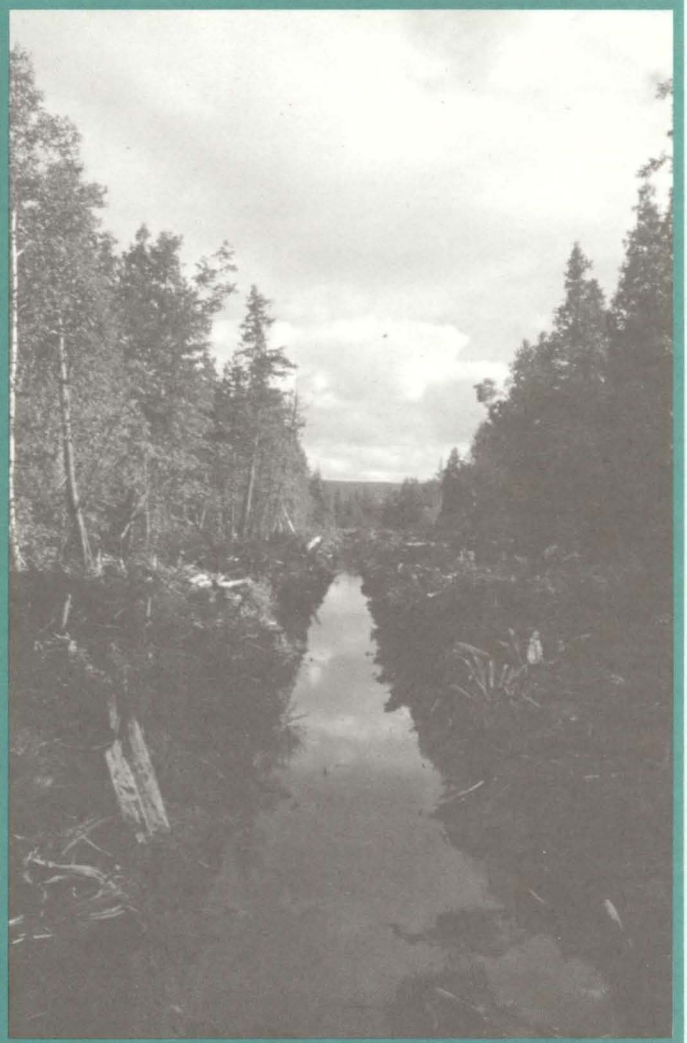
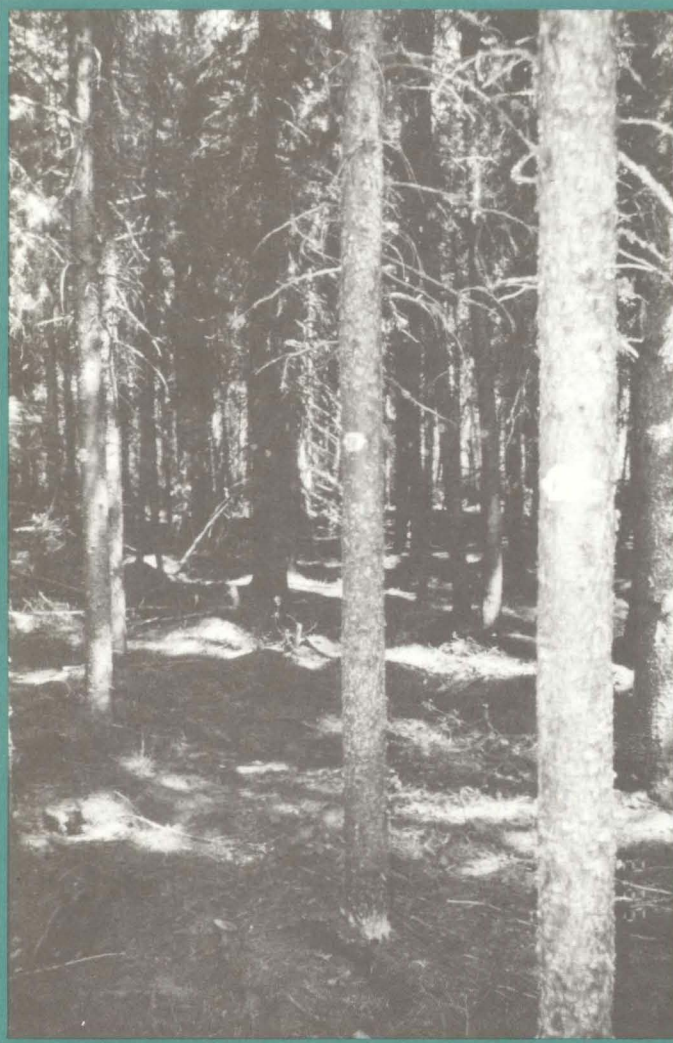




Suivi des travaux de drainage forestier : (3) Climat et accroissement en volume de l'épinette noire et du mélèze laricin à Saint-Anaclet

Richard Zarnovican et Claude Laberge
Région du Québec • Rapport d'information LAU-X-108



Ressources naturelles
Canada

Service canadien
des forêts

Natural Resources
Canada

Canadian Forest
Service

Canada

LE CENTRE DE FORESTERIE DES LAURENTIDES est un des six établissements régionaux du Service canadien des forêts (Ressources naturelles Canada). Le Centre collabore avec divers organismes gouvernementaux, avec les intervenants de l'industrie forestière et avec les établissements d'enseignement dans le but de promouvoir, par des travaux de recherche et de développement, un aménagement et une utilisation plus rationnels des ressources forestières du Québec.

Au Québec, les activités portent sur la recherche dans les domaines des ressources forestières et de la protection des forêts, et sur le développement forestier. La plupart des travaux sont entrepris pour répondre aux besoins de divers organismes intéressés à l'aménagement forestier. Les résultats de ces travaux sont diffusés sous forme de rapports techniques et scientifiques, de conférences et autres publications.

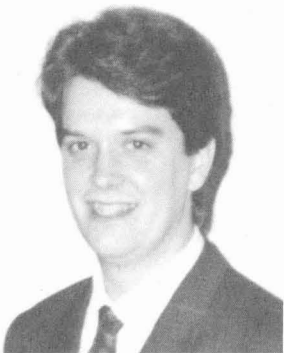
THE LAURENTIAN FORESTRY CENTRE is one of six regional establishments of the Canadian Forest Service (Natural Resources Canada). The Centre cooperates with other government agencies, educational institutions and the forest industry to promote through research and development the most efficient and rational management and use of Quebec's forests.

In Quebec, the program consists of forest resource and protection research and forest development. Most research is undertaken in response to the needs of the various forest management agencies. The results of this research are distributed in the form of scientific and technical reports, conferences, and other publications.



Richard Zarnovican

Richard Zarnovican travaille au Centre de foresterie des Laurentides à Sainte-Foy depuis 1977. Il détient un Doctorat en aménagement et sylviculture de l'Université Laval et il conduit présentement des recherches en sylviculture et en production des forêts aménagées. Il a aussi travaillé au Service des études écologiques régionales de 1974 à 1976.



Claude Laberge

Claude Laberge a obtenu un Baccalauréat spécialisé en statistiques et une Maîtrise en mathématiques (option statistique) de l'Université Laval. Il termine présentement un Doctorat en sciences de l'eau à l'INRS-Eau (composante de l'Université du Québec). Il a occupé différents postes de recherche à l'INRS-Eau, au CIRAL de l'Université Laval et au Service canadien des forêts. Il se spécialise dans l'application de la statistique au domaine de l'environnement et de la détection de tendances temporelles.

Suivi des travaux de drainage forestier :
(3) Climat et accroissement en volume de l'épinette noire
et du mélèze laricin à Saint-Anaclet

Richard Zarnovican et Claude Laberge

Rapport d'information LAU-X-108

1994

Ressources naturelles Canada
Service canadien des forêts - Région du Québec

**LA BIBLIOTHÈQUE NATIONALE DU CANADA A CATALOGUÉ
CETTE PUBLICATION DE LA FAÇON SUIVANTE :**

Zarnovican, Richard

Suivi des travaux de drainage forestier : (3) Climat et
accroissement en volume de l'épinette noire et du mélèze
laricin à Saint-Anaclet

(Rapport d'information ; LAU-X-108)

Comprend des résumés en français et en anglais.

Publ. aussi en anglais sous le titre: Survey of the effects
of forest drainage operations: (3) Climate and volume
increment of black spruce and tamarack at Saint-Anaclet.

Publ. par Centre de foresterie des Laurentides.

Comprend des références bibliographiques.

ISBN 0-662-98813-2

Cat. MAS no Fo46-18/108F

1. Drainage forestier -- Québec (Province). 2. Épinette
noire -- Facteurs climatiques -- Québec (Province). 3. Mélèze
laricin -- Facteurs climatiques -- Québec (Province).
4. Épinette noire -- Québec (Province) -- Croissance. 5. Mélèze
laricin -- Québec (Province) -- Croissance. I. Laberge, Claude.
II. Service canadien des forêts. Région du Québec.
III. Centre de foresterie des Laurentides. IV. Titre.
V. Collection: Rapport d'information (Centre de foresterie
des Laurentides) ; LAU-X-108.

SD408.2.Z38 1994 634.9'9 C94-900129-5

© Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1994

Numéro de catalogue Fo46-18/108F

ISBN 0-662-98813-2

ISSN 0835-1589

Il est possible d'obtenir sans frais un nombre restreint d'exemplaires de cette publication auprès de:

Ressources naturelles Canada
Service canadien des forêts - Région du Québec
Centre de foresterie des Laurentides
1055, rue du P.E.P.S.
C.P. 3800
Sainte-Foy (Québec)
G1V 4C7

Des copies ou des microfiches de cette publication sont en vente chez:

Micromédia Ltée
Place du Portage
165, rue Hôtel-de-Ville
Hull (Québec)
J8X 3X2

This publication is also available in English under the title "Survey of the effects of forest drainage operations: (3) Climate and volume increment of black spruce and tamarack at Saint-Anaclet" (Catalog No. Fo46-18/108E).



TABLE DES MATIÈRES

	Page
LISTE DES TABLEAUX	v
LISTE DES FIGURES	v
RÉSUMÉ	vii
ABSTRACT	viii
INTRODUCTION	1
Hypothèses de travail	2
Objectifs du travail	2
MATÉRIEL ET MÉTHODES	2
Séries temporelles de l'accroissement en volume	2
Élimination de la tendance de croissance	3
Données climatiques	3
Fonction de réponse	5
RÉSULTATS ET DISCUSSION	6
Synchronicité des séries résiduelles	6
Synchronicité sans décalage	6
Synchronicité avec décalage	7
Variabilité des résidus	8
Accroissements en volume et climat - fonction de réponse	10
Sélection des modèles prédictifs	10

TABLE DES MATIÈRES

(suite)

	Page
Analyse des modèles	13
Épinette noire - pessière à litière	13
Validation du modèle	13
Épinette noire - pessière à mousses	15
Validation du modèle	15
Mélèze laricin - pessière à litière	16
Validation du modèle	16
Accroissements en volume, climat et drainage	18
CONCLUSION	23
REMERCIEMENTS	24
OUVRAGES CONSULTÉS	24

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1. Coefficients de corrélation entre les séries résiduelles au temps «t» selon la classe de croissance et le groupement	7
Tableau 2. Autocorrélation d'ordres 1 et 2 pour les séries résiduelles selon le groupement et la classe de croissance	8
Tableau 3. Estimateurs de l'écart-type intrinsèque pour les séries de résidus transformées selon l'autocorrélation	9
Tableau 4. Modèles de régression multiple établis à l'aide de la méthode du R carré	12
Tableau 5. Modèles de régression multiple établis à l'aide de la méthode pas à pas .	13
Tableau 6. Modèle climatique de l'épinette noire de la pessière à litière de 1968 à 1987	14
Tableau 7. Modèle climatique de l'épinette noire de la pessière à mousses de 1968 à 1987	15
Tableau 8. Modèle climatique du mélèze laricin de la pessière à litière de 1968 à 1987	16

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Volume annuel de l'épinette noire dans la pessière à litière, moyenne par classe de croissance	4
Figure 2. Volume annuel de l'épinette noire dans la pessière à mousses, moyenne par classe de croissance	4
Figure 3. Volume annuel du mélèze laricin dans la pessière à litière, moyenne par classe de croissance	5
Figure 4. Séries résiduelles de l'épinette noire dans la pessière à litière selon la classe de croissance	11
Figure 5. Séries résiduelles de l'épinette noire dans la pessière à mousses selon la classe de croissance	11

LISTE DES FIGURES

(suite)

	Page
Figure 6. Séries résiduelles du mélèze laricin dans la pessière à litière selon la classe de croissance	12
Figure 7. Série résiduelle prédite et observée pour l'épinette noire dans la pessière à litière	14
Figure 8. Série résiduelle prédite et observée pour l'épinette noire dans la pessière à mousses	16
Figure 9. Série résiduelle prédite et observée pour le mélèze laricin dans la pessière à litière	17
Figure 10. Série résiduelle de l'épinette noire de la pessière à litière et intervalle de confiance à 95 % du modèle climatique	19
Figure 11. Série résiduelle de l'épinette noire de la pessière à mousses et intervalle de confiance à 95 % du modèle climatique	20
Figure 12. Série résiduelle du mélèze laricin de la pessière à litière et intervalle de confiance à 95 % du modèle climatique	20
Figure 13. Série résiduelle prédite et observée pour l'épinette noire dans la pessière à litière de 1983 à 1992	21
Figure 14. Volume annuel de l'épinette noire dans la pessière à litière selon la température moyenne d'août, de 1983 à 1992	21
Figure 15. Série résiduelle prédite et observée pour l'épinette noire dans la pessière à mousses de 1983 à 1992	22
Figure 16. Volume annuel de l'épinette noire dans la pessière à mousses selon la hauteur des pluies de juin, de 1983 à 1992	22

RÉSUMÉ

L'étude dendrochronologique de l'accroissement en volume de l'épinette noire (*Picea mariana* [Mill.] B.S.P.) et du mélèze laricin (*Larix laricina* [Du Roi] K. Koch.) a été effectuée dans la pessière à litière et dans la pessière à mousses de la tourbière drainée de Saint-Anaclet, près de Rimouski, de 1968 à 1992. Les séries temporelles de l'accroissement en volume proviennent de l'analyse de tiges et correspondent à la moyenne de 10 épinettes noires dans la pessière à litière et dans la pessière à mousses et de 5 mélèzes laricins dans la pessière à litière par classe de croissance (supérieure, moyenne et inférieure). Ces séries ont été corrélées avec les variables climatiques, les précipitations mensuelles de neige et de pluie et les températures mensuelles moyennes.

Les résultats démontrent que les séries résiduelles d'une essence et d'une parcelle sont synchrones entre les classes de croissance. Les séries d'épinettes dans la pessière à litière et dans la pessière à mousses présentent des oscillations amplifiées ayant un cycle complet d'environ 7 ans, alors que la périodicité du mélèze laricin est différente, avec un cycle d'environ 15 ans.

Les fonctions de réponse établies à partir des régressions multiples montrent une forte incidence positive des pluies (juin et août) et des températures moyennes (décembre et octobre) sur l'accroissement en volume des essences étudiées, pour la période de 1968 à 1987.

La comparaison du modèle climatique avec les séries observées de 1988 à 1992 indique des variations supérieures aux prévisions. Cependant, les fonctions de réponse pour la période de 1983 à 1992 démontrent que ces variations reflètent les variations climatiques et notamment l'effet des précipitations (pluie de juin) sur l'épinette noire dans la pessière à mousses et du stress thermique (températures moyennes d'août) sur l'épinette noire dans la pessière à litière, alors que l'effet du drainage est faible sinon nul.

ABSTRACT

A dendrochronological study of the volume increment of black spruce (*Picea mariana* [Mill.] B.S.P.) and tamarack (*Larix laricina* [Du Roi] K. Koch.) was carried out in the spruce-litter forest and the spruce-mosses forest in the drained peatland at Saint-Anaclet, near Rimouski, from 1968 to 1992. The time series of volume increment come from stem analysis and correspond to the mean of 10 black spruce trees in the spruce-litter forest and spruce-mosses forest and 5 tamarack trees in the spruce-litter forest by growth class (superior, intermediate and inferior). These series were correlated with climatic variables, monthly snowfall and rainfall and mean monthly temperatures.

The results show that the residual series for a species and a plot are synchronous between growth classes. The series of spruce in the spruce-litter forest and the spruce-mosses forest showed amplified oscillations with a complete cycle of about 7 years, while periodicity of tamarack was different, with a cycle of about 15 years.

Response functions based on multiple regressions showed a strong positive influence of rainfall (June and August) and mean temperatures (December and October) on volume increment for the species studied from 1968 to 1987.

Comparison of the climatic model with the series observed from 1988 to 1992 reveals greater than expected variations; however, the response functions for the period from 1983 to 1992 showed that these variations reflect climatic variations, in particular the effect of precipitation (June rainfall) on black spruce in the spruce-mosses forest and heat stress (mean August temperatures) on black spruce in the spruce-litter forest, while the effect of drainage was negligible or nil.

INTRODUCTION

Dans les forêts tourbeuses, la croissance de l'épinette noire (*Picea mariana* [Mill.] B.S.P.) et du mélèze laricin (*Larix laricina* [Du Roi] K. Koch.) dépend généralement des variations de la nappe phréatique (Jasieniuk et Johnson, 1982). En effet, dans les pessières à sphaignes et éricacées, les variations de la nappe phréatique constituent un obstacle important au développement des racines et au fonctionnement normal de l'arbre (Lieffers et Rothwell, 1987a et b).

Comme ces variations sont positivement corrélées avec la pluviosité (Dai et collab., 1974; Munro, 1984), on pourrait conclure qu'il y a une relation de cause à effet entre une pluviosité estivale élevée et une mauvaise croissance des arbres. Or, une étude de Dang et Lieffers (1989) révèle le contraire; il y est démontré que la croissance radiale des essences à l'étude est fortement et positivement corrélée avec les précipitations estivales et, par conséquent, avec la nappe phréatique élevée.

Le développement des arbres par évapotranspiration est aussi lié aux variations de la température estivale (Tryon et Chapin, 1983; Van Cleve et collab., 1983), et la croissance radiale est corrélée avec les minima et maxima de ces températures (Dang et Lieffers, 1989). Cependant, il convient de préciser que, si des températures fraîches favorisent la croissance radiale, des températures élevées semblent au contraire la gêner.

Pour obtenir une croissance radiale maximale, certains suggèrent d'opter pour un niveau optimal de la nappe phréatique (Van Groenewoud, 1975), alors que d'autres (Päivänen et Wells, 1978) parlent plutôt d'un niveau de la nappe phréatique qui soit biologiquement acceptable pendant la période de croissance active.

À la lumière de ces constatations, on peut se demander quels sont les effets réels, à court et à moyen terme, d'un abaissement de la nappe phréatique par drainage sur la croissance des arbres par rapport au climat et à ses variations. Le présent travail a été effectué dans cette perspective, puisque les relations entre le climat et la croissance dans le cas de pessières à mousses drainées n'ont fait l'objet d'aucune étude antérieure.

Le document présente une analyse dendrochronologique des relations entre le climat et l'accroissement en volume de l'épinette noire et du mélèze laricin dans les pessières drainées de Saint-Anaclet, près de Rimouski (Zarnovican, 1989).

Hypothèses de travail

Afin de vérifier la part respective du climat et du drainage sur l'accroissement en volume dans une analyse dendrochronologique, il était important d'établir des données de base en tenant compte des facteurs endogènes et exogènes du peuplement.

Dans le contexte du présent travail, nous considérons que :

- les effets endogènes du peuplement sur l'accroissement en volume des arbres sont atténués en classant les arbres dans les classes de croissance selon leur position sociale et selon leur vigueur;
- l'effet du drainage sur l'accroissement en volume des arbres est le même partout, puisque la distance minimale entre les parcelles et le canal est supérieure à 12 m;
- l'effet de l'arbre individuel est éliminé en utilisant une série moyenne par classe de croissance;
- l'effet climatique est le même dans les deux parcelles, puisqu'elles ont des caractères topographiques semblables et qu'elles font partie d'un même complexe tourbeux.

Objectifs du travail

Afin de mettre en évidence les effets du climat et du drainage sur l'accroissement en volume, les objectifs du travail sont les suivants :

- Évaluer la synchronicité et la variabilité des séries d'accroissement en volume selon les classes de croissance, tant pour l'épinette noire que pour le mélèze laricin;
- Préciser l'effet des facteurs climatiques sur l'accroissement en volume au moyen de régressions multiples, utilisées comme fonctions de réponse;
- Évaluer l'effet du drainage par rapport à celui du climat.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Séries temporelles de l'accroissement en volume

Les séries d'accroissement en volume proviennent de l'analyse de tiges (60 pour l'épinette noire et 15 pour le mélèze laricin) récoltées dans les parcelles expérimentales de Saint-Anaclet. Les caractéristiques morphométriques des arbres ont été présentées par Zarnovican et Laberge (1994), et les conditions écologiques des parcelles ont été décrites par Zarnovican (1989).

Une série moyenne correspond à la moyenne des accroissements en volume par année, par classe de croissance (10 valeurs pour l'épinette noire et 5 pour le mélèze laricin), par essence et par parcelle (figures 1, 2 et 3). Au total, de 1968 à 1992, neuf séries ont été constituées, soit six pour l'épinette noire et trois pour le mélèze laricin. L'usage des séries moyennes était justifié car, en général, les séries individuelles d'une classe de croissance sont fortement corrélées d'une manière positive, bien qu'il y ait quelques cas de corrélations non significatives.

Élimination de la tendance de croissance

L'étude des relations entre les variables climatiques et l'accroissement en volume par une fonction de réponse nécessite l'élimination de la tendance de croissance et l'utilisation des séries résiduelles. Pour ce faire, la tendance de la série d'une classe de croissance a été enlevée à l'aide d'un modèle linéaire simple. Le modèle linéaire a été choisi d'abord parce que les séries sont relativement courtes et sont à tendance nettement linéaire (figures 1, 2 et 3) et ensuite, parce qu'une droite permettait un aussi bon ajustement que dans le cas de modèles des deuxième et troisième ordres. La série résiduelle d'une classe de croissance a été calculée après avoir soustrait les valeurs de la droite de régression des valeurs observées correspondantes (figures 4, 5 et 6).

Données climatiques

Les données climatiques mensuelles ont été divisées en séries de l'année courante (climat de janvier à août de l'année courante) et en séries de l'année précédente (climat de septembre à décembre de l'année précédente). Ces données provenaient de la station de Rimouski (située à environ 12 km à l'ouest du complexe drainé) et étaient fournies par la Direction de la météorologie du ministère de l'Environnement du Québec.

L'étude des relations entre le climat et l'accroissement en volume couvre la période de 1967 à 1992 et inclut les variables climatiques suivantes :

- a) Moyennes des températures minimales de l'air en °C;
- b) Moyennes des températures maximales de l'air en °C;
- c) Moyennes des températures de l'air en °C;
- d) Précipitations de neige en cm;
- e) Précipitations de pluie en mm.

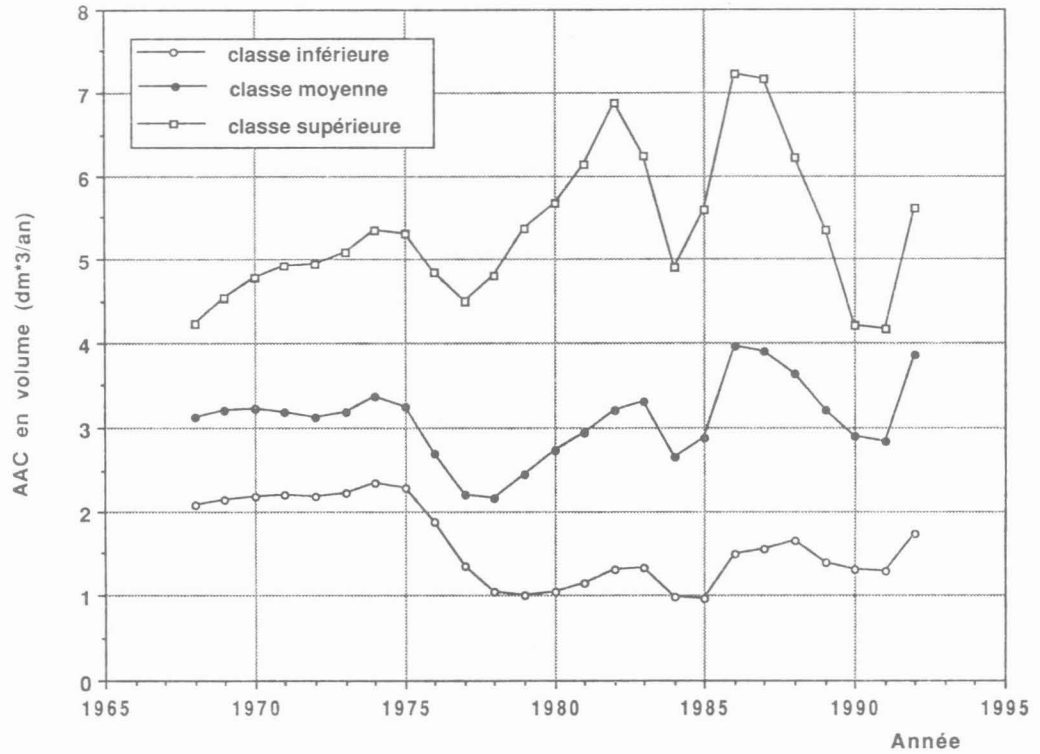


Figure 1. Volume annuel de l'épinette noire dans la pessière à litière, moyenne par classe de croissance.

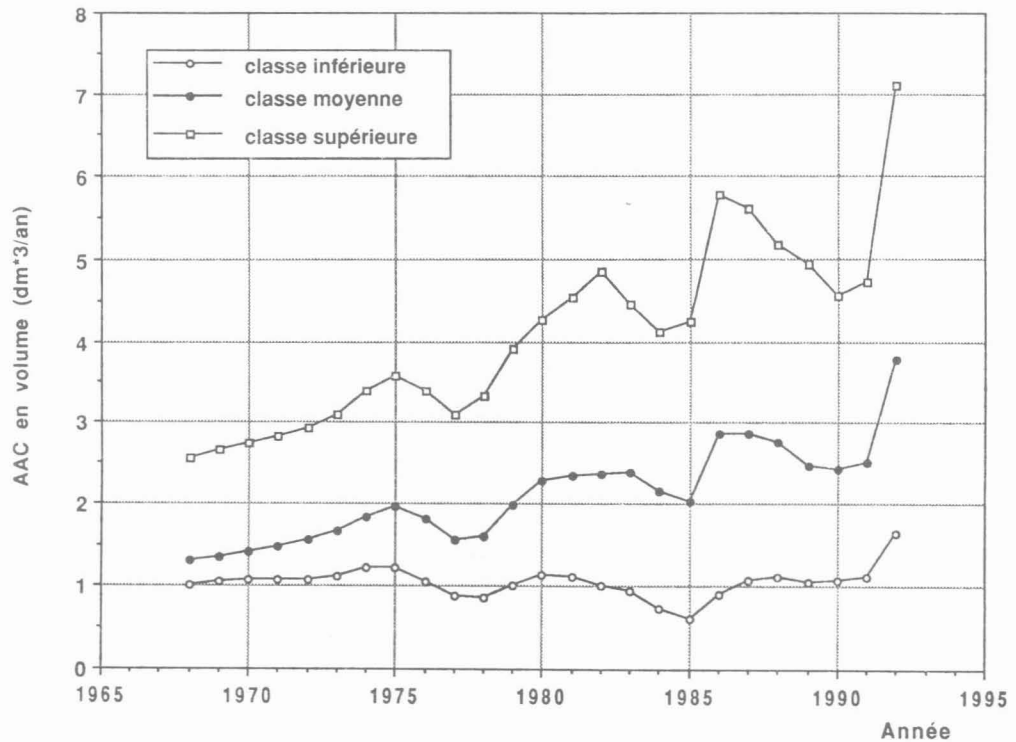


Figure 2. Volume annuel de l'épinette noire dans la pessière à mousses, moyenne par classe de croissance.

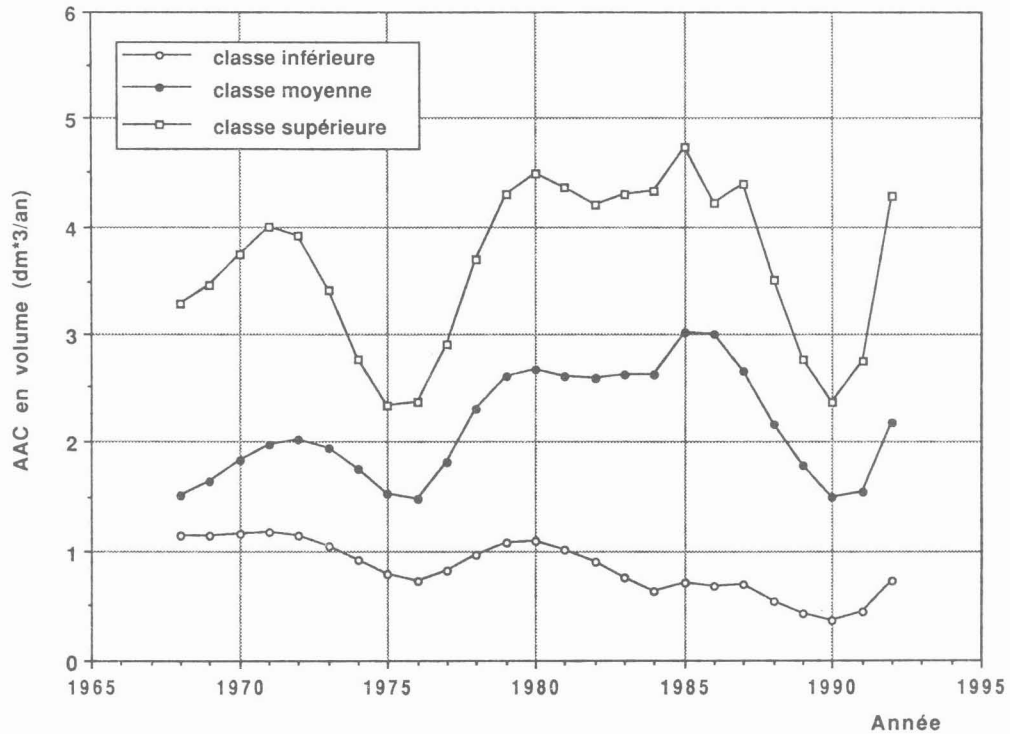


Figure 3. Volume annuel du mélèze laricin dans la pessière à litière, moyenne par classe de croissance.

Pour une comparaison directe des estimateurs obtenus dans les modèles de régression multiple, les données climatiques ont été centrées et réduites. Ainsi, il sera possible de qualifier l'importance d'une variable indépendante dans ces modèles à l'aide de l'estimateur qui lui est associé.

Fonction de réponse

Les relations entre les séries résiduelles et les variables climatiques ont été étudiées à l'aide de la régression multiple, comme une fonction de réponse. Cette analyse avait pour but d'évaluer la part respective du climat et du drainage dans les variations temporelles du volume. Dans un premier temps, le meilleur modèle climatique a été choisi pour prédire la série résiduelle de l'accroissement en volume avant le drainage, soit de 1968 à 1987. Ce modèle a alors été appliqué à la prédiction de l'accroissement en volume après le drainage, soit de 1988 à 1992, avec un intervalle de confiance de 95 %.

Dans un deuxième temps, le segment de la série résiduelle observée de 1988 à 1992 a été comparé aux valeurs de l'intervalle de confiance de la même période. Ainsi, nous considérons

l'effet du climat déterminant, lorsque le segment de la série résiduelle observée se trouve à l'intérieur des intervalles de confiance du modèle, alors que, dans le cas contraire, la croissance en volume reflète les effets d'autres facteurs, y compris ceux du drainage. Pour établir le meilleur modèle prédictif, les deux méthodes de sélection suivantes ont été utilisées : la méthode pas à pas (STEPWISE dans SAS) et la méthode du R carré (RSQUARE dans SAS).

Les différents tests statistiques ont été effectués à l'aide des programmes de SAS Institute Inc. (1985).

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Synchronicité des séries résiduelles

La synchronicité des séries résiduelles a été évaluée par essence, par classe de croissance et par groupement à l'aide des corrélations croisées sans décalage et de celles avec décalage d'un an et de deux ans. Cette évaluation avait pour but de déterminer si les séries résiduelles sont semblables dans leurs variations temporelles et, dans l'affirmative, de ne retenir pour les études ultérieures que certaines séries, sélectionnées lors de l'étude de la variabilité.

Synchronicité sans décalage

Les coefficients de corrélations croisées sans décalage ou au temps «t» (tableau 1) indiquent que :

- pour une essence et une parcelle donnée, les séries résiduelles des classes de croissance sont corrélées d'une manière positive et significative (5 %), sauf dans la pessière à litière pour les séries des épinettes des classes supérieure et inférieure;
- dans les deux parcelles, les séries résiduelles des épinettes sont corrélées d'une manière significative et positive, sauf pour une combinaison des classes supérieure et inférieure;
- les séries des épinettes de la classe supérieure des deux parcelles sont corrélées d'une manière significative et positive avec les séries des mélèzes de toutes les classes de croissance;

- il y a peu de corrélations significatives entre, d'une part, les séries des épinettes des classes de croissance moyenne et inférieure des deux parcelles et, d'autre part, les séries résiduelles des mélèzes. Lorsqu'il y a de telles corrélations, la relation est négative trois fois sur quatre.

Tableau 1. Coefficients de corrélation entre les séries résiduelles au temps «t» selon la classe de croissance et le groupement

Classe	MEL-litière			EPN-litière			EPN-mousse		
	inf.	moy.	sup.	inf.	moy.	sup.	inf.	moy.	sup.
MEL-inf.	1,00	0,64	0,82	-0,32	0,07	0,40	0,21	0,45	0,52
MEL-moy.		1,00	0,90	-0,54	0,05	0,69	-0,43	0,17	0,34
MEL-sup.			1,00	-0,42	0,15	0,56	-0,23	0,29	0,43
EPN-inf.				1,00	0,75	0,02	0,67	0,50	0,36
EPN-moy.					1,00	0,56	0,46	0,73	0,72
EPN-sup.						1,00	0,00	0,56	0,69
EPN-inf.							1,00	0,73	0,56
EPN-moy.								1,00	0,95
EPN-sup.									1,00

Note : Les caractères gras indiquent une relation significative au seuil de 5 %; EPN = épinette noire; MEL = mélèze laricin; inf. = inférieure; moy. = moyenne; sup. = supérieure.

Synchronicité avec décalage

Les coefficients d'autocorrélation d'ordre 1, décalage d'un an (tableau 2), indiquent que toutes les séries résiduelles sont autocorrélées, sauf dans le cas des séries résiduelles des épinettes des classes supérieure et moyenne de la pessière à mousses.

Les coefficients d'autocorrélation d'ordre 2, décalage de deux ans (tableau 2), indiquent une diminution notable des corrélations positives et significatives ainsi que l'apparition d'autocorrélations négatives pour les épinettes de la pessière à mousses dans les classes supérieure et moyenne.

L'étude des coefficients de corrélations croisées permet de constater qu'en général, plus le décalage entre deux séries augmente, plus la corrélation tend à diminuer ou à disparaître.

À partir de ces résultats, il est possible de conclure que les séries résiduelles sont généralement synchrones, c'est-à-dire qu'en moyenne les arbres d'une même essence, mais de classes de croissance différentes, ont un comportement temporel semblable pour ce qui est de leur croissance en volume.

Tableau 2. Autocorrélation d'ordres 1 et 2 pour les séries résiduelles selon le groupement et la classe de croissance

Série résiduelle	Autocorrélation	
	d'ordre 1	d'ordre 2
Pessière à litière : mélèze laricin		
classe inférieure	0,66	0,12
classe moyenne	0,83	0,48
classe supérieure	0,75	0,35
Pessière à litière : épinette noire		
classe inférieure	0,80	0,48
classe moyenne	0,59	0,11
classe supérieure	0,61	-0,04
Pessière à mousses : épinette noire		
classe inférieure	0,58	0,12
classe moyenne	0,14	-0,44
classe supérieure	0,16	-0,45

Note : Les caractères gras indiquent une relation significative au seuil de 5 %.

Variabilité des résidus

L'étude de la variabilité des séries résiduelles a pour but d'évaluer l'amplitude des variations de l'accroissement en volume en fonction du temps, au moyen de la comparaison des variances de différentes séries résiduelles. Cependant, l'autocorrélation des séries résiduelles (tableau 1) rend les estimateurs de $\text{Var}(y_t)$ biaisés. Afin d'obtenir une évaluation plus juste de la variabilité des résidus, on doit ajuster les séries pour la présence

d'autocorrélation. Si l'on admet que les séries résiduelles ont une structure autorégressive d'ordre 1, ce que les tableaux 1 et 2 semblent indiquer, on obtient l'équation suivante :

$$\text{Var}(y_t) = s^2.(1-\Phi^2)^{-1} \quad [1]$$

Cette équation donne la relation entre $\text{Var}(y_t)^{0,5}$, l'écart-type des valeurs observées (y_t); s , l'écart-type intrinsèque associé à la variabilité propre de chaque observation; et Φ , le coefficient d'autocorrélation d'ordre 1. Le tableau 3 présente les estimateurs de s , obtenus après avoir calculé les écarts-types des séries transformées ($y_t - \Phi y_{t-1}$).

Tableau 3. Estimateurs de l'écart-type intrinsèque pour les séries de résidus transformées selon l'autocorrélation

Essence	Type de pessière	Classe de croissance	Écarts-types ($\text{dm}^3.\text{an}^{-1}$)
mélèze	à litière	supérieure	0,50
mélèze	à litière	moyenne	0,26
mélèze	à litière	inférieure	0,10
épinette	à litière	supérieure	0,64
épinette	à litière	moyenne	0,36
épinette	à litière	inférieure	0,23
épinette	à mousses	supérieure	0,50
épinette	à mousses	moyenne	0,28
épinette	à mousses	inférieure	0,15

L'égalité des variances entre les parcelles, les espèces et les classes de croissance a été calculée à l'aide du test de Bartlett, et les résultats de son application sur les données transformées ($y_t - \Phi y_{t-1}$) indiquent que :

- la variabilité augmente de façon significative à mesure que l'on progresse dans la hiérarchie des classes de croissance;
- l'épinette noire présente une plus grande variabilité dans la pessière à litière que dans la pessière à mousses;
- l'épinette noire présente une plus grande variabilité que le mélèze laricin dans la pessière à litière.

L'étude de variabilité des résidus montre une amplitude beaucoup plus importante et donc une sensibilité accrue des arbres dominants aux facteurs externes. De plus, ces

résultats indiquent que les mélèzes montrent une sensibilité moins importante que les épinettes noires, et que les épinettes sont moins sensibles dans la pessière à mousses que dans la pessière à litière. Cette dernière observation permet de supposer l'effet de l'âge du peuplement ainsi que la présence de différentes formes de croissance (Zarnovican, 1992).

Dans le cas des épinettes (figures 4 et 5), on note que, dès 1975, les séries prennent l'allure d'oscillations amplifiées, ayant une périodicité d'environ sept ans. Par ailleurs, dans le cas du mélèze laricin (figure 6), l'amplitude semble être constante, et la périodicité est de 15 ans environ.

Ces résultats indiquent que les séries résiduelles sont en général synchrones et que les classes supérieures sont les plus sensibles, ce qui justifie leur usage exclusif pour établir les fonctions de réponse.

Accroissements en volume et climat - fonction de réponse

Sélection des modèles prédictifs

L'existence de fortes corrélations entre les différentes variables de températures nous a amenés à ne tenir compte, pour le reste de l'étude, que des températures moyennes de l'air et des précipitations de neige et de pluie.

Il convient de rappeler que les modèles prédictifs ont été établis pour la période de 1968 à 1987 inclusivement afin d'éliminer la période après drainage. De plus, afin d'éviter la présence de matrices singulières lors de l'utilisation de la méthode du R carré, seulement 19 variables climatiques ont été présélectionnées selon leurs coefficients de corrélation respectifs. Le tableau 4 présente les meilleurs modèles, établis grâce à la méthode du R carré. Pour les deux séries associées aux épinettes, les variables sélectionnées étaient les mêmes, et les estimateurs des paramètres étaient assez semblables. Les trois modèles incluaient la variable associée à la pluie de juin.

Dans le cas de la méthode pas à pas, le meilleur modèle prédictif a été choisi à l'aide des 32 variables climatiques, et le résultat est présenté au tableau 5. La procédure de sélection du modèle a été effectuée au seuil de 10 %, c'est-à-dire que les variables devaient être significatives au seuil de 10 % pour être introduites dans le modèle et devaient rester significatives à ce seuil pour y être conservées.

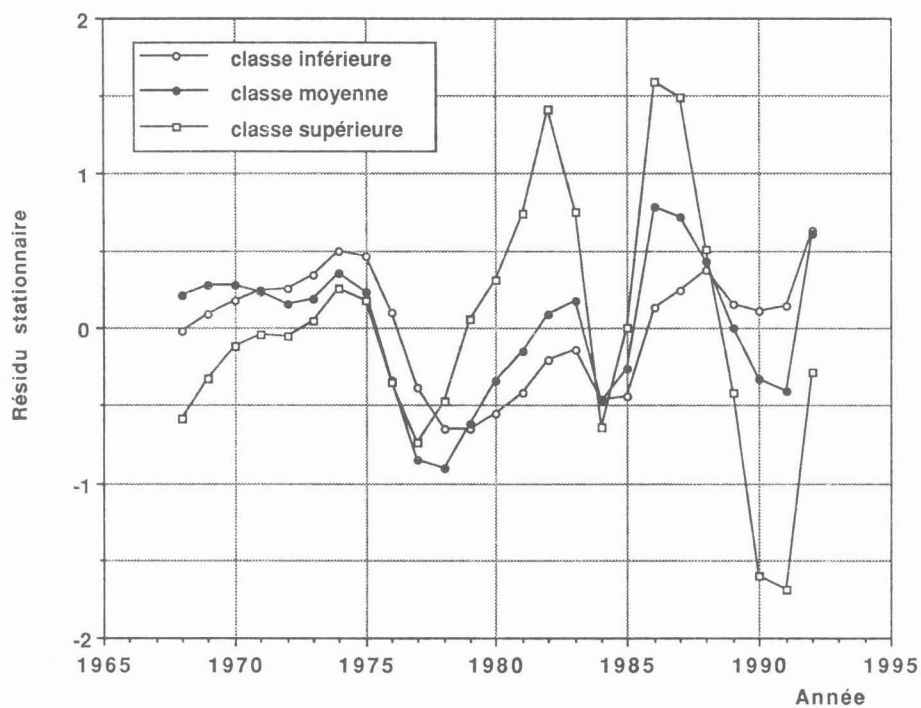


Figure 4. Séries résiduelles de l'épinette noire dans la pessière à litière selon la classe de croissance.

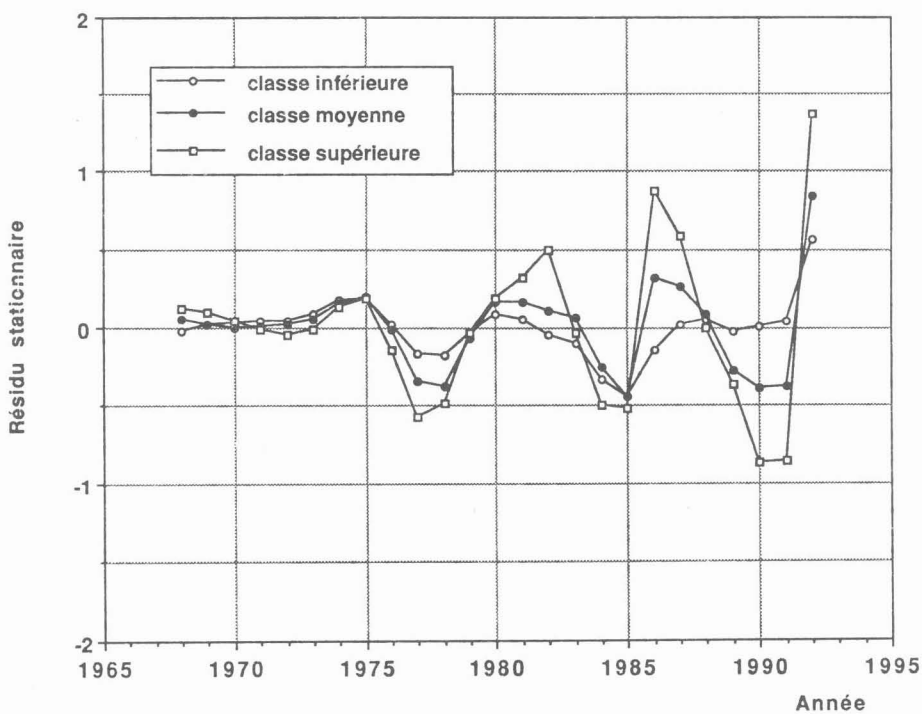


Figure 5. Séries résiduelles de l'épinette noire dans la pessière à mousses selon la classe de croissance.

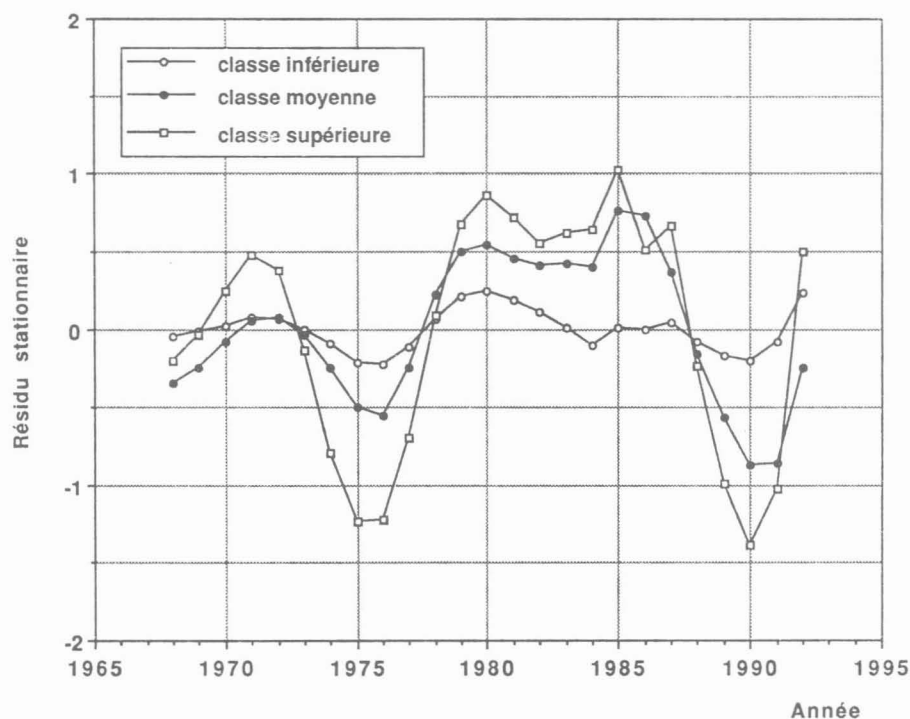


Figure 6. Séries résiduelles du mélèze laricin dans la pessière à litière selon la classe de croissance.

Les modèles associés à la méthode pas à pas (tableau 5) sont très différents de ceux associés à la méthode du R carré (tableau 4). De plus, les résultats de ces deux méthodes sont peu concordants avec les modèles des deux séries des épinettes qui présentent pourtant une bonne synchronicité. Compte tenu de ces observations, les modèles associés à la méthode du R carré ont été choisis.

Tableau 4. Modèles de régression multiple établis à l'aide de la méthode du R carré

Série résiduelle	R ²	Variables climatiques explicatives				
Épinette noire - pessière à litière	0,74	Tm ₁₁ (-0,26)	Tm ₁₂ (0,58)	Pl ₆ (0,34)	Pl ₈ (0,49)	Ne ₁₂ (-0,27)
Épinette noire - pessière à litière	0,70	Tm ₁₁ (-0,17)	Tm ₁₂ (0,36)	Pl ₆ (0,13)	Pl ₈ (0,31)	Ne ₁₂ (-0,11)
Mélèze laricin - pessière à litière	0,66	Tm ₆ (-0,26)	Tm ₇ (0,49)	Tm ₁₀ (0,53)	Pl ₆ (0,40)	

Note : Les chiffres en indice correspondent aux mois de l'année; Tm = température moyenne; Pl = Pluie; Ne = Neige.

Tableau 5. Modèles de régression multiple établis à l'aide de la méthode pas à pas

Série résiduelle	R ²	Variables climatiques explicatives				
Épinette noire - pessière à litière	0,47	Pl ₆ (0,40)	Pl ₁₂ (0,27)			
Épinette noire - pessière à mousses	0,54	Tm ₁ (0,17)	Tm ₈ (-0,26)	Pl ₁₂ (0,14)		
Mélèze laricin - pessière à litière	0,78	Tm ₃ (0,34)	Tm ₆ (-0,48)	Tm ₇ (0,43)	Tm ₁₀ (0,48)	Ne ₁₀ (-0,23)

Note : Voir note au bas du tableau 4.

Analyse des modèles

Épinette noire - pessière à litière

Le modèle sélectionné par la méthode du R carré explique 74 % des variations résiduelles de l'accroissement en volume, avec cinq variables climatiques. Ce modèle est présenté au tableau 6, et sa performance pour prédire l'accroissement en volume des épinettes dans la pessière à litière est illustrée à la figure 7. Comme toutes les variables climatiques sont standardisées, la valeur des estimateurs permet de déterminer l'importance des variables prédictives. Les variables les plus importantes sont donc les pluies de juin et d'août de l'année courante ainsi que la température moyenne de décembre de l'année précédente.

Validation du modèle

Le test de Durbin-Watson n'a pas permis de formuler de conclusion (au seuil de 5 %) quant à la signification de l'autocorrélation des résidus. Toutefois, la faible valeur du coefficient d'autocorrélation d'ordre 1 des résidus (0,21) n'entraînera pas de problèmes importants pour arriver à des conclusions pertinentes lors d'études postérieures; nous ne nous attarderons donc pas à éliminer toute trace d'autocorrélation.

L'étude des résidus a permis de constater que seule l'année 1983 a présenté un résidu standardisé plus grand que 2 en valeur absolue. Par ailleurs, l'étude des valeurs influentes à l'aide de la statistique de Cook a démontré que l'année 1983 a été la plus influente dans la détermination des estimateurs, et que plusieurs autres années ont eu une influence moyenne.

Cependant, afin de s'assurer que l'année 1983 n'est pas la seule à déterminer le modèle, une deuxième régression a été effectuée sans tenir compte de l'année 1983. Les résultats de

cette régression indiquent que le pourcentage de la variance expliquée augmente à 84 %; que les estimateurs des paramètres demeurent significatifs au seuil de 5 % ($Tm_{11} = -0,28$; $Tm_{12} = 0,62$; $Pl_6 = 0,39$; $Pl_8 = 0,56$ et $Ne_{12} = -0,22$); et que les valeurs des estimateurs sont conformes à celles figurant au tableau 6. La présence de l'année 1983 n'a donc pas affecté de façon significative les conclusions relatives au modèle du tableau 6, ce qui a justifié l'usage de ce modèle sans restriction pour les traitements suivants.

Tableau 6. Modèle climatique de l'épinette noire de la pessière à litière de 1968 à 1987

Variable	Estimateur	T pour H_0 Estim = 0	Prob > T
Intercept	0,20	2,14	0,050
Tm_{11}	-0,26	-2,57	0,022
Tm_{12}	0,58	3,94	0,002
Pl_6	0,34	3,15	0,007
Pl_8	0,49	3,57	0,003
Ne_{12}	-0,27	-2,71	0,017

Coefficient de détermination : 0,74

Note : Voir note au bas du tableau 4.

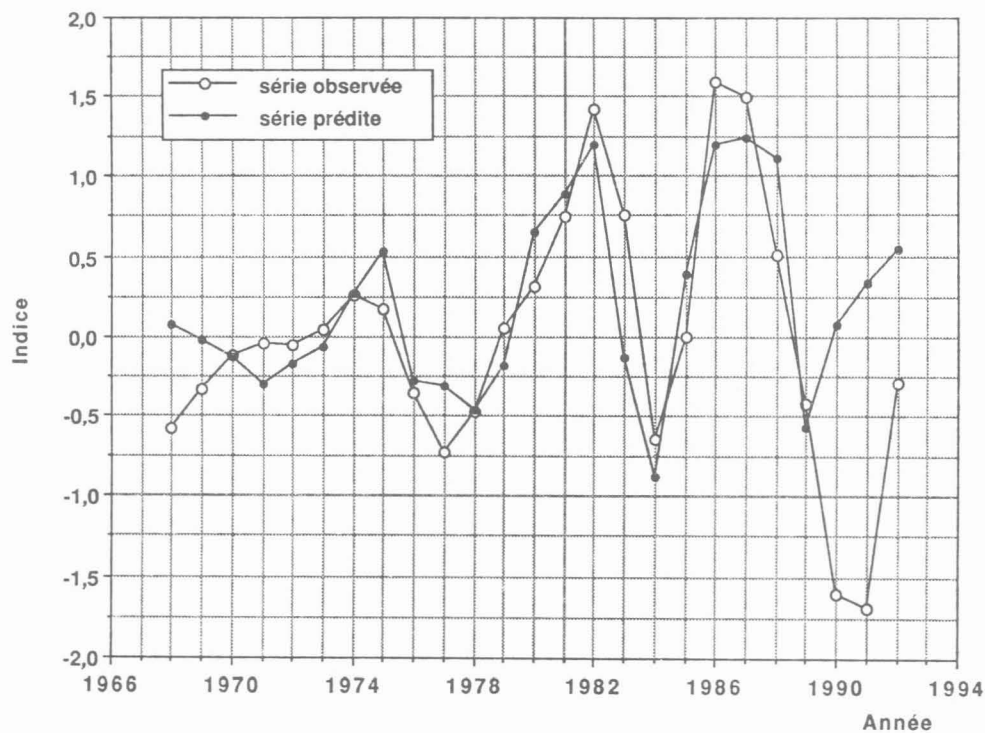


Figure 7. Série résiduelle prédite et observée pour l'épinette noire dans la pessière à litière.

Épinette noire - pessière à mousses

Le modèle sélectionné comme modèle prédictif comporte cinq variables et a été établi grâce à la méthode du R carré. Il permet d'expliquer 70 % des variations de la série résiduelle. Ce modèle est présenté au tableau 7, et sa performance est illustrée à la figure 8. On note que les variables les plus importantes sont la température moyenne de décembre de l'année précédente et la pluie d'août de l'année courante.

Validation du modèle

Le test de Durbin-Watson n'a pas permis de formuler de conclusion quant à l'autocorrélation des résidus au seuil de 5 %. Notons qu'il était indiqué précédemment au tableau 2 que la série résiduelle n'est pas autocorrélée.

L'étude des résidus a montré que seul le résidu standardisé de 1985 était supérieur à 2. L'étude des valeurs influentes à l'aide de la statistique de Cook a permis de constater que l'année 1985 a été la plus influente dans la détermination des estimateurs, tandis que plusieurs autres années ont eu une influence moyenne. Afin de s'assurer que l'année 1985 n'affecte pas le modèle de façon significative, une deuxième régression a été effectuée sans tenir compte de cette année. Les résultats de cette dernière ont indiqué que le pourcentage de variance expliquée a augmenté à 85 % ($Tm_{11} = -0,15$; $Tm_{12} = 0,36$; $Pl_6 = 0,13$; $Pl_8 = 0,32$; $Ne_{12} = -0,15$); que les estimateurs des paramètres ont tous été significatifs au seuil de 5 %; et que les valeurs des estimateurs ont été conformes à celles présentées au tableau 7. Le modèle de la pessière à mousses n'a pas été affecté de façon significative par l'année 1985 et il est tout à fait adéquat comme fonction de réponse.

Tableau 7. Modèle climatique de l'épinette noire de la pessière à mousses de 1968 à 1987

Variable	Estimateur	T pour H_0 : Estim = 0	Prob > T
Intercept	0,05	0,89	0,389
Tm_{11}	-0,17	-2,85	0,013
Tm_{12}	0,36	4,25	0,001
Pl_6	0,13	2,14	0,050
Pl_8	0,31	3,88	0,002
Ne_{12}	-0,11	-2,01	0,064
Coefficient de détermination : 0,70			

Note : Voir note au bas du tableau 4.

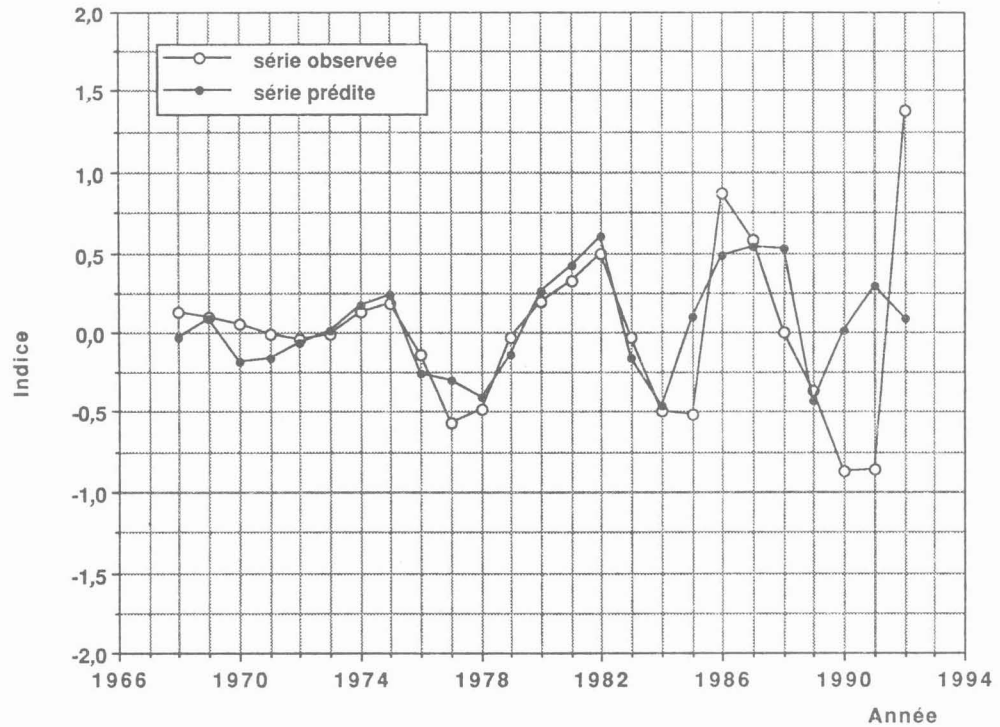


Figure 8. Série résiduelle prédite et observée pour l'épinette noire dans la pessière à mousses.

Mélèze laricin - pessière à litière

Le modèle à cinq variables sélectionné par la méthode pas à pas (au seuil de 10 %) permet d'expliquer 78 % de la variabilité, alors que celui obtenu avec la méthode du R carré avec quatre variables en explique 66 %. Malgré un pourcentage de variance expliquée un peu plus faible, le modèle obtenu par la méthode du R carré a été choisi comme fonction de réponse, afin d'assurer une certaine continuité avec les modèles associés aux deux séries des épinettes. Le tableau 8 résume ce modèle, et la figure 9 présente les séries prédites et observées. Les variables les plus importantes sont les températures moyennes d'octobre de l'année précédente, celles de juillet de l'année courante et la pluie de juin de l'année courante.

Validation du modèle

Selon le test de Durbin-Watson, l'autocorrélation des résidus n'est pas significative au seuil de 5 %. L'autocorrélation présente dans la série résiduelle (obtenue après l'élimination de la tendance) est donc éliminée par des variables climatiques. L'étude des résidus n'a montré aucun résidu standardisé plus grand que 2, en valeur absolue, alors que l'étude des

valeurs influentes à l'aide de la statistique de Cook n'a pas permis d'identifier une année très influente dans la détermination des estimateurs. Le modèle du tableau 8 a donc été utilisé sans restriction.

Tableau 8. Modèle climatique du mélèze laricin de la pessière à litière de 1968 à 1987

Variable	Estimateur	T pour H_0 : Estim = 0	Prob > T
Intercept	0,18	1,78	0,096
Pl ₆	0,40	2,63	0,019
Tm ₆	-0,26	-1,90	0,076
Tm ₇	0,49	3,36	0,004
Tm ₁₀	0,53	3,65	0,002

Coefficient de détermination : 0,66

Note : Tm₆ = température moyenne en juin; Ne = neige; Pl = pluie.

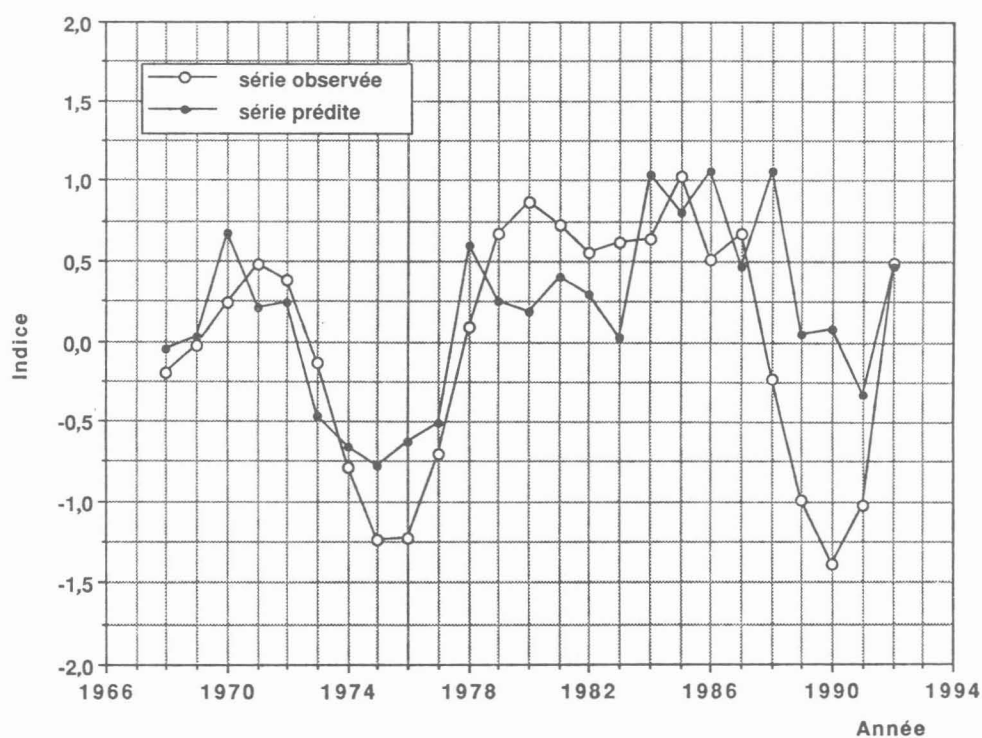


Figure 9. Série résiduelle prédite et observée pour le mélèze laricin dans la pessière à litière.

Accroissements en volume, climat et drainage

Afin de porter un jugement éclairé sur l'effet réel du drainage au cours des cinq dernières années, nous avons utilisé les modèles climatiques (tableaux 6, 7 et 8) pour la prédiction des séries résiduelles de la période de 1988 à 1992. Comme il en a été question précédemment, l'effet du drainage sur la croissance volumique sera jugé selon le comportement de la série résiduelle observée, par rapport à l'intervalle de confiance du modèle au seuil de 95 %. Dans le cas de l'épinette noire de la pessière à litière (figure 10), les variations résiduelles de l'accroissement en volume ont suivi les limites du modèle, sauf en 1990 et 1991. Pour ces années, la baisse de l'accroissement en volume excède la limite inférieure du modèle. La situation est semblable pour l'épinette de la pessière à mousses (figure 11). Cependant, en plus des baisses significatives de l'accroissement en volume enregistrées en 1990 et 1991, il y a eu une hausse significative en 1992. Dans le cas du mélèze laricin (figure 12), les variations résiduelles ont dépassé la limite inférieure du modèle en 1990. À l'examen des figures 10, 11 et 12, on note que les variations de l'accroissement en volume enregistrées de 1987 à 1992 étaient différentes des variations observées de 1968 à 1988, ce qui peut être causé par le drainage, mais également par un cycle climatique propre. Cependant, comme les séries des épinettes ont des oscillations synchrones, amplifiées (figures 10 et 11) dès 1975, il est peu probable que ces fluctuations soient attribuables au drainage.

Dans le cas du mélèze, l'oscillation de la série résiduelle ne s'amplifie pas avec le temps et le cycle complet est d'environ 15 ans. Pour bien saisir le déterminisme climatique sur le comportement du mélèze, nous croyons qu'il est nécessaire d'établir une série résiduelle beaucoup plus longue.

Enfin, pour vérifier l'effet du climat sur la croissance volumique des épinettes (cycle complet de sept ans) dans le contexte de la plus grande amplitude (de 1983 à 1992), une régression multiple a été réalisée entre les séries résiduelles et les variables climatiques des modèles qui sont décrits aux tableaux 6 et 7. Dans le cas de l'épinette noire de la pessière à litière, les variations en volume au cours des dix dernières années sont statistiquement liées aux variations climatiques du mois d'août (figure 13), car elles permettent d'en expliquer 96 %. Cependant l'effet le plus important est causé par la température moyenne d'août qui, à elle seule, explique 81 % des variations de l'accroissement en volume (figure 14). En ce qui concerne l'épinette noire de la pessière à mousses, les résultats démontrent que les variations en volume dépendent des précipitations de pluie en juin et de neige en avril (figure 15),

lesquelles expliquent 91 % de la variabilité. Toutefois, la hauteur des pluies de juin semble déterminante pour l'accroissement en volume au cours des dix dernières années, car elle est responsable de 81 % des variations (figure 16). L'effet dominant des pluies de juin ainsi que les températures d'août sur la croissance de l'épinette noire dans les groupements étudiés confirment les conclusions de Dang et Lieffers (1989).

Dans la pessière à litière, la période critique apparaît seulement au mois d'août, probablement en raison de l'absence des strates inférieures, et elle correspondrait au stress causé par les températures élevées, alors que, dans la pessière à mousses, la période critique apparaît plus tôt et elle est liée aux pluies de juin. Cela est probablement attribuable à l'abondance des mousses hypnacées qui, par interception et évapotranspiration (Busby et collab., 1978), augmentent le stress hydrique et accélèrent l'arrivée de la période critique pour l'épinette noire.

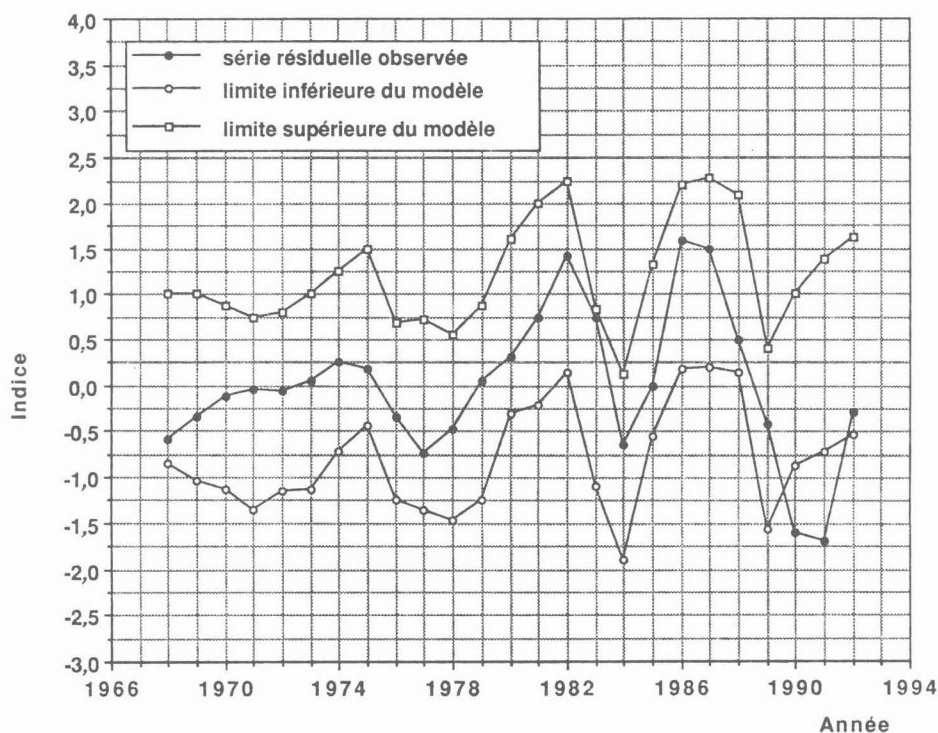


Figure 10. Série résiduelle de l'épinette noire de la pessière à litière et intervalle de confiance à 95 % du modèle climatique.

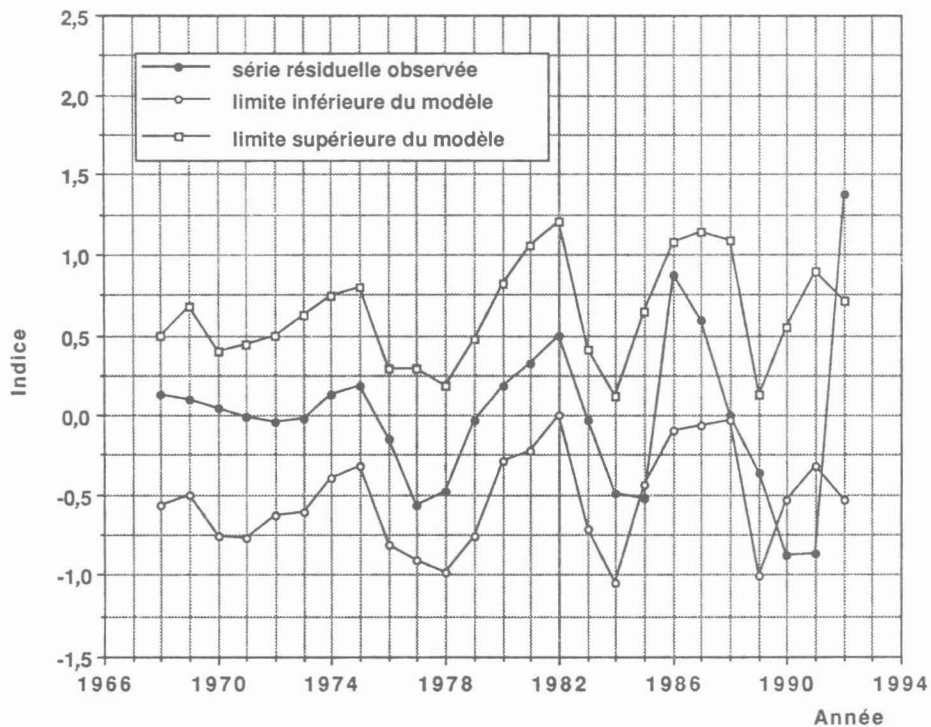


Figure 11. Série résiduelle de l'épinette noire de la pessière à mousses et intervalle de confiance à 95 % du modèle climatique.

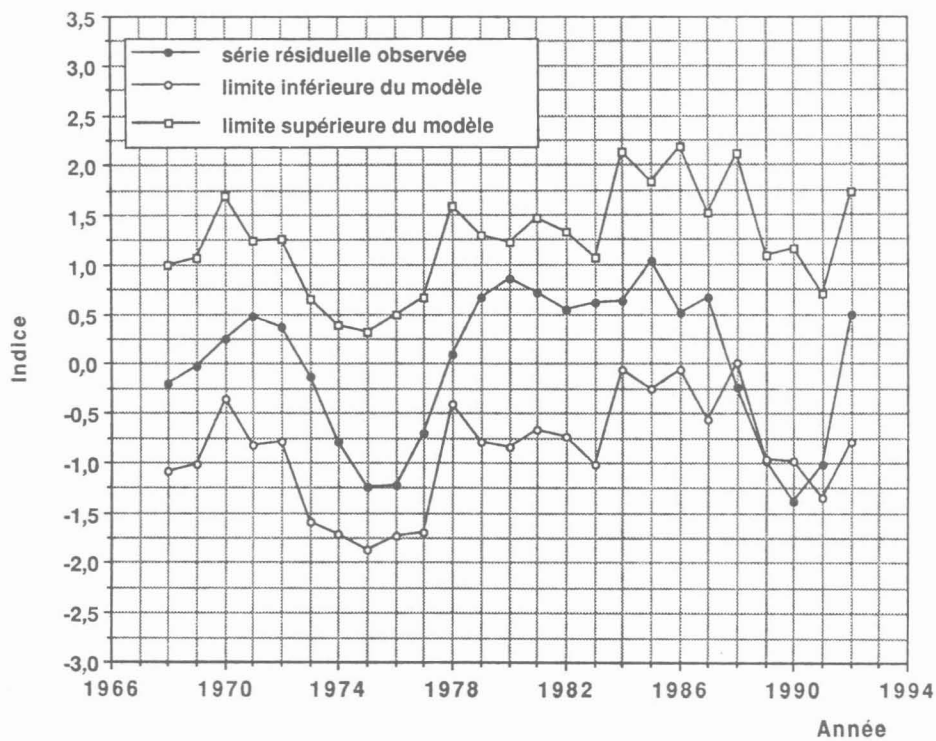


Figure 12. Série résiduelle du mélèze laricin de la pessière à litière et intervalle de confiance à 95 % du modèle climatique.

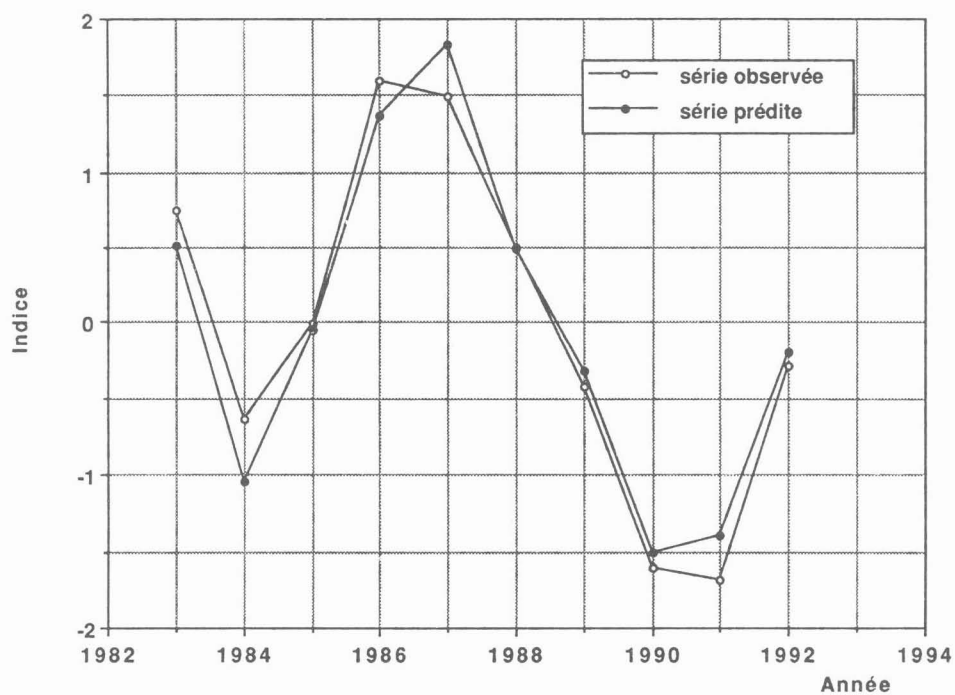


Figure 13. Série résiduelle prédite et observée pour l'épinette noire dans la pessière à litière de 1983 à 1992.

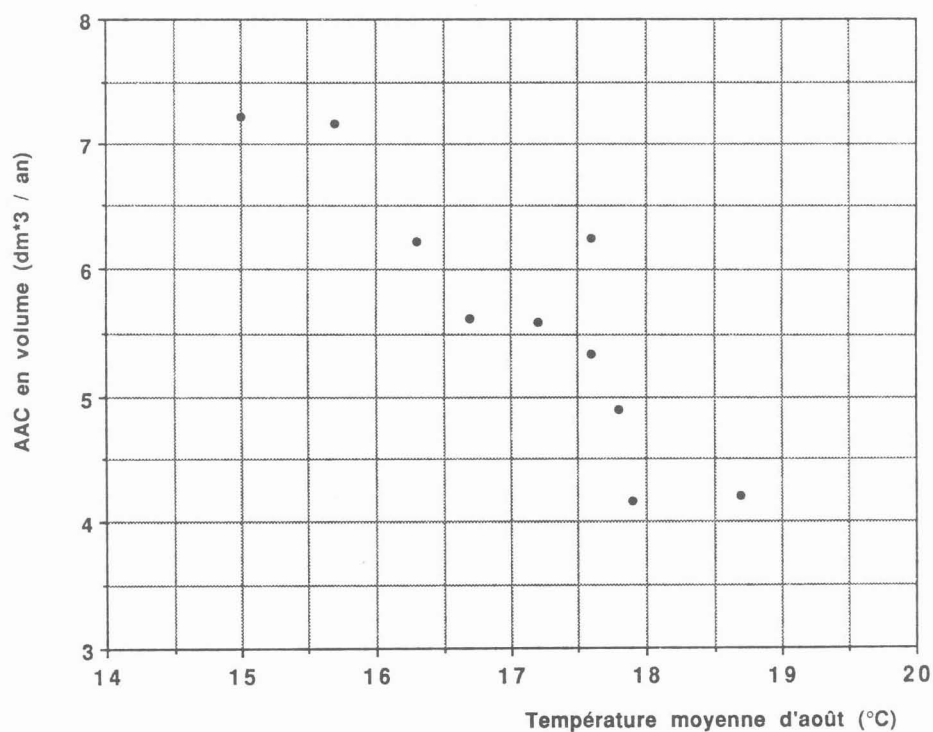


Figure 14. Volume annuel de l'épinette noire dans la pessière à litière selon la température moyenne d'août, de 1983 à 1992.

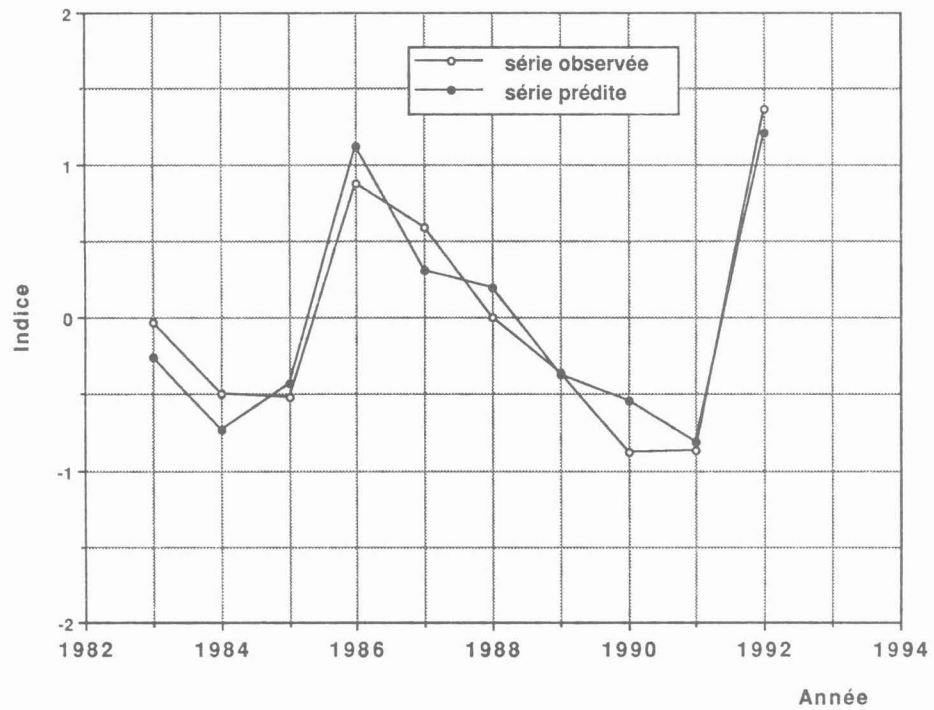


Figure 15. Série résiduelle prédite et observée pour l'épinette noire dans la pessière à mousses de 1983 à 1992.

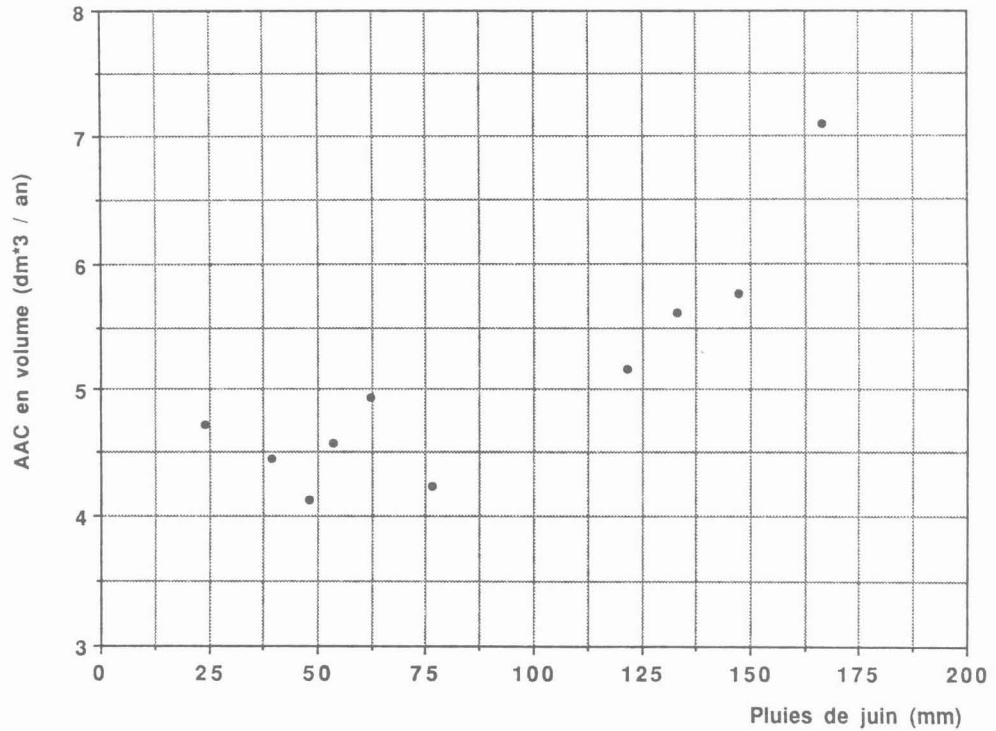


Figure 16. Volume annuel de l'épinette noire dans la pessière à mousses selon la hauteur des pluies de juin, de 1983 à 1992.

Les résultats obtenus soulèvent la question du bien-fondé du drainage dans ce type de pessières et de son effet réel sur le rendement. Les fortes corrélations entre les séries résiduelles et les variables climatiques pour la période où l'amplitude de croissance atteint son maximum tendent à démontrer que l'effet du drainage sur l'accroissement en volume était négligeable sinon nul.

L'épinette noire dominante de la pessière à litière présente une variabilité et donc une sensibilité aux facteurs exogènes plus grande que le mélèze et l'épinette de la pessière à mousses. Cependant, même si les épinettes dominantes de la pessière à mousses sont âgées de 82 ans, elles sont encore physiologiquement très actives.

En comparaison avec les tables de rendement normal, l'indice de site des deux pessières est comparable à l'indice de site des pessières des sols minéraux (Zarnovican, 1989 et 1992). Comme il s'agit de peuplements physiologiquement actifs et productifs, un traitement sylvicole approprié aurait pu améliorer la qualité du peuplement et du bois produit et aurait peut-être donné de meilleurs résultats que le drainage.

CONCLUSION

Les séries temporelles de l'accroissement en volume pour l'épinette noire et le mélèze laricin dans la pessière à litière et dans la pessière à mousses sont synchrones, et la variabilité de ces séries est en relation directe avec la hiérarchie sociale des arbres du peuplement.

Les séries des épinettes noires présentent des oscillations amplifiées avec un cycle de sept ans, et la plus grande amplitude du cycle s'est produite entre 1985 et 1992. Dans le cas du mélèze, la périodicité est différente, avec un cycle de 15 ans.

Pour la période de 1968 à 1987, la fonction de réponse de l'épinette noire de la pessière à litière est associée aux pluies de juin et d'août, ainsi qu'à la température moyenne de décembre de l'année précédente. Par ailleurs, pour la même période, la fonction de réponse pour l'épinette noire de la pessière à mousses souligne la synchronicité avec l'épinette de la pessière à litière par l'association aux pluies d'août et à la température moyenne de décembre de l'année précédente. Enfin, la fonction de réponse du mélèze laricin est associée aux pluies de juin et aux températures moyennes de juillet et d'octobre de l'année précédente.

La régression multiple pour la période où la plus grande amplitude a été observée, soit de 1983 à 1992, confirme l'effet déterminant des variables climatiques sur la croissance en volume. Il faut souligner, en particulier, l'effet de la température moyenne d'août sur l'épinette de la pessière à litière, ainsi que des pluies de juin sur l'épinette noire de la pessière à mousses. Compte tenu de l'importance du climat, l'effet du drainage sur cette croissance semble très faible, sinon nul, tout au moins dans le contexte de la présente étude.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient les D^{rs} L. Bélanger et A. Plamondon de l'Université Laval pour leurs suggestions pertinentes suite à la lecture de ce texte.

OUVRAGES CONSULTÉS

- Busby, J.R.; Bliss L.C.; Hamilton, C.D. 1978. Microclimate control of growth rates and habitats of the boreal forest mosses, *Tomenthypnum nitens* and *Hylocomium splendens*. Ecol. Monogr. 48: 95-110.
- Dai, T.S.; Haavisto, V.F.; Sparling, J.H. 1974. Water level fluctuation in a northeastern Ontario peatland. Can. J. For. Res. 4: 76-81.
- Dang, Q.L.; Lieffers, V.J. 1989. Climate and annual ring growth of black spruce in some Alberta peatlands. Can. J. Bot. 67: 1885-1889.
- Jasieniuk, M.A.; Johnson, E.A. 1982. Peatland vegetation organization and dynamics in western subarctic, Northwest Territories, Canada. Can. J. Bot. 60: 2581-2593.
- Lieffers, V.J.; Rothwell, R.L. 1987a. Effects of drainage on substrate temperature and phenology of some trees and shrubs in Alberta peatlands. Can. J. For. Res. 17: 97-104.
- Lieffers, V.J.; Rothwell, R.L. 1987b. Rooting of peatland black spruce and tamarack in relation to depth of water table. Can. J. Bot. 65: 817-821.
- Munro, D.S. 1984. Summer soil moisture content and the water table in a forested peat. Can. J. For. Res. 14: 331-335
- Päivänen, J.; Wells, E.D. 1978. Guidelines for the development of peatland drainage systems for forestry in Newfoundland. Fisheries and Environment Canada, For. Serv. Newfoundland Forest Research Centre, St. John's, Newfoundland. Inf. Rep. N-X-156.
- SAS Institute Inc. 1985. SAS/STAT guide for personal computers, version 6 edition. SAS Institute Inc., Cary, N.C.

- Tryon, P.R.; Chapin, F.S. 1983. Temperature control over root growth and root biomass in taiga forest trees. *Can. J. For. Res.* 13: 827-833.
- Van Cleve, K.; Oliver, L.; Schlentner, R. 1983. Productivity and nutrient cycling in taiga forest ecosystems. *Can. J. For. Res.* 13: 747-766.
- Van Groenewoud, H. 1975. Microrelief, water fluctuations, and diameter growth in wet-site stands of red and black spruce in New Brunswick. *Can. J. For. Res.* 5: 359-366.
- Zarnovican, R. 1989. Suivi forestier des travaux de drainage : (1) Production forestière et caractéristiques écologiques des massifs de Saint-Anaclet et de Cabano. *For. Can., Région du Québec, Sainte-Foy, Québec. Rapp. inf. LAU-X-90.*
- Zarnovican, R. 1992. Croissance en hauteur de l'épinette noire : régions de Lebel-sur-Quévillon et de Dolbeau au Québec. *Can. J. For. Res.* 22: 1378-1386.
- Zarnovican R.; Laberge, C. 1994. Suivi des travaux de drainage forestier : (2) Effet du drainage sur la croissance de l'épinette noire et du mélèze laricin à Saint-Anaclet. *Ressour. nat. Can., Serv. can. for., Région du Québec, Sainte-Foy, Québec. Rapp. inf. LAU-X-107.*

