

## CHAPITRE 2

PRÉDICTION DE LA CROISSANCE EN HAUTEUR DU PIN GRIS  
(*PINUS BANKSIANA* LAMB.) SELON DEUX APPROCHES:  
LA RELATION SOL-STATION ET LES PLANTES INDICATRICES

## INTRODUCTION

Le pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.) possède plusieurs avantages pour la production de bois et pour le renouvellement de la forêt boréale canadienne (Yeatman 1984). Il représente l'une des espèces forestières la plus répandue et la plus importante en Amérique du Nord (Fowells 1965). Cette essence colonise une gamme de dépôts de surface allant des dépôts de tills aux dépôts argileux et parfois même les dépôts organiques (Cauboue et Malenfant 1988). Elle peut se maintenir sur des sols très sablonneux et secs ainsi que sur des sols graveleux où d'autres espèces ne survivent pas. Le développement du pin gris est optimal dans des sables fins, des sables loameux ou des loams sableux bien drainés (Cauboue et Malenfant 1988; Fowells 1965; Lafond 1966).

Plusieurs études ont mis en évidence des relations entre l'indice de la qualité de la station du pin gris et certaines variables environnementales (Lafond 1966; Pawluk et Arneman 1961; Schmidt 1986; Schmidt et Carmean 1988; Shetron 1972; Wilde *et al.* 1964). Schmidt (1986) et Schmidt et Carmean (1988) ont trouvé une grande variabilité dans les indices de la qualité de la station de pins gris situés sur quatre différents types de dépôts (tills minces et épais, sables fluvio-glaciaires et sols lacustres).

La plupart des régions forestières démontrent une variation importante dans la capacité productive de la terre. Certains terrains sont pauvres, d'autres riches et plus propices à un aménagement intensif. Plusieurs méthodes directes et indirectes ont été développées pour caractériser ces différences de qualité de la station.

Les méthodes directes sont appliquées à des stations comportant un nombre suffisant de l'espèce étudiée et aux peuplements équiennes. La plus connue et la plus utilisée est l'analyse de tiges (Carmean 1975; Jones 1969; Schmidt et Carmean 1988; Spurr et Barnes 1980; Zarnovican 1985). Les méthodes indirectes quant à elles, sont appliquées lorsqu'il manque d'arbres adéquats de l'espèce étudiée, de placettes-échantillons permanentes, que les analyses de tiges sont difficilement réalisables ou lorsque les peuplements sont inéquiennes ou trop jeunes. Dans de tels cas, plusieurs approches indirectes existent et peuvent être utilisées. Les plus employées et les mieux connues sont l'évaluation de la relation sol-station et les plantes indicatrices. Ces méthodes permettent généralement une prédiction adéquate de la croissance en hauteur des arbres et sont rapides d'exécution.

La relation sol-station s'appuie sur le concept d'intégralité de la station et tient compte des liens complexes existant entre la topographie et la pédologie (Burger 1972; Robert et Saucier 1987). Quant à l'emploi des indicateurs végétaux de sous-bois, cette méthode repose sur l'hypothèse que cette végétation reflète assez bien l'ensemble des facteurs écologiques

importants pour la croissance des arbres (Carmean 1975; Daubenmire 1976; Corns et Pluth 1984; Green, Marshall et Klinka 1989; Schönau 1987). De plus, les recherches portant sur la prédiction de la qualité de la station à partir des méthodes indirectes fournissent une base quantitative pour identifier les critères topographiques, édaphiques et de végétation utiles dans les cadres écologiques. Ces méthodes permettent donc la classification des terres forestières selon leur capacité à produire la matière ligneuse.

Les relations entre la qualité de la station de pins gris situés dans des peuplements équiennes en Abitibi et certaines variables écologiques ont été identifiées par ces deux méthodes indirectes. Les objectifs de cette étude étaient d'estimer les relations entre la croissance en hauteur du pin gris le long d'un gradient topographique et des indicateurs abiotiques (topographie et pédologie) et biotiques (végétation), pour ensuite juger de l'efficacité de prédiction de la qualité stationnelle en fonction de l'énergie nécessaire pour mesurer les différentes variables.

## MÉTHODOLOGIE

### Indice de la qualité de la station

La hauteur moyenne d'arbres dominants et codominants composant un peuplement à un âge référentiel, se nomme indice de la qualité de la station. Pour le pin gris et pour les espèces arborescentes de l'est, l'âge référentiel est généralement établi à 50 ans.

Un inventaire des diamètres à hauteur de poitrine (dhp) des pins gris présents dans chacune des 32 stations fut effectué. Les trois arbres dont le dhp correspondait aux 95 pour cent du nombre cumulatif de pins dans la station furent choisis pour l'analyse de tiges. Ces arbres étaient dominants ou codominants, bien formés et sans blessure. Les pins choisis furent sectionnés à la base (10 cm) à 0,75 m et à 1,3 m puis à tous les mètres ultérieurs jusqu'à un diamètre avec écorce d'au moins deux centimètres.

L'âge de chaque disque récolté fut déterminé au laboratoire par dénombrement des cernes. La hauteur des arbres fut calculée par interpolation linéaire pour chaque année quinquennale, en utilisant un logiciel d'analyse de tiges (Zarnovican, Ouellet et Gendron 1988). Les hauteurs ainsi calculées furent par la suite utilisées pour déterminer l'indice de la qualité de la station (IQS) pour chacune des stations. L'IQS calculé représente l'âge à la souche et non l'âge à hauteur de poitrine (Carnean 1975, 1978; Monserud 1984). Les deux indices retenus furent l'indice de la qualité de la station moyen, qui représente la hauteur

moyenne, à 50 ans, des trois pins choisis et l'indice de la qualité de la station maximal, où seule la hauteur la plus élevée atteinte à l'âge de 50 ans par l'un des trois pins dans la station fut retenue.

## Variabes géomorphologiques

Des informations concernant la topographie furent recueillies afin de caractériser les 32 stations échantillonnées, telles: l'inclinaison moyenne de la pente (%), la longueur de la pente arrière (m), l'altitude moyenne (m), l'orientation de la station (°), la forme de la pente (concave, convexe ou régulière) et la situation sur la pente (haut de pente, mi-pente, replat ou bas de pente).

Un pèdon fut creusé, jusqu'à une profondeur d'un mètre ou jusqu'à la roche mère, près des trois pins abattus dans la station. La description du profil des sols fut effectuée selon les méthodes employées par Robert et Saucier (1987) et Walmsley *et al.* (1980). De plus, quatre autres échantillons d'horizons B furent prélevés dans la station.

Les variables topographiques, la classe de drainage de la station, ainsi que les pourcentages de sable, de limon et d'argile, la profondeur du solum (profondeur inférieure de l'horizon B, excluant les horizons BC et C), de la roche mère, de la nappe phréatique, de même que la profondeur et l'abondance des mouchetures et de la pierrosité du pèdon, représentent la matrice des critères géomorphologiques (**appendice A**).

Les pourcentages de sable, de limon et d'argile contenus dans les horizons B des pédons, séchés à l'air furent déterminés par l'analyse granulométrique de Bouyoucos (Bouyoucos 1962; McKeague 1978).

### Variables édaphiques

L'épaisseur des horizons organiques (L,F et H) et minéraux (A et B) fut notée et un échantillon de chaque horizon fut récolté. Le pH des horizons récoltés fut mesuré avec un pH mètre à électrode de verre, à partir d'une solution sol-eau distillée 1:1 pour les horizons minéraux et 1:3 pour les horizons organiques. Les nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ) et les orthophosphates ( $\text{PO}_4^{=}$ ) des horizons B récoltés à travers la station, furent dosés avec un appareil Tecator (Anonyme 1983 *a* et *b*). Quant aux bases ( $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ , en méq/100 g), elles furent dosées au laboratoire de sol de l'Université Laval avec un spectrophotomètre d'absorption atomique (Stuanes, Ogner et Opem 1984) et la concentration en ions  $\text{H}^+$ , en méq/100 g) fut dosée par titrage avec  $\text{NH}_4\text{OH}$ , jusqu'à pH 7,0. La moyenne de chaque élément fut calculée pour la station. Le taux de saturation en bases (TSB, en pourcentage) fut par la suite calculé, en utilisant la formule suivante:

$$\text{TSB} = (\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++} + \text{K}^+ + \text{Na}^+ / \text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++} + \text{K}^+ + \text{Na}^+ + \text{H}^+) \times 100.$$

Toutes ces variables dites édaphiques (**appendice D**), peuvent être influencées à la fois par les variables géomorphologiques et par la croissance en hauteur des arbres.

## Description de la végétation

La présence des espèces de sous-bois (arbustes, herbacées, mousses et lichens) et des espèces arborescentes de moins d'un centimètre de dhp fut répertoriée dans 12 microquadrats d'un mètre carré placés à 3, 7, 11, 16, 20 et 24 mètres le long des deux diagonales délimitées par la station. Une fréquence (nombre d'apparition/12) de ces espèces fut par la suite calculée (**appendice E**).

Un inventaire (nombre et dhp) de toutes les essences arborescentes (dhp > 1 cm) rencontrées dans la station fut également effectué. La nomenclature généralement suivie fut celle de Marie-Victorin (1964). Des valeurs d'importance ( $VI = (\text{densité relative} + \text{surface terrière relative}) / 2$ ) furent calculées pour chaque espèce dans chacune des stations.

L'analyse de correspondance détendancée (ACD, Detrended Correspondance Analysis) provenant du logiciel DECORANA (Hill 1979 a) fut utilisée pour traiter les fréquences des espèces de sous-bois. Ce traitement fut appliqué de façon à synthétiser les données de végétation recueillies à quelques critères décrivant objectivement l'agencement des données observées dans les peuplements forestiers échantillonnés. Ce type d'ordination indirecte a l'avantage d'éliminer l'effet d'arche sur le second axe et les distorsions d'échelles inhérentes aux méthodes de base des ordinations (Gauch 1982; Hill et Gauch 1980; Zoladeski 1988). Les coordonnées des stations sur ces deux premiers axes, ainsi que les valeurs

d'importance des essences arborescentes constituent la matrice de végétation ou matrice biotique (**appendice F**).

### Relations entre les IQS, les variables abiotiques et la végétation

Afin de prédire les IQS, l'analyse de régression multiple de type pas à pas, selon la méthode de l'amélioration maximale du coefficient de corrélation multiple (MAXR, SAS 1985) fut utilisée avec les matrices des variables géomorphologiques, édaphiques et de végétation. De plus, une régression multiple permettant l'inclusion des variables binaires (forme de la pente et situation sur la pente) fut utilisée (GLM) (SAS 1985). Ces analyses statistiques furent effectuées concurremment avec les indices de la qualité de la station moyen et maximal. Pour évaluer le caractère prédictif de chaque variable et de chaque groupe de variables (géomorphologique, édaphique et végétation), les analyses de régression multiple furent appliquées pour chacune des combinaisons possibles des trois groupes de descripteurs.

## RÉSULTATS

Des écarts importants des IQS calculés pour les 32 stations échantillonnées ont été observés à l'intérieur d'un même transect et entre les transects; les extrêmes allant de 14,0 mètres à 21,7 mètres (**tableau II, chapitre 1**) et ce, malgré une variabilité assez faible des critères géomorphologiques et édaphiques mesurés (**tableau III, chapitre 1 et tableau VI**).

Les axes 1 et 2 de l'ordination indirecte des espèces de sous-bois furent retenus étant donné leurs valeurs propres supérieures (0,343 et 0,111) par rapport à celles des axes 3 (0,061) et 4 (0,036). Les lichens et les mousses se trouvent généralement vers la gauche de l'axe 1 (**tableau VII et figure 4**), où les IQS des stations sont généralement plus faibles. Vers l'extrémité droite de l'axe 1, on retrouve plutôt les graminées, le némopanthe mucroné (*Nemopanthus mucronatus*), le pétasite palmé (*Petasites palmatus*), le gaillet à trois fleurs (*Galium triflorum*), la mitrelle nue (*Mitella nuda*) et le rosier aciculaire (*Rosa acicularis*) (**tableau VII**). Les IQS des stations situées du côté droit de l'axe 1 ont tendance à être supérieurs (**figure 4**).

Les **tableaux VIII** (IQS moyen) et **IX** (IQS maximal) présentent l'ordre d'entrée des variables dans les équations de régression multiple pour chacune des combinaisons possibles à partir des trois groupes de descripteurs (**blocs A à G**). Seules les variables expliquant au moins cinq

TABLEAU VI: Amplitude des variables édaphiques (N=32).

Variable	Moyenne	Écart-type	Médiane	Minimum	Maximum
pHL†	3,9	0,4	3,9	3,4	5,2
pHF	4,0	0,5	4,0	3,2	5,1
pHH	3,7	0,4	3,7	3,2	4,6
pHLFH	3,9	0,4	3,9	3,3	4,8
pHfH	3,9	0,4	3,8	3,2	4,6
pHA	3,8	0,3	3,7	3,3	4,6
pHB	4,1	0,3	4,1	3,5	4,7
pHC	4,5	0,5	4,4	3,6	5,7
H <sup>+</sup>	2,14	1,46	1,72	0,20	5,20
Ca <sup>++</sup>	0,81	0,84	0,39	0,15	3,15
Mg <sup>++</sup>	0,14	0,19	0,06	0,01	1,02
K <sup>+</sup>	0,06	0,05	0,04	0,02	0,22
Na <sup>+</sup>	0,16	0,03	0,17	0,02	0,22
tsb	36,7	24,5	24,9	11,0	90,6
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,93	0,55	0,78	0,22	2,45
PO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	40,31	36,53	31,62	5,14	177,33
zA	8,5	6,8	6,5	1,0	25,0
zB	46,2	20,5	46,0	12,0	83,0
zorg	11,6	5,4	11,0	4,0	25,0
zF	4,6	3,0	4,0	1,0	12,0
zFH	10,3	5,6	9,0	3,0	23,0
zH	6,1	5,3	3,0	2,0	24,0

† Voir la liste des abréviations (appendice M).

**TABLEAU VII:      Coordonnées des espèces de sous-bois sur les deux premiers axes de l'ordination indirecte (N=80).**

Variables	Axe 1	Axe 2
Cla. alp.†	-220	-79
Ste. sax.	-220	-76
Pol. jun.	-219	-57
Cla. unc.	-143	120
Cla. spp	-124	231
Kal. ang.	-121	-188
Led. gro.	-99	-439
Pol. pil.	-79	61
Pic. gla.	-71	-198
Pic. mar.	-69	108
Ame. spp	-66	20
Pru. vir.	-66	403
Cla. ran.	-58	-128
Dic. pol.	-51	-32
Pol. com.	-47	-206
Pti. cil.	-40	-84
Aln. rug.	-34	232
Aln. cri.	-28	269
Vac. myr.	-20	159
Ple. shr.	-13	-25
Gau. his.	-5	-166
Pte. aqu.	1	361
Vac. ang.	3	25
Lin. bor.	10	149
Ace. rub.	16	213

† Voir la liste des abréviations (appendice N).

TABLEAU VII (suite).

Variables	Axe 1	Axe 2
Cor. can.	26	53
Ath. fel.	32	-102
Sor. ame.	37	157
Lyc. luc.	45	41
Lyc. ann.	45	342
Goo. spp	74	2
Dic. spp	78	56
Bet. pap.	79	85
Mai. can.	92	87
Lyc. obs.	96	160
Abi. bal.	100	-87
Pru. pen.	121	76
Pop. tre.	122	-92
Ara. nud.	140	169
Osm. cla.	153	-5
Cli. bor.	166	118
Lic. spp	168	-107
Die. lon.	172	101
Cop. gro.	195	108
Mou. spp	205	-48
Tri. bor.	211	155
Vib. cas.	214	-50
Lyc. cla.	228	80
Mni. spp	238	56
Dry. spi.	240	24

TABLEAU VII (suite).

Variables	Axe 1	Axe 2
Ace. spi.	240	150
Mon. uni.	245	246
Ast. mac.	250	59
Sol. mac.	253	247
Str. ros.	260	180
Lon. can.	264	166
Rib. gla.	275	65
Bra. spp	284	10
Sph. spp	291	7
Lon. can.	294	21
Dry. dis.	295	22
Vib. edu.	300	-30
Pyr. sec.	308	57
Act. rub.	311	-96
Cor. cor.	314	225
Fra. nig.	336	17
Rub. pub.	343	64
Dry. phe.	345	0
Vio. spp	347	69
Ast. spp	357	81
Oxa. mon.	372	90
Cyp. spp	375	46
Cor. alt.	382	97
Cor. sto.	396	69
Nem. muc.	406	68
Gra. spp	406	68
Pet. pal.	414	78
Gal. tri.	429	90
Mit. nud.	437	97
Ros. aci.	452	110

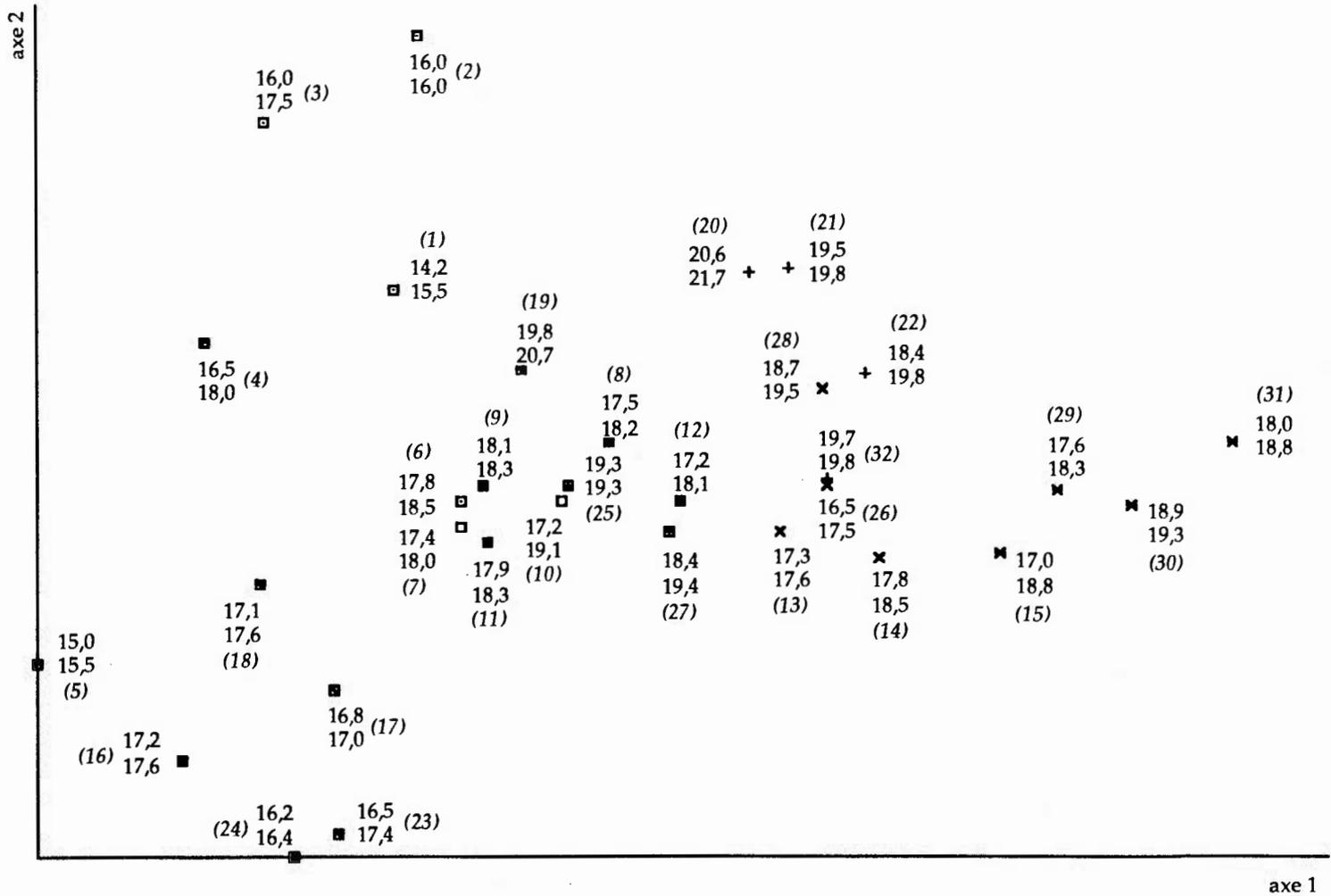


FIGURE 4: Ordination (ACD) des stations à partir de la matrice de végétation de sous-bois (N=32). Le chiffre en italique entre parenthèses indique le numéro de la station. Le chiffre ordinaire supérieur indique l'IQS moyen et l'inférieur l'IQS maximal.

**TABLEAU VIII: Analyse de régression multiple pas à pas exprimant l'IQS moyen du pin gris à partir des variables géomorphologiques, édaphiques et de végétation (N=32).**

Variable	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> partiel	F	Équation de régression
<b>A) Variables géomorphologiques seulement</b>				
% limont†	36,9	36,9	17,5***	$\text{IQS moy}^{***} = 18,8760 - 0,1153(\% \text{ limon})$
lpent	54,6	17,7	11,4**	$\text{IQS moy}^{***} = 18,0737 - 0,1077(\% \text{ limon}) + 0,0037(\text{lpent})$
<b>B) Variables édaphiques seulement</b>				
H <sup>+</sup>	39,8	39,8	19,9***	$\text{IQS moy}^{***} = 18,8578 - 0,6028(\text{H}^+)$
zB	56,3	16,5	10,9*	$\text{IQS moy}^{***} = 17,5855 - 0,6026(\text{H}^+) + 0,0275(\text{zB})$
<b>C) Variables de végétation seulement</b>				
pet	31,0	31,0	13,5***	$\text{IQS moy}^{***} = 17,2251 + 0,0923(\text{pet})$
axe 1	45,1	14,1	7,4*	$\text{IQS moy}^{***} = 16,2530 + 0,0740(\text{pet}) + 0,0079(\text{axe 1})$
sor	54,5	9,4	5,8*	$\text{IQS moy}^{***} = 16,1416 + 0,0664(\text{pet}) + 0,0082(\text{axe 1}) + 0,07834(\text{sor})$
aru	60,7	6,2	4,3*	$\text{IQS moy}^{***} = 16,1791 + 0,0917(\text{pet}) + 0,0102(\text{axe 1}) + 1,0140(\text{sor}) - 0,0924(\text{aru})$
<b>D) Variables édaphiques et de végétation seulement</b>				
H <sup>+</sup>	39,8	39,8	19,9***	$\text{IQS moy}^{***} = 18,8578 - 0,6028(\text{H}^+)$
zB	56,3	16,5	10,9**	$\text{IQS moy}^{***} = 17,5855 - 0,6026(\text{H}^+) + 0,0275(\text{zB})$
pet	66,0	9,7	8,0**	$\text{IQS moy}^{***} = 17,3653 - 0,5061(\text{H}^+) + 0,0234(\text{zB}) + 0,0553(\text{pet})$

\*\*\*, \*\* et \* = significatif au seuil de  $p \leq 0,001$ ; 0,01 et 0,05, respectivement.

† Voir la liste des abréviations (appendices L, M, N et O).

TABLEAU VIII (SUITE).

Variable	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> partiel	F	Équation de régression
E) Variables géomorphologiques et édaphiques seulement (a)				
zB	62,9	8,3	6,3*	$IQS\ moy^{***}=16,4649-0,0755(\% \text{ limon})+0,0046(lpent)+0,0233(zB)$
H <sup>+</sup>	68,9	6,0	5,2*	$IQS\ moy^{***}=17,3742-0,0608(\% \text{ limon})+0,0027(lpent)+0,0224(zB)-0,3191(H^+)$
F) Variables géomorphologiques et de végétation seulement (a)				
pet	62,7	8,1	6,0*	$IQS\ moy^{***}=17,9052-0,0898(\% \text{ limon})+0,0031(lpent)+0,0514(pet)$
G) Variables géomorphologiques, édaphiques et de végétation (a)				
pet	62,7	8,1	6,0	$IQS\ moy^{***}=17,9052-0,0898(\% \text{ limon})+0,0031(lpent)+0,0514(pet)$

(a) Les deux premières étapes des sections D, E, F et G sont identiques au bloc A.

**TABLEAU IX: Analyse de régression multiple pas à pas exprimant l'IQS maximal du pin gris à partir des variables géomorphologiques, édaphiques et de végétation (N=32).**

Variable	R2	R2 partiel	F	Équation de régression
<b>A) Variables géomorphologiques seulement</b>				
pentp	28,4	28,4	11,9**	$IQS \max^{**} = 19,5161 - 0,1741(\text{pentp})$
lpent	45,8	17,4	9,3**	$IQS \max^{***} = 18,6759 - 0,1557(\text{pentp}) + 0,0037(\text{lpent})$
solum	64,7	18,9	15,0***	$IQS \max^{***} = 16,5284 - 0,1018(\text{pentp}) + 0,0043(\text{lpent}) + 0,0275(\text{solum})$
<b>B) Variables édaphiques seulement</b>				
H <sup>+</sup>	45,3	45,3	24,8***	$IQS \max^{***} = 19,6786 - 0,6416(\text{H}^+)$
zB	61,6	16,3	12,3**	$IQS \max^{***} = 18,4160 - 0,6415(\text{H}^+) + 0,0273(\text{zB})$
pHA	66,6	5,0	4,3*	$IQS \max^{***} = 13,4665 - 0,5565(\text{H}^+) + 0,0364(\text{zB}) + 1,140(\text{pHA})$
<b>C) Variables de végétation seulement</b>				
axe 1	31,1	31,1	13,5***	$IQS \max^{***} = 16,8236 + 0,0113(\text{axe 1})$
pet	47,7	16,7	9,3**	$IQS \max^{***} = 16,8841 + 0,0088(\text{axe 1}) + 0,0705(\text{pet})$
sor	57,6	9,9	6,5*	$IQS \max^{***} = 16,7707 + 0,0092(\text{axe 1}) + 0,0627(\text{pet}) + 0,7970(\text{sor})$
aru	64,1	6,5	4,9*	$IQS \max^{***} = 16,8090 + 0,0112(\text{axe 1}) + 0,0886(\text{pet}) + 1,0325(\text{sor}) - 0,0944(\text{aru})$
<b>D) Variables édaphiques et de végétation seulement</b>				
H <sup>+</sup>	45,3	45,3	24,8***	$IQS \max^{***} = 19,6786 - 0,6416(\text{H}^+)$
zB	61,6	16,3	12,3**	$IQS \max^{***} = 18,4160 - 0,6145(\text{H}^+) + 0,0273(\text{zB})$
pet	70,0	8,5	7,9**	$IQS \max = 18,2109 - 0,5516(\text{H}^+) + 0,0235(\text{zB}) + 0,0515(\text{pet})$
pHA	75,3	5,2	5,7*	$IQS \max^{***} = 13,1924 - 0,4647(\text{H}^+) + 0,0327(\text{zB}) + 0,0519(\text{pet}) + 1,1565(\text{pHA})$

\*\*\*, \*\* et \* = significatif au seuil de  $p \leq 0,001$ ; 0,01 et 0,05, respectivement.

† Voir la liste des abréviations (appendices L, M, N et O).

TABLEAU IX (suite).

Variable	R2	R2 partiel	F	Équation de régression
E) Variables géomorphologiques et édaphiques seulement (a)				
Aucune variable				
F) Variables géomorphologiques et de végétation seulement (a)				
pet	73,2	8,5	8,5**	$IQS_{max}^{***} = 16,6404 - 0,0936(pentp) + 0,0035(lpent) + 0,0240(solum) + 0,0514(pet)$
G) Variables géomorphologiques, édaphiques et de végétation (a)				
pet	73,2	8,5	8,5**	$IQS_{max}^{***} = 16,6404 - 0,0936(pentp) + 0,0035(lpent) + 0,0240(solum) + 0,0514(pet)$
(a) Les trois premières étapes des sections D, E, F et G sont identiques au bloc A.				

pour cent de la variabilité observée des IQS du pin gris furent retenues. Les variables géomorphologiques les plus significatives furent toujours forcées à entrer dans les modèles combinés, puisqu'elles représentent les variables les plus facilement identifiables et mesurables sur le terrain. Ces variables géomorphologiques sont le pourcentage de limon dans l'horizon B des pédons et la longueur de la pente arrière pour l'IQS moyen ( $R^2$  de 54,6 %, **bloc A**); l'inclinaison de la pente, la longueur de la pente arrière et la profondeur moyenne du solum pour l'IQS maximal ( $R^2$  de 64,7). Les variables binaires (forme de la pente et situation sur la pente) n'ont pas montré de relation significative avec les IQS.

Les variables édaphiques expliquent légèrement plus de variabilité que les variables géomorphologiques. La concentration en ions  $H^+$  et l'épaisseur moyenne de l'horizon B prédisent 56,3 % de l'IQS moyen. Le pH de l'horizon A rajouté à ces deux variables élève le  $R^2$  de l'IQS maximal à 66,6 % (**bloc B**).

Quant aux variables de végétation, leur pourcentage de prédiction est moindre que celui des deux autres groupes et ce, pour un nombre équivalent de critères. Les valeurs d'importance du peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides*), du sorbier d'Amérique (*Sorbus americana*) et de l'érable rouge (*Acer rubrum*) ainsi que l'axe 1, expliquent 60,7 % de l'IQS moyen et à 64,1 % l'IQS maximal (**bloc C**).

Lorsque l'on combine les critères édaphiques à ceux de la végétation, les mêmes variables édaphiques des blocs B se retrouvent dans les équations de prédiction avec en sus la valeur d'importance du peuplier faux-tremble (**bloc D**). Ces combinaisons de variables expliquent respectivement 70,3 % et 75,3 % des IQS moyen et maximal.

Lorsque l'on ajoute l'épaisseur moyenne de l'horizon B et la concentration en ions  $H^+$  aux variables géomorphologiques, le  $R^2$  de l'IQS moyen passe à 68,9 % (**bloc E**). Aucune variable édaphique n'ajoute significativement d'explication supplémentaire aux variables géomorphologiques, en ce qui concerne l'IQS maximal. Toutefois, l'ajout de la valeur d'importance du peuplier faux-tremble aux variables géomorphologiques permet d'élever le  $R^2$  de l'IQS moyen de 8,1 % et de 8,5 % pour l'IQS maximal (**bloc F**). Les équations de régression restent les mêmes lorsqu'on ajoute les variables biotiques aux descripteurs géomorphologiques et édaphiques (**bloc G**). Pour un nombre équivalent de variables entrant dans les équations, les critères édaphiques utilisés seuls expliquent plus de variabilité que tout autre groupe isolé ou combiné, tandis que les variables de végétation expliquent moins la variabilité observée dans la croissance en hauteur du pin gris.

## DISCUSSION

D'importants écarts de croissance ont été observés sur les quatre transects malgré la faible amplitude écologique des variables géomorphologiques et édaphiques échantillonnées.

L'importance des variables géomorphologiques à décrire la croissance en hauteur du pin gris a été démontrée au chapitre 1 et dans ce chapitre. Ces relations s'expliquent par le contexte géomorphologique de la région abitibienne dans la ceinture d'argile. En haute altitude, sur les versants raides, le till de fond a été délavé et explique la faible croissance en hauteur du pin gris situé sur ces pentes à forte inclinaison. Les sols associés à ces pentes sont minces avec un pourcentage plus élevé de limon dans l'horizon B et la profondeur de la roche mère et de la pierrosité est faible. De plus, les sols situés sur les sommets à forte pente sont sujets à l'érosion, à l'altération et à la sécheresse à cause du drainage rapide (Carmean 1967; Spurr et Barnes 1980). Au pied des versants, en basse altitude, les pentes sont plus douces. À ces endroits, on trouve des dépôts de plage mieux triés et plus épais. Ces pentes douces, habituellement concaves empêchent l'érosion, favorisent l'accumulation de sol, l'humidité du sol, à cause du drainage moins excessif et permettent ainsi une meilleure croissance des arbres (Carmean 1967; Coile 1952; Spurr et Barnes 1980). Pour des conditions de dépôts comparables, l'influence de la longueur de la pente arrière sur la croissance en hauteur des pins serait plus importante que celle de l'inclinaison de la pente. L'effet conjoint du

type de dépôt de surface et la longueur de la pente arrière sur la croissance en hauteur du pin gris semble signifier que celui-ci répondrait mieux aux éléments nutritifs qu'au drainage, surtout lorsqu'on compare les corrélations significatives obtenues entre le taux de saturation en bases et les IQS.

L'importance de l'épaisseur du solum, tout comme celle de l'horizon B à prédire l'IQS refléterait, la quantité et la qualité de l'espace disponible pour la croissance des racines des arbres (Carman 1975) et représenterait probablement une mesure plus critique du volume effectif d'ancrage que la profondeur d'un horizon restrictif (Munn et Vimmerstedt 1980). Une étude menée par Foster et Morrison (1976), effectuée dans la région de la rivière Mississagi, au nord de l'Ontario sur des podzols humo-ferriques, indique que la majorité des racines de pins gris se situent soit dans les horizons de surface ou soit à une profondeur de 45 cm, ce qui équivaut environ à la profondeur inférieure de l'horizon B.

Parmi les caractéristiques chimiques du sol, la concentration en ions  $H^+$  dans l'horizon B exprime la plus grande variabilité de la croissance en hauteur du pin gris. Cette importance s'explique par le fait que la disponibilité de la plupart des éléments nutritifs est d'une façon ou d'une autre contrôlée par les conditions d'acidité ou d'alcalinité du milieu. En effet, la disponibilité des éléments nutritifs pour les plantes diminue généralement avec l'acidification des sols, surtout en deçà de pH 4,0

(Barbour, Burk et Pitts 1980; Munn et Vimmerstedt 1980). De plus, dans les sites les plus productifs, le pH de l'horizon A a tendance à être supérieur ou égal à la moyenne calculée de 3,8.

Le pouvoir prédictif de la végétation est inférieur aux autres groupes de variables. Le premier axe de l'ordination indirecte prédit 14,1 % et 31,1 % des IQS moyen et maximal. Plusieurs espèces situées vers l'extrême droite du premier axe ont été identifiées comme étant des plantes mésophiles (*Athyrium felix-femina*, *Osmunda Claytoniana*, *Dryopteris phegopteris*, *Cornus alternifolia*, Bégin *et al.* 1990; Pregitzer, Barnes et Lemme 1983), hygrophiles (*Mitella nuda*, *Rubus pubescens*, Bégin *et al.* 1990; Jones *et al.* 1983), représentatives de sites riches (Kenkel 1986; *Corylus cornuta*, Fowells 1965; *Viola spp*, Jones *et al.* 1983; Marie Victorin 1964) et productifs (*Rubus pubescens*, Corns et Pluth 1984). Les stations situées vers la droite de l'axe 1 et dans lesquelles ces espèces de sous-bois se retrouvent, ont tendance à avoir des IQS plus élevés. Tandis que les espèces végétales situées vers la gauche de l'ordination sont plutôt représentatives de milieux pauvres et de plus faibles IQS (*Picea mariana*, *Pleurozium shreberi*, *Vaccinium angustifolium*, *Vaccinium myrtilloides*, *Cornus canadensis*, *Cladonia spp*, *Kalmia angustifolia*, *Dicranum polysetum*, *Ptilidium ciliare*, *Cladonia uncialis*, *Dicranum spp*, *Cladonia rangerifera* ainsi que *Gaultheria hispidula*; Corns et Pluth 1984; Jones *et al.* 1983; Kenkel 1986). Ces espèces occupent surtout les stations situées en haut de pente, à forme convexe et à drainage plus rapide.

L'importance du peuplier faux-tremble dans les équations pourrait signifier qu'il est une espèce enrichissante pour les sols (Fowells 1965) et influencerait ainsi positivement l'IQS. En effet, selon Stoeckeler (1961), les caractéristiques édaphiques influencent la croissance du peuplier faux-tremble et ce dernier influence à son tour le statut nutritif des sols. Le peuplier faux-tremble est considéré comme une essence enrichissante suite à des feux de forêts à cause de la tombée de ses feuilles qui permet une redistribution de l'azote dans la couche superficielle du sol. Cette essence arborescente préfère des stations fraîches, assez bien drainées et riches à texture loameuse ou de sable loameux. Lafond (1966) a aussi remarqué que le pin gris atteignait son maximum de développement dans des peuplements mélangés avec le bouleau à papier (*Betula papyrifera*) et le peuplier faux-tremble.

Les troisième et quatrième variables prédisant la variabilité des IQS du pin gris sont les valeurs d'importance du sorbier d'Amérique ou cormier (*Sorbus americana*) et celle de l'érable rouge (*Acer rubrum*) (bloc C). Le sorbier serait représentatif des milieux riches (Jones *et al.* 1983) et préférerait les endroits humides (Hosie 1980). Selon une étude de Bergeron *et al.* (1983), l'érable rouge serait un bon indicateur du drainage oblique et préférerait les sols humides (Hosie 1980). Ces sols se trouvent habituellement dans les milieux et les bas de pente où l'eau est souvent enrichie en éléments nutritifs et les peuplements floristiques riches et productifs (Gerardin 1989). La relation négative obtenue entre l'IQS et l'érable rouge et qui semble étrange s'explique par son lien avec l'altitude.

En effet, les peuplements d'érables rouge auraient tendance à se retrouver en altitude à cause du phénomène d'inversion thermique.

L'interprétation du pouvoir descriptif de la végétation de sous-bois est délicate puisque ces espèces ne possèdent pas un système racinaire aussi étendu et ramifié que les arbres. Selon Coile (1938), il ne semble pas raisonnable que la végétation reflète autant que les arbres la capacité reproductrice du sol. Daubenmire et Daubenmire (1968) et Pfister *et al.* (1977) croient également qu'il existe une faible correspondance entre les changements morphologiques du sol et la composition de la végétation de sous-bois puisque cette dernière réagit à ses propres conditions d'habitat (faibles profondeurs d'enracinement) et moins à celles des arbres (plus grandes profondeurs des racines) (Hägglund 1981; Hodgkins 1968).

Selon Green, Marshall et Klinka (1989) et Wiltshire (1982), les espèces de sous-bois d'amplitude écologique relativement étroite pourraient être de bons indicateurs de la qualité de la station et d'utiles indices pour la productivité des forêts. Toutefois, le pouvoir prédictif de la végétation de sous-bois est limité par les conditions de lumière, de microsites, de compétitions, de perturbations et des chances d'établissement prévalant sous la canopée, ce qui pourrait limiter leur utilisation comme phytomètres de la productivité des forêts (Spurr et Barnes 1980). De plus, même si Corns et Pluth (1984) ont montré que les équations incluant la végétation possèdent des  $R^2$  plus élevés que celles n'incluant pas la végétation, Verbyla (1986) fait une mise en garde envers

de tels résultats. Le nombre de variables indépendantes retenues dans l'équation finale est souvent trop élevé par rapport à la petite taille de l'échantillon (n) et de tels modèles peuvent inclure un biais de prédiction dit positif.

Les équations de régression obtenues à partir des variables édaphiques ne devraient pas être considérées comme des critères contrôlant ou influençant directement la croissance des arbres (LeBlanc et Towill 1989). Monserud, Moody et Breuer (1990) ont démontré que la majorité des facteurs édaphiques mesurés n'expliquaient qu'une faible proportion de la variation observée chez l'IQS du sapin de Douglas. Selon eux, deux explications sont plausibles pour interpréter les faibles corrélations entre ces facteurs et les indices de la qualité de la station. La première étant que le nombre considérable d'interactions édaphiques importantes pour la croissance des arbres excède largement la taille de l'échantillon étudié. Pour pallier à ce problème, Verbyla et Fisher (1989) recommandent un échantillonnage stratifié afin que chaque classe de croissance soit adéquatement représentée. Le nombre de sites pauvres sur sols minces pourrait être insuffisant dans la présente étude. La deuxième explication serait l'échec à mesurer les vraies causes de la productivité des stations, soit les régimes trophique et d'humidité durant la saison de croissance, ainsi que l'aération du sol et les conditions physiques du sol. Monserud, Moody et Breuer (1990) ont conclu qu'il n'était pas justifiable d'analyser et de décrire des critères édaphiques pour prédire l'IQS, étant donné l'effort trop important investi dans la collecte et l'analyse des

données par rapport au pouvoir prédictif obtenu. Ils n'ont retenu que des descripteurs facilement mesurables sur le terrain. Malgré le rendement prédictif intéressant de ces variables, elles demandent plus d'effort lors de l'échantillonnage et les analyses en laboratoire les rendent coûteuses.

Selon Grey (1983), le  $R^2$  d'un bon modèle de prédiction de la croissance des arbres devrait se situer entre 65 et 80%. Les équations calculées dans la présente étude prédisent entre 54 % et 75 % de variation observée chez le pin gris et ce, avec un maximum de quatre variables. Les variables géomorphologiques devraient être privilégiées pour la prédiction de l'IQS du pin gris en Abitibi, même si elles n'obtiennent pas les niveaux de prédiction les plus élevés. Elles sont facilement quantifiables et mesurables sur le terrain, ne demandent pas ou peu d'analyses en laboratoire. Le coût de la collecte de ces données est donc faible. La seule analyse en laboratoire requise pour récolter ces informations sur le terrain est celle de la texture du sol. Celle-ci pourrait être remplacée par l'utilisation de clés d'identification des classes texturales comme celles proposées par Robert et Saucier (1987).

## BIBLIOGRAPHIE

ANONYME. 1983a. Determination of reactive phosphorous in water by flow injection analysis (stannous chloride method). Tecator Application note. ASN 60-01/83.

ANONYME. 1983b. Determination of the sum of nitrate and nitrite in water by flow injection analysis. Tecator application note. ASN 62-01/83.

BARBOUR, M.G., Burk, J.H. et Pitts, W.D. 1980. Terrestrial plant ecology. The Benjamin/Cummings Publishing Company, inc. Californie. 604 pages.

BÉGIN, J., Bélanger, L., Pflanzgraf, J. et Pineau, M. 1990. Qualité de station et production dans les érablières rouges de la plaine de Drummondville, Québec. Forestry Chronicle. 66: 377-387.

BERGERON, Y., Bouchard, A., Gangloff, P. et Camiré, C. 1983. La classification écologique des milieux forestiers de la partie ouest des cantons d'Hébertcourt et de Roquemaure, Abitibi, Québec. Études écologiques 9. Laboratoire d'écologie forestière. Université Laval. Québec. 169 pages.

BOUYOUCOS, G.V. 1962. Hydrometer method improved for making particle-size analysis of soils. Agron. J. 54: 464-465.

BURGER, D. 1972. Forest site classification in Canada. Mitt. Ver. Forstliche Standortskunde Fortpflanzenzüchtung. 21: 20-36.

CARMEAN, W.H. 1967. Soil Survey refinements for predicting black oak site quality in southeastern Ohio. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 31: 805-810.

CARMEAN, W.H. 1975. Forest site quality evaluation in the United States. Adv. Agron. 27: 209-267.

CARMEAN, W.H. 1978. Site index curves for northern hardwoods in northern Wisconsin and upper Michigan. USDA Forest Serv. Res. Paper NC-160. NC Forest Exp. Stn. St-Paul, Minn. 16 pages.

CAUBOUE, M. et Malenfant, D. 1988. Le reboisement au Québec. Exigences écologiques des épinettes (*Picea*), des pins (*Pinus*) et des mélèzes (*Larix*) plantés au Québec. CERFO. Publications du Québec. 90 pages.

COILE, T.S. 1938. Forest classification: Class of forest sites with special reference to ground vegetation. *J. Forestry*. 36: 1062-1066.

COILE, T.S. 1952. Soil and the growth of forests. *Adv. Agron.* 4: 330-398.

CORNS, I.G.W. et Pluth, D.J. 1984. Vegetational indicators as independant variables in forest growth prediction in west-central Alberta, Canada. *Forest Ecology and Management*. 9: 13-25.

DAUBENMIRE, R.F. 1976. The use of vegetation in assessing the productivity of forest lands. *Bot. Res.* 42: 115-143.

DAUBENMIRE, R.F. et Daubenmire, J.B. 1968. Forest vegetation of eastern Washington and northern Idaho. *Washington Agric. Exp. Stn Tech. Bull.* no 60.

FOSTER, N.W. et Morrison, I.K. 1976. Distribution and cycling of nutrients in a natural *Pinus banksiana* ecosystem. *Ecology*. 57: 110-120.

FOWELLS, H.A. 1965. Silvics of forest trees species of the United States. *USDA Handbook*. no 271. pages 338-354 et 523-534.

GAUCH, H.G. 1982. Noise reduction by eigenvector ordinations. *Ecology*. 63: 1643-1649.

GERARDIN, V. 1989. Introduction à l'écologie forestière. *L'Aubelle*. 73: 1-14.

GREEN, R.N., Marshall, P.L. et Klinka, K. 1989. Estimating site index of douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* [Mirb.] Franco) from ecological variables in south western British Columbia. *Forest Science*. 35: 50-63.

GREY, D.C. 1983. The evaluation of site factor studies. *Suid-Afrikaanse Bosboutydskrif*. 19-22.

HAGGLUND, B. 1981. Evaluation of forest site productivity. *Forestry Abstracts (Commonwealth Forestry Bureau)*. 42: 515-527.

HILL, M.O. 1979a. DECORANA, a fortran program for detrended correspondance analysis and reciprocal averaging. Cornell University. Ithaca. 52 pages.

HILL, M.O. 1979b. TWINSPAN, a fortran program for arranging multivariate data in an ordered two-way table by classification of the individuals and attributes. Cornell University. Ithaca.

HILL, M.O. et Gauch, H.G. 1980. Detrended correspondance analysis: An improved ordination technique. *Vegetatio*. 42: 47-58.

HODGKINS, E.J. 1968. Productivity estimation by means of plant indicators in the longleaf pine forests of Alabama. dans, *Tree growth and forest soils*. Youngberg, C.T. et Davey, C.B. (éds). pages 461-474.

HOSIE, R.C. 1980. Arbres indigènes du Canada. 8<sup>e</sup> édition. Éditions Fides. Environnement Canada et Centre d'édition du gouvernement du Canada. 389 pages.

JONES, J.R. 1969. Review and comparison of site evaluation methods. USDA For. Serv. Res. Paper. RM-51. pages 9-27.

JONES, R.K., Pierpoint, G., Wickware, G.M., Jeglum, J.K., Arnup, R.W. et Bowles, J.M. 1983. Field guide to forest ecosystem classification for the clay belt, site region 3e. Ministry of natural resources. Environnement Canada. Ontario. 161 pages.

KENKEL, N.C. 1986. Structure and dynamics of jack pine stands near Elk Lake, Ontario: A multivariate approach. *Can. J. Bot.* 64: 486-497.

LAFOND, A. 1966. Notes sur l'écologie de quatre conifères du Québec. *Naturaliste canadien*. 93: 823-842.

LEBLANC, P.A. et Towill, W.D. 1989. Can jack pine site productivity in north central Ontario be predicted using multiple regression soil-site equations? NWOFTDU Technical Report. no 33. Ontario Ministry of natural resources. Thunder Bay. Ontario. 14 pages.

MARIE-VICTORIN, F. 1964. Flore Laurentienne. Les Presses de l'Université de Montréal. 2<sup>e</sup> édition. Montréal. 925 pages.

McKEAGUE, J.A. 1978. Manuel de méthodes d'échantillonnage et d'analyses des sols. 2<sup>e</sup> édition. Soil Research Institute. Can. Soil Survey Committee. Préparé par le sous-comité des méthodes d'analyses. Ottawa. 250 pages.

MONSERUD, R.A. 1984. Height growth and site index curves for inland douglas-fir based on stem analysis data and forest habitat type. *For. Sci.* 30: 943-965.

MONSERUD, R.A., Moody, U. et Breuer, D.W. 1990. A soil-site study for inland douglas-fir. *Can. J. For. Res.* 20: 686-695.

MUNN, L.C. et Vimmerstedt, J.P. 1980. Predicting height growth of yellow-poplar from soils and topography in south-eastern Ohio. *Soil Sci. Amer. J.* 44: 384-387.

PAWLUK, S. et Arneman, H.S. 1961. Some forest soil characteristics and their relationship to jack pine growth. *Forest Science.* 7: 160-173.

PFISTER, R.D., Kovalchik, B.L., Arno, S.F. et Presby, R.C. 1977. Forest habitat types of Montana. USDA For. Serv. Gen. Tech. Report. INT-34. Intermountain For. and Range Exp. Stn. Ogden. Utah.

PREGITZER, K.S., Barnes, B.V. et Lemme, G.D. 1983. Relationship of topography to soils and vegetation in an upper Michigan ecosystem. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 47: 117-123.

ROBERT, D. et Saucier, J.P. 1987. Cadre écologique forestier I: Normes de prise de données et de vérification 1988. MER. Service de l'inventaire forestier. Gouvernement du Québec. 180 pages.

SAS Institute Inc. 1985. User's guide: Statistics. Version 5. North Carolina. 956 pages.

SCHMIDT, M.G. 1986. Soil-site relations for jack pine in the Thunder Bay area. Thesis for Master of science in forestry. School of forestry. Lakehead University. 113 pages.

SCHMIDT, M.G. et Carmean, W.H. 1988. Jack pine site quality in relation to soil and topography in north central Ontario. *Can. J. For. Res.* 19: 179-184.

SCHONAU, A.P.G. 1987. Problems in using vegetational or soil classification in determining site quality. *Suid-Afrikaanse Bosboutydskrif*-nr. 141: 13-18

SHETRON, S.G. 1972. A study concerning the soil-growth relationships of native jack pine and pine plantations on Mosinee Paper Company lands. Michigan Technological University. Houghton. Mich. Tech. Univ. 89 pages.

SPURR, S.H. et Barnes, B.V. 1980. Forest ecology. 3<sup>e</sup> édition. John Wiley and Sons. New York. 687 pages.

STOECKELER, J.H. 1961. Organic layers in Minnesota aspen stands and their role in soil improvement. *Forest Science*. 7: 66-71.

STUANES, A.O., Ogner, G. et Opem, M. 1984. Ammonium nitrate as extractant for soil exchangeable cations, exchangeable acidity and aluminium. *Soil Sci. Plant Anal.* 15: 773-778.

VERBYLA, D.L. 1986. Potential prediction bias in regression and discriminant analysis. *Can. J. For. Res.* 16: 1255-1257.

VERBYLA, D.L. et Fisher, R.F. 1989. An alternative approach to conventional soil-site regression modeling. *Can. J. For. Res.* 19: 179-184.

WALMSLEY, M., Utzig, G., Vold, T., Moon, D. et van Barneveld, J. 1980. Describing ecosystems in the field. RAB Technical Paper 2. Land Management Report. no 7. Ministère de l'Environnement. Ministère des Forêts. Colombie-Britannique. 224 pages.

WILDE, S.A., Iyer, J.G., Tanzer, CH., Trautmann, W.L. et Watterston, K.G. 1964. Growth of jack pine (*Pinus banksiana*, Lamb.) plantation in relation to fertility of non-phreatic sandy soils. *Soil Sci.* 98: 162-169.

WILTSHIRE, R.O. 1982. Ground vegetation as an indicator of site quality for jack pine in north western Ontario. Thesis for bachelor of science in forestry. School of Forestry. Lakehead University. 80 pages.

YEATMAN, C.W. 1984. The genetic basis of jack pine management. dans, Smith, C.R. et Brown, G. (éds). Jack pine symposium. COJFRC symposium proceedings. O-P-12. Timmins. Ontario. 195 pages.

ZARNOVICAN, R. 1985. L'analyse de tige: une méthode à redécouvrir. *Naturaliste Canadien*. 112: 253-260.

ZARNOVICAN, R., Ouellet, D. et Gendron, S. 1988. Saisie informatisée de la croissance radiale. Rapport d'information LAU-X-80. Forêts Canada, région de Québec. 14 pages.

ZOLADESKI, C.A. 1988. Classification and gradient analysis of forest vegetation of cape Enragé, Bic park, Québec. *Naturaliste Canadien (Rev. Ecol. Syst.)*. 115: 9-18.