipitations. L'évapotranspiration potentielle estimée varie de 273 à 397 mm; en moyenne, elle est plus faible au nord-est et plus forte au sud-ouest de la forêt aménagée. Finalement, le bilan hydrique climatique estival varie en moyenne de -121 mm à +69 mm. Dans le nord-est de la forêt aménagée, la réserve faunique des Laurentides et les hauts sommets des Appalaches, la quantité de précipitations excède généralement l'évapotranspiration potentielle.

À l'inverse, les régions situées plus au sud et à l'ouest de la province reçoivent en moyenne moins de précipitations que la demande atmosphérique.

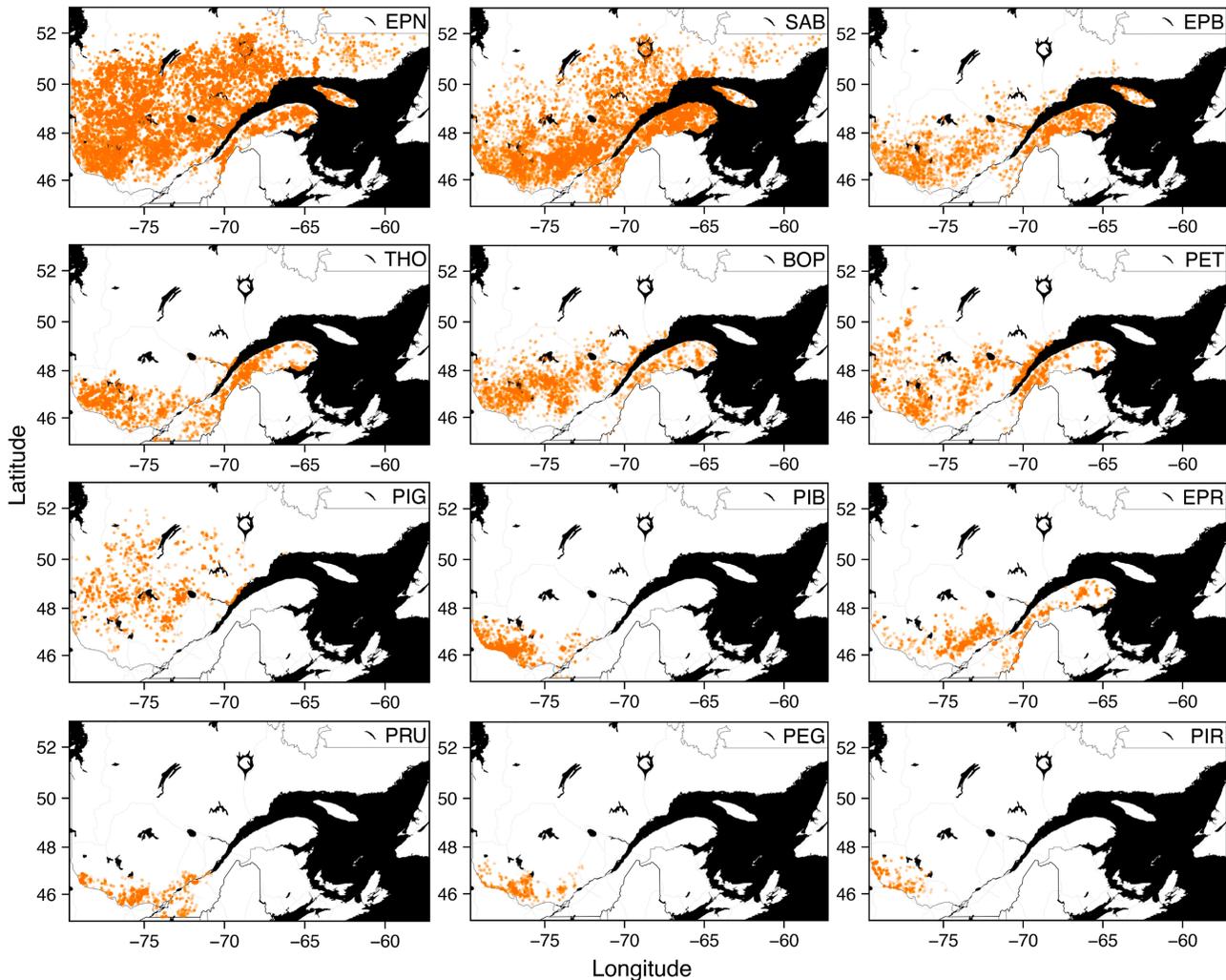
### 2.3 Variations interannuelles de la croissance des arbres

Au total, nous avons retenu pour l'analyse près de 2,8 millions d'indices de croissance provenant d'environ 70 000 arbres répartis dans plus de 44 000 placettes-échantillons (tableau 3, figure 4). L'épinette noire (39 %) et le sapin baumier (28 %) représentent près du deux tiers (67 %) des échantillons. Les indices de croissance du bouleau à papier, du peuplier faux-tremble, de la pruche du Canada et du peuplier à grandes dents présentent la plus grande variabilité d'une année à l'autre (écart-type = 0,22 à 0,24). En comparaison, ceux du thuya occidental, de l'épinette noire et du pin gris sont moins variables (écart-type = 0,16 à 0,17). Cette simple mesure de variabilité laisse supposer que certaines essences réagissent plus que d'autres aux variations interannuelles du climat. Les séries d'indices de croissance intègrent des signaux environnementaux perceptibles à diverses échelles spatiales (locale, régionale et provinciale; figure 5).

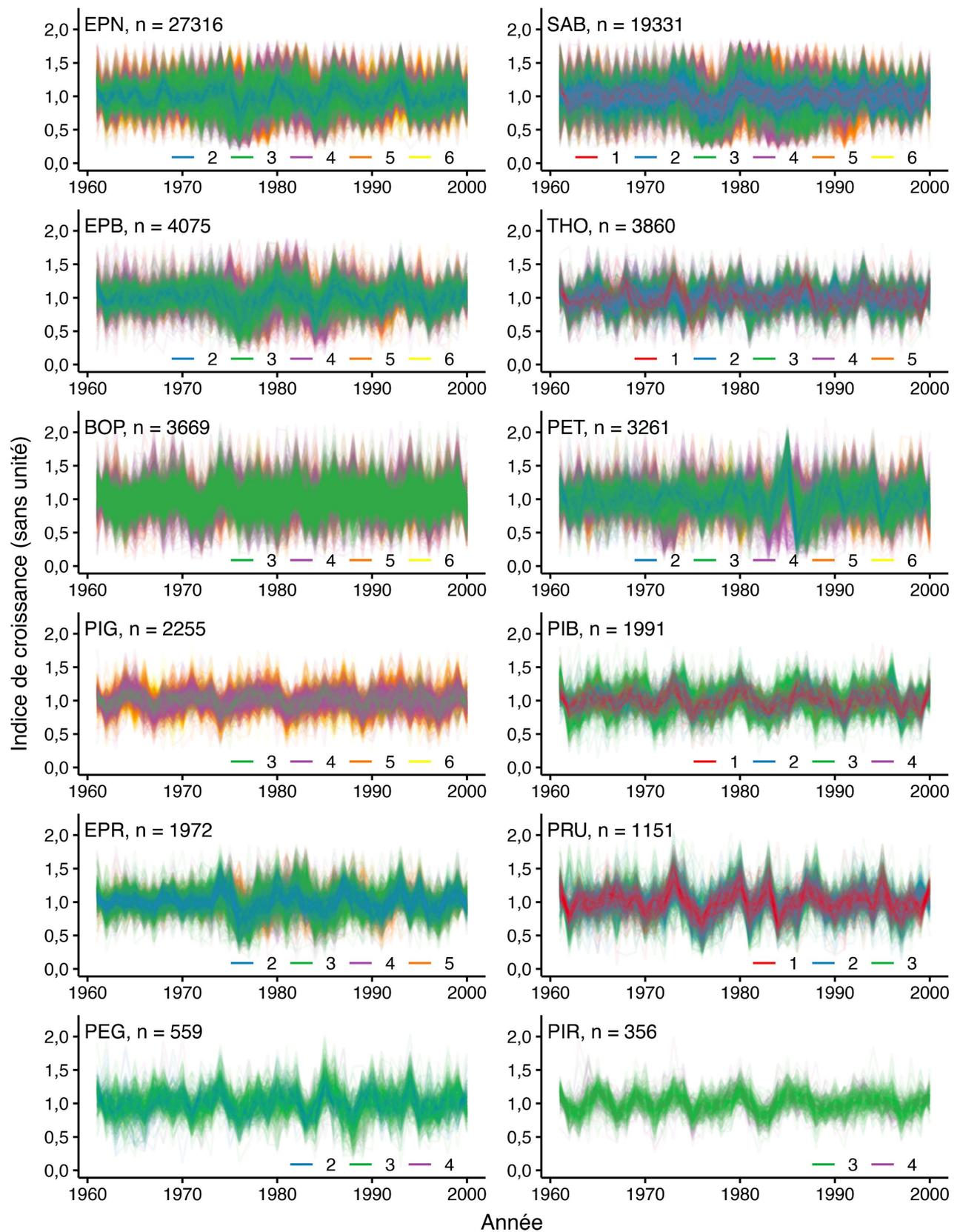
**Tableau 3.** Statistiques descriptives des indices de croissance annuels retenus pour l'analyse.

Essence*	Nombre d'arbres	Nombre de placettes	Indices de croissance			
			Nombre	Minimum	Maximum	Écart-type
EPN	27 316	16 938	1 092 640	0,19	1,85	0,17
SAB	19 331	13 620	773 240	0,16	1,89	0,19
EPB	4 075	3 201	163 000	0,15	1,89	0,20
THO	3 860	2 600	154 400	0,15	1,81	0,16
BOP	3 669	3 163	146 760	0,08	2,16	0,24
PET	3 261	2 471	130 440	0,01	2,20	0,24
PIG	2 255	1 572	90 200	0,27	1,83	0,17
PIB	1 991	1 283	79 640	0,15	1,84	0,18
EPR	1 972	1 362	78 880	0,13	1,87	0,20
PRU	1 151	736	46 040	0,08	2,05	0,23
PEG	559	420	22 360	0,06	2,03	0,22
PIR	356	228	14 240	0,27	1,99	0,18
<b>Toutes</b>	<b>69 796</b>	<b>44 168</b>	<b>2 791 840</b>	<b>0,01</b>	<b>2,20</b>	<b>0,19</b>

\* Codes d'essences : EPN = épinette noire; SAB = sapin baumier; EPB = épinette blanche; THO = thuya occidental; BOP = bouleau à papier; PET = peuplier faux-tremble; PIG = pin gris; PIB = pin blanc; EPR = épinette rouge; PRU = pruche de l'est; PEG = peuplier à grandes dents; PIR = pin rouge.



**Figure 4.** Répartition des arbres retenus pour l'analyse. Les points sur les cartes ont été légèrement décalés de leurs positions réelles afin de réduire leur superposition. De plus, les symboles ont été mis en transparence afin de mettre en évidence les points superposés. Voir le tableau 3 pour la définition des codes d'essences.



**Figure 5.** Indices de croissance des arbres individuels retenus pour l'analyse. La couleur des courbes correspond aux domaines bioclimatiques (1 à 6) de chaque arbre échantillonné. Voir le tableau 2 pour la définition des codes de domaines bioclimatiques et le tableau 3 pour les codes d'essences.

## 2.4 Sensibilité des arbres à la sécheresse

### 2.4.1 Sensibilité moyenne des essences

Les variations de croissance moyennes associées aux sécheresses ( $SPEI_{1\text{ mois}} < -1$ ) et les coefficients de corrélation moyens entre les indices de croissance et ceux du bilan hydrique ( $SPEI_{1\text{ mois}}$ ) pour chaque essence sont présentés au tableau 4. Dans l'ensemble, les arbres de la forêt boréale ne semblent pas avoir gravement souffert de la sécheresse durant la période étudiée. Les résultats indiquent que les arbres de la plupart des espèces étudiées réagissent positivement aux sécheresses printanières du mois de mai (plus c'est sec, meilleure est la croissance). En effet, sauf pour le pin blanc, le pin rouge, la pruche du Canada et le sapin baumier, la croissance des arbres est de 0,9 à 6 % supérieure à la normale lorsque le bilan hydrique au cours du mois de mai est inférieur à la normale ( $SPEI_{1\text{ mois}} < -1$ ; tableau 4). Les essences qui font exception sont parmi celles que l'on trouve en abondance dans le sud-ouest de la province, là où la température est plus chaude, les précipitations sont moins abondantes et la fonte de la neige est plus hâtive au printemps (figures 1, 3 et 4). Apparemment, selon la saisonnalité du climat qui caractérise le territoire et son influence sur la disponibilité en eau, les sécheresses printanières peuvent réduire la croissance des arbres au sud et en même temps, favoriser un début hâtif de la saison de croissance au nord (voir la section 2.4.2).

Pour la plupart des essences étudiées, des baisses de croissance sont associées aux sécheresses qui surviennent au mois de juin (tableau 4). Elles varient en moyenne de 1 % pour l'épinette blanche à 8,5 % pour le peuplier à grandes-dents. Toutefois, pour le pin gris, l'épinette rouge, la pruche du Canada et le sapin baumier, la croissance semble peu affectée par le temps sec du mois de juin (variations de croissance de 0 à 0,6 %). Les analyses de corrélation confirment que le peuplier à grandes-dents, le pin blanc, le peuplier faux-tremble et le pin rouge sont les essences les plus sensibles à la disponibilité en eau au cours du mois de juin (coefficients moyens variant de 0,119 à 0,252). La pruche du Canada, le pin gris, l'épinette blanche, le thuya occidental et le bouleau à papier sont moins influencés (coefficients moyens variant de 0,013 à 0,066). En moyenne, pour l'épinette noire, le sapin baumier et l'épinette rouge, la croissance est inversement liée à la disponibilité en eau au cours du mois de juin (coefficients moyens variant de -0,003 à -0,029).

À l'exception du bouleau à papier, toutes les essences montrent des croissances inférieures à la normale au cours des années caractérisées par une sécheresse ( $SPEI < -1$ ) qui survient au mois de juillet (tableau 4). Les variations de croissance associées aux sécheresses ainsi que les coefficients de corrélation révèlent que le pin blanc et le pin rouge sont les deux essences les plus sensibles à la disponibilité en eau au mois de juillet.

**Tableau 4.** Sensibilité des essences à la sécheresse exprimée par les variations de croissance moyennes associées aux sécheresses ( $SPEI_{1\text{ mois}} < -1$ , %  $\pm$  95 % IC) et les coefficients de corrélation de Pearson moyens ( $\pm$  95 % IC) entre les indices de croissance et les variations du bilan hydrique climatique mensuel standardisé ( $SPEI_{1\text{ mois}}$ ) pour la période 1961-2000. Les coefficients de corrélation négatifs indiquent une croissance favorisée par la sécheresse.

Essence*	Variation de croissance associée aux sécheresses (%)				Coefficient de corrélation de Pearson			
	Mai	Juin	Juillet	Août	Mai	Juin	Juillet	Août
BOP	3,1 $\pm$ 0,3	-2,7 $\pm$ 0,3	0,5 $\pm$ 0,3	2,9 $\pm$ 0,3	-0,028 $\pm$ 0,005	0,066 $\pm$ 0,005	-0,049 $\pm$ 0,006	-0,058 $\pm$ 0,005
EPB	2,1 $\pm$ 0,3	-1,0 $\pm$ 0,2	-2,1 $\pm$ 0,3	-2,7 $\pm$ 0,3	-0,069 $\pm$ 0,005	0,054 $\pm$ 0,005	0,016 $\pm$ 0,006	0,085 $\pm$ 0,005
EPN	1,2 $\pm$ 0,1	-1,8 $\pm$ 0,1	-0,6 $\pm$ 0,1	-1,4 $\pm$ 0,1	-0,073 $\pm$ 0,002	-0,003 $\pm$ 0,002	0,002 $\pm$ 0,002	0,047 $\pm$ 0,002
EPR	1,8 $\pm$ 0,3	0,4 $\pm$ 0,3	-1,1 $\pm$ 0,4	2,5 $\pm$ 0,4	-0,028 $\pm$ 0,007	-0,029 $\pm$ 0,007	-0,021 $\pm$ 0,008	-0,056 $\pm$ 0,007
PEG	1,3 $\pm$ 0,8	-8,5 $\pm$ 0,6	-2,6 $\pm$ 0,7	0,2 $\pm$ 0,7	-0,011 $\pm$ 0,013	0,252 $\pm$ 0,012	0,147 $\pm$ 0,015	-0,069 $\pm$ 0,014
PET	6,0 $\pm$ 0,3	-5,0 $\pm$ 0,3	-0,8 $\pm$ 0,3	-1,0 $\pm$ 0,4	-0,140 $\pm$ 0,005	0,136 $\pm$ 0,006	0,074 $\pm$ 0,006	0,011 $\pm$ 0,005
PIB	-3,7 $\pm$ 0,3	-7,8 $\pm$ 0,2	-7,0 $\pm$ 0,3	-1,6 $\pm$ 0,3	0,114 $\pm$ 0,007	0,174 $\pm$ 0,006	0,308 $\pm$ 0,006	0,011 $\pm$ 0,007
PIG	1,3 $\pm$ 0,3	0,0 $\pm$ 0,3	-3,3 $\pm$ 0,2	-2,2 $\pm$ 0,3	-0,111 $\pm$ 0,006	0,021 $\pm$ 0,006	0,115 $\pm$ 0,006	0,058 $\pm$ 0,006
PIR	-5,0 $\pm$ 0,7	-6,9 $\pm$ 0,7	-8,2 $\pm$ 0,8	-2,6 $\pm$ 0,6	0,103 $\pm$ 0,015	0,119 $\pm$ 0,013	0,302 $\pm$ 0,015	0,069 $\pm$ 0,015
PRU	-3,6 $\pm$ 0,5	0,5 $\pm$ 0,4	-4,4 $\pm$ 0,5	-1,3 $\pm$ 0,5	0,091 $\pm$ 0,009	0,013 $\pm$ 0,010	0,047 $\pm$ 0,009	-0,001 $\pm$ 0,009
SAB	-2,0 $\pm$ 0,1	0,6 $\pm$ 0,1	-0,7 $\pm$ 0,1	0,3 $\pm$ 0,1	0,046 $\pm$ 0,002	-0,018 $\pm$ 0,002	0,030 $\pm$ 0,003	0,030 $\pm$ 0,002
THO	0,9 $\pm$ 0,2	-3,5 $\pm$ 0,2	-3,8 $\pm$ 0,2	-2,9 $\pm$ 0,2	-0,113 $\pm$ 0,005	0,056 $\pm$ 0,005	0,096 $\pm$ 0,005	0,092 $\pm$ 0,005
<b>Moyenne</b>	<b>0,4 <math>\pm</math> 0,1</b>	<b>-1,5 <math>\pm</math> 0,1</b>	<b>-1,2 <math>\pm</math> 0,1</b>	<b>-0,7 <math>\pm</math> 0,1</b>	<b>-0,033 <math>\pm</math> 0,001</b>	<b>0,017 <math>\pm</math> 0,001</b>	<b>0,032 <math>\pm</math> 0,001</b>	<b>0,035 <math>\pm</math> 0,001</b>

\* Voir le tableau 3 pour la définition des codes d'essences.

Les variations de croissance associées aux sécheresses du mois d'août sont généralement moins prononcées, mais surviennent chez toutes les essences à l'exception du bouleau à papier, de l'épinette rouge, du peuplier à grandes dents et du sapin baumier (tableau 4). Les analyses de corrélation confirment que les variations de croissance du bouleau à papier, de l'épinette rouge et du peuplier à grandes dents sont, en moyenne, inversement liées à la disponibilité en eau au cours du mois d'août.

Les analyses réalisées par espèce et pour l'ensemble de celles-ci révèlent que les conditions plus sèches que la normale au mois de mai favorisent généralement la croissance des essences boréales (tableau 4). En revanche, les sécheresses au cours des mois de juin à août nuisent à leur croissance. Sur la majeure partie du territoire étudié, le couvert nival disparaît au cours du mois de mai, alors que la température de l'air est encore fraîche et limite la demande atmosphérique en eau (évapotranspiration potentielle). En fait, les mois de mai plus secs que la normale correspondent probablement à des printemps exceptionnellement chauds qui favorisent la fonte hâtive du couvert de neige, le réchauffement du sol et une croissance précoce des arbres (D'Orangeville *et al.* 2018b). Les analyses révèlent aussi que la croissance annuelle des arbres est moins influencée par les sécheresses du mois d'août que par celles des mois de juin et juillet. Ce fait n'est pas étonnant si l'on considère que l'activité cambiale et la croissance s'opèrent principalement au cours des mois de juin et juillet, et que le taux de croissance maximal des essences résineuses en forêt boréale coïncide généralement avec le solstice estival (Duchesne *et al.* 2012, Rossi *et al.* 2006, 2007, 2008). Notre analyse ne permet pas d'estimer si les effets des sécheresses tardives se répercutent sur la croissance des années ultérieures. Cependant, un nombre grandissant d'études réalisées au Québec comme ailleurs indiquent que de tels effets à retardement seraient importants (D'Orangeville *et al.* 2013, 2016, 2018b, Itter *et al.* 2019, Rennenberg *et al.* 2006).

À partir de ces analyses, il est possible d'ordonner les essences étudiées en fonction de leur sensibilité moyenne aux sécheresses. Pour y parvenir, nous avons d'abord ordonné les essences en fonction des quatre mesures mensuelles de variation de croissance associées aux sécheresses et des quatre valeurs mensuelles de coefficient de corrélation moyen (tableau 4). Dans un deuxième temps, nous avons ordonné les essences selon leur rang moyen pour l'ensemble de ces 8 indicateurs.

Le résultat de ce classement est le suivant :

PIR > PIB > THO > PEG > PIG > PRU > EPB > PET > EPN > SAB > BOP > EPR

Selon le degré de sensibilité des essences à la sécheresse, nous avons appliqué un code de couleur : rouge pour le tiers des essences les plus sensibles, jaune pour celles de sensibilité moyenne et vert pour celles apparemment moins sensibles.

Le même classement peut être réalisé en considérant uniquement les indicateurs relatifs aux mois de juin et juillet (4 indicateurs sur 8), de manière à considérer les mois ayant le plus d'influence sur la croissance annuelle. L'ordre des essences selon ces critères diffère, mais leur répartition parmi les 3 classes de sensibilité relative (couleurs) demeure identique.

PIB > PIR > PEG > THO > PET > PIG > PRU > EPB > BOP > EPN > EPR > SAB

Ce classement de la sensibilité moyenne des essences à la sécheresse pour le territoire de la forêt aménagée peut cependant varier régionalement en fonction de l'environnement climatique et des milieux physiques qui caractérisent les régions.

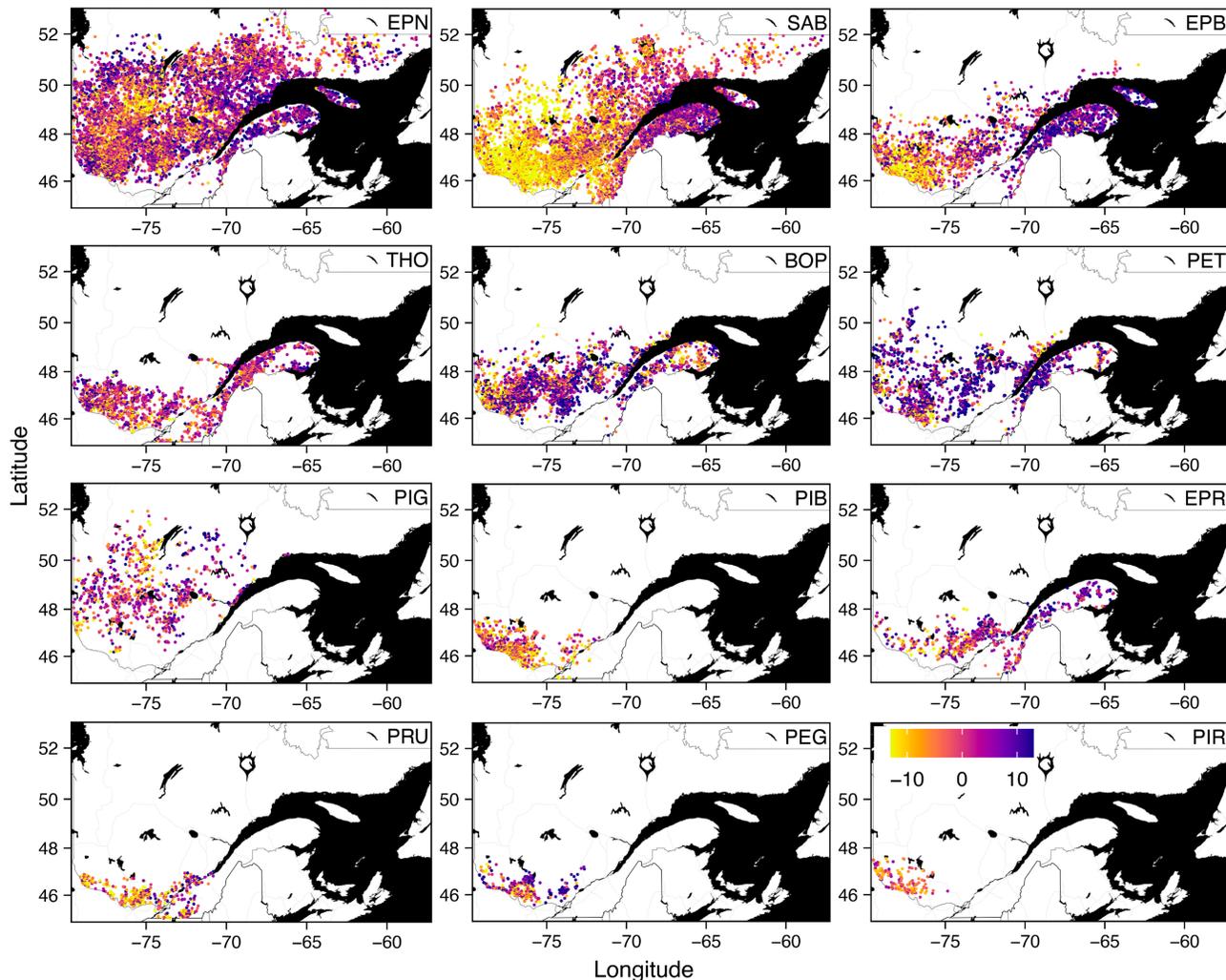
#### 2.4.2 Influence du climat local et du milieu physique

La sensibilité des arbres à la sécheresse et à la disponibilité en eau dépend de l'essence, de l'environnement atmosphérique et des caractéristiques édaphiques du site. Les essences étudiées ne sont pas présentes sur les mêmes sites ni dans les mêmes proportions. Certaines, comme le pin rouge, se trouvent davantage sur des sites chauds et secs, car elles y sont plus compétitives, tandis que d'autres, comme l'épinette noire, sont plus abondantes sur les sites froids et humides. Une sécheresse de même intensité peut donc engendrer un stress différent pour ces deux essences, en raison non seulement de leurs différents degrés d'adaptation à la sécheresse, mais aussi des environnements distincts. Ainsi, la sensibilité moyenne de chaque essence présentée à la section précédente résulte d'une combinaison i) des différences physiologiques et morphologiques de tolérance à la sécheresse et ii) des différentes conditions de croissance découlant des conditions édaphiques et climatiques. Les variations spatiales de la sensibilité des arbres aux sécheresses et à la disponibilité en eau le confirment (figures 6 à 13). Par exemple, on observe un net gradient longitudinal et latitudinal pour la sensibilité à la sécheresse du sapin baumier et de l'épinette blanche : dans le sud-ouest de leur

aire de répartition, ces essences réagissent négativement à la sécheresse et à la disponibilité en eau au printemps (mois de mai), alors qu'au nord-est de leur aire, leur croissance est supérieure à la normale lors des printemps anormalement secs. Ce gradient reflète en partie ceux de la date de disparition du couvert de neige et de la demande atmosphérique en eau au printemps. Dans un environnement plus sec et plus chaud, le couvert de neige fond plus rapidement, le sol se réchauffe plus vite et la croissance des arbres débute plus tôt que dans les sites plus frais et plus humides. De plus, dans le sud-ouest de la province, les printemps hâtifs peuvent engendrer un tarissement précoce des réserves en eau durant l'été suivant. Cela pourrait expliquer l'effet négatif des sécheresses printanières sur la croissance annuelle des arbres dans cette région (Buermann *et al.* 2018). À l'inverse, dans le nord-est de la province, où le bilan hydrique est

plus favorable, les printemps hâtifs auraient moins d'influence sur les réserves en eau du sol en période estivale. Ce gradient de réponse aux sécheresses printanières est aussi perceptible pour l'épinette noire. Toutefois, la variabilité spatiale à l'échelle locale est plus importante et potentiellement associée aux caractéristiques des stations.

La sensibilité des arbres aux sécheresses estivales (juin, juillet et août) varie elle aussi entre les régions et selon les caractéristiques de sites. De manière générale, les étés secs ont des effets négatifs sur la croissance des arbres dans le sud-ouest de la province, mais ils peuvent favoriser leur croissance au nord et à l'est (figures 8 à 13). Ces observations donnent à penser que pour ces territoires, la croissance des arbres n'est pas toujours limitée par la disponibilité en eau. Au contraire, dans certains cas, des étés plus chauds et plus secs sont associés à de plus fortes croissances annuelles.

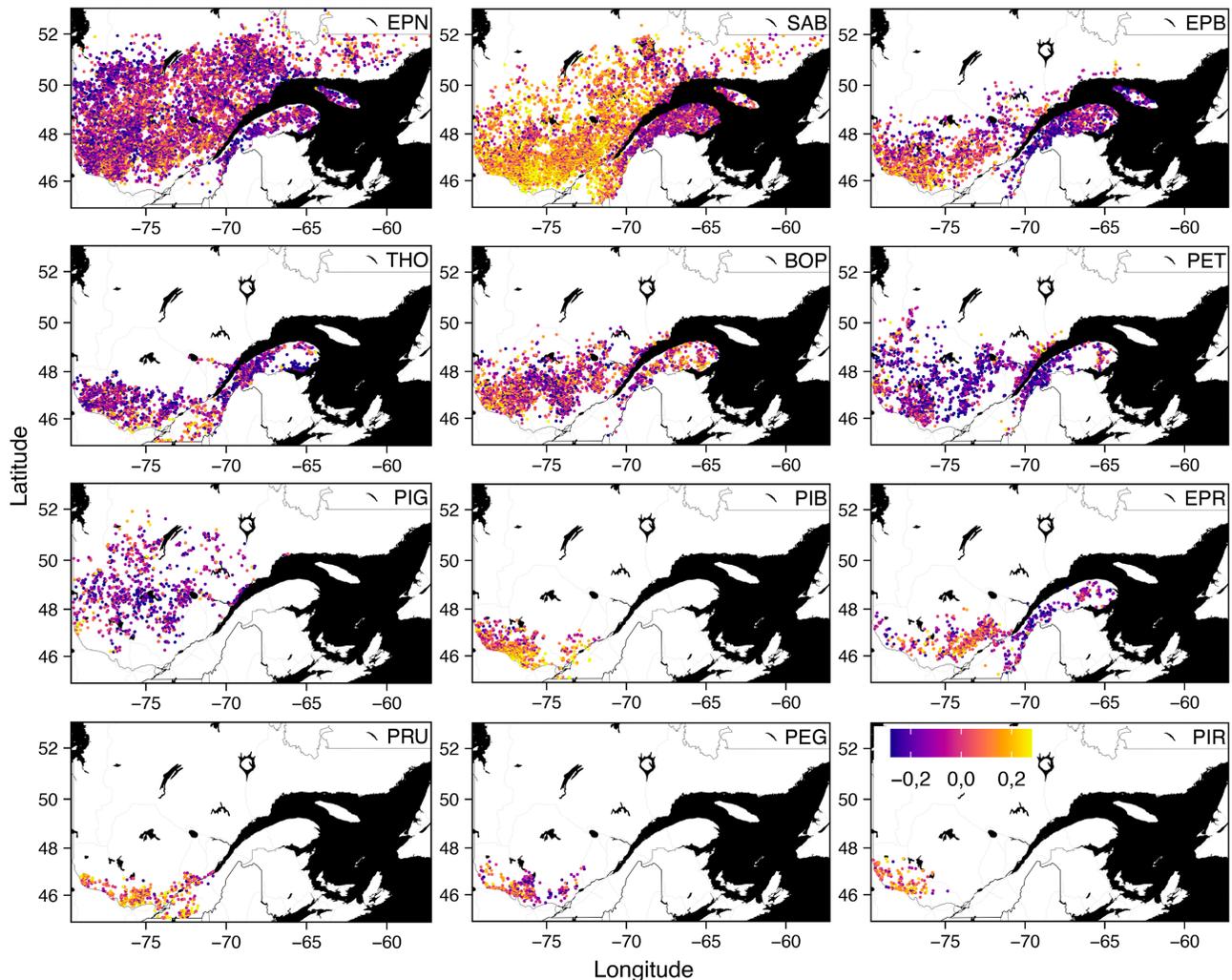


**Figure 6.** Variations de croissance moyennes (pour chaque arbre individuel, %) associées aux sécheresses du mois de mai ( $SPEI_{1\text{mois}} < -1$ ) survenues au cours de la période de 1961 à 2000. Voir le tableau 3 pour la définition des codes d'essences.

On observe aussi que la sensibilité des arbres aux sécheresses et à la disponibilité en eau varie à l'échelle locale, vraisemblablement en fonction des caractéristiques des stations. À cette échelle, le statut de l'arbre (vigueur, âge, taille, compétition, etc.) peut influencer sa sensibilité à la sécheresse et à la disponibilité en eau. Ici aussi, certaines essences présentent des différences développementales qui peuvent être confondues avec leurs adaptations morphologiques ou physiologiques à la sécheresse. Notamment, les arbres de plus grande taille ou présentant des surfaces foliaires plus grandes ont des coûts métaboliques plus élevés qui les rendent plus vulnérables à la sécheresse (Greenwood *et al.* 2017, Jump *et al.* 2017).

Afin de mettre en lumière les différences découlant des conditions climatiques et des caractéristiques édaphiques, nous avons documenté la

sensibilité des arbres à la sécheresse en stratifiant la population d'arbres en fonction de gradients climatiques et édaphiques. Pour chaque essence, les arbres ont été stratifiés selon le gradient de température moyenne annuelle, de précipitations, d'évapotranspiration potentielle, du bilan hydrique climatique, du milieu physique et du domaine bioclimatique. Cette analyse révèle que pour la majorité des essences, les précipitations et le bilan hydrique influencent de manière prépondérante la sensibilité des arbres à la sécheresse (annexe A). Pour plusieurs essences, les sécheresses ponctuelles peuvent défavoriser les arbres situés dans des milieux qui reçoivent moins de précipitations et dont le bilan hydrique est plus faible. Toutefois, elles seraient associées à des croissances plus fortes que la normale dans des milieux qui reçoivent plus de précipitations et dont le bilan hydrique est plus favorable.



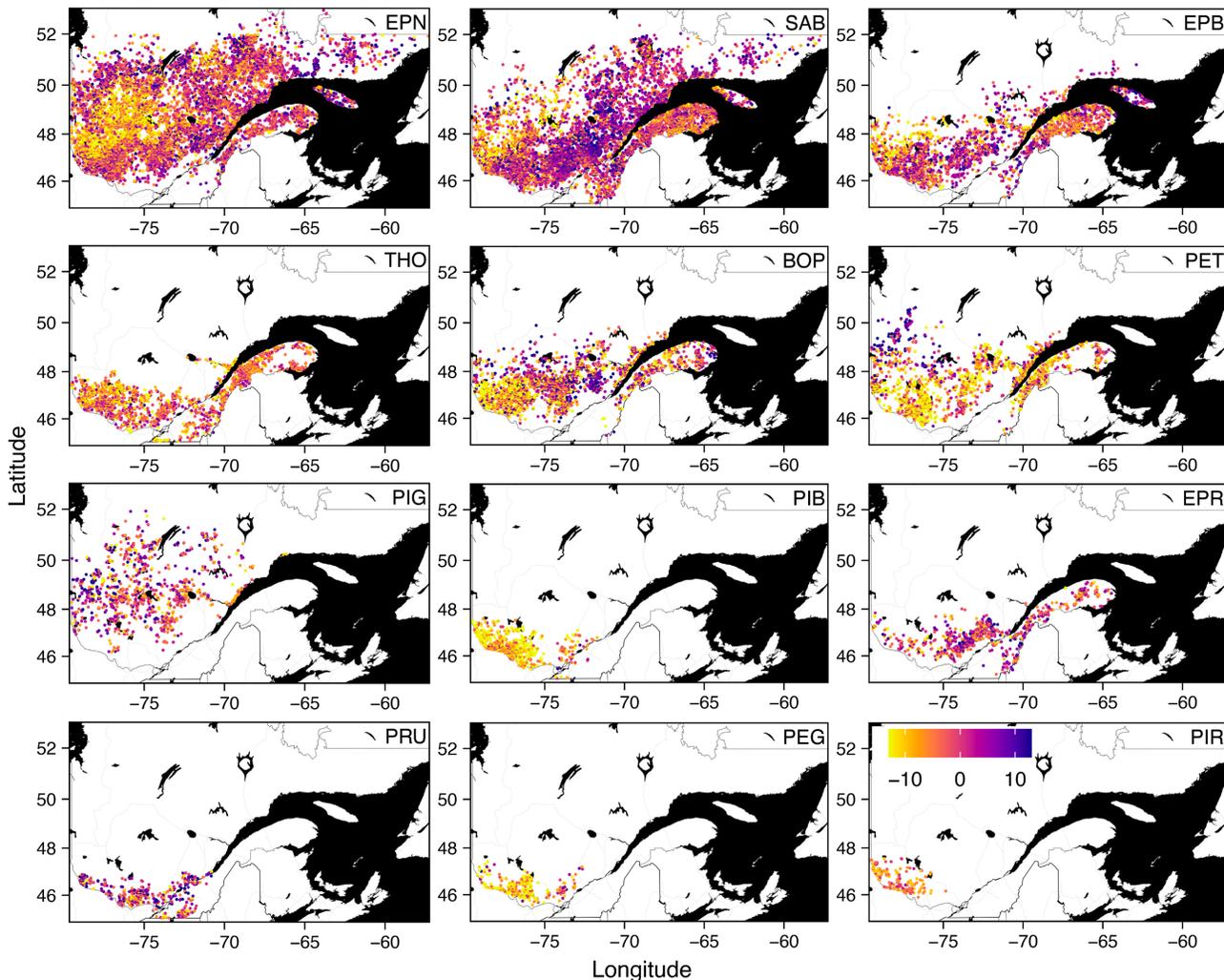
**Figure 7.** Coefficients de corrélation de Pearson (pour chaque arbre individuel) entre la variation interannuelle de l'indice de croissance et celle de la disponibilité en eau au mois de mai ( $SPEI_{1\text{mois}}$ ) au cours de la période de 1961 à 2000. Les valeurs négatives indiquent une croissance favorisée par la sécheresse. Voir le tableau 3 pour la définition des codes d'essences.

Pour certaines essences, la sensibilité des arbres varie aussi en fonction du gradient de température et du milieu physique. De manière générale, les sécheresses sont associées à des croissances plus faibles que la normale dans les territoires où la température annuelle moyenne est élevée, alors qu'elles peuvent même être associées à des croissances supérieures à la normale dans les territoires caractérisés par des températures annuelles moyennes plus faibles. L'influence du milieu physique semble plus forte pour le bouleau à papier et le peuplier faux-tremble (annexe A). Pour ces essences, on observe qu'en moyenne, les arbres sont plus sensibles à la sécheresse lorsqu'ils poussent sur des sols minces ou très pierreux (milieu physique 0), ou encore, sur des sols de texture grossière et dont la classe de drainage synthèse est xérique ou mésique (milieu physique 1).

Ces analyses révèlent que la sensibilité des arbres à la sécheresse dépend de nombreux facteurs auxquels s'ajoutent les interactions possibles entre ces facteurs. Afin de répondre au mandat, nous avons compilé la sensibilité des arbres aux sécheresses et au bilan hydrique par essence pour chaque milieu physique dans chaque territoire (annexe B).

## 2.5 Limites de l'analyse

La présente analyse a permis de quantifier la sensibilité des arbres aux sécheresses ponctuelles de la fin du XX<sup>e</sup> siècle et leur réponse à la variabilité interannuelle du bilan hydrique climatique. Ces analyses, qui reposent sur un très grand nombre d'échantillons, procurent un portrait inédit de la sensibilité des arbres pour 12 essences de la forêt québécoise. Elles comportent toutefois certaines limites que nous désirons mettre en évidence.

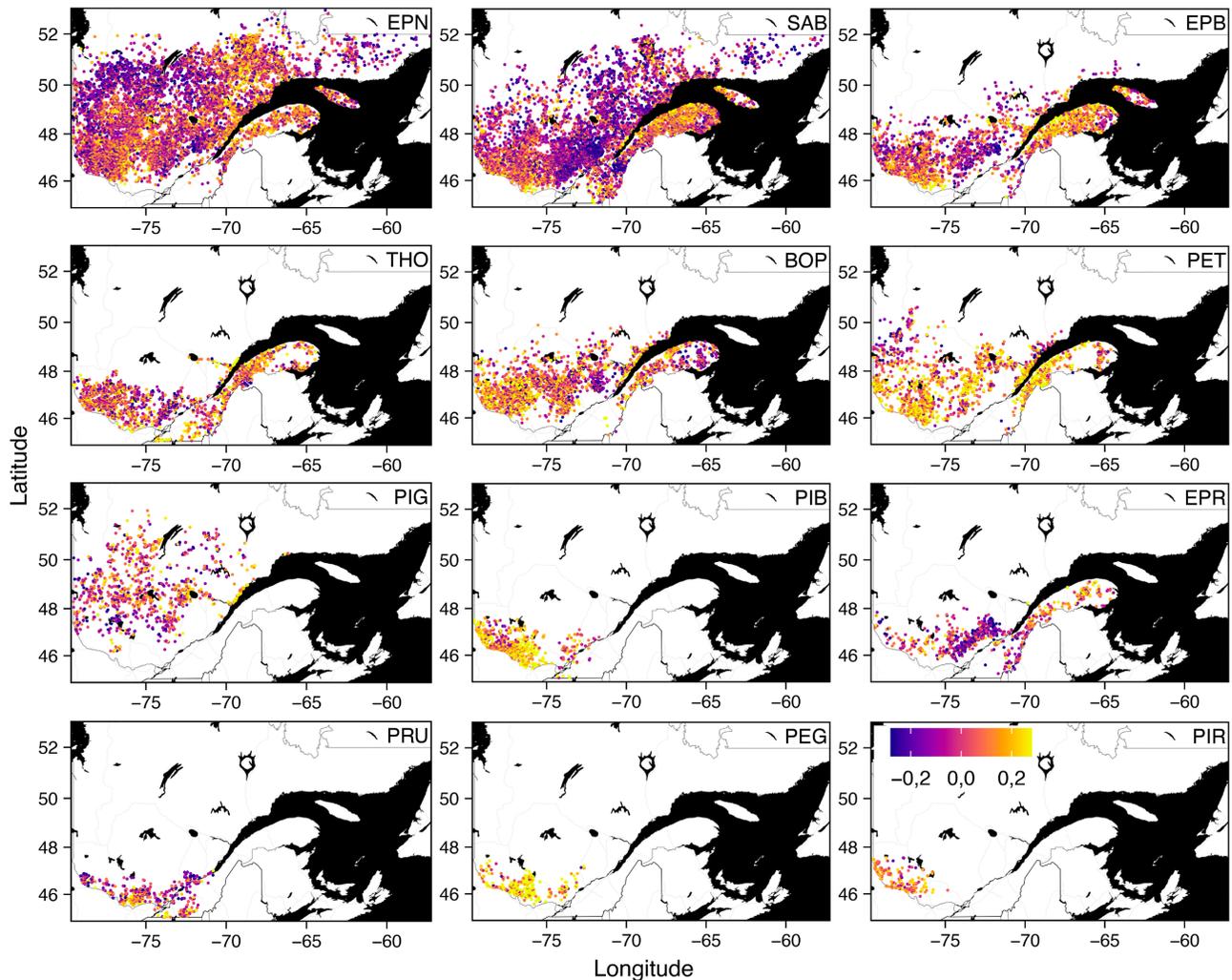


**Figure 8.** Variations de croissance moyennes (pour chaque arbre individuel, %) associées aux sécheresses du mois de juin ( $SPEI_{1\text{mois}} < -1$ ) survenues au cours de la période de 1961 à 2000. Voir le tableau 3 pour la définition des codes d'essences.

Dans la présente étude, nous avons quantifié la sensibilité à la sécheresse des essences en fonction de la réduction de leur croissance radiale lors de déficits hydriques historiques. Il est important de rappeler que cette mesure de sensibilité reflète des stratégies plus larges d'adaptation à la sécheresse comprenant non seulement la croissance, mais aussi la photosynthèse, la transpiration, les mécanismes de défense, la respiration et d'autres (Volaire 2018). Par exemple, une diminution de croissance lors d'une sécheresse peut faire partie d'une stratégie conservatrice (incluant d'autres adaptations comme la baisse de la transpiration) visant à limiter les pertes en eau afin d'augmenter les chances de survie lors d'événements extrêmes. À l'inverse, lors d'une sécheresse plus modérée, une diminution de croissance peut entraîner un désavantage par rapport à la compétition (Claeys

et Inzé 2013). Ainsi, les implications de nos résultats se limitent au processus observé, soit la croissance radiale, mais ne peuvent être extrapolées à d'autres processus importants comme la mortalité.

En raison de contraintes liées à la disponibilité des mesures de cernes annuels de croissance des arbres, l'analyse a couvert une période de 40 ans (1961-2000). Ainsi, les sécheresses et les variations récentes de la disponibilité en eau n'ont pas été considérées dans l'analyse. Les portraits révèlent toutefois que, pour plusieurs régions, la période analysée inclut les sécheresses ponctuelles les plus marquées parmi celles survenues au cours de la période 1950-2018. Apparemment, la variabilité au cours de la période étudiée est donc représentative de la variabilité des sécheresses ponctuelles depuis le milieu du dernier siècle.

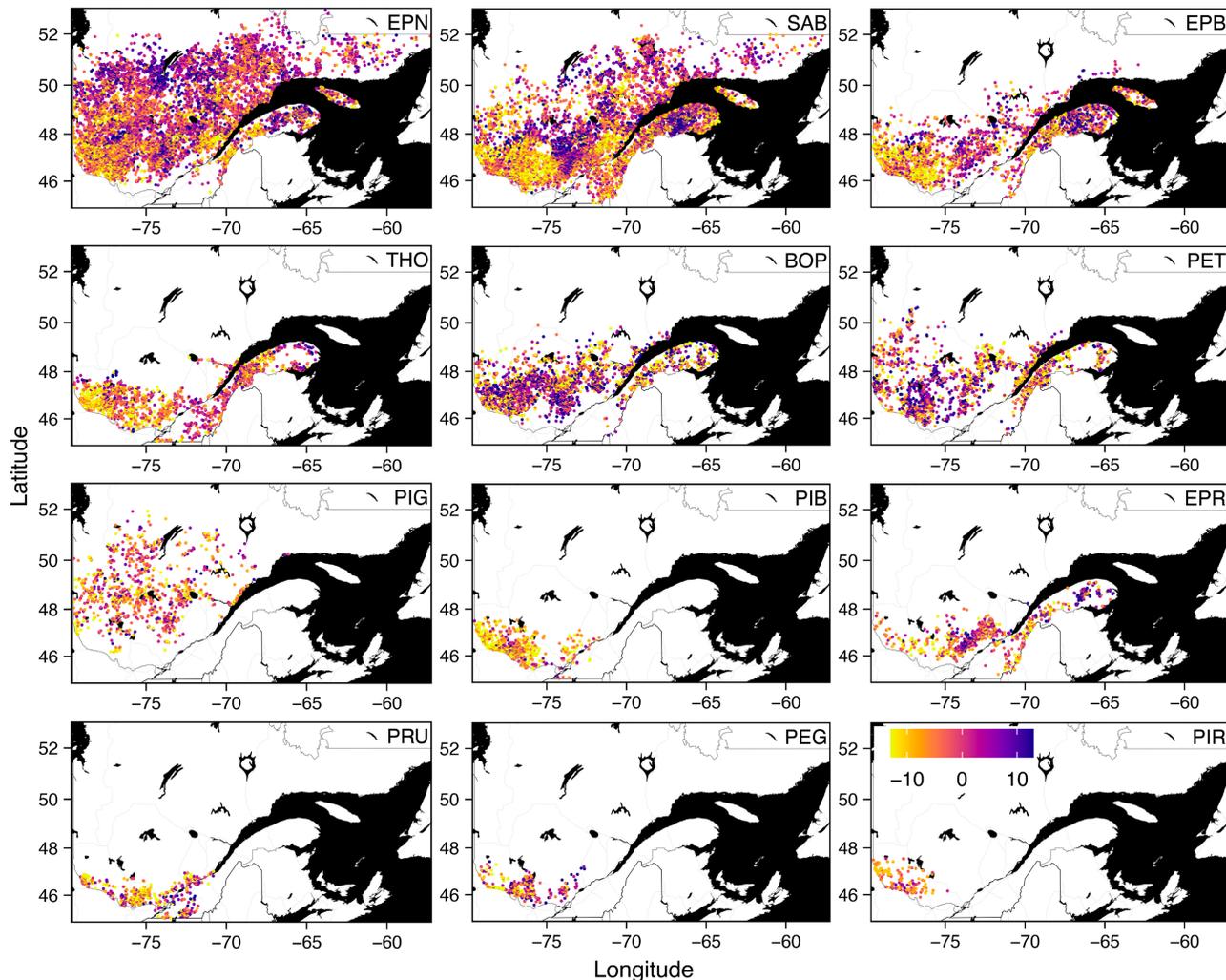


**Figure 9.** Coefficients de corrélation de Pearson (pour chaque arbre individuel) entre la variation interannuelle de l'indice de croissance et celle de la disponibilité en eau au mois de juin ( $SPEI_{1 \text{ mois}}$ ) au cours de la période de 1961 à 2000. Les valeurs négatives indiquent une croissance favorisée par la sécheresse. Voir le tableau 3 pour la définition des codes d'essences.

Une procédure de validation *a posteriori* a été suivie pour sélectionner les carottes d'inventaire forestier qui partagent un signal commun à l'échelle de la région écologique. Cette procédure de sélection peut engendrer un biais en faveur des arbres qui répondent plus fortement au climat. Toutefois, des analyses ont démontré que la grande majorité des arbres exclus de l'analyse présentaient des erreurs de datation, et non un signal climatique différent (Duchesne *et al.* 2017). De plus, il est peu probable qu'une faible réponse au climat donne lieu à une absence de corrélation entre les variations inter-annuelles de croissance d'un arbre et celles de la population (représentées par les séries maîtresses régionales). Les analyses ont aussi démontré que la procédure de sélection permet de créer des chronologies régionales indépendantes, et que celles-ci sont cohérentes entre elles et avec des chronologies de référence construites indépendamment à l'échelle du peuplement (Duchesne *et al.* 2017).

Nous avons opté pour une approche de standardisation qui élimine la majorité du signal à long terme pour mettre en évidence les variations inter-annuelles de la croissance des arbres. La présente analyse aurait pu donner des résultats différents si d'autres méthodes de standardisation étaient utilisées. Toutefois, il est peu probable que le seul choix de la méthode de standardisation entraîne des différences importantes quant aux tendances et aux conclusions présentées ici.

L'analyse repose aussi sur les données climatiques interpolées à partir de stations météorologiques pour chaque placette-échantillon en utilisant le logiciel BioSIM. Le nombre de stations météorologiques a augmenté au cours de la période couverte par notre étude. Ainsi, il est fort probable que les données climatiques historiques au début de la période d'analyse soient moins précises que par la suite. Toutefois, la fréquence des stations a

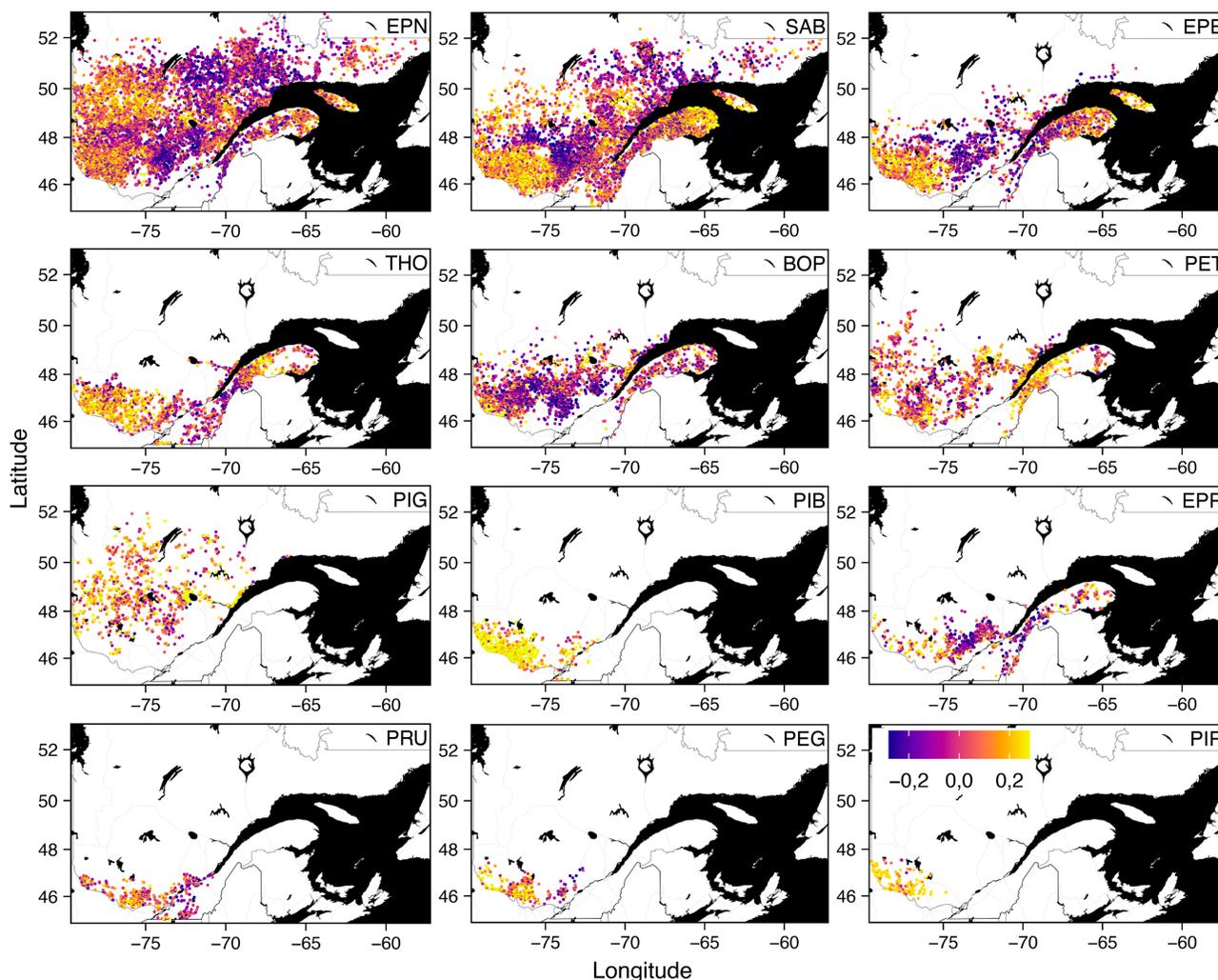


**Figure 10.** Variations de croissance moyennes (pour chaque arbre individuel, %) associées aux sécheresses du mois de juillet ( $SPEI_{1 \text{ mois}} < -1$ ) survenues au cours de la période de 1961 à 2000. Voir le tableau 3 pour la définition des codes d'essences.

une influence moins marquée sur la précision de l'estimation des anomalies climatiques mensuelles que sur la précision de valeurs quotidiennes. Nous avons donc confiance que les anomalies climatiques reflètent adéquatement la variabilité du climat par rapport aux conditions normales. La cohérence interrégionale du signal climatique au cours de la période étudiée (figure 2) indique d'ailleurs que les données climatiques utilisées reflètent bien la variabilité historique des données mensuelles. De plus, les coefficients de corrélation obtenus entre les variations interannuelles de la croissance et celles du climat portent aussi à croire que les données climatiques utilisées reflètent convenablement la variabilité historique du climat.

Les coefficients de corrélation entre les indices de croissance des arbres et les indices de bilan hydrique (SPEI) mensuels sont relativement faibles, et plusieurs d'entre eux ne diffèrent pas

significativement de 0. Il importe de rappeler que les coefficients de corrélation obtenus dans le cadre d'études dendroclimatiques sont généralement faibles (D'Orangeville et al. 2016, Huang et al. 2010). Une des raisons est que l'analyse porte sur des variables climatiques mensuelles, alors que la croissance annuelle des arbres est influencée simultanément par diverses conditions climatiques de durée et d'intensité variables (printemps tardif, gel tardif, automne hâtif, sécheresse estivale, vague de chaleur, etc.). Par exemple, une étude de cas a démontré qu'un stress thermique d'environ 12 jours au début juillet a causé un arrêt précoce de la croissance et la formation d'un cerne de croissance anormalement mince chez le sapin baumier en 2006 (Duchesne et Houle 2011, Duchesne et al. 2012). Ce stress thermique a apparemment résulté de températures et d'humidités relatives anormalement élevées combinées à des précipitations faibles

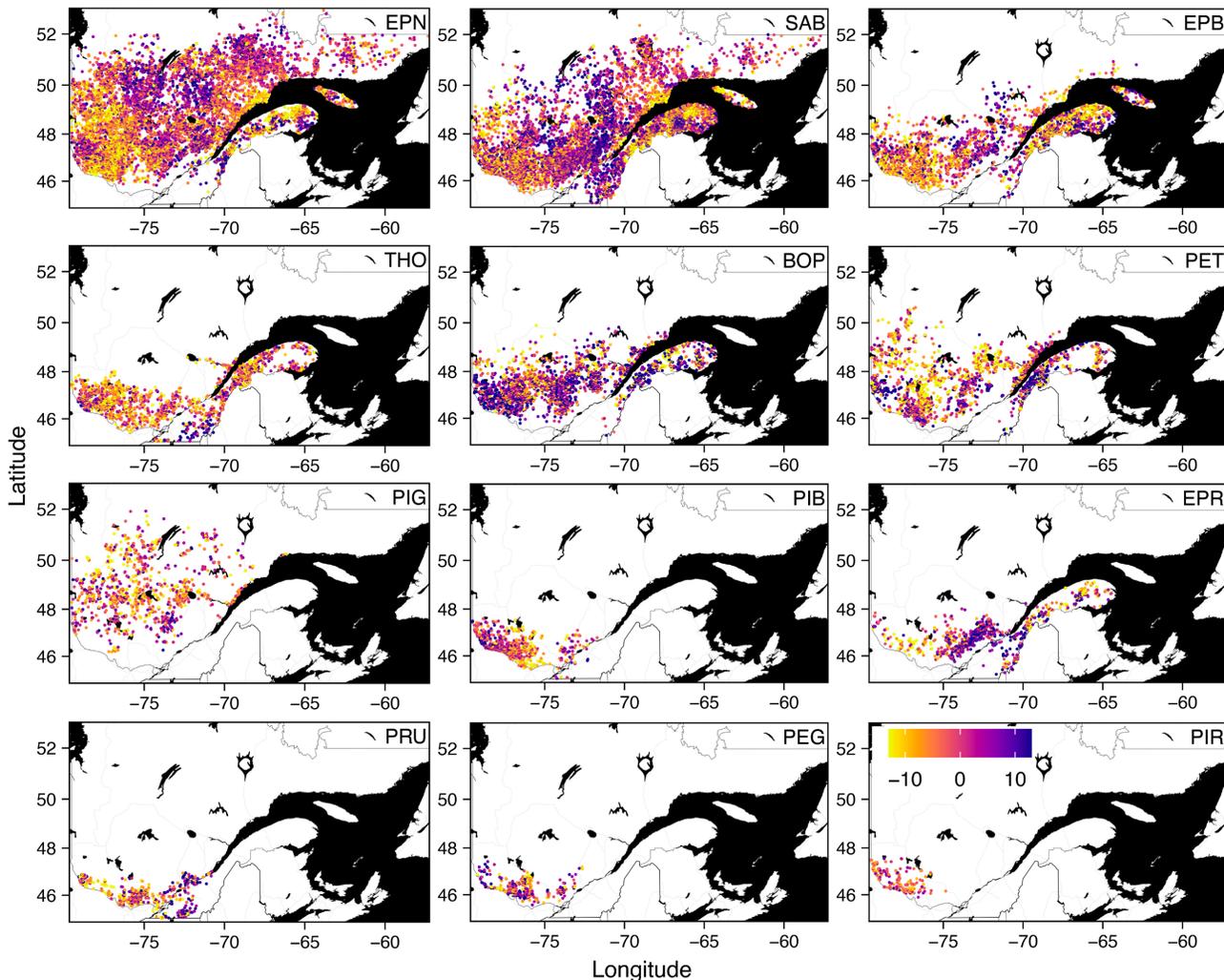


**Figure 11.** Coefficients de corrélation de Pearson (pour chaque arbre individuel) entre la variation interannuelle de l'indice de croissance et celle de la disponibilité en eau au mois de juillet ( $SPEI_{1\text{ mois}}$ ) au cours de la période de 1961 à 2000. Les valeurs négatives indiquent une croissance favorisée par la sécheresse. Voir le tableau 3 pour la définition des codes d'essences.

et à des vents de faibles vélocités. L'analyse de sensibilité réalisée à partir de variables climatiques mensuelles peut donc masquer les effets d'événements climatiques extrêmes de courte durée. À cette diversité de conditions climatiques s'ajoutent les autres événements ponctuels comme les défoliations par les insectes qui peuvent influencer les variations interannuelles de la croissance des arbres. Il n'est donc pas surprenant que les coefficients de corrélation entre les indices de croissance annuels et les SPEI mensuels soient faibles, puisque le signal de l'influence de cette variable mensuelle est confondu avec l'ensemble des autres conditions qui régissent les variations de croissance interannuelles. En somme, les séries chronologiques d'indices de croissance des arbres intègrent les signaux de plusieurs facteurs, y compris les épisodes de défoliation par les insectes et une panoplie de phénomènes climatiques saisonniers

qui peuvent influencer la croissance des arbres. La combinaison de ces facteurs au sein du signal limite notre capacité à apprécier l'influence de chacun de ces facteurs pris isolément, de même que leurs interactions possibles. Le signe du coefficient de corrélation (positif ou négatif) et sa valeur nous permettent néanmoins de documenter, de manière relative, la sensibilité des arbres et des essences aux variations interannuelles du bilan hydrique. Notons ici que les coefficients de corrélation n'ont aucun objectif de prédiction.

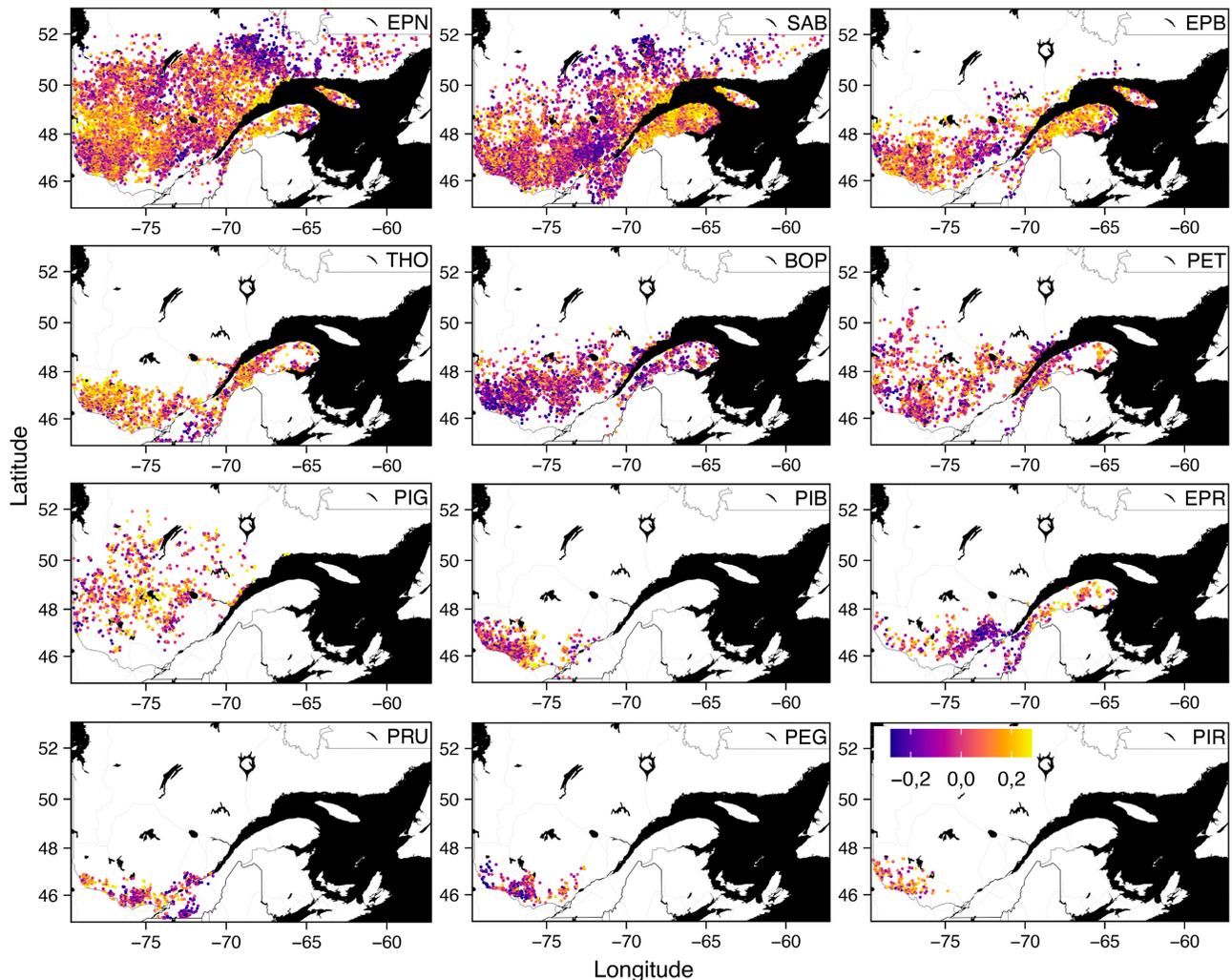
Il est connu que les sécheresses ponctuelles peuvent influencer la croissance des arbres pour l'année en cours, mais aussi pour plusieurs années subséquentes (Itter *et al.* 2019). De plus, les sécheresses automnales qui surviennent après l'arrêt de la croissance radiale peuvent apparemment influencer la croissance de l'année



**Figure 12.** Variations de croissance moyennes (pour chaque arbre individuel, %) associées aux sécheresses du mois d'août ( $SPEI_{1\text{mois}} < -1$ ) survenues au cours de la période de 1961 à 2000. Voir le tableau 3 pour la définition des codes d'essences.

suivante (D'Orangeville *et al.* 2013, 2016, 2018b, Huang *et al.* 2010, Itter *et al.* 2019, Rennenberg *et al.* 2006). Elles peuvent notamment influencer les processus de différenciation cellulaire (p. ex. : épaissement des parois cellulaires et lignification du bois tardif) qui s'opèrent généralement jusqu'en septembre-octobre chez les conifères en haute altitude (Rossi *et al.* 2007). Dans notre étude, seule la sensibilité des arbres aux sécheresses estivales de l'année en cours a été documentée. L'analyse de la réaction des arbres aux sécheresses des années antérieures serait possible, mais complexifierait considérablement les analyses, les résultats et les interprétations.

La présente étude visait à quantifier la sensibilité des arbres aux variations interannuelles du bilan hydrique, sans égard à la croissance absolue des arbres. L'étude de la variabilité spatiale de la croissance absolue en fonction des caractéristiques des stations et des conditions climatiques a récemment été réalisée pour les 6 essences les plus abondantes de la forêt boréale québécoise (D'Orangeville *et al.* 2018a). L'étude de la croissance absolue des autres espèces ne faisait pas partie du présent mandat.



**Figure 13.** Coefficients de corrélation de Pearson (pour chaque arbre individuel) entre la variation interannuelle de l'indice de croissance et celle de la disponibilité en eau au mois d'août ( $SPEI_{1\text{ mois}}$ ) au cours de la période de 1961 à 2000. Les valeurs négatives indiquent une croissance favorisée par la sécheresse. Voir le tableau 3 pour la définition des codes d'essences.



## Conclusion

En réponse à un mandat du Service des orientations d'aménagement de la Direction de l'aménagement et de l'environnement forestiers du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, nous avons évalué la sensibilité des arbres aux sécheresses ponctuelles et à la variabilité interannuelle du bilan hydrique climatique à partir de mesures de cernes de croissance de près de 70 000 arbres-études échantillonnés dans le cadre des inventaires forestiers. Les analyses révèlent que la sensibilité des arbres varie selon l'essence, l'environnement climatique et le milieu physique de la station. La sensibilité des arbres a été compilée par essence et

par milieu physique pour chacun des territoires des guides de reconnaissance des types écologiques. Ces connaissances peuvent contribuer à évaluer localement la vulnérabilité des essences forestières aux sécheresses et à orienter l'élaboration de stratégies d'adaptation visant à réduire les impacts des changements climatiques sur la productivité des forêts. Dans le futur, il serait possible d'étalonner des modèles prédictifs de cette sensibilité et d'évaluer la réponse des arbres en fonction de scénarios de changements climatiques. Ce travail nécessiterait toutefois beaucoup plus de temps et de ressources que la présente analyse.



## Références bibliographiques

- Allen, C.D., A.K. Macalady, H. Chenchouni, D. Bachelet, N. McDowell, M. Vennetier, T. Kitzberger, A. Rigling, D.D. Breshears, E.H. (Ted) Hogg, P. Gonzalez, R. Fensham, Z. Zhang, J. Castro, N. Demidova, J.H. Lim, G. Allard, S.W. Running, A. Semerci et N. Cobb, 2010. *A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests*. *For. Ecol. Manage.* 259(4): 660-684. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.001>
- Babst, F., O. Bouriaud, B. Poulter, V. Trouet, M.P. Girardin et D.C. Frank, 2019. *Twentieth century redistribution in climatic drivers of global tree growth*. *Sci. Adv.* 5(1): eaat4313. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat4313>
- Ballantyne, A.P., C.B. Alden, J.B. Miller, P.P. Tans et J.W.C. White, 2012. *Increase in observed net carbon dioxide uptake by land and oceans during the past 50 years*. *Nature* 488(7409): 70-72. <https://doi.org/10.1038/nature11299>
- Bobbink, R., K. Hicks, J. Galloway, T. Spranger, R. Alkemade, M. Ashmore, M. Bustamante, S. Cinderby, E. Davidson, F. Dentener, B. Emmett, J.-W. Erisman, M. Fenn, F. Gilliam, A. Nordin, L. Pardo et W. de Vries, 2010. *Global assessment of nitrogen deposition effects on terrestrial plant diversity: a synthesis*. *Ecol. Appl.* 20(1): 30-59. <https://doi.org/10.1890/08-1140.1>
- Boisvenue, C. et S.W. Running, 2006. *Impacts of climate change on natural forest productivity - evidence since the middle of the 20<sup>th</sup> century*. *Glob. Change Biol.* 12(5): 862-882. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01134.x>
- Brodribb, T.J., J. Powers, H. Cochard et B. Choat, 2020. *Hanging by a thread? Forests and drought*. *Science* 368(6488): 261-266. <https://doi.org/10.1126/science.aat7631>
- Brown, R.D. et B. Brasnett, 2010. *Canadian Meteorological Centre (CMC) Daily Snow Depth Analysis Data, Version 1*. NSIDC. <https://doi.org/10.5067/W9FOYWH0EQZ3>
- Buermann, W., M. Forkel, M. O'Sullivan, S. Sitch, P. Friedlingstein, V. Haverd, A.K. Jain, E. Kato, M. Kautz, S. Lienert, D. Lombardozzi, J.E.M.S. Nabel, H. Tian, A.J. Wiltshire, D. Zhu, W.K. Smith et A.D. Richardson, 2018. *Widespread seasonal compensation effects of spring warming on northern plant productivity*. *Nature* 562: 110-114. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0555-7>
- Bunn, A.G., 2008. *A dendrochronology program library in R (dplR)*. *Dendrochronologia* 26(2): 115-124. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2008.01.002>
- Claeys, H. et D. Inzé, 2013. *The agony of choice: How plants balance growth and survival under water-limiting conditions*. *Plant Physiol.* 162(4): 1768-1779. <https://doi.org/10.1104/pp.113.220921>
- Clark, J.S., L. Iverson, C.W. Woodall, C.D. Allen, D.M. Bell, D.C. Bragg, A.W. D'Amato, F.W. Davis, M.H. Hersh, I. Ibanez, S.T. Jackson, S. Matthews, N. Pederson, M. Peters, M.W. Schwartz, K.M. Waring et N.E. Zimmermann, 2016. *The impacts of increasing drought on forest dynamics, structure, and biodiversity in the United States*. *Glob. Change Biol.* 22(7): 2329-2352. <https://doi.org/10.1111/gcb.13160>
- D'Orangeville, L., B. Côté, D. Houle et H. Morin, 2013. *The effects of throughfall exclusion on xylogenesis of balsam fir*. *Tree Physiol.* 33(5): 516-526. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpt027>
- D'Orangeville, L., L. Duchesne, D. Houle, D. Kneeshaw, B. Côté et N. Pederson, 2016. *Northeastern North America as a potential refugium for boreal forests in a warming climate*. *Science* 352(6292): 1452-1455. <https://doi.org/10.1126/science.aaf4951>
- D'Orangeville, L., D. Houle, L. Duchesne, R.P. Phillips, Y. Bergeron et D. Kneeshaw, 2018a. *Beneficial effects of climate warming on boreal tree growth may be transitory*. *Nature Commun.* 9(1): 3213. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05705-4>
- D'Orangeville, L., J. Maxwell, D. Kneeshaw, N. Pederson, L. Duchesne, T. Logan, D. Houle, D. Arseneault, C.M. Beier, D.A. Bishop, D. Druckenbrod, S. Fraver, F. Girard, J. Halman, C. Hansen, J.L. Hart, H. Hartmann, M. Kaye, D. Leblanc, S. Manzoni, R. Ouimet, S. Rayback, C.R. Rollinson et R.P. Phillips, 2018b. *Drought timing and local climate determine the sensitivity of eastern temperate forests to drought*. *Glob. Change Biol.* 24(6): 2339-2351. <https://doi.org/10.1111/gcb.14096>
- Duchesne, L. et D. Houle, 2011. *Modelling day-to-day stem diameter variation and annual growth of balsam fir (Abies balsamea (L.) Mill.) from daily climate*. *For. Ecol. Manage.* 262(5): 863-872. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.05.027>

- Duchesne, L., D. Houle et L. D'Orangeville, 2012. *Influence of climate on seasonal patterns of stem increment of balsam fir in a boreal forest of Québec, Canada*. Agric. For. Meteorol. 162-163: 108-114. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.04.016>
- Duchesne, L., L. D'Orangeville, R. Ouimet, D. Houle et D. Kneeshaw, 2017. *Extracting coherent tree-ring climatic signals across spatial scales from extensive forest inventory data*. PLoS ONE 12(12): e0189444. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0189444>
- Fan, Y., G. Miguez-Macho, E.G. Jobbágy, R.B. Jackson et C. Otero-Casal, 2017. *Hydrologic regulation of plant rooting depth*. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 114(40): 10572-10577. <https://doi.org/10.1073/pnas.1712381114>
- Forkel, M., N. Carvalhais, C. Rödenbeck, R. Keeling, M. Heimann, K. Thonicke, S. Zaehle et M. Reichstein, 2016. *Enhanced seasonal CO<sub>2</sub> exchange caused by amplified plant productivity in northern ecosystems*. Science 351(6274): 696-699. <https://doi.org/10.1126/science.aac4971>
- Graven, A.H.D., R.F. Keeling, S.C. Piper, P.K. Patra, B.B. Stephens, S.C. Wofsy, L.R. Welp, C. Sweeney, P.P. Tans, J.J. Kelley, B.C. Daube, E.A. Kort, G.W. Santoni et J.D. Bent, 2013. *Enhanced seasonal exchange of CO<sub>2</sub> by northern ecosystems since 1960*. Science 341(6150): 1085-1089. <https://doi.org/10.1126/science.1239207>
- Greenwood, S., P. Ruiz-Benito, J. Martinez-Vilalta, F. Lloret, T. Kitzberger, C.D. Allen, R. Fensham, D.C. Laughlin, J. Kattge, G. Bönisch, N.J.B. Kraft et A.S. Jump, 2017. *Tree mortality across biomes is promoted by drought intensity, lower wood density and higher specific leaf area*. Ecol. Lett. 20(4): 539-553. <https://doi.org/10.1111/ele.12748>
- Hargreaves, G.H. et Z.A. Samani, 1985. *Reference crop evapotranspiration from temperature*. Appl. Eng. Agric. 1(2): 96-99. <https://doi.org/10.13031/2013.26773>
- Huang, J., J.C. Tardif, Y. Bergeron, B. Denneler, F. Berninger et M.P. Girardin, 2010. *Radial growth response of four dominant boreal tree species to climate along a latitudinal gradient in the eastern Canadian boreal forest*. Glob. Change Biol. 16(2): 711-731. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.01990.x>
- Itter, M.S., L. D'Orangeville, A. Dawson, D. Kneeshaw, L. Duchesne et A.O. Finley, 2019. *Boreal tree growth exhibits decadal-scale ecological memory to drought and insect defoliation, but no negative response to their interaction*. J. Ecol. 107(3): 1288-1301. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13087>
- Jump, A.S., P. Ruiz-benito, S. Greenwood, C.D. Allen, T. Kitzberger, R. Fensham, J. Martinez-Vilalta et F. Lloret, 2017. *Structural overshoot of tree growth with climate variability and the global spectrum of drought-induced forest dieback*. Glob. Change Biol. 23(9): 3742-3757. <https://doi.org/10.1111/gcb.13636>
- Kahle, D. et H. Wickham, 2013. *ggmap: Spatial Visualization with ggplot2*. R J. 5(1): 144-161. <https://doi.org/10.32614/RJ-2013-014>
- Lloret, F., E.G. Keeling et A. Sala, 2011. *Components of tree resilience: Effects of successive low-growth episodes in old ponderosa pine forests*. Oikos 120(12): 1909-1920. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0706.2011.19372.x>
- Ma, Z., C. Peng, Q. Zhu, H. Chen, G. Yu, W. Li, X. Zhou, W. Wang et W. Zhang, 2012. *Regional drought-induced reduction in the biomass carbon sink of Canada's boreal forests*. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 109(7): 2423-2427. <https://doi.org/10.1073/pnas.1111576109>
- Mérian, P. et F. Lebourgeois, 2011. *Consequences of decreasing the number of cored trees per plot on chronology statistics and climate-growth relationships: a multispecies analysis in a temperate climate*. Can. J. For. Res. 41(12): 2413-2422. <https://doi.org/10.1139/x11-149>
- [MFFP] Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, 2016a. *Norme d'inventaire écoforestier – Placettes-échantillons permanentes, édition 2016*. <https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/Norme-PEP.pdf>
- [MFFP] Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, 2016b. *Norme d'inventaire écoforestier – placettes-échantillons temporaires, édition 2016*. <https://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/Norme-PET.pdf>
- Nemani, R.R., C.D. Keeling, H. Hashimoto, W.M. Jolly, S.C. Piper, C.J. Tucker, R.B. Myneni et S.W. Running, 2003. *Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999*. Science 300(5625): 1560-1563. <https://doi.org/10.1126/science.1082750>

- Pan, Y., R.A. Birdsey, O.L. Phillips et R.B. Jackson, 2013. *The structure, distribution, and biomass of the world's forests*. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 44(1): 593-622. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110512-135914>
- Peng, C., Z. Ma, X. Lei, Q. Zhu, H. Chen, W. Wang, S. Liu, W. Li, X. Fang et X. Zhou, 2011. *A drought-induced pervasive increase in tree mortality across Canada's boreal forests*. *Nat. Clim. Change* 1(9): 467-471. <https://doi.org/10.1038/nclimate1293>
- R Core Team, 2019. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. Vienne (Autriche). <https://www.R-project.org>
- Régnière, J., 1996. *Generalized approach to landscape-wide seasonal forecasting with temperature-driven simulation models*. *Environ. Entomol.* 25(5): 869-881. <https://doi.org/10.1093/ee/25.5.869>
- Rennenberg, H., F. Loreto, A. Polle, F. Brilli, S. Fares, R.S. Beniwal et A. Gessler, 2006. *Physiological responses of forest trees to heat and drought*. *Plant Biol.* 8(5): 556-571. <https://doi.org/10.1055/s-2006-924084>
- Rossi, S., A. Deslauriers, T. Anfodillo, H. Morin, A. Saracino, R. Motta et M. Borghetti, 2006. *Conifers in cold environments synchronize maximum growth rate of tree-ring formation with day length*. *New Phytol.* 170(2): 301-10. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01660.x>
- Rossi, S., A. Deslauriers, T. Anfodillo et V. Carraro, 2007. *Evidence of threshold temperatures for xylogenesis in conifers at high altitudes*. *Oecologia* 152(1): 1-12. <https://doi.org/10.1007/s00442-006-0625-7>
- Rossi, S., A. Deslauriers, J. Griçar, J.-W. Seo, C.B. Rathgeber, T. Anfodillo, H. Morin, T. Levanic, P. Oven et R. Jalkanen, 2008. *Critical temperatures for xylogenesis in conifers of cold climates*. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 17(6): 696-707. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2008.00417.x>
- Sitch, S., C. Huntingford, N. Gedney, P.E. Levy, M. Lomas, S.L. Piao, R. Betts, P. Ciais, P. Cox, P. Friedlingstein, C.D. Jones, I.C. Prentice et F.I. Woodward, 2008. *Evaluation of the terrestrial carbon cycle, future plant geography and climate-carbon cycle feedbacks using five Dynamic Global Vegetation Models (DGVMs)*. *Glob. Change Biol.* 14(9): 2015-2039. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01626.x>
- Trouillier, M., M. van der Maaten-Theunissen, J.E. Harvey, D. Würth, M. Schnittler et M. Wilmking, 2018. *Visualizing individual tree differences in tree-ring studies*. *Forests* 9(4): 216. <https://doi.org/10.3390/f9040216>
- Vicente-Serrano, S.M., S. Beguería et J.I. López-Moreno, 2010. *A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index*. *J. Clim.* 23(7): 1696-1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- Volaire, F., 2018. *A unified framework of plant adaptive strategies to drought: Crossing scales and disciplines*. *Glob. Change Biol.* 24(7): 2929-2938. <https://doi.org/10.1111/gcb.14062>
- Wang, J., H. Lin, J. Huang, C. Jiang, Y. Xie et M. Zhou, 2019. *Variations of drought tendency, frequency, and characteristics and their responses to climate change under CMIP5 RCP scenarios in Huai River Basin, China*. *Water* 11(10): 2174. <https://doi.org/10.3390/w11102174>
- Wickham, H., 2016. *ggplot2: Elegant graphics for data analysis*. Springer International Publishing. New York, NY (États-Unis). 260 p.
- Wickham, H., R. François, L. Henry et K. Müller, 2019. *dplyr: A grammar of data manipulation - R package version 0.8.3*. Logiciel.
- Wigley, T.M.L., K.R. Briffa et P.D. Jones, 1984. *On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydro-meteorology*. *J. Climat. Appl. Meteor.* 23(2): 201-213.
- Zhu, Z., S. Piao, R.B. Myneni, M. Huang, Z. Zeng, J.G. Canadell, P. Ciais, S. Sitch, P. Friedlingstein, A. Arneeth, C. Cao, L. Cheng, E. Kato, C. Koven, Y. Li, X. Lian, Y. Liu, R. Liu, J. Mao, Y. Pan, S. Peng, J. Peñuelas, B. Poulter, T.A.M. Pugh, B.D. Stocker, N. Viogy, X. Wang, Y. Wang, Z. Xiao, H. Yang, S. Zaehle et N. Zeng, 2016. *Greening of the Earth and its drivers*. *Nat. Clim. Change* 6(8): 791-795. <https://doi.org/10.1038/nclimate3004>

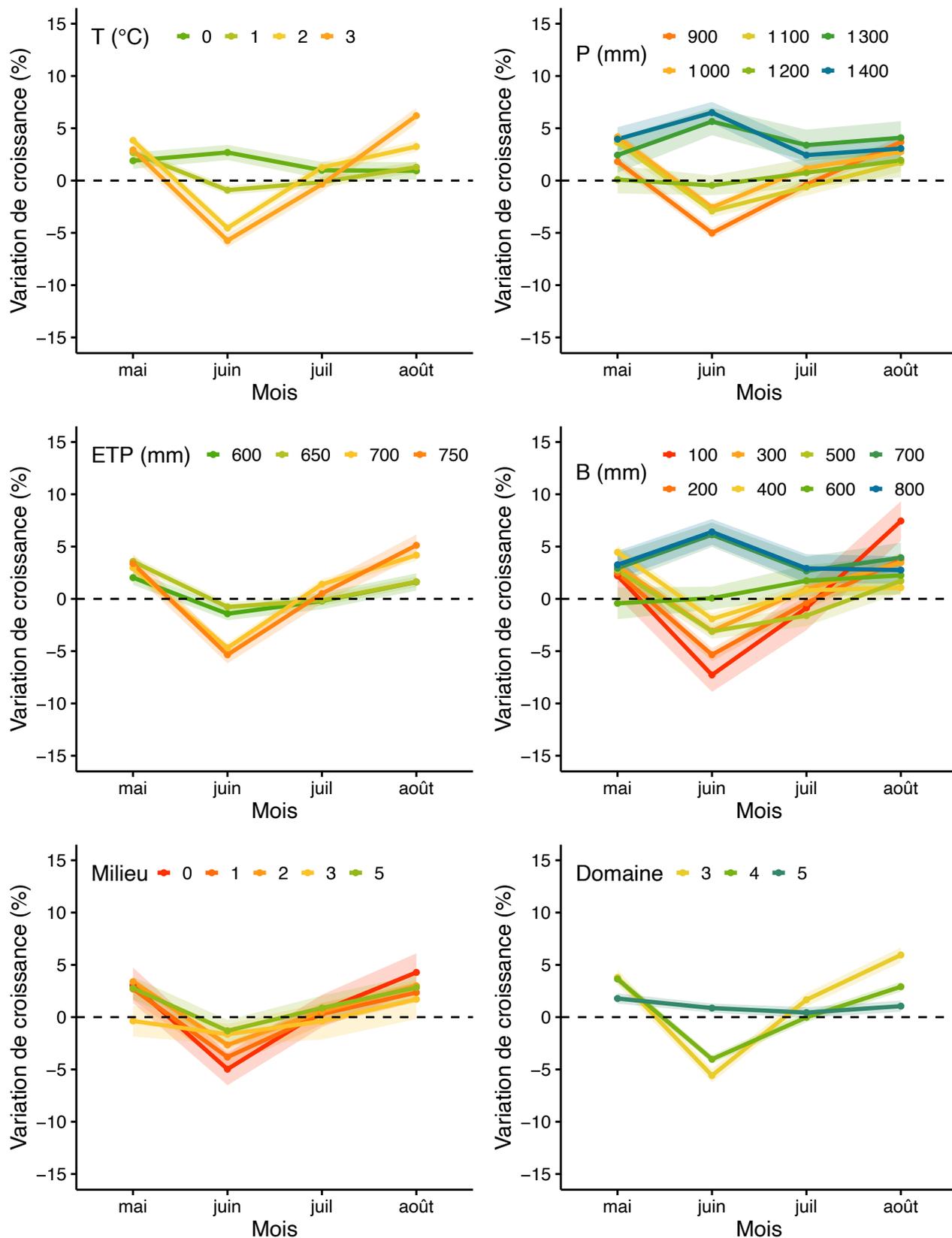


# Annexes

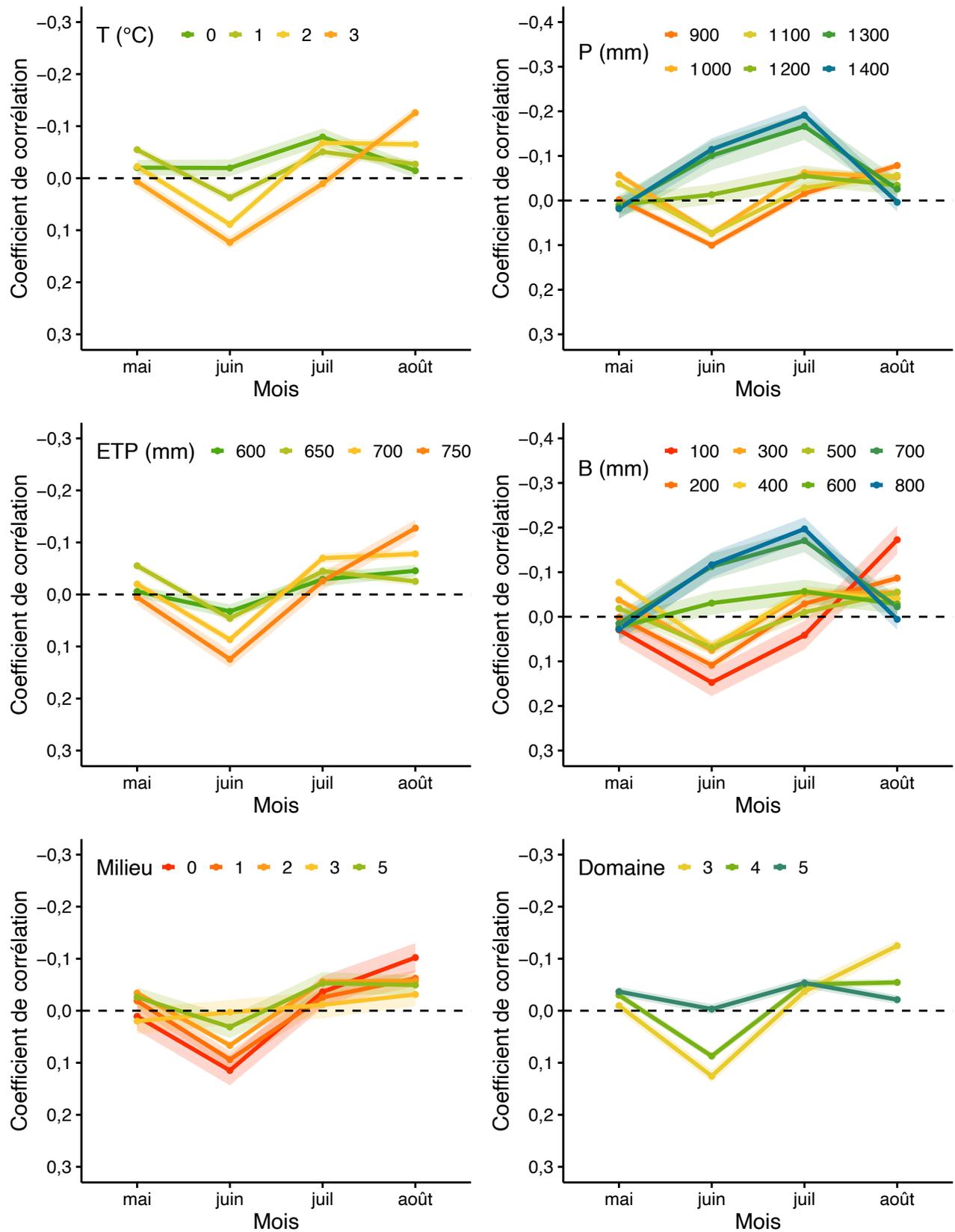
**Annexe A.** Variations de croissance moyennes des essences (%) associées aux sécheresses ( $SPEI_{1\text{ mois}} < -1$ ) survenues au cours de la période de 1961 à 2000, et coefficients de corrélations moyens entre les indices de sécheresses mensuels ( $SPEI_{1\text{ mois}}$ ) et les indices de croissance des arbres individuels, en fonction des normales climatiques (1961-2000), du milieu physique<sup>3</sup> et du domaine bioclimatique<sup>4</sup> qui caractérisent les stations. Les zones ombragées représentent l'intervalle de confiance (95 %,  $Z_{0,975}$  \*erreur type). Les coefficients de corrélation négatifs indiquent une croissance favorisée par la sécheresse; l'axe des ordonnées a été inversé pour faciliter l'interprétation. Les classes pour les variables continues ont été formées après avoir arrondi les valeurs de température (T) au degré Celsius près, de précipitations (P) et de bilan hydrique climatique (B) à 100 mm près, et d'évapotranspiration potentielle (ETP) à 50 mm près.

<sup>3</sup> Les codes de milieu physique utilisent, entre autres, les classes de drainage synthèse définies dans les guides de reconnaissance des types écologiques du MFFP : 0 = dépôt très mince, de texture variée, de drainage de xérique à hydrique ou dépôt minéral de mince à épais, de drainage xérique à hydrique, très pierreux sans matrice; 1 = dépôt minéral de mince à épais, de texture grossière, de drainage xérique ou mésique; 2 = dépôt minéral de mince à épais, de texture moyenne, de drainage mésique; 3 = dépôt minéral de mince à épais, de texture fine, de drainage mésique; 4 = dépôt minéral de mince à épais, de texture grossière, de drainage subhydrique; 5 = dépôt minéral de mince à épais, de texture moyenne, de drainage subhydrique; 6 = dépôt minéral de mince à épais, de texture fine, de drainage subhydrique; 7 = dépôt minéral de mince à épais, de drainage hydrique, ombrotrophe; 8 = dépôt organique ou minéral de mince à épais, de drainage hydrique, minérotrophe; 9 = dépôt organique de mince à épais, de drainage hydrique, ombrotrophe.

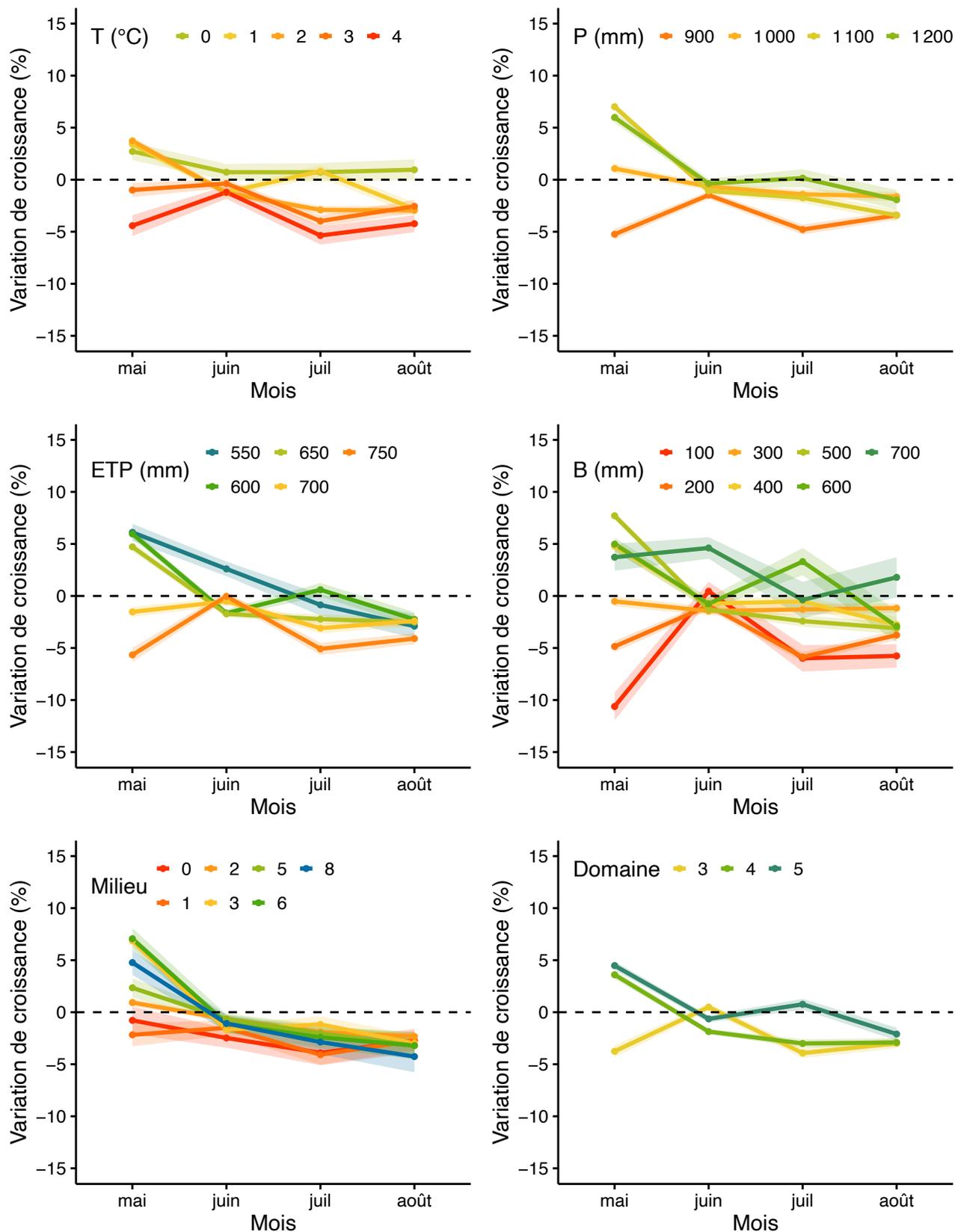
<sup>4</sup> Domaines bioclimatiques, du sud au nord : 1 = érablière à caryer cordiforme; 2 = érablière à tilleul; 3 = érablière à bouleau jaune; 4 = sapinière à bouleau jaune; 5 = sapinière à bouleau blanc; 6 = pessière à mousses.



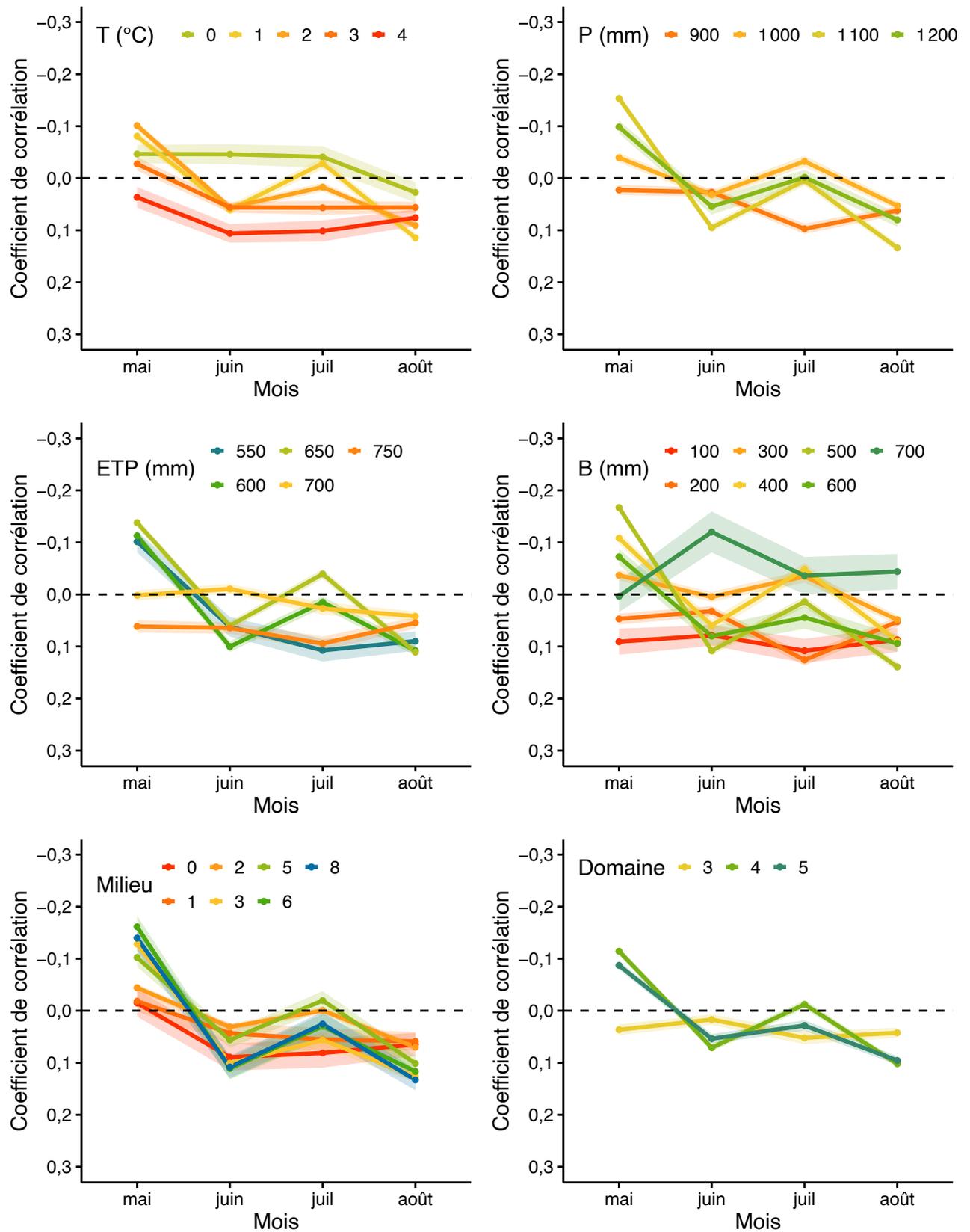
**Figure A1.** Variations de croissance moyennes du **bouleau à papier** (%) associées aux sécheresses ( $SPEI_{1\text{mois}} < -1$ ) survenues au cours de la période de 1961 à 2000. Les zones ombragées représentent l'intervalle de confiance (95 %). Voir la page titre de l'annexe pour la définition des codes.



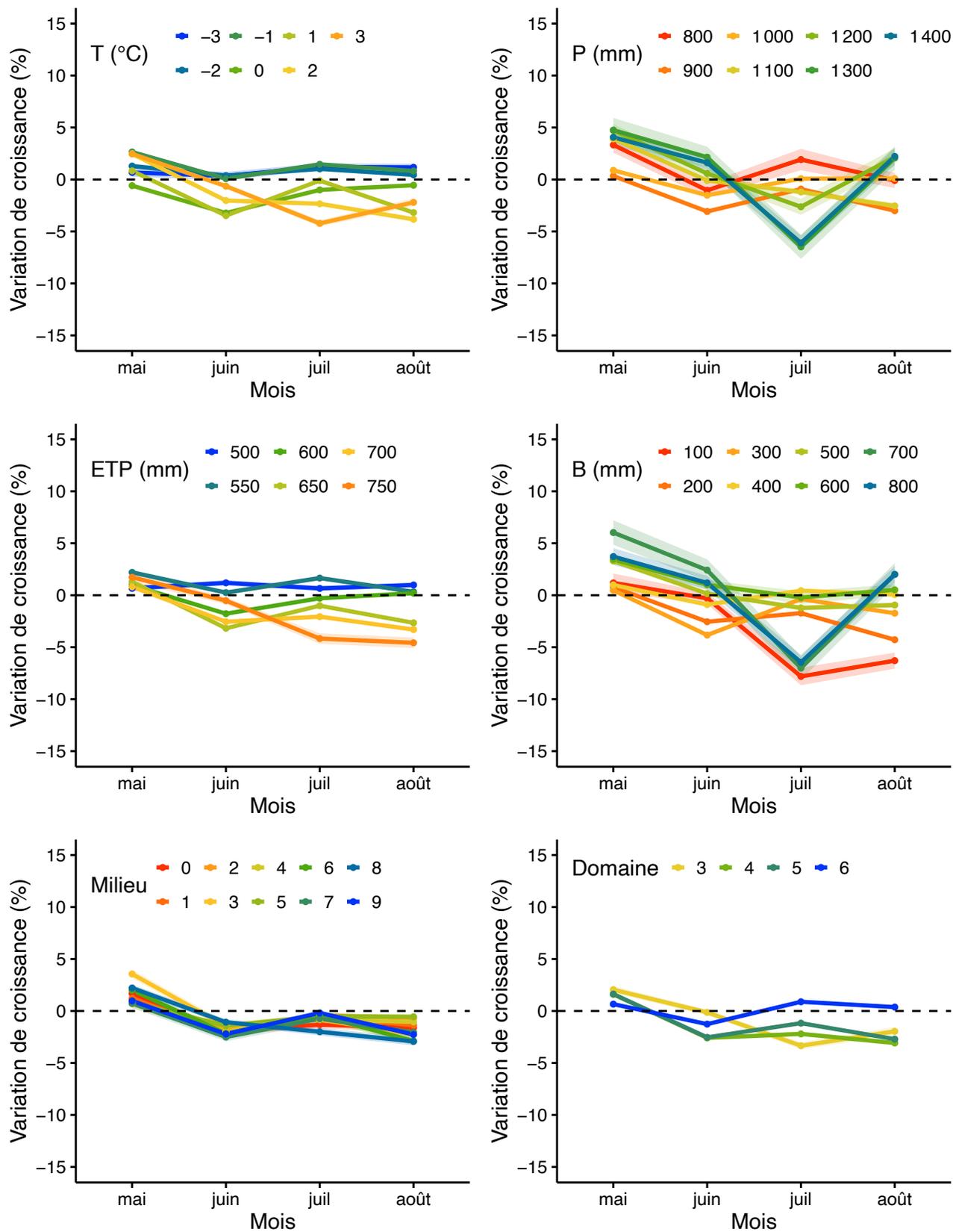
**Figure A2.** Coefficients de corrélation moyens entre les indices de croissance du **bouleau à papier** et les indices du bilan hydrique climatique ( $SPEI_{1\text{mois}}$ ) au cours de la période de 1961 à 2000. Les zones ombragées représentent l'intervalle de confiance (95 %). Voir la page titre de l'annexe pour la définition des codes.



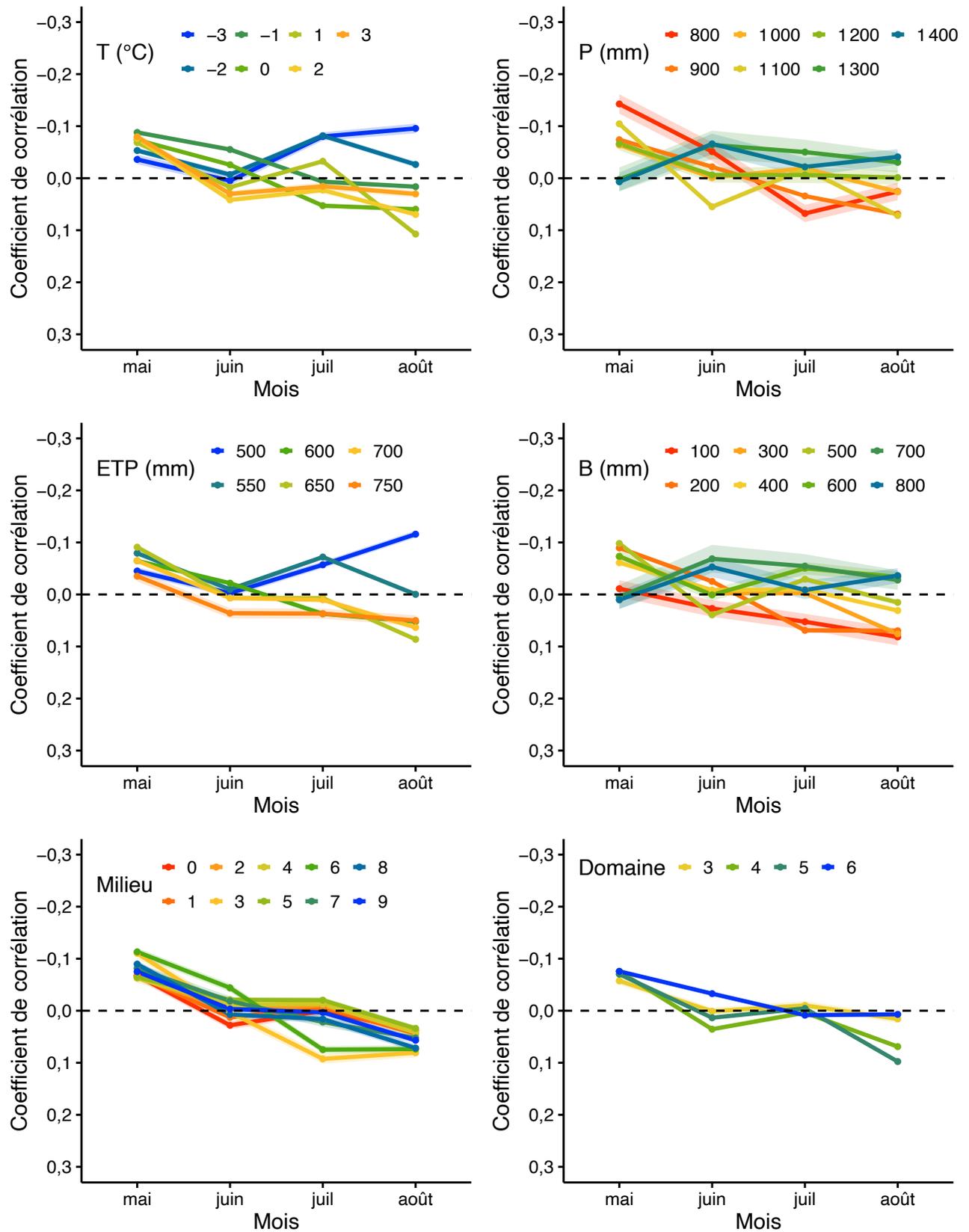
**Figure A3.** Variations de croissance moyennes de l'épinette blanche (%) associées aux sécheresses ( $SPEI_{1\text{ mois}} < -1$ ) survenues au cours de la période de 1961 à 2000. Les zones ombragées représentent l'intervalle de confiance (95 %). Voir la page titre de l'annexe pour la définition des codes.



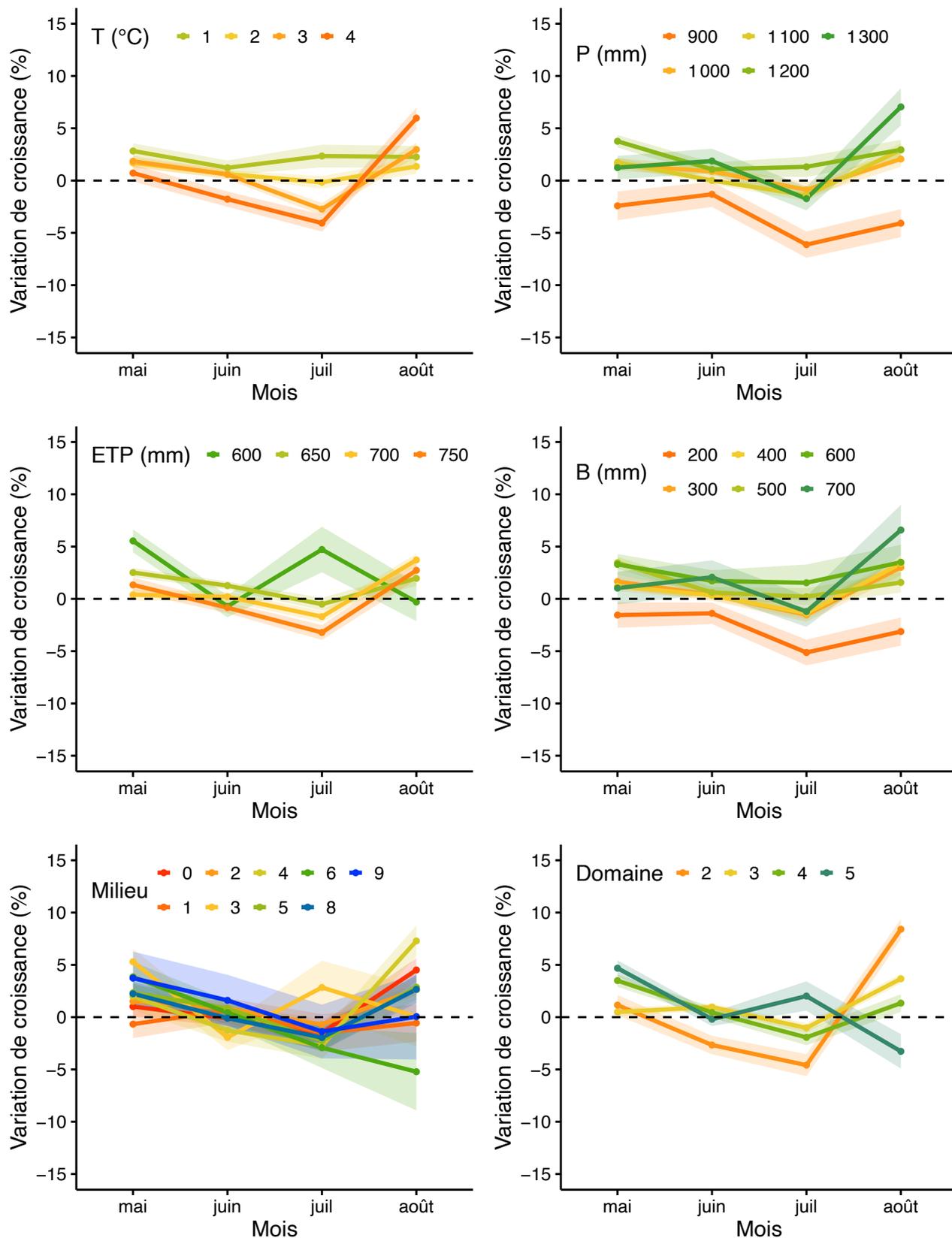
**Figure A4.** Coefficients de corrélation moyens entre les indices de croissance de l'épinette blanche et les indices du bilan hydrique climatique ( $SPEI_{1\text{mois}}$ ) au cours de la période de 1961 à 2000. Les zones ombragées représentent l'intervalle de confiance (95 %). Voir la page titre de l'annexe pour la définition des codes.



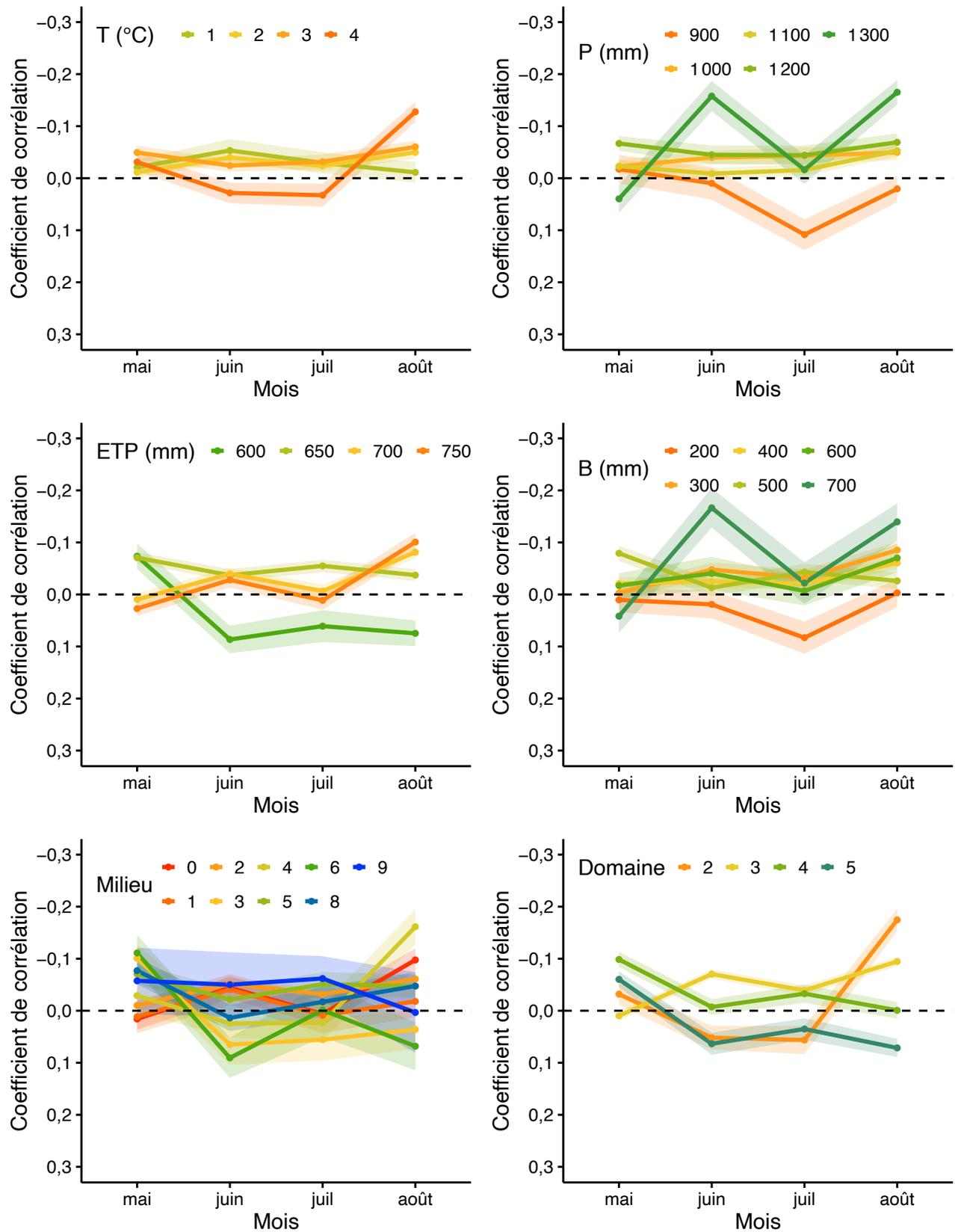
**Figure A5.** Variations de croissance moyennes de l'épinette noire (%) associées aux sécheresses ( $SPEI_{1\text{mois}} < -1$ ) survenues au cours de la période de 1961 à 2000. Les zones ombragées représentent l'intervalle de confiance (95 %). Voir la page titre de l'annexe pour la définition des codes.



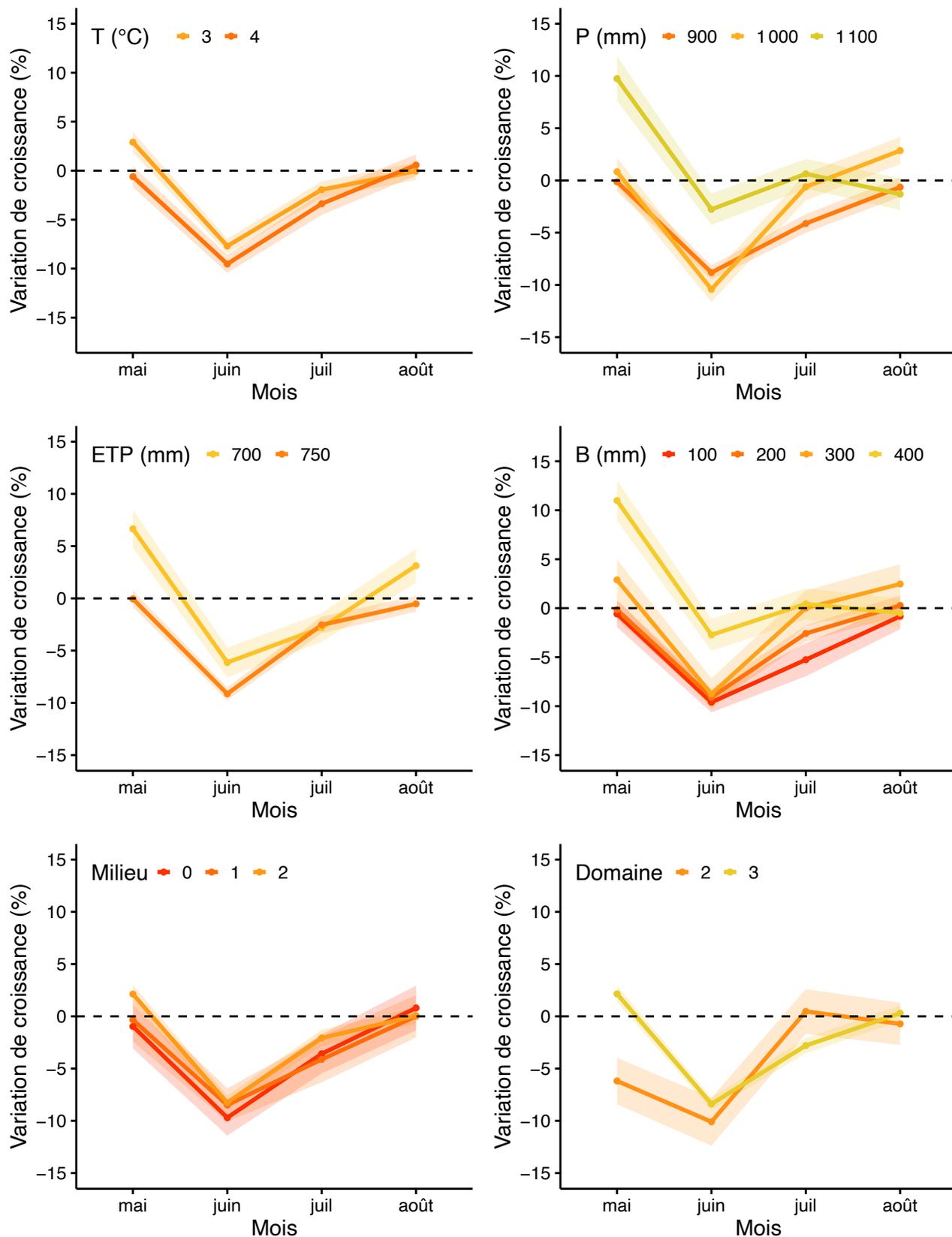
**Figure A6.** Coefficients de corrélation moyens entre les indices de croissance de l'épinette noire et les indices du bilan hydrique climatique ( $SPEI_{1,mois}$ ) au cours de la période de 1961 à 2000. Les zones ombragées représentent l'intervalle de confiance (95 %). Voir la page titre de l'annexe pour la définition des codes.



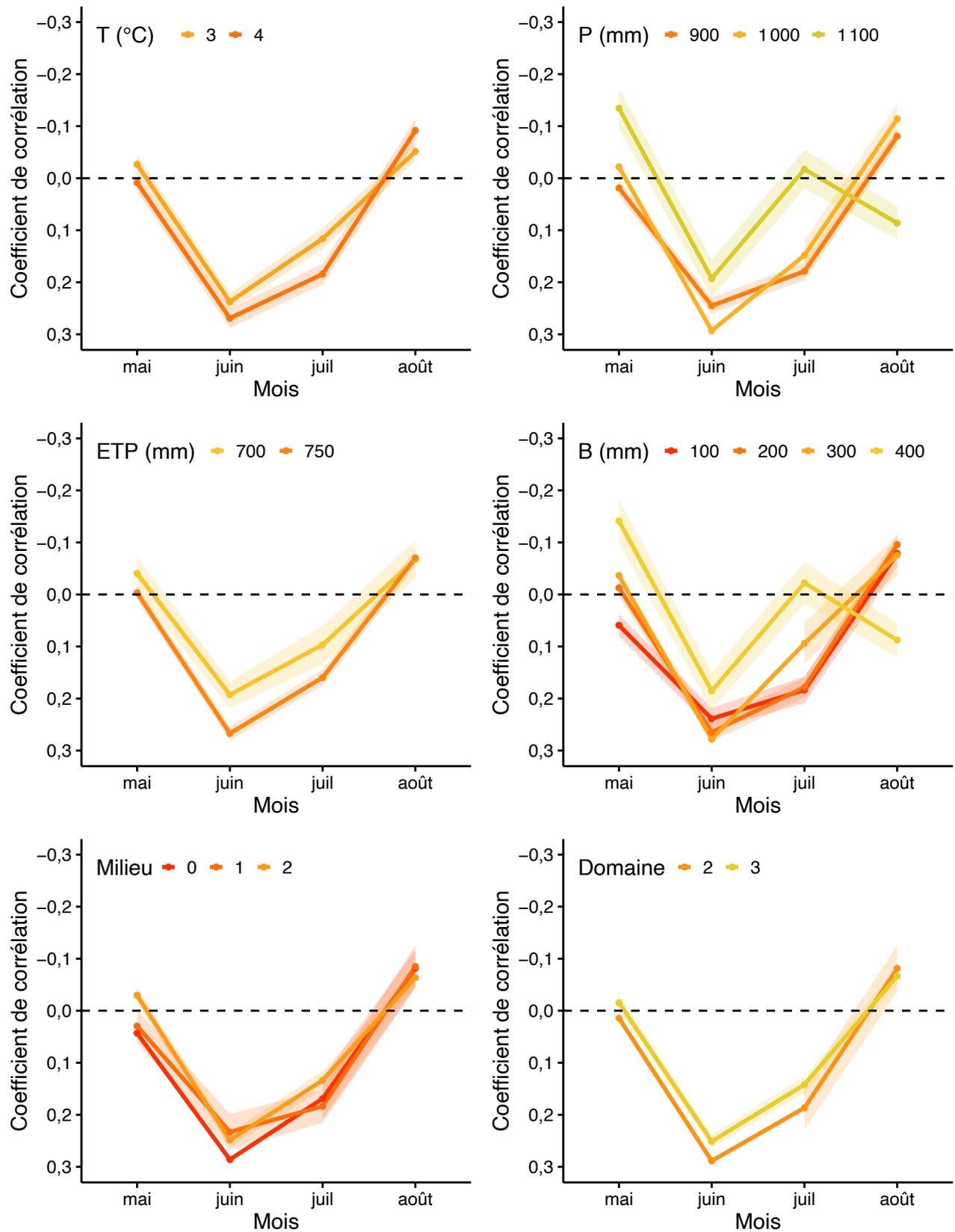
**Figure A7.** Variations de croissance moyennes de l'épinette rouge (%) associées aux sécheresses ( $SPEI_{1\text{ mois}} < -1$ ) survenues au cours de la période de 1961 à 2000. Les zones ombragées représentent l'intervalle de confiance (95 %). Voir la page titre de l'annexe pour la définition des codes.



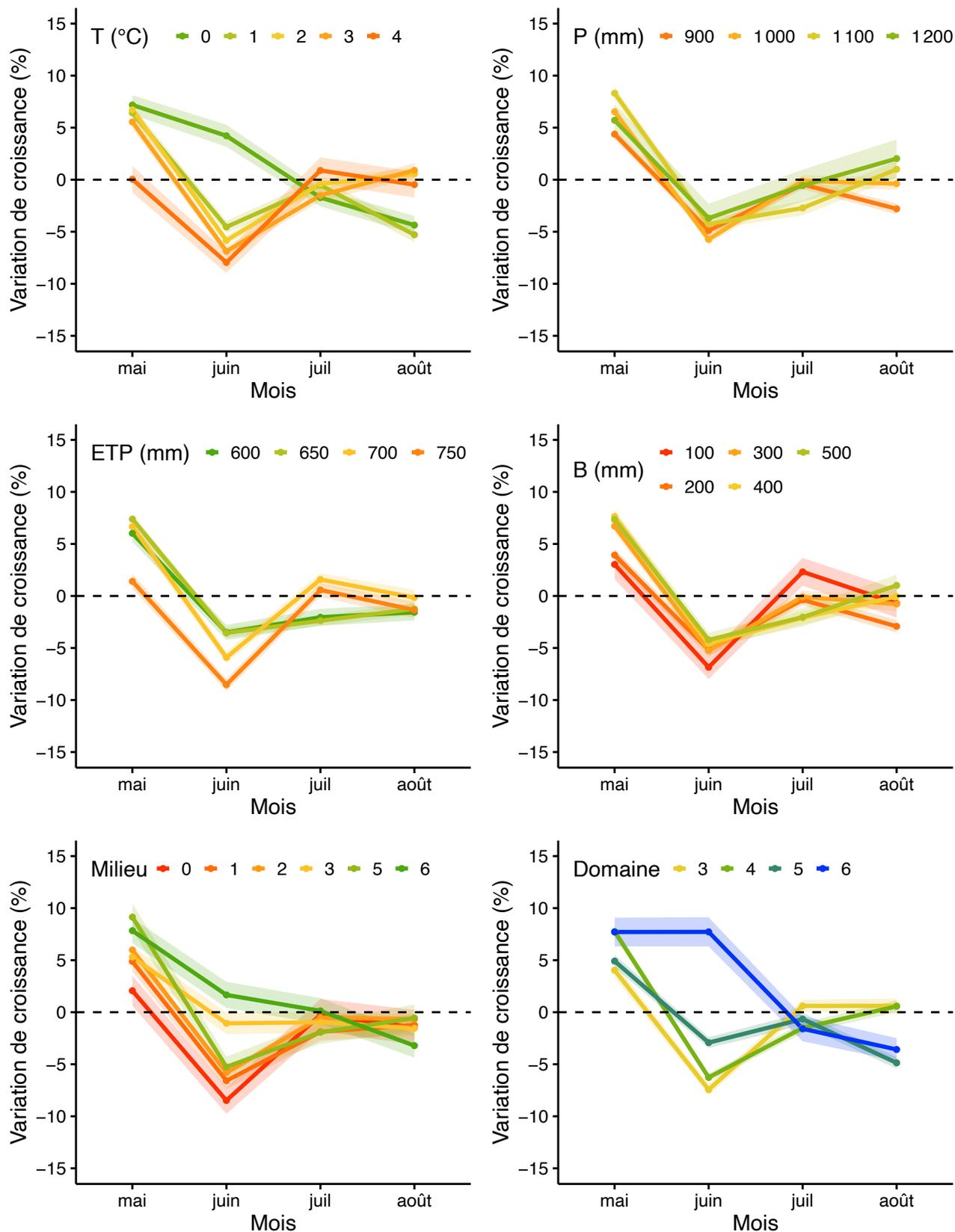
**Figure A8.** Coefficients de corrélation moyens entre les indices de croissance de l'épinette rouge et les indices du bilan hydrique climatique ( $SPEI_{1,mois}$ ) au cours de la période de 1961 à 2000. Les zones ombragées représentent l'intervalle de confiance (95 %). Voir la page titre de l'annexe pour la définition des codes.



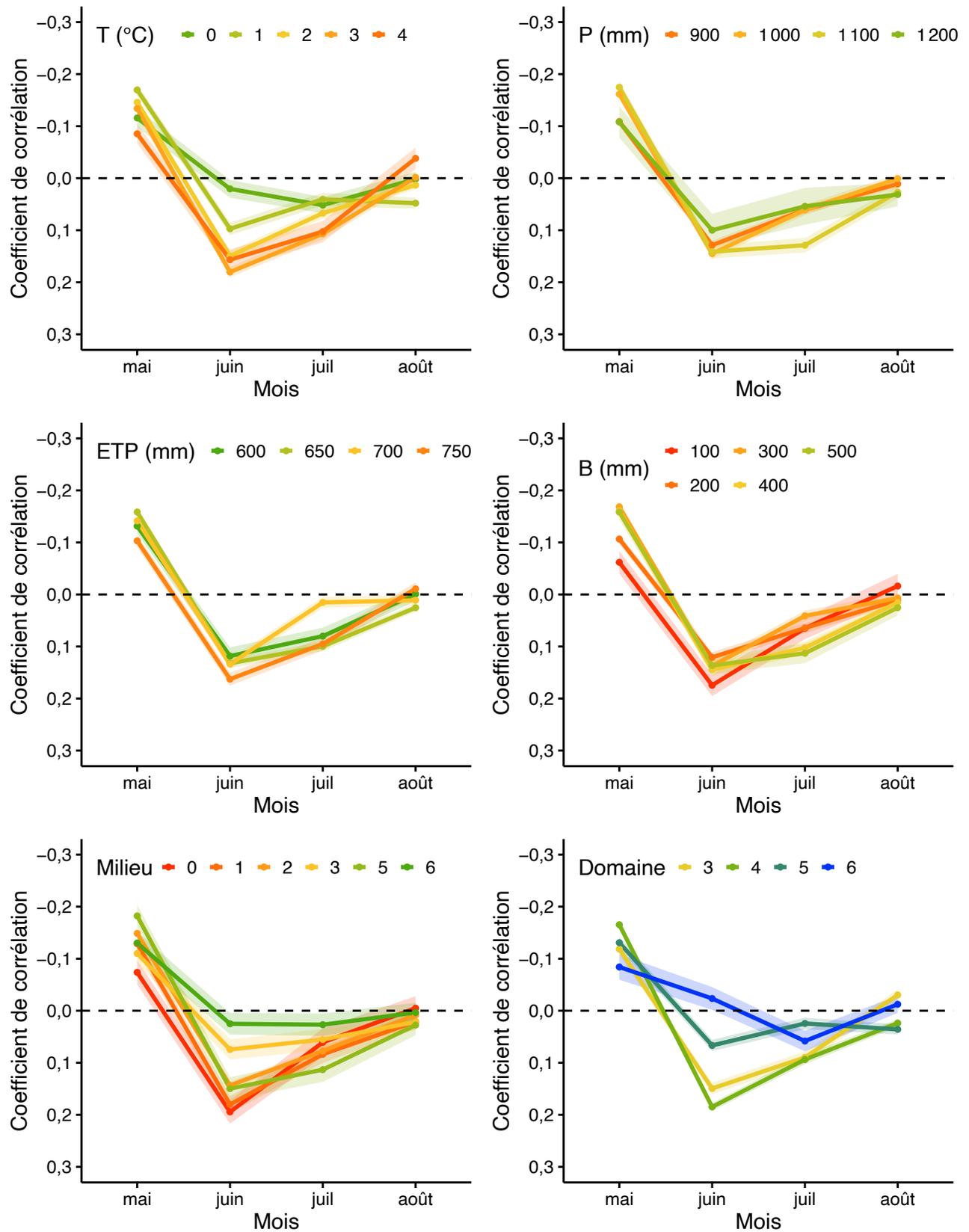
**Figure A9.** Variations de croissance moyennes du **peuplier à grandes dents** (%) associées aux sécheresses ( $SPEI_{1\text{mois}} < -1$ ) survenues au cours de la période de 1961 à 2000. Les zones ombragées représentent l'intervalle de confiance (95 %). Voir la page titre de l'annexe pour la définition des codes.



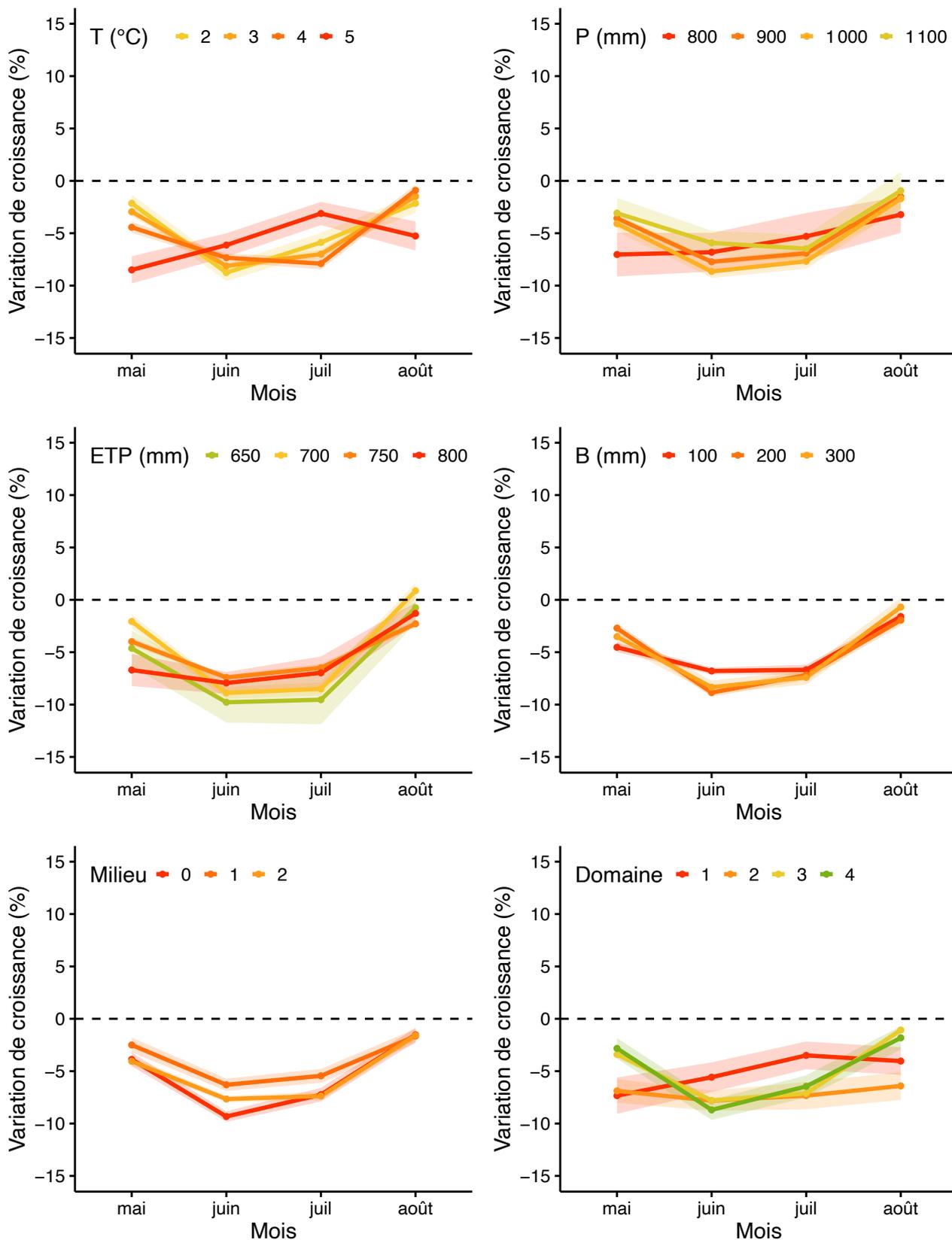
**Figure A10.** Coefficients de corrélation moyens entre les indices de croissance du **peuplier à grandes dents** et les indices du bilan hydrique climatique ( $SPEI_{1\text{mois}}$ ) au cours de la période de 1961 à 2000. Les zones ombragées représentent l'intervalle de confiance (95 %). Voir la page titre de l'annexe pour la définition des codes.



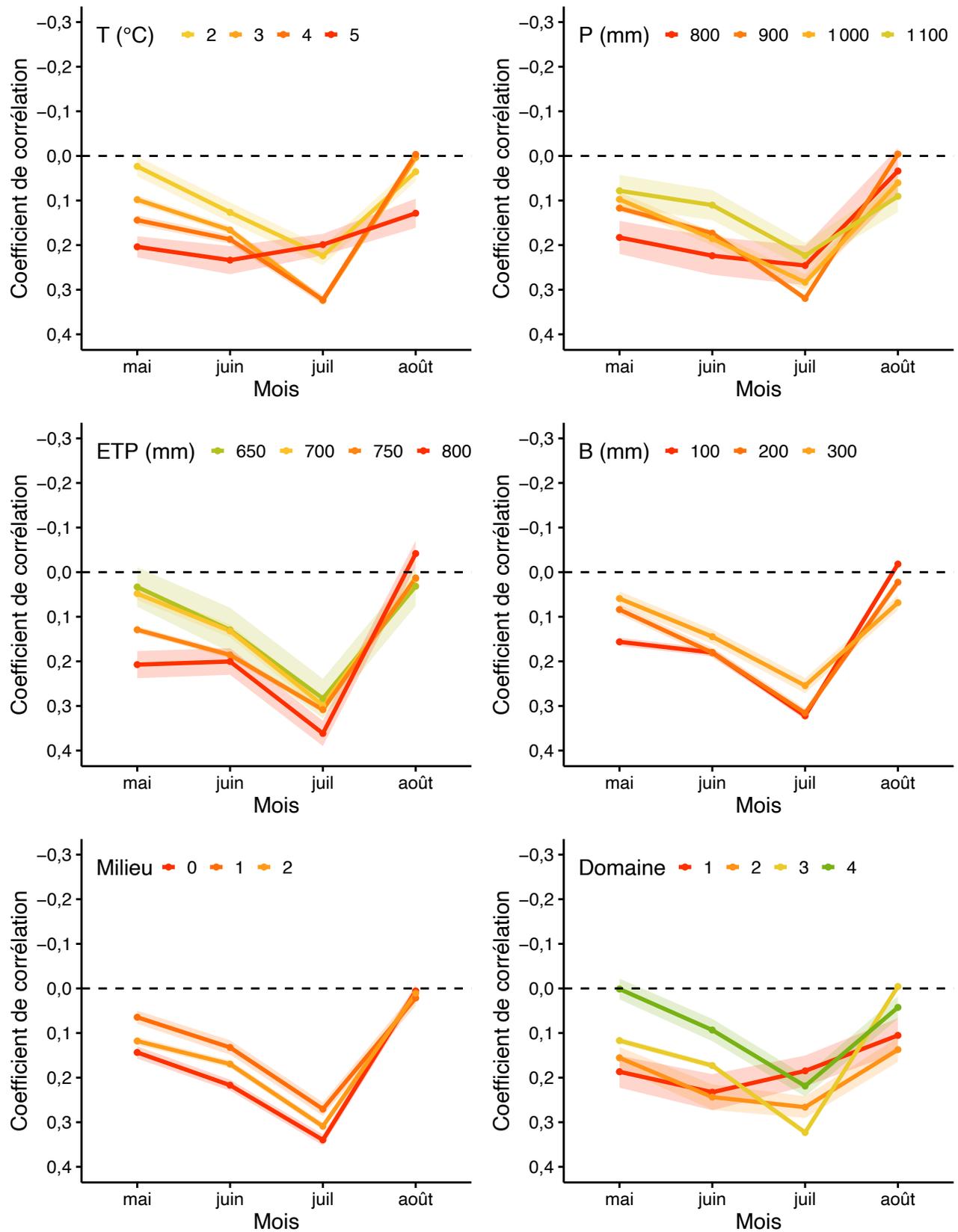
**Figure A11.** Variations de croissance moyennes du **peuplier faux-tremble** (%) associées aux sécheresses ( $SPEI_{1\text{mois}} < -1$ ) survenues au cours de la période de 1961 à 2000. Les zones ombragées représentent l'intervalle de confiance (95 %). Voir la page titre de l'annexe pour la définition des codes.



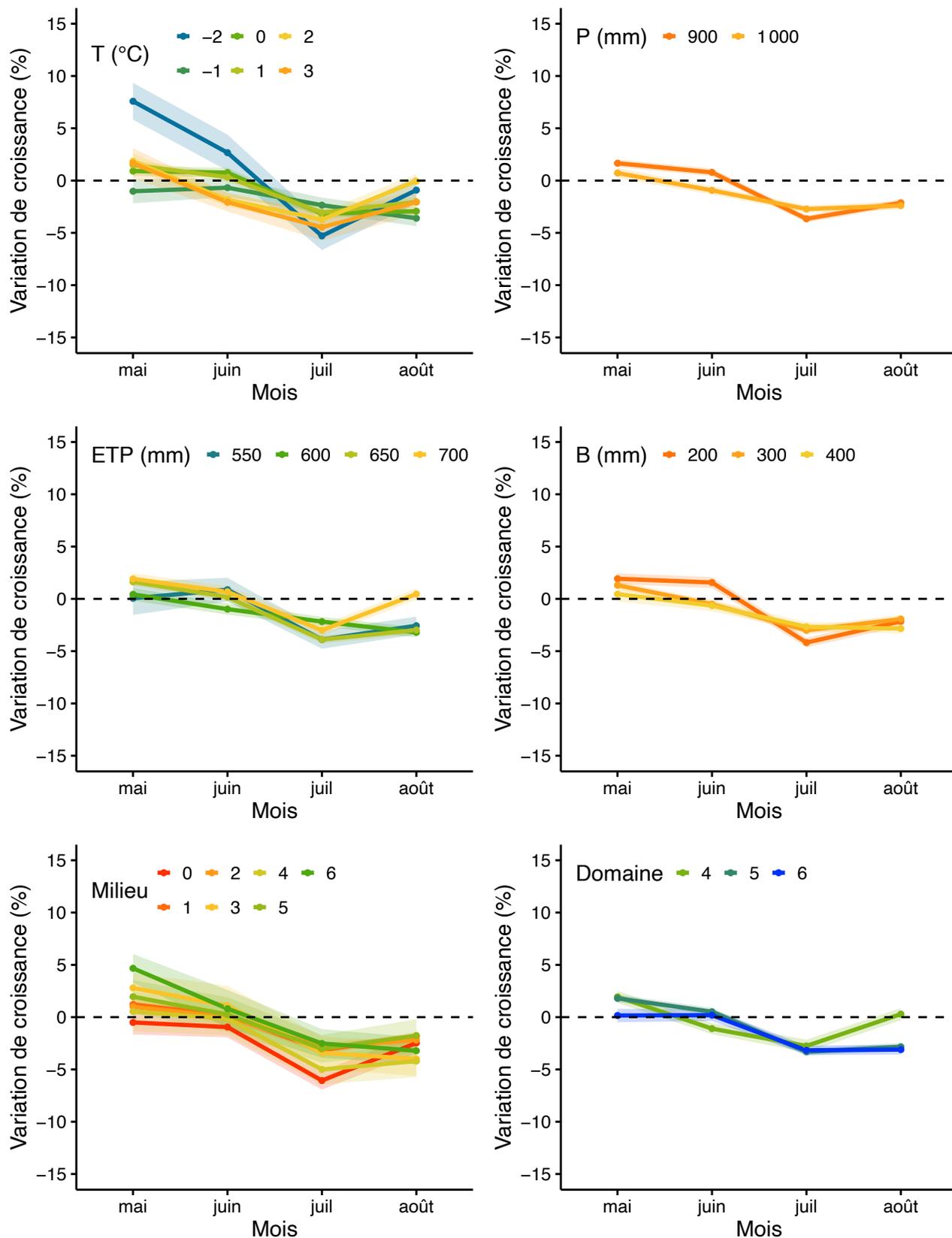
**Figure A12.** Coefficients de corrélation moyens entre les indices de croissance du **peuplier faux-tremble** et les indices du bilan hydrique climatique (SPEI<sub>1mois</sub>) au cours de la période de 1961 à 2000. Les zones ombragées représentent l'intervalle de confiance (95 %). Voir la page titre de l'annexe pour la définition des codes.



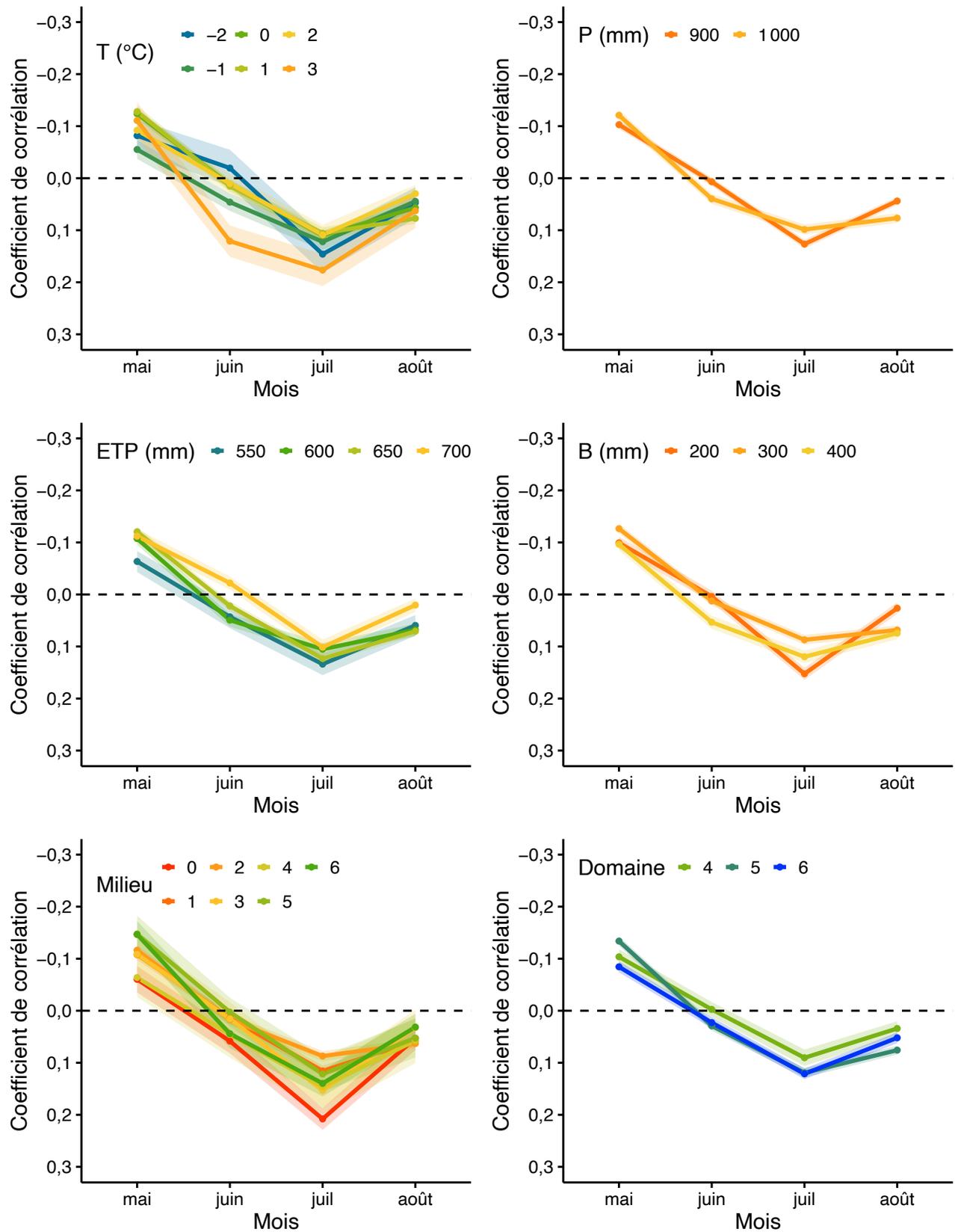
**Figure A13.** Variations de croissance moyennes du **pin blanc** (%) associées aux sécheresses ( $SPEI_{1\text{mois}} < -1$ ) survenues au cours de la période de 1961 à 2000. Les zones ombragées représentent l'intervalle de confiance (95 %). Voir la page titre de l'annexe pour la définition des codes.



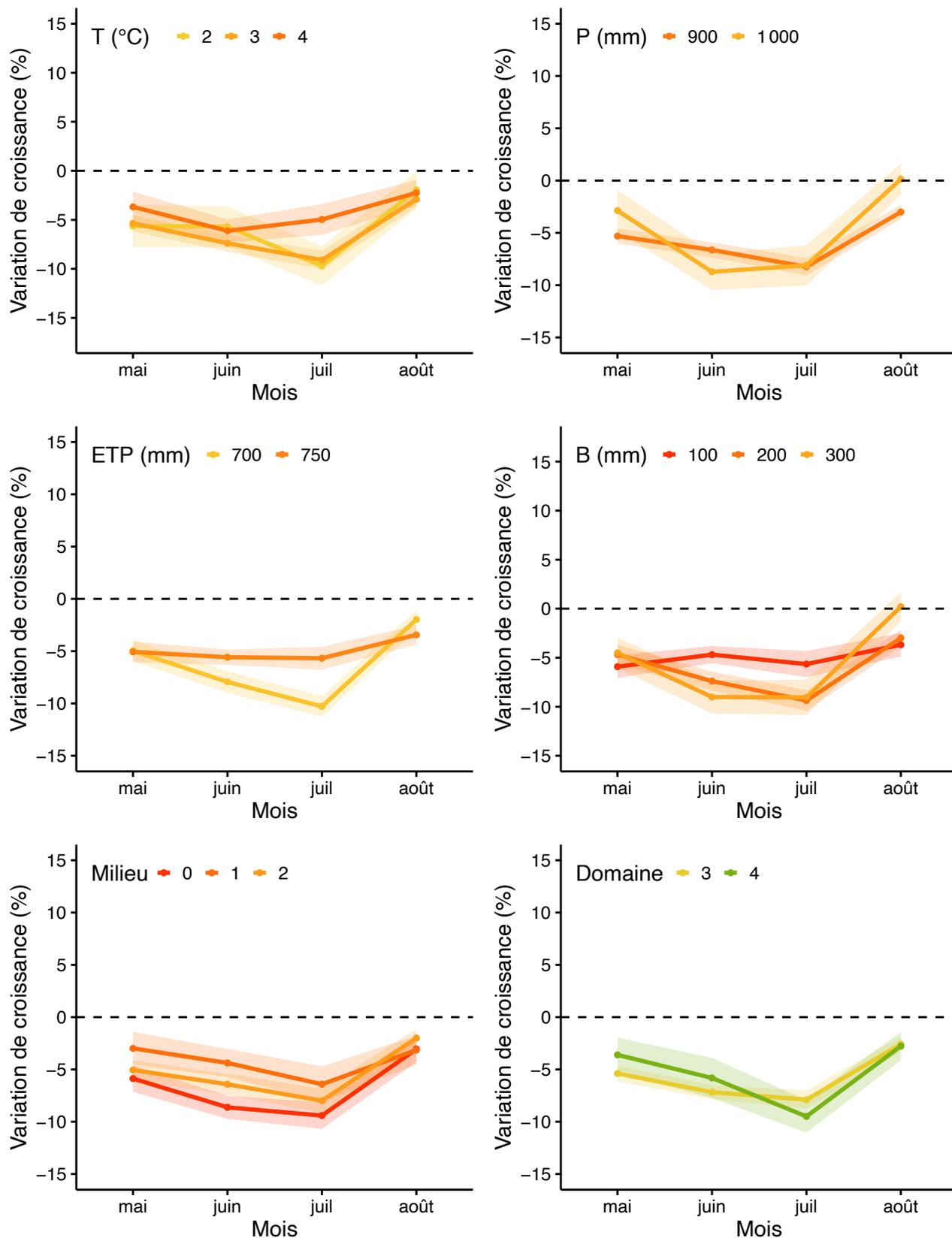
**Figure A14.** Coefficients de corrélation moyens entre les indices de croissance du **pin blanc** et les indices du bilan hydrique climatique ( $SPEI_{1\text{mois}}$ ) au cours de la période de 1961 à 2000. Les zones ombragées représentent l'intervalle de confiance (95 %). Voir la page titre de l'annexe pour la définition des codes.



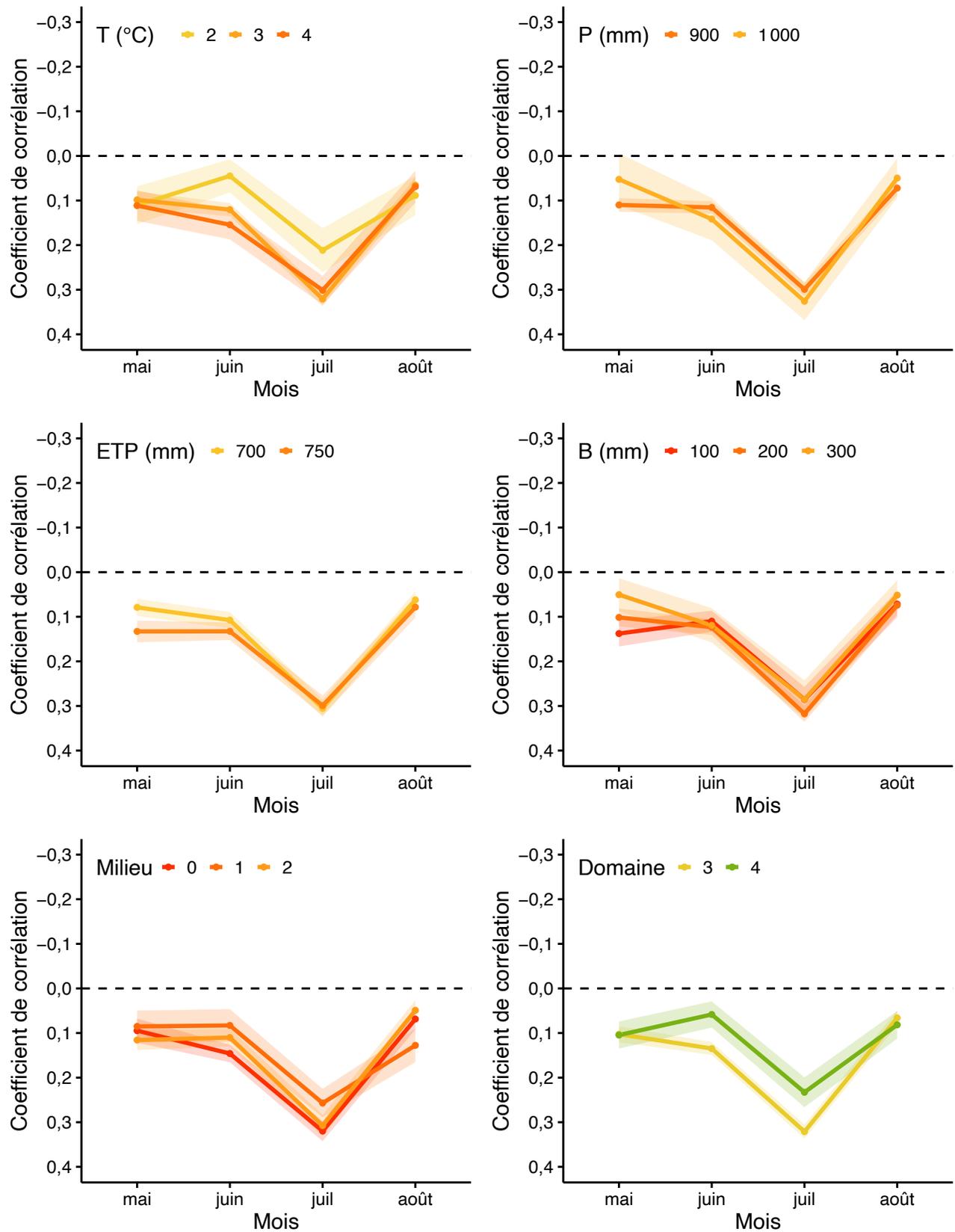
**Figure A15.** Variations de croissance moyennes du **pin gris** (%) associées aux sécheresses ( $SPEI_{1\text{mois}} < -1$ ) survenues au cours de la période de 1961 à 2000. Les zones ombragées représentent l'intervalle de confiance (95 %). Voir la page titre de l'annexe pour la définition des codes.



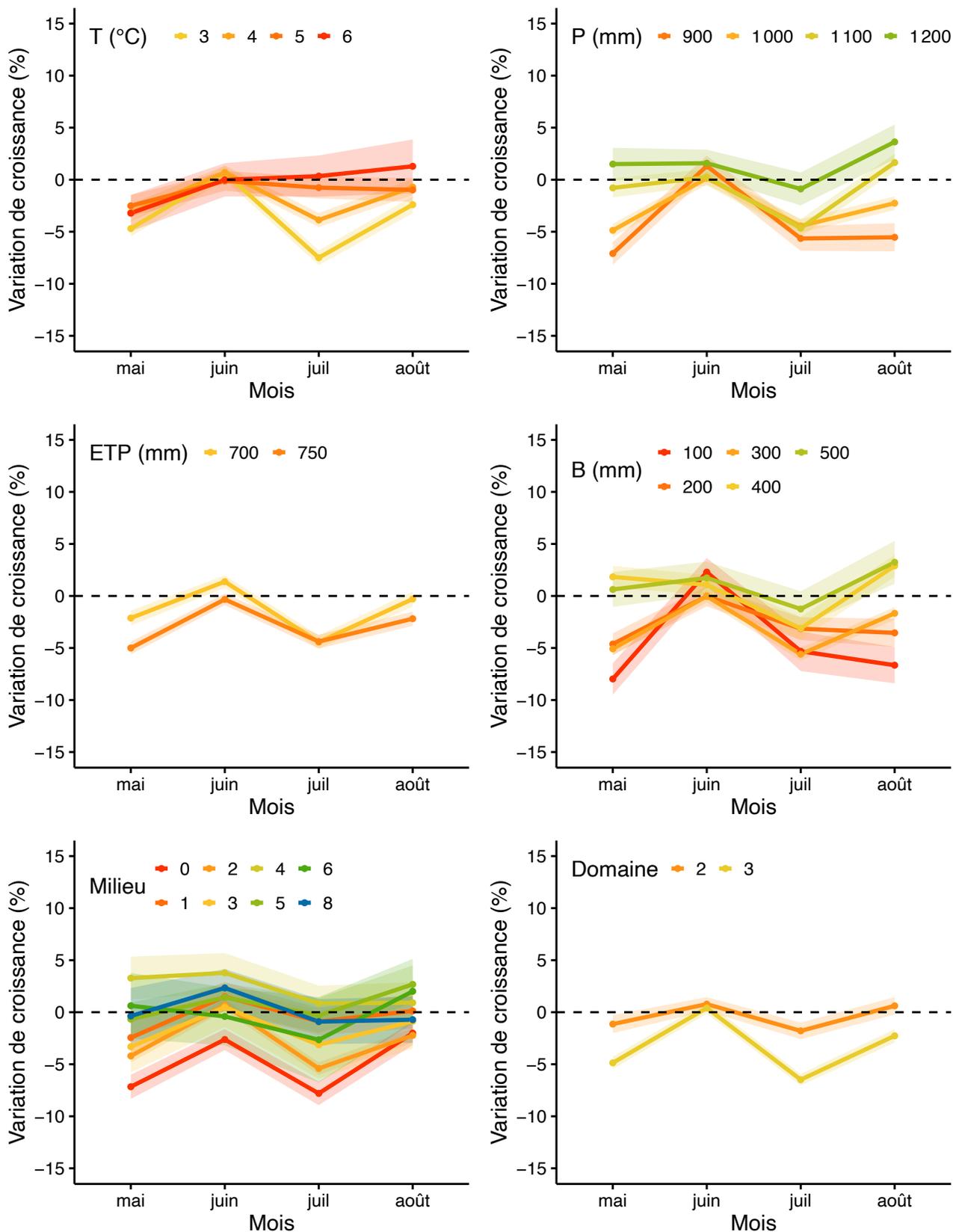
**Figure A16.** Coefficients de corrélation moyens entre les indices de croissance du *pin gris* et les indices du bilan hydrique climatique (SPEI<sub>1 mois</sub>) au cours de la période de 1961 à 2000. Les zones ombragées représentent l'intervalle de confiance (95 %). Voir la page titre de l'annexe pour la définition des codes.



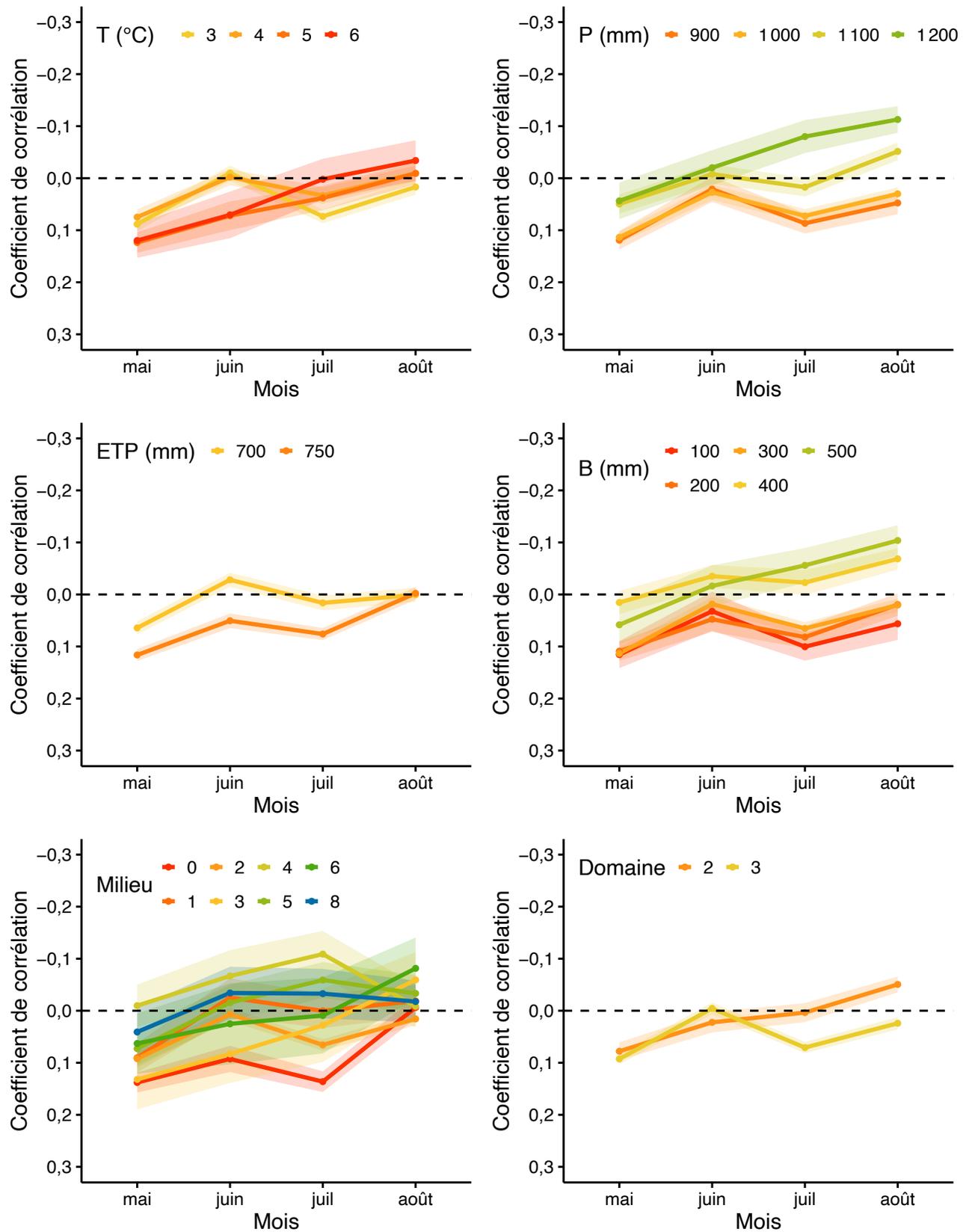
**Figure A17.** Variations de croissance moyennes du **pin rouge** (%) associées aux sécheresses ( $SPEI_{1\text{mois}} < -1$ ) survenues au cours de la période de 1961 à 2000. Les zones ombragées représentent l'intervalle de confiance (95 %). Voir la page titre de l'annexe pour la définition des codes.



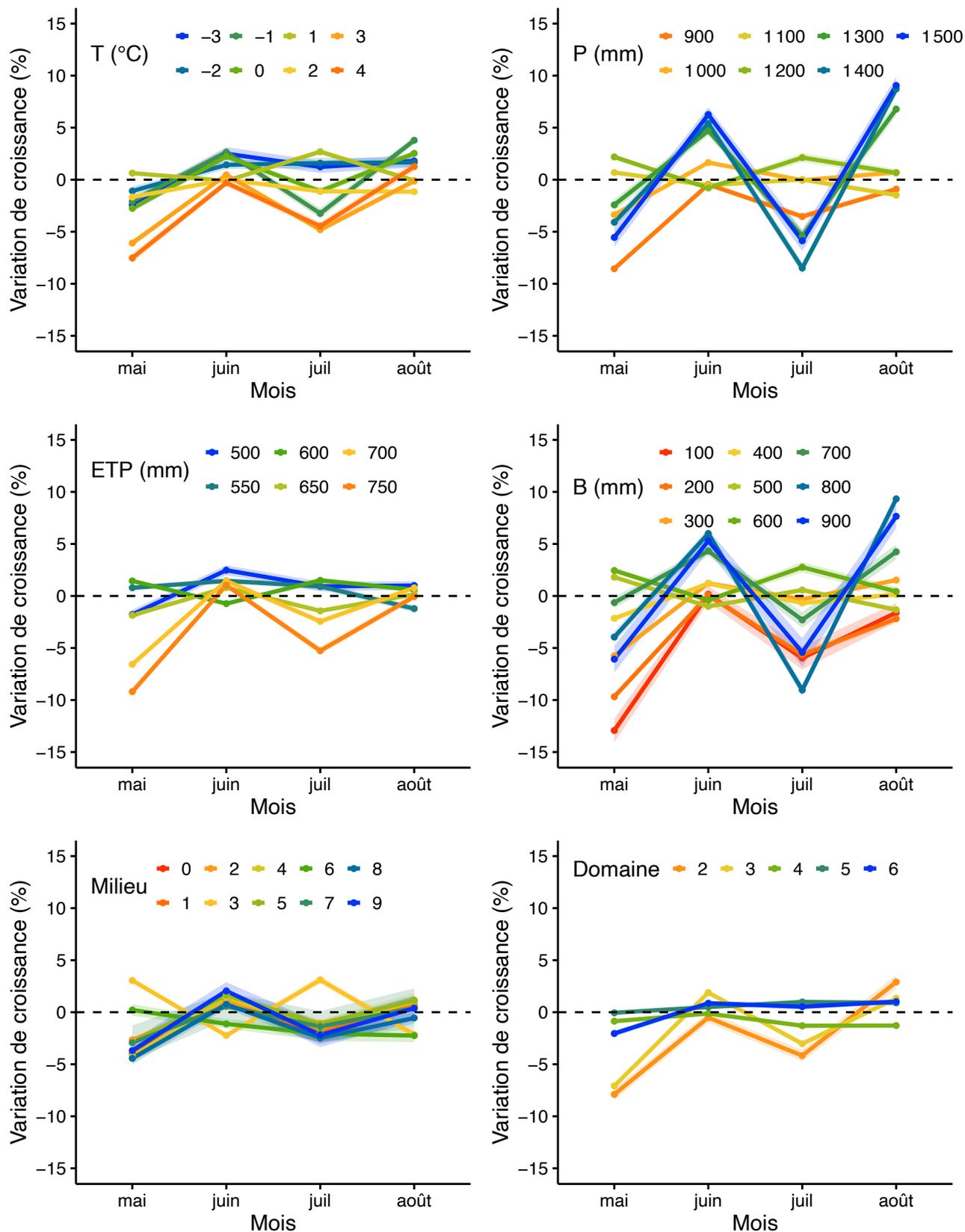
**Figure A18.** Coefficients de corrélation moyens entre les indices de croissance du **pin rouge** et les indices du bilan hydrique climatique ( $SPEI_{1\text{mois}}$ ) au cours de la période de 1961 à 2000. Les zones ombragées représentent l'intervalle de confiance (95 %). Voir la page titre de l'annexe pour la définition des codes.



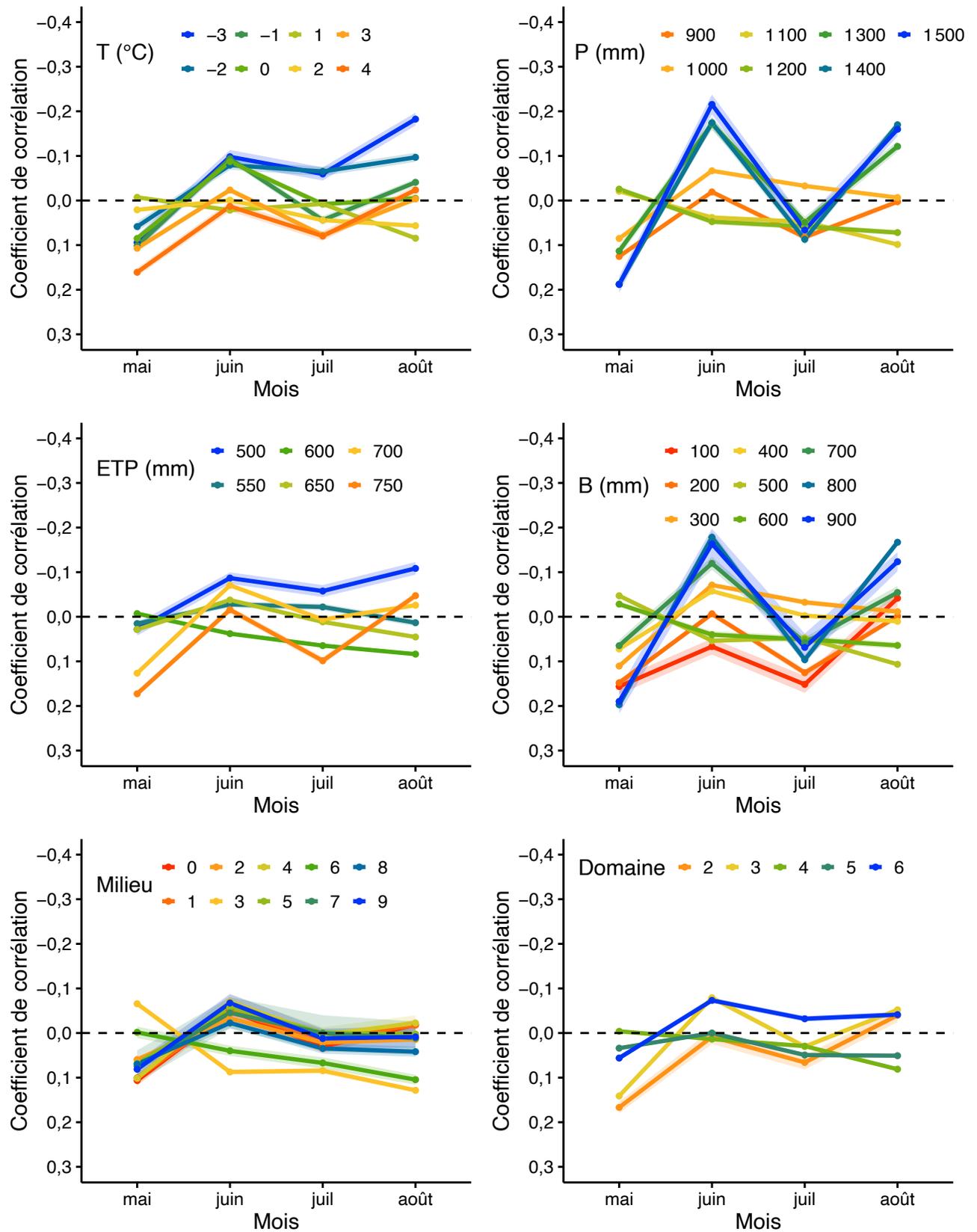
**Figure A19.** Variations de croissance moyennes de la **pruche de l'est** (%) associées aux sécheresses ( $SPEI_{1\text{mois}} < -1$ ) survenues au cours de la période de 1961 à 2000. Les zones ombragées représentent l'intervalle de confiance (95 %). Voir la page titre de l'annexe pour la définition des codes.



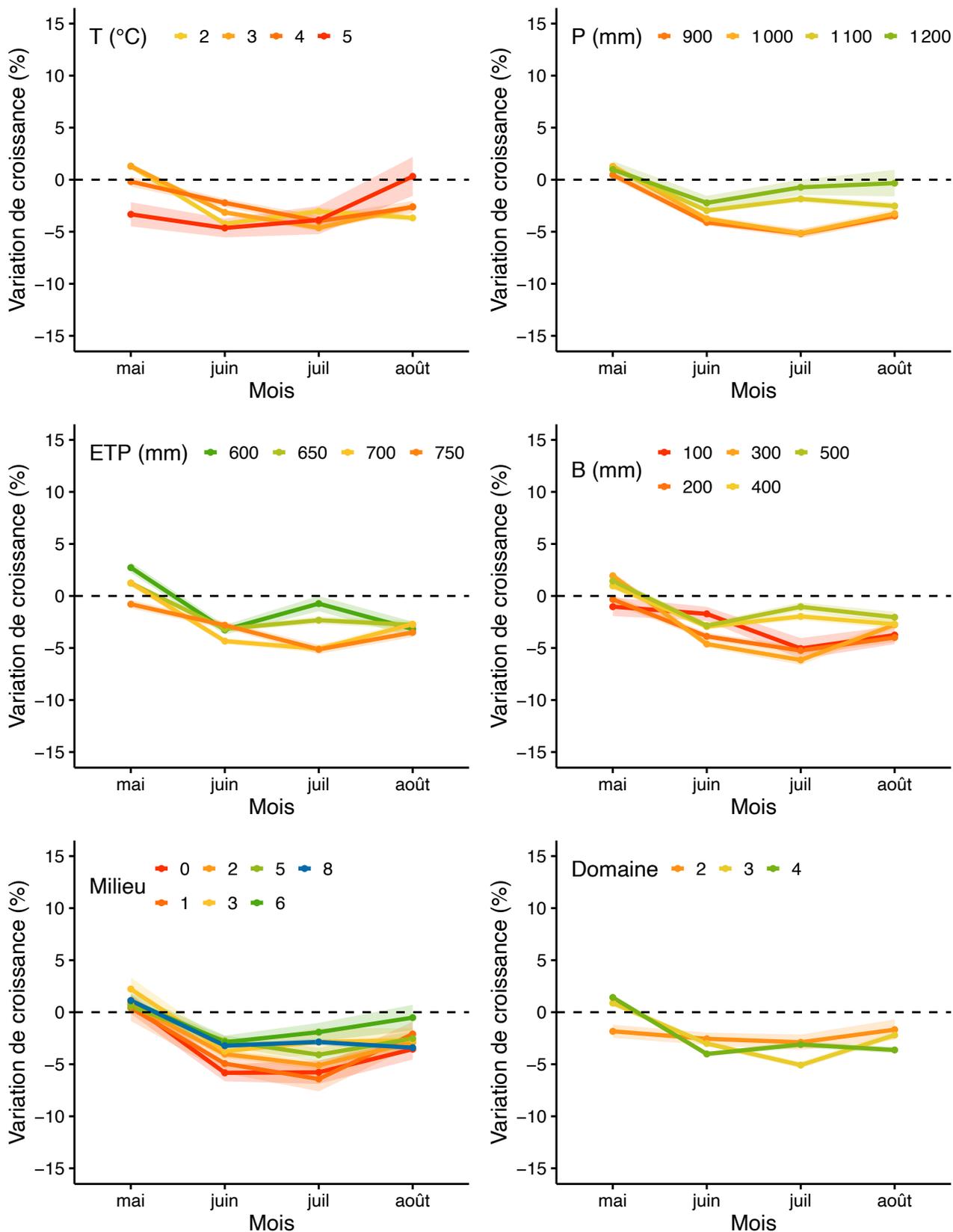
**Figure A20.** Coefficients de corrélation moyens entre les indices de croissance de la **pruche de l'est** et les indices du bilan hydrique climatique ( $SPEI_{1\text{mois}}$ ) au cours de la période de 1961 à 2000. Les zones ombragées représentent l'intervalle de confiance (95 %). Voir la page titre de l'annexe pour la définition des codes.



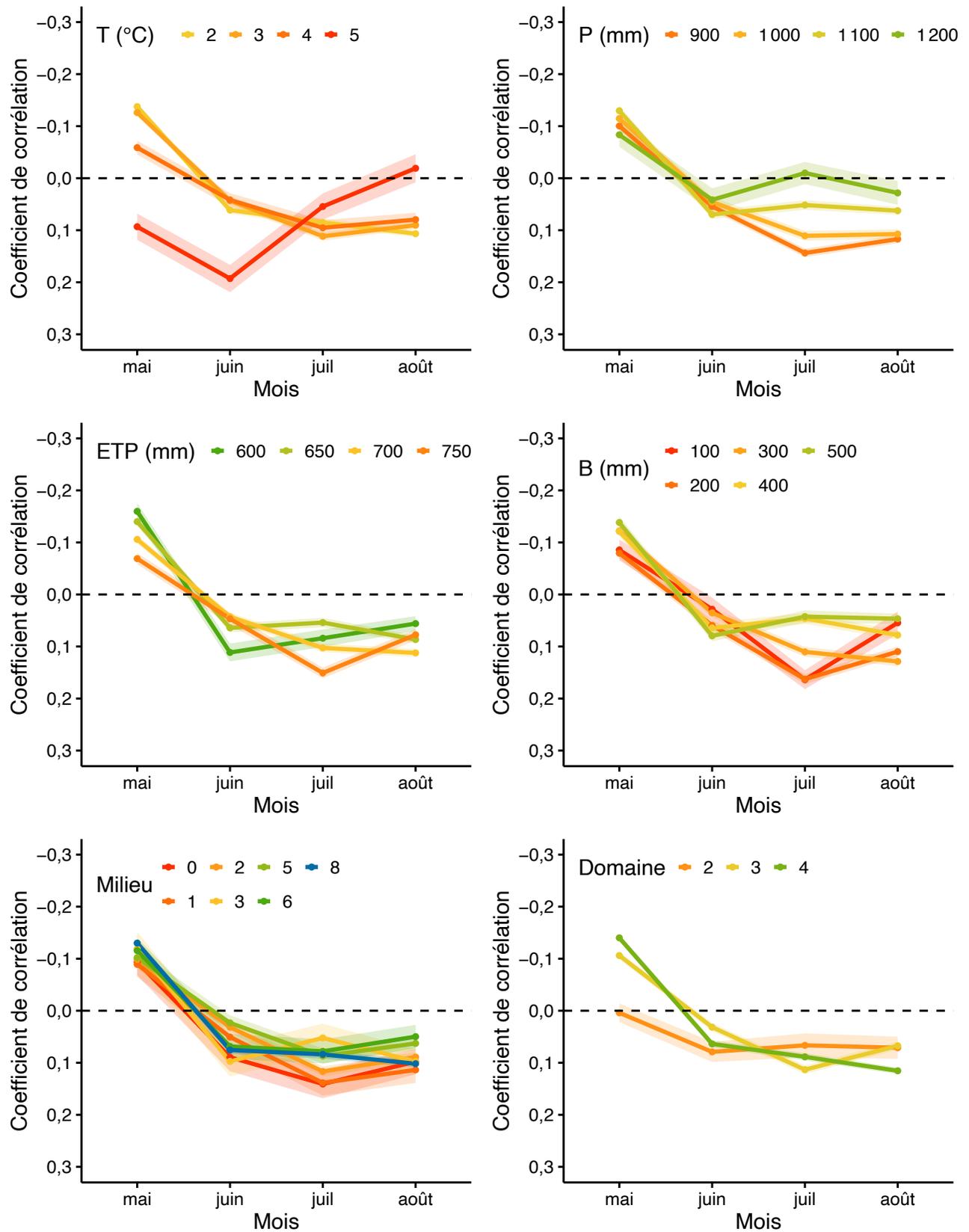
**Figure A21.** Variations de croissance moyennes du **sapin baumier** (%) associées aux sécheresses ( $SPEI_{1\text{mois}} < -1$ ) survenues au cours de la période de 1961 à 2000. Les zones ombragées représentent l'intervalle de confiance (95 %). Voir la page titre de l'annexe pour la définition des codes.



**Figure A22.** Coefficients de corrélation moyens entre les indices de croissance du **sapin baumier** et les indices du bilan hydrique climatique ( $SPEI_{1\text{mois}}$ ) au cours de la période de 1961 à 2000. Les zones ombragées représentent l'intervalle de confiance (95 %). Voir la page titre de l'annexe pour la définition des codes.



**Figure A23.** Variations de croissance moyennes du *thuya occidental* (%) associées aux sécheresses ( $SPEI_{1\text{ mois}} < -1$ ) survenues au cours de la période de 1961 à 2000. Les zones ombragées représentent l'intervalle de confiance (95 %). Voir la page titre de l'annexe pour la définition des codes.



**Figure A24.** Coefficients de corrélation moyens entre les indices de croissance du **thuya occidental** et les indices du bilan hydrique climatique ( $SPEI_{1\text{mois}}$ ) au cours de la période de 1961 à 2000. Les zones ombragées représentent l'intervalle de confiance (95 %). Voir la page titre de l'annexe pour la définition des codes.

**Annexe B.** Variations de croissance moyennes des arbres (%) associées aux sécheresses des mois de mai à août ( $SPEI_{1\text{ mois}} < -1$ ) survenues au cours de la période de 1961 à 2000, et coefficients de corrélation moyens entre les indices de croissance des arbres et les indices du bilan hydrique ( $SPEI_{1\text{ mois}}$ ) des mois de mai à août au cours de cette même période. Les coefficients de corrélation négatifs indiquent une croissance favorisée par la sécheresse. Les moyennes sont compilées pour chaque essence<sup>5</sup> et chaque milieu physique (0 à 9)<sup>6</sup>, dans chaque territoire des guides de reconnaissance des types écologiques<sup>7</sup>. Seules les moyennes des groupements contenant plus de 10 arbres sont présentées.

<sup>5</sup> Codes d'essences : EPN = épinette noire; SAB = sapin baumier; EPB = épinette blanche; THO = thuya occidental; BOP = bouleau à papier; PET = peuplier faux-tremble; PIG = pin gris; PIB = pin blanc; EPR = épinette rouge; PRU = pruche de l'est; PEG = peuplier à grandes dents; PIR = pin rouge.

<sup>6</sup> Les codes de milieu physique utilisent, entre autres, les classes de drainage synthèses définies dans les guides de reconnaissance des types écologiques du MFFP : 0 = dépôt très mince, de texture variée, de drainage de xérique à hydrique ou dépôt minéral de mince à épais, de drainage xérique à hydrique, très pierreux sans matrice; 1 = dépôt minéral de mince à épais, de texture grossière, de drainage xérique ou mésique; 2 = dépôt minéral de mince à épais, de texture moyenne, de drainage mésique; 3 = dépôt minéral de mince à épais, de texture fine, de drainage mésique; 4 = dépôt minéral de mince à épais, de texture grossière, de drainage subhydrique; 5 = dépôt minéral de mince à épais, de texture moyenne, de drainage subhydrique; 6 = dépôt minéral de mince à épais, de texture fine, de drainage subhydrique; 7 = dépôt minéral de mince à épais, de drainage hydrique, ombrotrophe; 8 = dépôt organique ou minéral de mince à épais, de drainage hydrique, minérotrophe; 9 = dépôt organique de mince à épais, de drainage hydrique, ombrotrophe.

<sup>7</sup> Les territoires des guides de reconnaissance des types écologiques correspondent à des regroupements de régions écologiques. Une carte illustrant le système hiérarchique de classification écologique du territoire pour le Québec méridional est disponible en ligne à l'emplacement suivant : <https://mffp.gouv.qc.ca/forets/inventaire/pdf/carte-regions-ecologiques.pdf>.





**Tableau B1. (suite)**

Territoire	Essence	Variation de croissance (% , par milieu physique)									Coefficient de corrélation (par milieu physique)											
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
4gh	BOP																					
	EPB			1	-1																	
	EPN	3		5	7		5		5													
	PET			5	6		6		6													
	SAB			4	4		4		4													
	THO			4	4		4		4													
5a	BOP																					
	EPB			-4	1		5															
	EPN	-3		-1	-2		0		0		0		-2		-0,06		-0,07		-0,09		-0,10	
	PET			5	6		8		9													
	PIG	3		1	2		4		4													
	SAB			-8	-10		-7		-7													
5bcd	BOP																					
	EPB			4	3		1															
	EPN	0		0	0		0		0		0		1		-0,06		-0,07		-0,07		-0,08	
	EPR				-1																	
	PET			8	6		7		7													
	PIG	-1		1	2		2		2													
5ef	SAB			-1	-5		-3		-3		-5		-7		-7		-7		-7		-7	
	BOP			-2	3		1															
	EPB			4	3		4		4		4		4		4		4		4		4	
	EPN	4		3	2		6		6		6		6		6		6		6		6	
	EPR			4	4		4		4		4		4		4		4		4		4	
	PET			7	7		7		7		7		7		7		7		7		7	
5g	SAB			-5	-3		-4		-3		-2		-2		-2		-2		-2		-2	
	BOP			3	1		1		1		1		1		1		1		1		1	
	EPB			4	5		5		5		5		5		5		5		5		5	
	EPN	5		7	6		3		5		4		4		4		4		4		4	
	PET	-3		-1	-2		3		3		3		3		3		3		3		3	
	PIG	4		4	5		5		5		5		5		5		5		5		5	
5hi	SAB			2	3		1		0		2		0		-4		0		-4		0	
	THO			3	1		1		0		0		-4		4		0		4		0	
	BOP			-3	1		1		1		1		1		1		1		1		1	
	EPB			4	5		5		5		5		5		5		5		5		5	
	EPN	4		4	5		6		6		6		6		6		6		6		6	
	EPR			5	6		6		6		6		6		6		6		6		6	
5j	PET			3	3		3		3		3		3		3		3		3		3	
	SAB	4		4	3		4		3		4		3		4		3		4		3	
	THO			2	3		2		2		2		2		2		2		2		2	
	EPB			11	8		9		9		9		9		9		9		9		9	
	EPN			6	6		6		6		6		6		6		6		6		6	
	SAB			2	3		3		3		3		3		3		3		3		3	

Tableau B1. (suite et fin)

Territoire	Essence	Variation de croissance (% , par milieu physique)									Coefficient de corrélation (par milieu physique)										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
6ab	EPN	2	1	2	2	-2	0	2	2	2	1	-0,17	-0,10	-0,13	-0,14	-0,10	-0,09	-0,13	-0,13	-0,14	-0,13
	PET			7	6			8						-0,04	-0,03			-0,11			
	PIG	1	2	1	1			5				-0,06	-0,10	-0,10	-0,06			-0,14			
	SAB			-13	-7			-8				0,12	0,07	0,12	0,07			0,09			
6cdefg	EPN	-1	0	-2	-1	-1	-2	-3	-3	-2	-3	-0,07	-0,08	-0,06	-0,03	-0,05	-0,05	-0,05	-0,06	-0,05	-0,04
	PIG	-3	-1	-2	2		-2					-0,03	-0,09	-0,07	-0,05			-0,05			
	SAB	-6	-6	-9		-7	-8					0,11	0,13	0,13	0,17	0,17	0,14				
6hi	EPB			4										-0,07							
	EPN	4	4	3	3	3	3	2	3	3	3	-0,08	-0,07	-0,06		-0,06	-0,06		-0,02	-0,08	-0,07
	PIG	6	6	3								-0,09	-0,06								
6j	SAB	0	0	0	0	-1	0		1			0,12	0,07	0,08		0,08	0,08			0,04	
	EPB			2										0,02							
	EPN	2	1	1	1	1	1				0	-0,13	-0,10	-0,09		-0,02	-0,08				-0,07
6kl	SAB	0	1	1	1						0	-0,01	-0,05	-0,02			-0,02				-0,02
	EPN	1	2	1	1	1	0	0	1	1	-2	-0,04	-0,08	-0,08		-0,06	-0,05		-0,01	-0,06	-0,01
	SAB	-3	-3	-3	-2	-2	-1					0,03	-0,02	-0,02		0,02	0,01				-0,01
6mn	EPN			5										-0,07							
	SAB	2	2	-2	2	-2	-2					-0,03	0,07	-0,09			0,02				
6opqr	EPN	1	-1	-1	1	-1		2				-0,02	-0,01			-0,01	0,03				-0,10
	SAB	-4	-3			-2						0,11	0,10				0,09				

**Tableau B2.** Variations de croissance moyennes des arbres (%) associées aux sécheresses du mois de juin ( $SPEI_{1\text{mois}} < -1$ ) survenues au cours de la période de 1961 à 2000 et coefficients de corrélation moyens entre les indices de croissance des arbres et les indices du bilan hydrique au mois de juin ( $SPEI_{1\text{mois}}$ ) au cours de cette même période. Voir la page titre de l'annexe pour la définition des codes.

Territoire	Essence	Variation de croissance (% par milieu physique)										Coefficient de corrélation (par milieu physique)									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1a	PIB	-4	-6									0,21	0,22								
	PRU	0	0	0	3	0					0,06	0,09			0,08	0,08					
	THO					-7									0,29						
2a	EPB		-2									0,19									
	PEG	-8	-10								0,24	0,27									
	PET	-11	-11								0,21	0,18									
	PIB	-10	-10	-9							0,34	0,23	0,29								
	PRU	-5	-1	-1							0,21	0,12	0,15								
	SAB	-3	-2	0							0,16	0,07	0,08								
2b	THO		-3						-2		0,13								0,05		
	EPN								-2									0,08	0,03	0,05	
	EPR								-2						0,04	0,14				0,03	
	PIB	-3									0,06										
	PRU	5	4	4	4	4			3		-0,14	-0,10			-0,11	-0,09			-0,10		
	SAB	0	1	1	0	0	-1		0		-0,09	-0,04			-0,08	0,01	-0,03		0,00		
2c	THO								-2					0,01					0,02		
	PRU		-1						-1			0,07				0,05					
	SAB		-3						-4			0,08				0,14					
	THO								-5							0,23			0,15		
	BOP	-8	-7							-7		0,17	0,14	0,14							
	EPB	-2	0	0						-1		0,09	0,06	0,05					0,11		
3ab	EPN	-3	-1							-1	0,02	0,06	-0,01					0,03	0,04	0,05	
	EPR	-4	-2	-2						-1	0,07	0,04	0,01						0,06		
	PEG	-9	-10	-9							0,28	0,25	0,26								
	PET	-12	-10	-9						-7	0,25	0,19	0,15				0,18				
	PIB	-10	-6	-8							0,22	0,13	0,17								
	PIG	-1									0,12										
3ac	PIR	-9	-4	-7							0,17	0,09	0,13								
	PRU	-2	-1	1						2	0,05	-0,01	-0,01						0,00		
	SAB	-1	1	0						2	0,07	0,03	0,04						0,04		
	THO	-7	-3	-4						-3	0,15	0,02	0,03						0,06		
	BOP	-7	-2	-2						2	0,15	0,08	0,11								
	EPB	1	1	2						2	-0,03	-0,07	-0,09								
3c	EPN	0	-1	2						2	1								-0,03	-0,03	
	EPR	0	3	2						2	0	-0,03	-0,02	-0,08					-0,05		
	PEG									2	-0,08	-0,09	-0,11	-0,13	-0,01	-0,13					
	PET		1	-2						-3		0,21									
	PIB	-6	-6	-6						-6	0,14	0,14	0,09								
	PIG		0							0	-0,04										
3cb	PRU	-4		1						0,07									-0,08		
	SAB	2	3	3						6	-0,13	-0,15	-0,14						-0,14	-0,18	
	THO	-4		-3						-2	-0,03									-0,01	
	BOP									4											
	EPB									3											
	EPN									5											

Tableau B2. (suite)

Territoire	Essence	Variation de croissance (% par milieu physique)									Coefficient de corrélation (par milieu physique)											
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
3d	BOP																					
	EPB																					
	EPN																					
	EPR																					
	PET																					
	SAB																					
	THO																					
4a	BOP																					
	EPB																					
	EPN																					
	EPR																					
	PET																					
	PIB																					
	PIG																					
4bc	BOP																					
	EPB																					
	EPN																					
	EPR																					
	PEG																					
	PET																					
	PIB																					
4de	BOP																					
	EPB																					
	EPN																					
	EPR																					
	PIG																					
	SAB																					
	THO																					
4f	BOP																					
	EPB																					
	EPN																					
	EPR																					
	PET																					
	SAB																					
	THO																					

**Tableau B2. (suite)**

Territoire	Essence	Variation de croissance (% par milieu physique)									Coefficient de corrélation (par milieu physique)										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
4gh	BOP			-7	-2								0,16	0,00							
	EPB			-3	-4		-2		-1				0,14	0,11				0,11			0,16
	EPN	1		-2	0				0	-2			0,05	-0,02						0,01	0,07
	PET			-2	-1								0,06	0,08							
	SAB			-2	-3		-1	-2	0				0,12	0,11		0,11	0,11			0,09	
	THO			-3	-2		-2	-3	-3				0,10	0,01		0,05	0,06			0,10	
5a	BOP		3	0								0,05	0,08								
	EPB			-5									0,01								
	EPN	-6		-6	-6	-4	-6	-5	-4	-6			-0,02	-0,03	0,00	-0,04	-0,01	-0,02	-0,01	-0,02	-0,01
	PET			-2	-1		1						0,10	0,06	0,01				0,00		
	PIG	4	4	2	4	1		2				0,01	-0,03	0,01	0,02	0,02			0,06		
	SAB			-3	-2		-2			-5			-0,07	-0,06	-0,04				-0,04		-0,02
5bcd	BOP		0	-1			2					0,06	0,05								-0,03
	EPB			-5	-2		-4					0,06	-0,02								0,01
	EPN	-3		-4	-4	-2	-4	-4	-1	-4		0,02	0,03	0,01	-0,03	0,01	0,00	0,08	0,01	-0,01	0,03
	EPR			-1									-0,05								
	PET			-6	-3		-4						0,16	0,09							0,05
	PIG	-2	0	0			-1					0,07	0,01	0,02						0,03	
5ef	SAB	3	-2	2	2	-4	1		1	1		-0,10	-0,01	-0,07	-0,01	-0,08				-0,06	-0,06
	BOP		6	6			2					-0,13	-0,11								-0,11
	EPB			5									-0,18								
	EPN	1	2	2	2	2	2	1	2	0		0,00	-0,05	-0,03							
	EPR			8									-0,29								
	PET			-7									0,19								
5g	SAB	7	6	6	6	5	6	6	6	6		-0,20	-0,16	-0,17	-0,19	-0,16					-0,24
	BOP			-4	-1							0,09	0,05								
	EPB			-1	-2							0,06	0,06								
	EPN	-1	0	1	2	1	0		0	0		0,06	0,04	0,03	0,02	0,02	0,06			0,11	0,01
	PET		-7	-2	-3	-2						0,08	0,05	0,01	0,02						
	PIG	-5	-3	-3								0,19	0,18	0,20							
5hi	SAB	1	2	3	2	2	3	4				-0,07	-0,06	-0,10	-0,11	-0,06	-0,11	-0,13			
	THO																				0,27
	BOP			-2	-1																
	EPB			-2	-1		-1	-1	-3												
	EPN	1		-2	-1		-1	0	0	0											
	EPR			-1	-3		0	-1													
5j	PET			-3	-4																
	SAB	1	-1	-2	-3	-3	-1	-1	-1	-1		0,05	0,10	0,13	0,11	0,12	0,13	0,11	0,12	0,12	0,14
	THO			-3	-3		-1														
	EPB		2	2	2	2	3	3	3	1											
	EPN			3	3	1	2	2	1												
	SAB			-4	-4	1	-1	-1													

Tableau B2. (suite et fin)

Territoire	Essence	Variation de croissance (% , par milieu physique)									Coefficient de corrélation (par milieu physique)										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
6ab	EPN	-5	-4	-3	-1	-4	-5	-2	-2	0	-1	0,00	-0,05	-0,09	-0,10	-0,10	-0,06	-0,10	-0,11	-0,12	-0,10
	PET			10	9			7						-0,02	-0,04		-0,04				
	PIG		-1	1	-1			0				0,01	0,01	-0,01	0,02		0,03				
	SAB		-4	1			-3						-0,03	-0,07			-0,10				
6cdefg	EPN	-3	-3	-3	-5	-2	-3	-2	-1	-3	-2	-0,04	-0,04	-0,05	-0,05	-0,05	-0,06	-0,08	-0,06	-0,04	-0,08
	PIG	-3	0	1	1		-3					0,09	0,03	0,03	-0,02	-0,02	-0,02				
	SAB	0	-4			-3	-2						-0,09	-0,04		-0,03	-0,09				
6hi	EPB			3									-0,09								
	EPN	0	-1	-1		-1	0	1	1	2	-1	0,00	0,06	0,01		0,03	-0,02		-0,08	-0,02	0,02
	PIG	0	0	1								0,00	-0,02								
	SAB	1	1	2	2	1	1	1	2	2		-0,07	-0,06	-0,10		-0,07	-0,10				-0,09
6j	EPB			3									-0,07								
	EPN	0	1	1		0	2	1	2	2		0,05	0,04	0,01		-0,01	0,00				-0,01
	SAB	3	1	3			1			1	1	-0,06	0,02	-0,06			-0,05				-0,05
	EPN	3	1	1	1	2	3	2	2	5	2	0,01	0,05	0,04		0,00	0,02		0,05	-0,10	-0,01
6kl	SAB	1	2	2	2	2	2					-0,04	-0,04		-0,01	-0,01					
	EPN			2									-0,09								
6mn	SAB	1	1	1	2	1	1					-0,02	-0,12	-0,04			-0,12				
	EPN	1	1	1		0	1	3			0,01	-0,02			0,01	-0,01					-0,06
6opqr	SAB	3	2	2		2	2					-0,10	-0,14				-0,07				

**Tableau B3.** Variations de croissance moyennes des arbres (%) associées aux sécheresses du mois de juillet ( $SPEI_{-1,mois} < -1$ ) survenues au cours de la période de 1961 à 2000 et coefficients de corrélation moyens entre les indices de croissance des arbres et les indices du bilan hydrique au mois de juillet ( $SPEI_{-1,mois}$ ) au cours de cette même période. Voir la page titre de l'annexe pour la définition des codes.

Territoire	Essence	Variation de croissance (% , par milieu physique)										Coefficient de corrélation (par milieu physique)									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1a	PIB		-3	-4								0,18	0,21								
	PRU		1	-2		1	1					0,12	0,05		0,00	-0,02					
	THO						-8									0,12					
2a	EPB			-8									0,18								
	PEG		-3	3								0,24	0,15								
	PET		-3	3								0,15	0,09								
	PIB		-3	-10	-8						0,26	0,34	0,27								
	PRU		-6	-4	-4						0,19	0,13	0,13								
	SAB		-8	-7	-7						0,26	0,22	0,17								
2b	THO			-8								0,11								0,22	
	EPN																			0,03	0,00
	EPR																			0,07	0,07
	PIB		-8									0,22									
	PRU		-2	-2		2	3					-0,10	-0,05								-0,12
	SAB		-3	-4		-3	-2	-1				-0,01	0,05								0,04
2c	THO					1														-0,07	-0,06
	PRU		-1	-1		2						0,00									
	SAB		-5	-5		-2						0,07								0,07	0,07
	THO					1														-0,08	-0,02
	BOP		1	0	0		2					0,00	0,03	0,03							
	EPB		-7	-8	-6		-7					0,15	0,16	0,14							0,09
3ab	EPN		-6	-7	-6		-2					0,11	0,13	0,10						0,03	0,04
	EPR		-8	-7	-7		-9					0,17	0,12	0,12						0,01	0,02
	PEG		-4	-5	-3							0,18	0,19	0,17							0,02
	PET		1	-1	0		-1					0,11	0,11	0,11							0,08
	PIB		-7	-5	-8							0,36	0,29	0,33							
	PIG		-10									0,22									
	PIR		-9	-5	-8							0,33	0,27	0,33							
	PRU		-9	-2	-7		-6					0,11	0,00	0,07							0,00
	SAB		-6	-7	-7		-7					0,16	0,16	0,16							0,16
	THO		-9	-7	-7		-7					0,21	0,19	0,18							0,17
3ac	BOP		5	3	5		7					-0,16	-0,10	-0,19							0,17
	EPB		6	0	2		1					-0,14	-0,14	-0,13							-0,20
	EPN		2	0	2		2					-0,10	-0,07	-0,13							-0,11
	EPR		0	-1	1	1	1	0				-0,04	-0,03	-0,06							-0,12
	PEG			2	2																-0,09
	PET			5	4																-0,05
3c	PIB		-10	-6	-7							0,29	0,09	0,18							0,18
	PIG			-4								0,04									-0,04
	PRU		-7	-4	-4							0,15	0,05	0,05							0,05
	SAB		-1	0	0	-1	0	2				-0,04	-0,05	-0,06							-0,05
	THO		-5	-3	-3		-4					0,05	0,03	0,03							-0,05
																					0,06

Tableau B3. (suite)

Territoire	Essence	Variation de croissance (% par milieu physique)									Coefficient de corrélation (par milieu physique)											
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
3d	BOP			1																		
	EPB			-1			-3															
	EPN			-2		-3	-3	-6	-3	-3	-2											
	EPR			-2		-3	-3	-2		0												
	PET			-1		-2	-2															
	SAB			-5		-5	-3	-2	-2	-1	-1											
	THO			1		-2	-2	-2														
4a	BOP			-4																		
	EPB			-8																		
	EPN			-7		-2	-4	-3	-2	-6	-3											
	EPR			-5																		
	PET			4		4	1	5		6												
	PIB			-12																		
	PIG			-8																		
	PIR			-11																		
	SAB			-10		-6	-5	-6		-7												
	THO			-2		-2																
4bc	BOP			2		3	1	2	1	1												
	EPB			-6		-4	-2	-5	-3	-3												
	EPN			-3		0	-1	-3	-1	-2	-1											
	EPR			-2		-4	-1	-4	2													
	PEG						-8															
	PET			5		1	3		0													
	PIB			-3		-4	-6															
	PIG			-5		-1	-2															
	PIR			-9		-9	-5															
	SAB			-2		-1	-2	-3	0	0	-4											
THO			-4		-7	-5	-5	-6	-6	-5												
4de	BOP			-10		-5																
	EPB			-3		-1	0	1														
	EPN			-2		-8	0	-4	-2	-2	-2											
	PET			-10		-6	-3															
	PIG			-8		-5	-5	-7														
	SAB			0		-3	-2	3	0	0	-3											
	THO			1		-3	-2	1														
	BOP			-3		-4	-3	-6		-6												
	EPB			-7		-3	-4	-4	-4	-3	-5											
	EPN			-7		-3	-4	-4	-4	-7	-10											
EPR			-4		-4	-4	-9	-2	-2	-2												
PET			-5		-5	-5	-5	-5	-5	-5												
SAB			-4		-4	-3	-2	-4	-4	-3												
THO			-3		-3	-3	-3	-3	-2	-2												
4f	BOP			-3		-3	-3	-6		-6												
	EPB			-4		-4	-4	-4	-3	-5												
	EPN			-7		-3	-4	-4	-7	-7	-7											
	EPR			-4		-4	-4	-9	-2	-2	-2											
	PET			-5		-5	-5	-5	-5	-5	-5											
	SAB			-4		-4	-3	-2	-4	-3	-2											
	THO			-3		-3	-3	-3	-3	-2	-2											
	BOP			-3		-3	-3	-6		-6												
	EPB			-4		-4	-4	-4	-3	-5	-7											
	EPN			-7		-3	-4	-4	-7	-10	-8											
EPR			-4		-4	-4	-9	-2	-2	-2												
PET			-5		-5	-5	-5	-5	-5	-5												
SAB			-4		-4	-3	-2	-4	-3	-2												
THO			-3		-3	-3	-3	-3	-2	-2												

Tableau B3. (suite)

Territoire	Essence	Variation de croissance (% par milieu physique)									Coefficient de corrélation (par milieu physique)											
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
4gh	BOP			-1	0								0,00	0,01								
	EPB			1	0			3	4				0,09	0,13			0,08			-0,01		
	EPN	1		-1	-2				1	3		0,08	0,12	0,09					0,03	-0,01		
	PET			-6	-1								0,13	0,10								
	SAB			3	2			3	3	5			0,07	0,11			0,04	0,09		0,03		
	THO			-5	-1			-3	-1	0			0,19	0,12			0,18	0,10		0,12		
5a	BOP			-1	-2			-5					-0,01	-0,06								
	EPB			-4				0					0,07									
	EPN	-2		-3	-3			-3	-3	-2		0,06	0,04	0,11	0,00	0,04	0,06	0,03	0,03	0,00		
	PET			0	-6			0				0,06	0,06	0,04			0,03					
	PIG	-4		-5	-3			-2				0,21	0,18	0,13	0,14	0,13						
	SAB			-5	-6			-5	-4				0,15	0,10	0,16							
5bcd	BOP			0	-1			1					-0,03	-0,01								
	EPB			0	2			1					-0,04	-0,12								
	EPN	0		0	0			0	0	-1	0	-0,04	-0,03	-0,03	-0,01	-0,04	-0,05	0,03	-0,06	-0,05	-0,04	
	EPR			0									-0,05									
	PET			-1	0			0					0,04	0,03			0,04					
	PIG	-5		-3	-2			-4				0,19	0,10	0,07			0,13					
5ef	SAB	-1		2	2			3	2	1		-0,04	-0,06	-0,08	-0,02	-0,11						
	BOP			4	3			4					-0,17	-0,17								
	EPB			-3									-0,09									
	EPN	-7		-7	-5			-5	-3	-4		0,02	-0,03	0,00	-0,02	-0,03			-0,04	-0,05	-0,03	
	EPR			-1									-0,11									
	PET			-4									0,13									
5g	SAB	-9		-11	-8			-9	-6	-9		0,11	0,11	0,07	0,07	0,08						
	BOP			5	2								-0,07	-0,03								
	EPB			-1	0								-0,05	-0,02								
	EPN	-1		-1	-1			-1	-3	-2		0,00	-0,05	-0,02	-0,08	-0,02	-0,05					
	PET			-1	-2			1	0			0,04	0,02	0,01	-0,12							
	PIG	-6		-1	-3							0,23	0,13	0,19								
5hi	SAB	0		0	0			5				-0,06	-0,03	-0,02	-0,04	-0,02	0,01	-0,06				
	BOP			-2	2					-4												
	EPB			5	3			4	-2	1												
	EPN	-1		1	1			1	3	2		0,05							0,04	0,07	0,09	
	EPR			3	8			-3	-2										-0,01	0,05	0,04	-0,02
	PET			-2	1														0,06	0,09		
5j	SAB	4		4	4			6	0	0		0,02	0,06	0,11	0,09	0,03	0,11					
	BOP			-7	-5			-2		1												
	EPB			-7	-5			-2		-3												
	EPN			-1	-1			0														
	EPR			-6	-6			-9														
	SAB			-6	-6			-9														

Tableau B3. (suite et fin)

Territoire	Essence	Variation de croissance (% , par milieu physique)									Coefficient de corrélation (par milieu physique)											
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
6ab	EPN	-1	0	2	1	0	0	2	2	3	3	0,12	0,13	0,12	0,13	0,08	0,11	0,11	0,08	0,09	0,06	
	PET			0	-4			0						0,01	0,10			0,05				
	PIG	-5	-5	-4	-4			-3				0,14		0,14	0,18			0,16				
	SAB		-3	-3			-2					0,05	0,12					0,12				
6cdefg	EPN	2	1	1	0	1	1	1	1	1	2	0,03	0,03	0,05	0,11	0,01	0,05	0,09	0,04	0,08	0,03	
	PIG	-5	-3	-3	0		-2				0,21	0,12	0,11	0,11		0,15						
	SAB	2	1	1	0	0	2					-0,01	0,02		0,04	0,01						
6hi	EPB			-3								0,09										
	EPN	1	-2	0		-1	1	0	1	1	-1	-0,09	-0,07	-0,07		-0,05	-0,08		-0,07	-0,03	-0,03	
	PIG		-1	-3								0,03	0,09									
	SAB	-1	-1	0		3	1		1	1		0,07	-0,02	-0,01		-0,08	-0,01					0,00
6j	EPB			2								-0,07										
	EPN	1	0	1		-1	0			1	1	-0,11	-0,07	-0,11		-0,05	-0,09				-0,11	
	SAB	2	1	2			1			-2	-2	-0,09	-0,11	-0,12		-0,12					-0,09	
6kl	EPN	-1	0	0		1	0		3	-2	1	-0,03	-0,04	-0,04		-0,06	-0,01		-0,01	0,01	-0,03	
	SAB	0	0	0		2	-1					-0,09	-0,05			-0,10	0,00					
6mn	EPN			2								0,04										
	SAB	0	2	2		2	1					-0,04	-0,03	-0,11		-0,03						
6opqr	EPN	1	0	0		4	3		2			-0,03	0,00			-0,06	-0,05					0,02
	SAB	2	0	0		2	2					-0,04	0,01			-0,04						-0,04

**Tableau B4.** Variations de croissance moyennes des arbres (%) associées aux sécheresses du mois d'août ( $SPEI_{1\text{mois}} < -1$ ) survenues au cours de la période de 1961 à 2000 et coefficients de corrélation moyens entre les indices de croissance des arbres et les indices du bilan hydrique au mois d'août ( $SPEI_{1\text{mois}}$ ) au cours de cette même période. Voir la page titre de l'annexe pour la définition des codes.

Territoire	Essence	Variation de croissance (% par milieu physique)										Coefficient de corrélation (par milieu physique)									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1a	PIB		-3	-5									0,12	0,11							
	PRU		-4	-2		-1	4						0,07	-0,02	0,04	0,03					
	THO						-13									0,03					
2a	EPB			-6																	
	PEG		0	0									-0,08	-0,12							
	PET		0	0									0,00	-0,09							
	PIB		-9	-7	-8							0,21	0,13	0,17							
	PRU		-5	-4	-2							0,05	0,01	-0,03							
	SAB		-5	-3	-3							0,11	0,05	0,05							
2b	THO			-2					-4				0,01								0,15
	EPN									6											-0,01
	EPR					10	7			7											-0,03
	PRU		0	3	7	2	7		4	4			0,03								-0,13
	SAB		4	7	4	3	4	3	4	4			-0,08	-0,07							-0,07
	THO		4	7	4	-5							-0,05	-0,13							-0,03
2c	PRU		2	5						6											0,14
	SAB										7										-0,16
	THO										9										-0,09
3ab	BOP		9	6	8																-0,11
	EPB		-7	-4	-5						8										-0,13
	EPN		-4	-6	-5						-7										0,10
	EPR		-3	-9	-3						-6										0,07
	PEG		2	0	0						-5										0,05
	PET		0	1	-1						-4										0,01
	PIB		-1	-1	-1						-4										0,06
	PIG		-3	-3	-2						-4										0,00
	PRU		-2	-2	-3						-2										0,00
	SAB		-1	-1	-2						-2										0,04
	THO		-2	-2	-2						-4										0,00
	3ac	BOP		0	6	3															
EPB			3	1	0						6										0,07
EPN			4	3	2						1										-0,05
EPR			7	0	5	7	6	5			2										-0,08
PEG					-1						4										-0,13
PET			2	4	4																0,09
PIB			2	-2	0																-0,06
PIG			1	1																	0,04
PRU			6	3	3																0,06
SAB			3	3	3	2	2	3	1												-0,01
THO			-3	-3	-3	2	2	3	1												-0,08

Tableau B4. (suite)

Territoire	Essence	Variation de croissance (% par milieu physique)									Coefficient de corrélation (par milieu physique)										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
3d	BOP			-2																	
	EPB			3		2										0,01					
	EPN			7		8		7	3	4	5					-0,06	-0,07	-0,01	0,01	0,03	
	EPR			4		5		5	5	6						-0,12	-0,12	-0,03	-0,07		
	PET			4		4		0								-0,08	-0,07				
	SAB			5		4		4	1	3						-0,06	-0,04	-0,02	-0,01		
	THO			2		2		3	6	-1						-0,03	-0,03	-0,06	0,03		
4a	BOP			8																	
	EPB			2		2										-0,05					
	EPN			2		1		3	0	1	-1	3	1			-0,01					
	EPR			3		1		3	0	1	-1	3	1			0,00					
	PET			4		2		1	-6		0					0,06	0,07	0,05	0,06		0,08
	PIB			-1												-0,06					
	PIG			2		-3										-0,08					
	PIR			-2		-3										0,04					
	SAB			-2		0		-2	-3		-1					-0,01	-0,04	0,03	0,01		0,01
	THO			-4		-4										0,25					
4bc	BOP			2		1		3		1	4					-0,08	-0,04	-0,06			
	EPB			-3		-2		-3		-2						0,04	0,04	0,05	0,07	0,03	0,01
	EPN			-4		-3		-3		-2						0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
	EPR			1		3		2		-1						-0,06	-0,05	-0,05	-0,05	0,04	0,06
	PEG					1		1								-0,06					
	PET			-6		0		-1		-5						0,01	0,01	0,02	0,05		
	PIB			-6		-3		-1								0,12	0,07	0,05			
	PIG			0		2		2								0,06	0,02	0,03			
	PIR			-1		-1		-1								0,15	0,15	0,03			
	SAB			0		1		1		1	0	1	1			-0,02	-0,05	-0,02	-0,02	0,04	0,03
4de	THO			-6		-2		-4		-1	-3					0,17	0,17	0,15	0,15	0,19	0,19
	BOP			4		2										-0,05	-0,05				
	EPB			-1		-1		-2								0,09	0,10	0,09	0,16		
	EPN			-1		-3		1		1	1					0,08	0,07	0,08	0,08	0,07	0,06
	PET			-3		-2		-2		-2						0,02	0,04	0,01			0,11
	PIG			-2		-5				-2						0,05	0,11		0,02		
	SAB			1		-1		4		7	4					-0,03	0,02	-0,03	-0,02	0,00	0,02
	THO			-5		-5										-0,03	0,02	-0,02	0,07	0,08	0,08
	BOP			3		2		3		2	5					-0,07	-0,06				
	EPB			-4		-4		-5		-3						0,16	0,18	0,16	0,16	0,20	0,20
4f	EPN			-6		1		-4		-3					0,15	0,15	0,15	0,15	0,12	0,15	0,15
	EPR			1		-9		1		-3					0,03	0,10	0,10	0,10	0,13	0,04	0,04
	PET			3		5		1		1	3				0,06	0,02	0,04	0,04	0,04		
	SAB			2		-3		-4		-1	-5				0,18	0,16	0,18	0,18	0,20	0,18	0,17
	THO			-5		-5		-4		-4					0,05	0,12	0,12	0,12	0,07	0,08	0,09
	BOP			3		2		3		2	5					-0,07	-0,06				

**Tableau B4. (suite)**

Territoire	Essence	Variation de croissance (% par milieu physique)										Coefficient de corrélation (par milieu physique)									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
4gh	BOP																				
	EPB																				
	EPN	4																			
	PET																				
	SAB																				
	THO																				
5a	BOP																				
	EPB																				
	EPN	-5																			
	PET																				
	PIG	-4																			
	SAB																				
5bcd	BOP																				
	EPB																				
	EPN	-1																			
	EPR																				
	PET																				
	PIG	-4																			
5ef	SAB	4																			
	BOP																				
	EPB																				
	EPN	-4																			
	EPR																				
	PET																				
5g	SAB	7																			
	BOP																				
	EPB																				
	EPN	-5																			
	PET	0																			
	PIG	-6																			
5hi	SAB	-3																			
	BOP																				
	EPB																				
	EPN	6																			
	EPR																				
	PET																				
5j	SAB	-3																			
	BOP																				
	EPB																				
	EPN																				
	SAB																				

Tableau B4. (suite et fin)

Territoire	Essence	Variation de croissance (% , par milieu physique)									Coefficient de corrélation (par milieu physique)										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
6ab	EPN	-1	-2	0	-2	0	1	-2	-3	-1	-3	0,03	0,06	0,06	0,05	0,05	0,06	0,04	0,01	0,05	0,03
	PET			-4	-3			-4						-0,01	-0,02			-0,01			
	PIG			-3	-5	-5		-5					0,05	0,02	-0,01			0,03			
	SAB			4	-3			2						0,00	-0,03			0,02			
6cdefg	EPN	1	0	2	1	1	1	3	2	2	2	0,04	0,05	0,03	0,04	0,02	0,02	0,03	0,01	0,02	0,01
	PIG	-3	-3	-3	-4		-3				0,05	0,06	0,06	0,11		0,02					
	SAB	3	4	4		2	3					-0,07	-0,05			-0,06	-0,07				
6hi	EPB			4										0,02							
	EPN	0	-2	0		-2	1	3	1	0	0	0,04	0,09	0,05		0,08	0,02		-0,07	0,05	0,04
	PIG			-1	-2								0,08	0,10							
	SAB	0	-1	1		0	2		0			0,05	0,02	-0,04		-0,03	-0,06				0,01
6j	EPB			-2										-0,14							
	EPN	0	1	0		2	0	0		-1	-1	-0,07	-0,10	-0,08		-0,18	-0,08			-0,07	
	SAB	1	0	0		0	0			0	0	-0,02	0,01	0,00			-0,01			0,02	
6kl	EPN	2	2	2	2	2	2	2	2	5	2	-0,15	-0,12	-0,13		-0,15	-0,14		-0,10	-0,24	-0,12
	SAB	2	2	0	0	0	1					-0,19	-0,18			-0,16	-0,22				
6mn	EPN			-2										-0,01							
	SAB			-4	-1	-4		-3				0,11	0,03	0,13			0,02				
6opqr	EPN			1	1	3	1	2					-0,10	-0,09		-0,14	-0,13				-0,10
	SAB			0	1		0					-0,15	-0,07				-0,12				





Le ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP) accorde une grande importance à l'acquisition et au transfert des connaissances nécessaires à l'aménagement durable des forêts. Il souhaite entre autres accroître les connaissances permettant de caractériser et d'anticiper les effets des changements climatiques sur les forêts. Ce mémoire présente les travaux visant à évaluer la sensibilité des arbres aux sécheresses ponctuelles et à la variabilité interannuelle du bilan hydrique climatique. L'analyse a porté sur les mesures de cernes de croissance de près de 70 000 arbres-études échantillonnés dans le cadre du programme ministériel d'inventaire écoforestier du Québec méridional. Ces connaissances peuvent contribuer à évaluer localement la vulnérabilité des essences forestières aux sécheresses et à orienter l'élaboration de stratégies d'adaptation visant à réduire les impacts des changements climatiques sur la productivité des forêts.