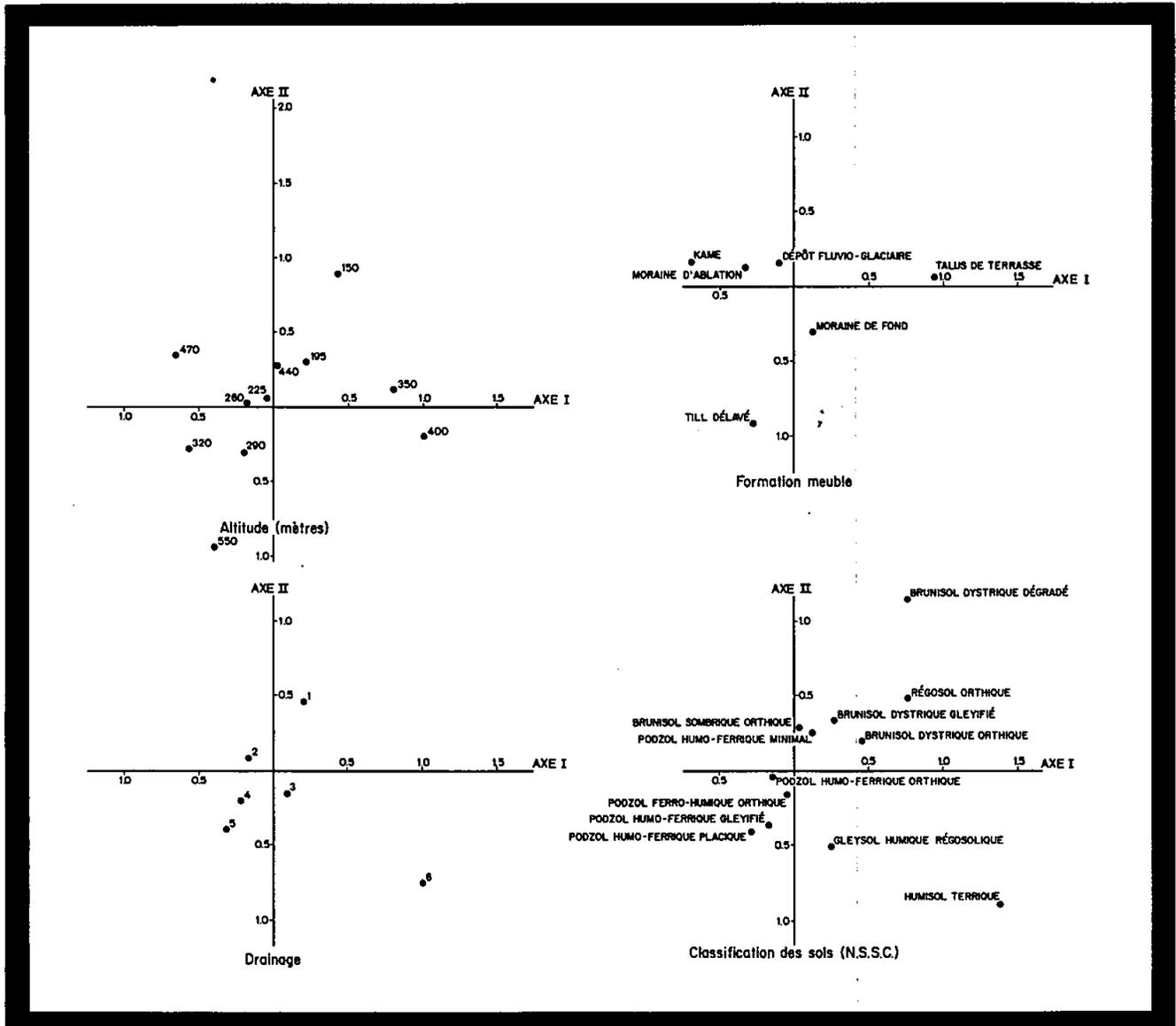




MÉMOIRE N° 24

ÉTUDE DES RELATIONS ENTRE LES CARACTÈRES DU MILIEU ET LA PRODUCTION FORESTIÈRE PAR L'ANALYSE FACTORIELLE DES CORRESPONDANCES

Par Mario Ménard et Jacques Bélanger



MARIO MÉNARD est titulaire d'un diplôme de bachelier es sciences appliquées (génie forestier) de l'université Laval depuis 1969. En 1975, cette université lui décernait le diplôme de maître es sciences forestières. Depuis mai 1969, il est à l'emploi du Service de la recherche du ministère des Terres et Forêts du Québec, à titre de chargé de recherche en dendrométrie à la division de biométrie et du traitement des données.

JACQUES BÉLANGER est bachelier es sciences (mathématiques) de l'université Laval depuis 1958 et professeur de mathématiques à la Faculté de Foresterie et Géodésie. De 1962 à 1964, il s'est spécialisé en statistiques à l'Université de Montréal, où il obtenait une maîtrise es sciences en 1963. Depuis 1970, il est docteur es sciences de l'université Laval.

ETUDE DES RELATIONS ENTRE LES CARACTERES
DU MILIEU ET LA PRODUCTION FORESTIERE PAR
L'ANALYSE FACTORIELLE DES CORRESPONDANCES

par

MARIO MENARD ET JACQUES BELANGER

MEMOIRE N^O 24

SERVICE DE LA RECHERCHE
DIRECTION GENERALE DES FORETS
MINISTERE DES TERRES ET FORETS DU QUEBEC

1976

Thèse présentée à l'Ecole des gradués de l'université Laval
comme exigence partielle pour l'obtention du grade de maître
ès sciences (foresterie) sous la direction du Dr. Jacques Bélanger
du département d'Aménagement forestier et sylviculture de la
faculté de Foresterie et de Géodésie.

C O R R I G E N D A

Couverture et fiches de bibliothèque:

au lieu de: L.C. SD 358

lire: L.C. QK 911

E R R A T A

page-
paragraphe-
ligne

17-1-1 tableau $P_{IJ} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^p p_{ij}$, de somme 1. Posons:

17-3-2 $p_{j|i} = \frac{p_{ij}}{p_{i\cdot}}$ = probabilité d'avoir l'élément j , i étant

18-3-formule $\sum_{j=1}^p \left[p_{\cdot j} \left(\frac{p_{i|j}}{p_{i\cdot}} - \frac{p_{i'|j}}{p_{i'\cdot}} \right)^2 \right]$

19-1-3 $(p_{i|j})/(\sqrt{p_{\cdot j}})$ où....

19-2-1- Les calculs se résument à chercher les vecteurs et les

20-1-1 les masses $p_{i\cdot}$: $\lambda\alpha = \sum_{i=1}^p \dots$

36-1-1 hydrique....

Dépôt légal

Bibliothèque nationale du Québec

REMERCIEMENTS

Mes premiers remerciements vont au Dr Jacques Bélanger qui a bien voulu me guider tout au long de ce travail.

Je remercie également les dirigeants du ministère des Terres et Forêts et en particulier Monsieur Pierre Dorion, directeur du Service de la recherche, pour avoir mis à ma disposition le temps et le budget nécessaires pour la poursuite de mes études.

A Monsieur Guy Waksman, coopérant militaire français, je dois beaucoup. Sa précieuse collaboration a facilité le traitement des données sur ordinateur et l'interprétation des résultats.

Monsieur Gaétan Cloutier, dessinateur au Service de la recherche, a rendu possible la représentation graphique dans ce travail. Les secrétaires du même Service ont gentiment accepté de dactylographier le texte de cette thèse.

Enfin, je ne peux oublier le Dr Yvon Richard qui a su me conseiller avec une patience sans faille depuis le début.

M. M.

Note sur les unités de mesure

Le texte original de ce mémoire, présenté à l'Ecole des gradués de l'université Laval, est basé sur des relevés dont certains datent de 1968 et qui ont tous été effectués dans le système de mesures canadiennes. On comprendra qu'il ne nous aît pas été possible de reprendre l'ensemble du texte pour y incorporer les unités de mesure du système international et on voudra bien se reporter à la table de conversion présentée en annexe.

RESUME

Ce mémoire est consacré à l'étude des relations entre les caractères du milieu et la production forestière des peuplements de peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides* Michx.) de la section Laurentienne (L. 4a) de Rowe (1959). On démontre l'intérêt de l'analyse factorielle des correspondances pour la reconnaissance des variables écologiques qui influencent le niveau de production des milieux échantillonnés et pour l'étude de la dynamique des peuplements.

SUMMARY

*The primary objective of this work is to study the relationships between ecological characteristics and forest production of the transition communities of trembling aspen (*Populus tremuloides* Michx.) of the Laurentian section (L. 4a) defined by Rowe (1959). The study shows that factorial analysis of correspondences can be used to find ecological variables which influence the production level and for the study of the dynamics of communities.*

...the first of these is the fact that the ...

...the second is the fact that the ...

...the third is the fact that the ...

...the fourth is the fact that the ...

...the fifth is the fact that the ...

...the sixth is the fact that the ...

...the seventh is the fact that the ...

...the eighth is the fact that the ...

...the ninth is the fact that the ...

...the tenth is the fact that the ...

...the eleventh is the fact that the ...

...the twelfth is the fact that the ...

...the thirteenth is the fact that the ...

...the fourteenth is the fact that the ...

...the fifteenth is the fact that the ...

...the sixteenth is the fact that the ...

...the seventeenth is the fact that the ...

...the eighteenth is the fact that the ...

...the nineteenth is the fact that the ...

TABLE DES MATIERES

	page
REMERCIEMENTS	iii
RESUME	v
SUMMARY	v
TABLE DES MATIERES	vii
LISTE DES TABLEAUX	ix
LISTE DES FIGURES	xi
CHAPITRE 1 - INTRODUCTION	1
CHAPITRE 2 - LES DONNEES	5
2.1 - La région étudiée	5
2.2 - L'échantillonnage	7
2.3 - Les variables du milieu et de production	8
CHAPITRE 3 - L'ANALYSE FACTORIELLE DES CORRESPONDANCES	15
CHAPITRE 4 - LES RESULTATS	23
4.1 - Les éléments supplémentaires	23
4.2 - La variance des facteurs	24
4.3 - Le poids des états des variables	26
4.4 - Les facteurs	27
4.4.1 - Le premier facteur	30
4.4.2 - Le second facteur	40
4.4.3 - Le troisième facteur	47
4.4.4 - Discussion des résultats	52
CHAPITRE 5 - CONCLUSION	59
BIBLIOGRAPHIE	63
ANNEXE 1 - DEFINITION DES ETATS DES VARIABLES DANS L'ETUDE	69

ANNEXE II - COEFFICIENTS DE CONVERSION DES MESURES CANADIENNES
EN MESURES METRIQUES 73

LISTE DES TABLEAUX

		page
Tableau 1	Tableau des deux ensembles mis en correspondance	9
Tableau 2	Entropies-variables observées et maximales pour les diverses variables retenues et qualité relative de l'échantillonnage	11
Tableau 3	Résultats partiels d'une première analyse des états D.H.P. (E) (8.6-10.5) et till délavé	25
Tableau 4	Pourcentage de la variance totale expliquée par les 8 premiers facteurs	25
Tableau 5	Etats de variables ayant un poids supérieur à 280	28
Tableau 6	Contributions absolues prédominantes des états des variables de production au premier facteur	32
Tableau 7	Contributions absolues prédominantes des états des variables du milieu au premier facteur	37
Tableau 8	Une variable corrélée avec le premier facteur: le diamètre moyen (E)	39
Tableau 9	Une variable expliquée par le premier facteur: la surface terrière (E)	39
Tableau 10	Contributions absolues prédominantes des états des variables de production au deuxième facteur	43

Tableau 11	Contributions absolues prédominantes des états des variables du milieu au deuxième facteur	43
Tableau 12	Une variable corrélée avec le deuxième facteur : le drainage	45
Tableau 13	Les types d'humus et le deuxième facteur	45
Tableau 14	Les types de sol	45
Tableau 15	Contributions absolues prédominantes des états des variables de production au troisième facteur	48
Tableau 16	Contributions absolues prédominantes des états des variables du milieu au troisième facteur	48
Tableau 17	Une variable expliquée par les deux premiers facteurs: l'altitude	51
Tableau 18	Une variable liée au troisième facteur: l'indice de fertilité	51
Tableau 19	Une variable liée aux deuxième et troisième facteurs: le pH	51
Tableau 20	Les variables de production. Comparaison des coordonnées sur l'axe des notations sur les peuplements entiers et partiels	54

LISTE DES FIGURES

		page
Figure 1	Relation entre l'information mutuelle moyenne des cinquante espèces ayant la plus grande information mutuelle et l'entropie des facteurs écologiques	13
Figure 2	Diagramme des états des variables de production (Axes I et II)	29
Figure 3	Diagramme des états des variables du milieu (Axes I et II)	31
Figure 4	Diagramme des états des variables de production (Axes I et III)	33
Figure 5	Diagramme des états des variables du milieu (Axes I et III)	35
Figure 6	Diagrammes des états de quatre variables du milieu: altitude, formation meuble, drainage et classification des sols (Axes I et II)	38
Figure 7	Diagrammes des états de quatre variables de production: diamètre moyen total, surface terrière totale, âge et accroissement annuel moyen total (Axes I et II)	41
Figure 8	Diagrammes des états de quatre variables du milieu: pente, nomenclature de l'horizon de surface, exposition et type d'humus (Axes I et II)	46
Figure 9	Diagrammes des états de trois variables du milieu et de production: pH de l'horizon de surface, indice de fertilité et nombre d'arbres par unité de volume marchand (Axes I et II)	49

the 1990s, the number of people with a mental health problem has increased in the UK (Mental Health Act 1983, 1990).

There is a growing awareness of the need to improve the lives of people with mental health problems. The Department of Health (1999) has set out a strategy for mental health care, which includes a commitment to improve the lives of people with mental health problems. This strategy is based on the following principles:

• To improve the lives of people with mental health problems.

• To ensure that people with mental health problems are treated with respect and dignity.

• To ensure that people with mental health problems are given the opportunity to participate in decisions about their care.

• To ensure that people with mental health problems are given the opportunity to live in the community.

• To ensure that people with mental health problems are given the opportunity to work and to contribute to society.

• To ensure that people with mental health problems are given the opportunity to live a full and active life.

• To ensure that people with mental health problems are given the opportunity to live in a safe and secure environment.

• To ensure that people with mental health problems are given the opportunity to live in a supportive environment.

• To ensure that people with mental health problems are given the opportunity to live in a caring environment.

• To ensure that people with mental health problems are given the opportunity to live in a healthy environment.

• To ensure that people with mental health problems are given the opportunity to live in a peaceful environment.

• To ensure that people with mental health problems are given the opportunity to live in a happy environment.

• To ensure that people with mental health problems are given the opportunity to live in a successful environment.

• To ensure that people with mental health problems are given the opportunity to live in a thriving environment.

• To ensure that people with mental health problems are given the opportunity to live in a vibrant environment.

• To ensure that people with mental health problems are given the opportunity to live in a flourishing environment.

• To ensure that people with mental health problems are given the opportunity to live in a prosperous environment.

• To ensure that people with mental health problems are given the opportunity to live in a wealthy environment.

• To ensure that people with mental health problems are given the opportunity to live in a powerful environment.

• To ensure that people with mental health problems are given the opportunity to live in a strong environment.

• To ensure that people with mental health problems are given the opportunity to live in a confident environment.

• To ensure that people with mental health problems are given the opportunity to live in a secure environment.

• To ensure that people with mental health problems are given the opportunity to live in a safe environment.

• To ensure that people with mental health problems are given the opportunity to live in a healthy environment.

• To ensure that people with mental health problems are given the opportunity to live in a peaceful environment.

• To ensure that people with mental health problems are given the opportunity to live in a happy environment.

CHAPITRE I

INTRODUCTION

Depuis quelques années, les mathématiques ont pris une place de plus en plus grande dans le domaine des sciences naturelles et, de plus, le développement considérable des ordinateurs a permis de remplacer les méthodes de calcul, plutôt artisanales et subjectives, par des méthodes modernes basées sur des conceptions analytiques objectives.

L'exploitation de la masse de renseignements d'ordre phytoécologique, qui continue de s'accumuler, nécessite des méthodes statistiques qui permettent de traiter en toute objectivité les données observées, de tenir compte à la fois d'une foule de variables qui influencent le milieu et d'obtenir une vue d'ensemble sur les milieux étudiés.

Une méthode d'analyse multidimensionnelle, soit l'analyse factorielle des correspondances (Cordier, 1965; Benzécri *et al.*, 1973; Lebart et Fénelon, 1973; Escoufier, 1972), a été utilisée en phytosociologie et en phytoécologie notamment par Dagnélie (1960, 1961, 1965), Orloci (1966), M. Roux

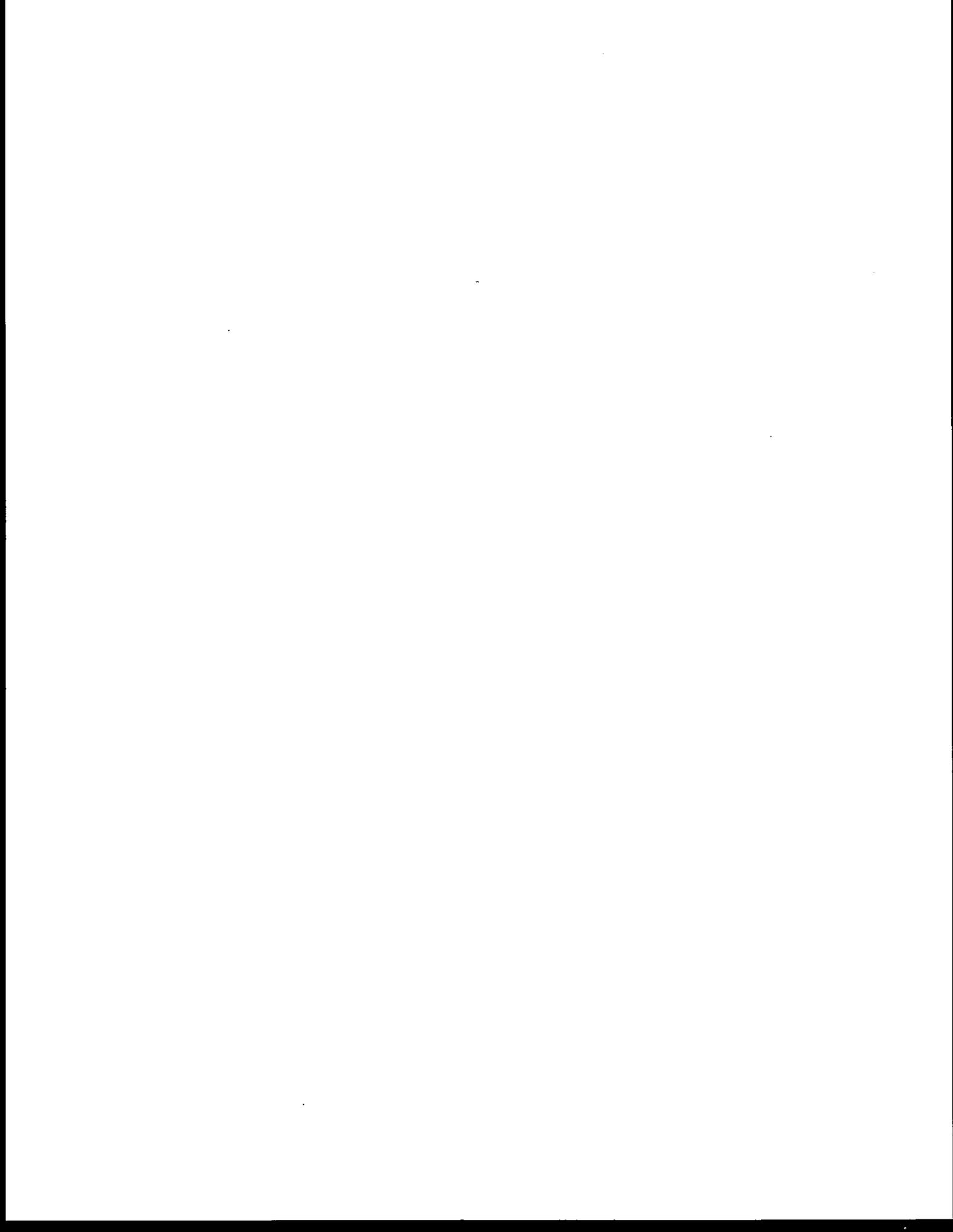
et G. Roux (1967), Ivimey-Cook et Proctor (1967), Van Der Maarel (1969), Romane (1972 a et b), *etc.* Ces auteurs ont envisagé les correspondances entre, soit l'ensemble des espèces et celui des relevés, soit l'ensemble des espèces et celui des états (ou classes) des variables du milieu.

Le but de cette étude est de mettre en évidence quelques-unes des relations qui existent entre les caractères du milieu et les caractères de production des peuplements de peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides* Michx.). Pour ce faire, l'analyse factorielle des correspondances est utilisée, car elle semble la méthode d'analyse multidimensionnelle la mieux adaptée aux données à étudier.

Le peuplier faux-tremble s'établit dans des milieux très perturbés. C'est pourquoi l'étude phytoécologique de ces peuplements pionniers ou de transition présente quelques difficultés. Les variables du milieu qui influencent la distribution des espèces n'apparaissent pas toujours clairement et la recherche des associations, au sens de Braun-Blanquet (1965), des espèces différentielles ou indicatrices, est délicate. L'évolution probable de la végétation est incertaine parce que les études sont réalisées dans un court laps de temps (Gagnon et Grandtner, 1973). Enfin, du point de vue du sylviculteur et de l'aménagiste, la description des groupements végétaux paraît insuffisante parce que, généralement, seules les caractéristiques dendrométriques moyennes des associations sont mentionnées. Ainsi, il est nécessaire d'abandonner ici un point de vue strictement phytoécologique et d'étudier les relations entre les caractères du milieu et la production en matière ligneuse, plus précisément entre les états des variables décrivant le milieu (variables écologiques) et les états des variables décrivant la production forestière (variables de production) à l'aide de l'analyse factorielle des correspondances.

Plusieurs travaux écologiques ont été réalisés sur les tremblaies, par la méthode Braun-Blanquet, dans la province de Québec. Pour n'en citer que quelques-uns, mentionnons: Grandtner (1960), Blouin (1964), De Veer (1967), Lafond et Ladouceur (1968), Jurdant *et al.* (1969), Blouin (1970) et Gagnon et Grandtner (1973).

Cependant, cette étude-ci semble être la première à mettre en évidence les caractères du milieu qui influencent la production forestière de certains peuplements de peuplier faux-tremble et ce, à l'aide d'une analyse statistique multidimensionnelle.



CHAPITRE 2

LES DONNEES

Les données de base sont celles qui ont servi pour *l'étude éco dynamique des tremblais de la section Laurentienne* de G. Gagnon et M. M. Grandtner (1973). Ces auteurs avaient pour but de décrire les principaux groupements de peuplier faux-tremble de cette section en analysant les facteurs (ou variables) écologiques prépondérants responsables de la distribution des groupements végétaux rencontrés.

2.1 LA REGION ETUDIEE.

Grossièrement, la section Laurentienne (L. 4a) de la région forestière des Grands-Lacs et du Saint-Laurent, décrite par Rowe (1959), s'étend du cap Tourmente au lac Nomingue, soit du 70° 55' au 75° 15' de longitude ouest et du 45° 50' au 47° 25' de latitude nord. C'est une zone de transition entre la forêt feuillue du Haut-Saint-Laurent (section L.2) et la forêt boréale (région B). L'altitude de la section varie entre 400 et 2000 pieds avec quelques sommets plus élevés qui peuvent atteindre 3 100 pieds.

Ce sont les glaciers du Pléistocène qui ont le plus contribué à former le relief de cette région. On y retrouve des lignes de faille, des vallées à fond plat ou ondulé, des bandes rocheuses et des dépôts de toutes sortes. Ces conditions font que le drainage varie d'excessif dans les sables grossiers et les graviers, à imparfait et très mauvais dans les endroits concaves où les matériaux sont très fins.

Ce vaste territoire, aux milliers de lacs et de rivières, est occupé en importance par des tremblaies à bouleau à papier (*Betula papyrifera* Marsh.) avec érable à sucre (*Acer saccharum* Marsh.) ou érable rouge (*Acer rubrum* L.) et des tremblaies à bouleau à papier avec sapin (*Abies balsamea* (L.) Mill.), épinette (*Picea* sp.) et pin (*Pinus* sp.). Elles résultent généralement de très grands feux (Gagnon et Grandtner, 1973). De plus, ces auteurs notent que l'intervention humaine semble jouer sur la distribution des tremblaies dans les parties défrichées et colonisées. Ces interventions sont principalement la culture, l'exploitation forestière, la récréation et les feux.

Selon Rowe (1959), les collines sont généralement couvertes de peuplements de feuillus d'ombre tels le bouleau jaune (*Betula alleghaniensis* Britton) et l'érable à sucre. L'épinette rouge (*Picea rubens* Sarg.), le sapin baumier, l'érable rouge et le bouleau à papier y sont aussi en importance. On retrouve dans les vallées des peuplements mixtes et résineux. Cette région contenait autrefois de grands pins blancs (*Pinus strobus* L.); bien que cette essence soit encore présente, elle n'y est plus importante. L'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) occupe les hautes terres mal drainées et les tourbières des terres basses où elle est accompagnée du thuya occidental (*Thuja occidentalis* L.) et du mélèze (*Larix laricina* (Du Roi) K. Koch) ou, parfois, du frêne noir (*Fraxinus nigra* Marsh).

2.2 L'ECHANTILLONNAGE

Dans le cadre d'une étude écologique de la région L.4a, une équipe dirigée par M. Gilles Gagnon du Service de la recherche a délimité, en 1967-68, 85 places-échantillons dans des peuplements de peuplier faux-tremble. Etablies sur des surfaces floristiquement homogènes, les places-échantillons retenues pour l'étude ont généralement une superficie de 0.2 acre. Quelques-unes ont une superficie de 0.1 acre.

A chaque place-échantillon correspondent trois types de relevés: de végétation, de pédologie et de dendrométrie. Le relevé de végétation, selon la méthode proposée par Braun-Blanquet (1965), permet de décrire des unités de végétation, grâce aux tableaux phytosociologiques, en tenant compte des espèces différentielles et de la dominance des espèces.

L'échantillonnage du sol permet d'étudier plusieurs variables qui peuvent influencer *a priori* sur la composition floristique et la production en matière ligneuse. En plus de la description du pédon au point de vue morphologique, les horizons sont échantillonnés dans la mesure du possible. Les propriétés physiques et chimiques sont par la suite déterminées en laboratoire. Le type de dépôt, le drainage, le type pédogénétique, le pH des horizons et le type d'humus sont des variables déterminées pour l'ensemble de la station.

Enfin, c'est grâce au relevé dendrométrique qu'il est possible de déterminer la production de chaque place-échantillon. Les tiges de 3.6 pouces et plus ont été dénombrées sur la totalité de la superficie, tandis que celles de 0.6 à 3.5 pouces ne le sont que sur le quart de la superficie totale. L'étude de 8 à 10 arbres dominants et codominants a permis de connaître la hauteur, le diamètre à hauteur de poitrine et l'âge du

peuplement. A partir de ces données, il a été possible de tracer des courbes d'indice de fertilité et d'obtenir des tables de rendement qui établissent la production en matière ligneuse des tremblais échantillonnés.

Les informations recueillies ont été codées conformément au *Code pour les relevés d'inventaires écologiques du territoire* (Groupe d'études sur l'écologie appliquée à l'aménagement du territoire, 1970 et 1974). Les variables de production et les variables du milieu, tant qualitatives que quantitatives, sont réparties en classes, d'où la possibilité de présenter les données sous la forme d'un tableau à doubles entrées (tableau 1).

2.3 LES VARIABLES DU MILIEU ET DE PRODUCTION

Parmi les variables échantillonnées sur le terrain, on peut éliminer celles dont la qualité ou la distribution de l'échantillonnage n'est pas adéquate et celles qui sont peu corrélées avec les variables floristiques. Deux critères sont utilisées dans ces cas: l'entropie-variable et l'information mutuelle espèce-variable.

L'entropie-variable est une quantité qui est fonction de la répartition du nombre total des relevés dans chaque classe d'une variable. Elle se formule ainsi:

$$\sum_{i=1}^{NC} \left[\frac{R}{N} \log_2 \frac{N}{R} \right]$$

		1 ^{er} ensemble (états des variables du milieu)									
		Variable 1			Variable 2		-----		-----		
		état 1	état 2	état 3	état 1	---	---	j	---	p	
I \ J											
	1	2	3	4	---	---	j	---	p	Total	
Variable 1	état 1	1									
	état 2	2									
	état 3	3									
	état 4	4									
Variable 2	état 1	5									
	état 2	6									
	-----	--									
-----	-----	i							n _{ij}		n _{i.}
	-----	--									
	-----	--									
	-----	--									
	-----	k									
Total									n _{.j}		N

Tableau 1 — Tableau des deux ensembles mis en correspondance

n_{ij} = nombre de relevés ayant les états i et j

$$n_{i.} = \sum_{j=1}^p n_{ij}$$

$$n_{.j} = \sum_{i=1}^k n_{ij}$$

$$N = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^p n_{ij}$$

où,

N = nombre total de relevés

R = nombre de relevés dans une classe

NC = nombre de classes de la variable

Log_2 = logarithme dans la base 2.

Cette quantité est nulle si tous les relevés sont inclus dans une seule classe de la variable; elle est maximale, c'est-à-dire égale à $\log_2 NC$, si l'on retrouve le même nombre de relevés dans chaque classe de la variable. Le rapport entropie-variable observée sur entropie-variable maximale est une appréciation de la qualité de l'échantillonnage (Guillerm, 1971). Le classement des variables par ordre décroissant de ce rapport permet de juger au premier coup d'oeil les variables les mieux échantillonnées et d'améliorer, si cela est possible, l'échantillonnage de celles dont le rapport est faible; par exemple, la variable nomenclature du premier horizon (tableau 2). A l'exception de cette dernière variable, on considère que pour l'ensemble des variables retenues, celles-ci sont relativement bien échantillonnées.

L'information mutuelle espèce-variable est une mesure du degré de liaison qui existe entre une espèce et une variable. Elle est fonction du nombre de fois où une espèce donnée est présente et absente dans chaque classe d'une variable (Godron, 1966 et 1968). Cette quantité se calcule ainsi:

$$\sum_1^{NC} \left[\frac{U}{N} \log_2 \left(\frac{U}{R} \cdot \frac{N}{UE} \right) \right] + \sum_1^{NC} \left[\frac{V}{N} \log_2 \left(\frac{V}{R} \cdot \frac{N}{VE} \right) \right]$$

Tableau 2

Entropies-variables observées et maximales pour les diverses variables retenues et qualité relative de l'échantillonnage.

Variable	Nombre de classes	Entropie-variable		$\frac{E(O)}{E(M)}$
		observée E(O)	maximale E(M)	
Nombre d'arbres par unité de volume marchand	10	2.995	3.322	0.90
Surface terrière (P*)	6	2.351	2.595	0.90
Accroissement annuel moyen (E**)	9	2.655	3.170	0.84
Age du peuplement	6	2.123	2.595	0.82
Surface terrière (E)	6	2.142	2.595	0.82
Accroissement annuel moyen (P)	10	2.679	3.322	0.81
Indice de fertilité	4	1.533	2.000	0.77
Diamètre moyen (P)	4	1.386	2.000	0.69
Diamètre moyen (E)	5	1.478	2.322	0.64
Exposition	9	3.067	3.170	0.97
Altitude	11	3.191	3.459	0.92
Pente	8	2.679	3.000	0.89
Drainage	6	1.969	2.595	0.76
pH du premier horizon	4	1.414	2.000	0.71
Formation meuble	6	1.711	2.595	0.66
Classification des sols	12	2.367	3.585	0.66
Type d'humus	6	1.579	2.595	0.61
Nomenclature du premier horizon	4	0.636	2.000	0.32

* Peuplement incluant les tiges de 3.6 pouces et plus à hauteur de poitrine.

** Peuplement incluant les tiges de 0.6 pouces et plus à hauteur de poitrine.

où,

NC = nombre de classes de la variable

N = nombre total de relevés

U = nombre de relevés d'une classe où l'espèce est présente

R = nombre de relevés d'une classe de la variable

UE = nombre total de relevés où l'espèce est présente

V = nombre de relevés d'une classe où l'espèce est absente

VE = nombre total de relevés où l'espèce est absente.

En portant en ordonnée la moyenne de l'information mutuelle espèce-variable pour les espèces qui apportent le plus d'information (50 espèces dans le cas présent) et, en abscisse, l'entropie de chaque variable, on obtient ainsi une hiérarchisation de l'activité générale des variables et une idée de la qualité de l'échantillonnage de ces dernières (figure 1). Dans ce graphique, les variables les plus actives et les mieux échantillonnées sont situées dans la partie droite supérieure. La partie gauche inférieure montre des variables de second intérêt. Le rôle du faisceau de droites issues de l'origine est de mieux visualiser le rapport information mutuelle moyenne et entropie-variable.

La liste des variables retenues pour l'analyse est présentée en annexe. On y retrouve quelques variables peu actives et mal échantillonnées (figure 1); par exemple, la nomenclature du premier horizon et le pH du premier horizon. Elles sont tout de même prises en considération car aucune observation n'était manquante. Les variables choisies, qui décrivent le milieu, sont: l'altitude, la pente, l'exposition, la formation meuble, le drainage, le type d'humus, le type de sol, la nomenclature

50 ESPÈCES

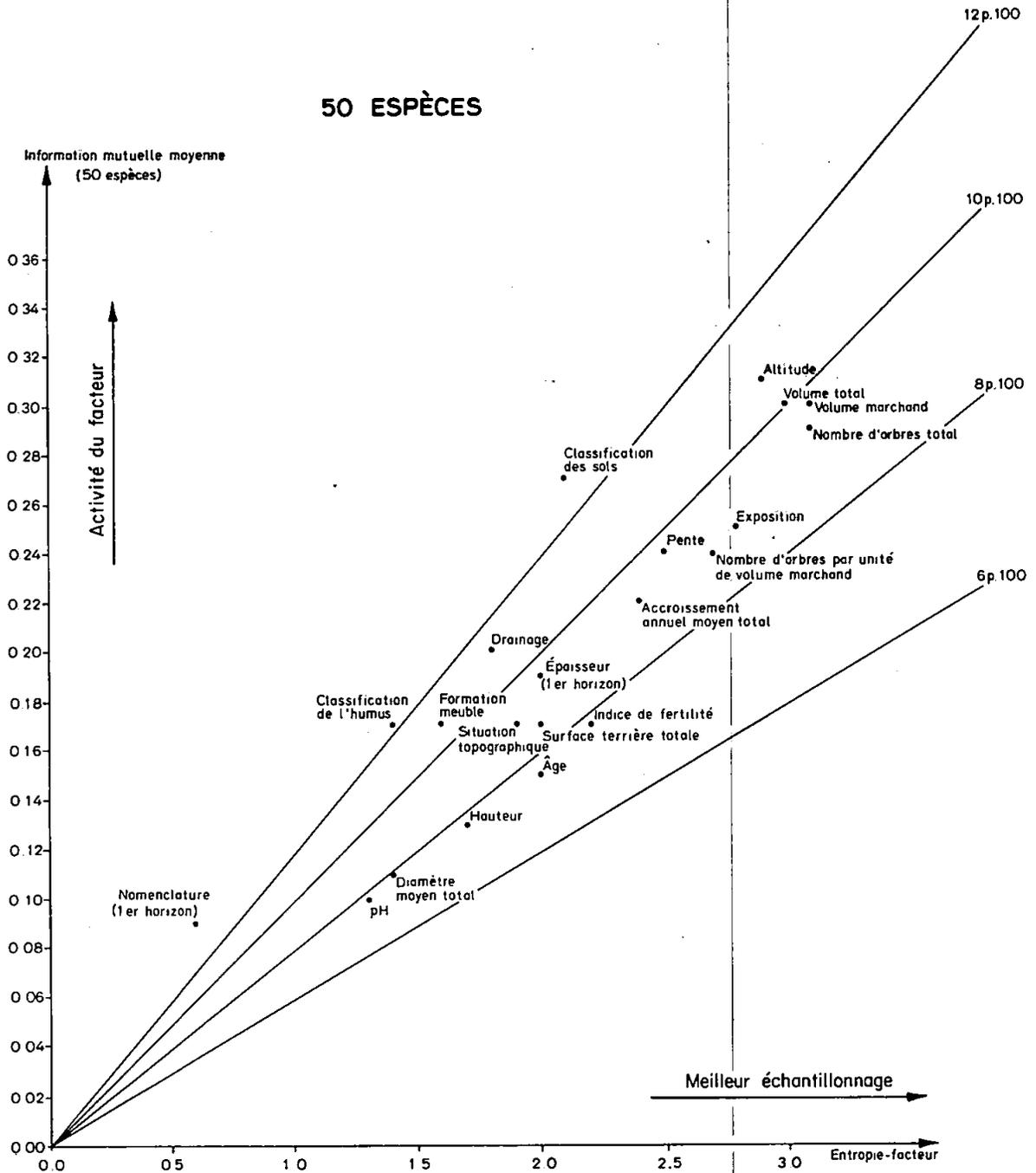


Figure 1— Relation entre l'information mutuelle moyenne des cinquante espèces ayant la plus grande information mutuelle et l'entropie des facteurs écologiques

du premier horizon et le pH de cet horizon. Les variables pédologiques sont malheureusement exclues de l'analyse car elles n'ont pu être échantillonnées dans tous les relevés.

Les variables décrivant la production forestière sont : l'âge, le diamètre moyen à hauteur de poitrine, la surface terrière, l'accroissement annuel moyen, le nombre d'arbres par unité de volume marchand et l'indice de fertilité à l'âge de référence de 50 ans. Pour le diamètre moyen, la surface terrière et l'accroissement annuel moyen, les notations pour le peuplement entier (tiges de plus de 0.5 pouces à hauteur de poitrine) et le peuplement partiel ou marchand (tiges de plus de 3.5 pouces à hauteur de poitrine) ont été retenues, car il est ainsi possible d'espérer mettre en évidence l'importance de la strate arbustive et évaluer le degré d'évolution des peuplements.

CHAPITRE 3

L'ANALYSE FACTORIELLE DES CORRESPONDANCES

Cette méthode d'analyse des données est une variante de l'analyse en composantes principales (Escoufier, 1972). Elle s'applique aux cas où "deux ou plusieurs ensembles se trouvent en relation quelle que soit la nature de ces ensembles" (Cordier, 1965). C'est une méthode à la fois simple et efficace de traitement des tableaux de nombres positifs (Benzécri *et al.*, 1973).

Dans l'exemple présenté ici, deux ensembles sont mis en correspondance, 9 variables de production et 9 variables du milieu dont chacune se subdivise en plusieurs classes ou états. Les variables de production se subdivisent en 60 états et celles du milieu, en 66 états.

Soient I, l'ensemble des 60 états des variables de production et J, l'ensemble des 66 états des variables du milieu. Le tableau I x J est constitué de nombres n_{ij} c'est-à-dire le nombre de fois que l'état i a été rencontré dans l'état j. Puisque l'échantillonnage se compose de 85

relevés, la valeur maximale de n_{ij} ne peut être plus grande que 85. Ce tableau permet une représentation schématisée des proximités entre les états i et j .

Sans tenir compte de leurs fréquences absolues, deux états j et j' sont proches l'un de l'autre s'ils ont la même réaction vis-à-vis des états i . De plus, un état i et un autre j peuvent être proches l'un de l'autre si l'état i est sensible à l'état j , c'est-à-dire si la fréquence relative de l'état i pour j est plus grande que la moyenne. Ce sont ces notions de proximité qui sont recherchées et qu'il est possible de représenter dans un diagramme condensé (Benzécri *et al.*, 1973). Il existe donc une symétrie entre les lignes et les colonnes de la matrice étudiée (Lebart et Fénelon, 1973). L'analyse factorielle des correspondances tient compte de cette symétrie et du caractère probabiliste de la matrice en prenant en considération les poids différents des lignes et des colonnes; ceci est un des faits très importants qui distinguent cette technique de l'analyse en composantes principales.

Soit le tableau 1 rectangulaire où sont mis en correspondance 2 ensembles I et J . A un couple $(i, j) \in I \times J$, correspond un nombre positif n_{ij} . Si:

$$N = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^p n_{ij}$$

alors,

$$p_{ij} = \frac{n_{ij}}{N}$$

où p_{ij} est la probabilité d'apparition du couple (i, j) . On obtient un nouveau tableau rectangulaire formé des p_{ij} . Dans ce dernier

tableau $p_{ij} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^p p_{ij}$, de somme 1. Posons:

$$p_{i\cdot} = \sum_{j=1}^p p_{ij} = \text{probabilité d'avoir l'élément } i \text{ quel que soit } j$$

$$p_{\cdot j} = \sum_{i=1}^k p_{ij} = \text{probabilité d'avoir l'élément } j \text{ quel que soit } i.$$

Les probabilités $p_{i\cdot}$ et $p_{\cdot j}$ sont interprétées en termes de lois marginales. Dans cet exemple, $p_{i\cdot}$ souligne l'importance de l'état de variable de production i et $p_{\cdot j}$, celui de l'état de variable du milieu j . Posons maintenant les lois de probabilité suivantes:

$$p_{i|j} = \frac{p_{ij}}{p_{\cdot j}} = \text{probabilité d'avoir l'élément } i, j \text{ étant fixé}$$

$$p_{j|i} = \frac{p_{ij}}{p_{i\cdot}} = \text{probabilité d'avoir l'élément } j, i \text{ étant fixé.}$$

Dans l'espace des variables de production R^k , les coordonnées de chaque état des variables du milieu j ont pour quantités les probabilités conditionnelles $p_{i|j}$, où $i = 1 \dots k$. Dans R^p , l'espace des états des variables du milieu, chaque état des variables de production i a pour coordonnées les probabilités conditionnelles $p_{j|i}$, où $j = 1 \dots p$.

Le principe de l'analyse factorielle des correspondances est de considérer, dans l'espace R^p par exemple, le nuage des états des variables de production muni de la distance X^2 (chi carré) obéissant

à la loi de probabilité $p_{.j}$, c'est-à-dire, $p_{.j}$ doit être supérieur à zéro sinon cela voudrait dire qu'un élément j n'a pas été échantillonné. Il en est de même en considérant l'espace R^k .

Pour une représentation spatiale d'un nuage de points, Cordier (1965) suggère l'emploi d'une distance entre 2 éléments d'un même ensemble, ou 2 éléments n'appartenant pas au même ensemble. Dans R^p , la distance entre 2 états de variables de production i et i' se formule ainsi:

$$\sum_{j=1}^p \left[p_{.j} \left(\frac{p_{i|j}}{p_{i\cdot}} - \frac{p_{i'|j}}{p_{i'\cdot}} \right) \right]^2$$

Cette expression est pondérée par $p_{.j}$, car sans cela, la comparaison terme à terme des p éléments des profils i et i' donne à chacun des p éléments le même poids, ce qui peut entraîner des disparités très grandes dans les proximités; c'est le cas quand les effectifs d'une colonne j , mesurés par $p_{.j}$, sont élevés (Lebart et Fénélon, 1973). Une expression analogue à la dernière mesure la distance entre 2 états de variables du milieu j et j' dans R^k .

L'analyse factorielle des correspondances permet d'appliquer un principe important, celui de l'équivalence distributionnelle. Le choix de la distance du X^2 permet de vérifier ce principe qui s'énonce ainsi: soient 2 états i et i' de l'ensemble I , par exemple, tels qu'ils aient le même profil, c'est-à-dire qu'ils soient confondus dans R^p ; il est possible de les considérer comme un seul état i'' affecté de la somme des masses des profils i et i' , les distances distributionnelles entre les autres états de I et de J , dans R^p et R^k , étant inchangées.

Dans R^p , d'après la formule de la distance pondérée citée plus haut, un état i a maintenant pour coordonnées $(p_{i|j})/(p_{.j})$ où $j = 1 \dots p$. Cette pondération par $p_{.j}$, on l'a dit, a pour effet de ne pas donner un rôle excessif à un état trop représenté et, dans l'espace euclidien, n'affecte que l'échelle des axes. Puisque les coordonnées des états des 2 ensembles sont maintenant définies, il ne reste qu'à trouver les composantes principales, ou axes factoriels, du nuage de points par l'analyse factorielle des correspondances.

Les calculs se résument à chercher les secteurs et les valeurs propres d'une matrice symétrique. Soit I le plus petit des 2 ensembles I et J . Le tableau carré $I \times I$ est formé des nombres $s(i, i')$ donnés par la formule:

$$s(i, i') = \frac{p_{ij} p_{i'j}}{p_{.j} p_{i.} p_{i'.$$

Les proximités des éléments de l'ensemble I peuvent ainsi être représentées dans R^p . Une représentation analogue des éléments de J dans R^k est aussi possible. Il existe des relations qui permettent de passer des facteurs représentant I dans R^p à ceux représentant J dans R^k (Lebart et Fénélon, 1973).

On sait que les axes factoriels successifs sont orthogonaux deux à deux et donc non corrélés entre eux. Dans R^p , les coordonnées de chaque état i sont notées $F_\alpha(i)$, où α représente le rang de l'axe factoriel. Le moment d'inertie, ou valeur propre, du nuage de points des i états est la somme des $F_\alpha(i)$ pondérés par

les masses $p_{i..}$: $\chi^2 = \sum_{\alpha=1}^p (F\alpha(i))^2 p_{i..}$. En analyse des correspondances $\lambda\alpha$ est toujours compris entre 0 et 1. La somme de tous les moments d'inertie λ , ou trace, est l'inertie totale du nuage de points. A chaque $\lambda\alpha$ correspond une part de l'inertie totale appelée taux d'inertie:

$$\frac{\lambda\alpha}{\sum \lambda\alpha} \\ \alpha = 1$$

Même si les facteurs et les valeurs propres trouvés n'ont pas la même origine, soit à partir du nuage de l'ensemble I ou soit à partir de celui de l'ensemble J , il arrive, malgré que l'on se répète, que la symétrie est totale entre les lignes et les colonnes car on aboutit aux mêmes facteurs, aux mêmes valeurs propres.

Afin de faciliter l'interprétation des axes trouvés par l'analyse factorielle des correspondances, il est possible de calculer différents coefficients pour chacun des états des 2 ensembles mis en correspondance. Quelques définitions sont nécessaires pour la compréhension de ces coefficients. Posons:

$$\rho(i)^2 = \sum_{\alpha=1}^k F\alpha(i)^2 \quad \text{où } i = 1 \dots k$$

$$\rho(j)^2 = \sum_{\alpha=1}^k G\alpha(j)^2 \quad \text{où } j = 1 \dots p$$

La contribution absolue, qui exprime la part prise par un état i donné dans l'inertie expliquée par un facteur α , se définit $F\alpha(i)^2 p_{i..}$. Pour un état j , la contribution absolue est $G\alpha(j)^2 p_{.j}$.

La contribution relative, $F\alpha(i)^2/p(i)^2$ ou $G\alpha(j)^2/p(j)^2$, exprime la part prise par un facteur dans l'explication de la dispersion d'un état.

Les contributions absolues permettent de connaître les variables responsables de la construction d'un facteur, tandis que les contributions relatives donnent celles qui sont des caractéristiques exclusives à ce facteur (Lebart et Fénelon, 1973). Ainsi, les facteurs sont dépendants des états qui leur apportent les plus fortes contributions. Selon Benzécri *et al.* (1973), si la contribution absolue d'un état i (ou j) pour un facteur α est de l'ordre de $\lambda\alpha/2$ (ou seulement de $\lambda\alpha/4$), le facteur n'est probablement dépendant que du seul état i . Il suggère de reprendre l'analyse en mettant l'état i en élément supplémentaire, c'est-à-dire que cet état n'intervient plus dans l'analyse pour la détermination des facteurs. Cependant, dans la nouvelle analyse, les coordonnées de cet état sont tout de même calculées.

Enfin, la corrélation entre le facteur et l'état se définit comme étant la racine carrée de la contribution du facteur à l'état, ou $F\alpha(i)/p(i)$. Cette corrélation est surtout utile pour indiquer le sens de la liaison, négative ou positive, et le degré de liaison entre le facteur et l'état.

Le moyen le plus rapide de prendre connaissance des valeurs des facteurs est de porter dans un diagramme plan chaque état des ensembles I et J (figures 2 à 9). L'ordinateur fait habituellement ce travail. Sommairement, interpréter un axe c'est trouver les états semblables situés à droite de l'origine d'une part et ceux qui s'écartent

à gauche d'autre part, et exprimer ce qui oppose les 2 extrêmes
(Benzécri *et al.*, 1973). Il s'agit donc d'analyser l'organisation
des états selon chaque axe et d'en découvrir le pourquoi.

CHAPITRE 4

LES RESULTATS

L'ordinateur fournit la représentation simultanée des états des variables des 2 ensembles dans un espace à $(I + J)$ dimensions, la liste des valeurs sur I et sur J des premiers facteurs extraits (selon l'ordre décroissant des valeurs propres) ainsi que leur valeur propre ($\lambda\alpha$) et leur taux d'inertie ($\lambda\alpha/\lambda$). Le nombre de facteurs à retenir est quelque peu arbitraire. C'est généralement l'examen de la suite des valeurs propres et du taux d'inertie qui sert d'indicatif pour ce nombre. Ce sont surtout les 2 premiers axes ou facteurs qui sont étudiés (Romane, 1972).

4.1 LES ELEMENTS SUPPLEMENTAIRES

La première analyse sur les 2 ensembles, états des variables de production et états des variables du milieu, met en évidence un état de variable de production et un état de variable du milieu qui contribuent très fortement à l'édification du deuxième facteur.

L'état diamètre moyen (B_4^*) et l'état till délavé (M_3) seront dorénavant considérés comme éléments supplémentaires car leur contribution absolue respective au deuxième facteur, 0.0170 et 0.0217, est supérieure à la valeur propre de ce facteur divisée par 4 ($0.0624/4 = 0.0156$) (tableau 3).

Ces états caractérisent un seul relevé et ce relevé n'est pas particulièrement intéressant et n'est pas aussi le seul objet de l'étude. Il est donc nécessaire de traiter comme éléments supplémentaires les états de variables mentionnés, c'est-à-dire de recalculer les facteurs en ne tenant pas compte de ces 2 états particuliers. Toutefois, dans la seconde analyse, les coordonnées des 2 états sont calculés et ils apparaissent dans les résultats. Dans la suite du texte, seuls les résultats de la seconde analyse sont présentés.

4.2 LA VARIANCE DES FACTEURS

Le premier aspect d'importance sur lequel l'on doit s'attarder en examinant les résultats d'une telle analyse est la part de variance totale expliquée par les premiers facteurs. Les trois premiers facteurs extraient respectivement 19.4, 11.6 et 8.9 pour 100 de l'inertie totale (tableau 4). Ces pourcentages sont considérés comme significatifs pour un tableau de données (60 x 66).

* Pour connaître les classes correspondant à ces états: voir l'annexe 1 ou les tableaux correspondants.

Tableau 3

Résultats partiels d'une première analyse
des états diamètre moyen (B_4) et till délavé (M_3)

état de variable	DHP ¹ (E)-(8.6-10.5) (B_4)			Till délavé (M_3)		
	9			9		
no du facteur	1	2	3	1	2	3
coordonnées	- 0.16	- 3.58	- 1.25	- 4.42	- 4.05	- 1.52
$\lambda/4$	0.0208	0.0156	0.0115	0.0208	0.0156	0.0115
contribution absolue	0.0000	0.0170	0.0021	0.0002	0.0217	0.0030

¹ DHP(E)-(8.6-10.5) = diamètre moyen à hauteur de poitrine du peuplement entier, classe (8.6-10.5).

Tableau 4

Pourcentage de la variance totale
expliquée par les 8 premiers facteurs

no du facteur	1	2	3	4	5	6	7	8
taux d'inertie %	19.4	11.6	8.9	7.5	6.8	5.0	4.6	3.9
taux d'inertie cumulé %	19.4	31.0	39.9	47.4	54.2	59.2	63.8	67.7

Cependant, aucune épreuve statistique de validité n'est présentée ici. "En analyse multidimensionnelle, la complexité des informations traitées et des réponses obtenues est telle qu'un résultat issu de fluctuations aléatoires a très peu de chances d'être interprétable: par conséquent, on peut légitimement admettre que tout ce qui est interprétable est valide. C'est ce qu'on peut appeler l'épreuve de validité sémantique" (Benzécri *et al.*, 1973).

Les trois premiers facteurs rendent compte de près de 40 pour 100 de la variance totale alors que les 52 derniers ne totalisent que 33.3 pour 100. Selon le tableau 4, l'intervalle séparant 2 facteurs devient faible et pratiquement constant à partir du quatrième facteur. De plus, les contributions absolues et relatives des états des variables sont très faibles à partir du troisième facteur. Selon Benzécri *et al.*, (1973), lorsque ces conditions sont réalisées, l'étude des facteurs subséquents n'apporte que très peu d'information utilisable. Dans ce cas précis, il paraît donc inutile d'examiner plus de trois facteurs. En effet, il ne faut pas oublier que certains aspects de la structure des données résultent du hasard. Les premiers axes rendent compte des traits principaux de cette structure tandis que les axes qui n'extraient qu'une faible part de l'inertie totale décrivent plutôt des variations aléatoires. Aussi, les trois premiers facteurs extraient beaucoup plus que 40 pour 100 de l'information "utilisable" contenue dans les données. Cette remarque montre que l'analyse factorielle des correspondances est une méthode qui s'applique bien à l'étude des relations entre les variables de production et celles du milieu.

4.3 LES POIDS DES ETATS DES VARIABLES

Le poids d'un état de variable est la somme marginale des fréquences n_{ij} , c'est-à-dire $n_{i.}$ ou $n_{.j}$ et, dans le cas où il n'y a aucune observation manquante, il est égal, à un facteur multiplicatif près, au nombre de relevés où l'état de variable considéré a été noté. Le tableau 5 montre quelques états de variables de production et du milieu ayant un poids supérieur à 280, c'est-à-dire représentés dans plus du tiers des relevés échantillonnés.

Les états des variables dont le poids est élevé apparaissent généralement dans la partie centrale du nuage de points dont l'analyse factorielle des correspondances donne une représentation. Les premiers utilisateurs de cette analyse n'ont interprété le plus souvent que les éléments éloignés du centre de gravité du nuage et dont la signification est plus évidente. Malgré le pouvoir descriptif élevé de l'analyse factorielle des correspondances, il est tout de même difficile d'analyser tous les rapports qui existent entre les ensembles mis en correspondance. Les paragraphes suivants montrent, malgré tout, qu'il est possible d'en dégager quelques-uns.

4.4 LES FACTEURS

Les sorties des programmes informatiques fournissent différents moyens pour l'interprétation biologique des résultats. Un premier moyen est l'analyse des proximités entre états des variables sur les diagrammes obtenus par projection dans les plans définis par les premiers axes pris deux à deux (figures 2 à 5), ou l'étude des diagrammes

Tableau 5

Etats de variables ayant un poids supérieur à 280.

Type de variable	Nom de la variable	Etat de la variable
Production	Diamètre - peuplement entier (B_1)	2.6 - 4.5
	Diamètre - peuplement entier (B_2)	4.6 - 6.5
	Diamètre - peuplement partiel (C_2)	4.6 - 6.5
	Indice de fertilité (I_2)	50
	Age (A_3)	30 - 39
Milieu	Drainage (N_2)	2
	Humus (O_3)	Mor non hydrique
	Type de sol (P_4)	Podzol humo-ferrique orthique
	pH (H_1)	4 - 4.5
	Nomenclature du 1er horizon (Q_2)	LH
	Formation meuble (M_4)	Dépôts fluvio-glaciaires

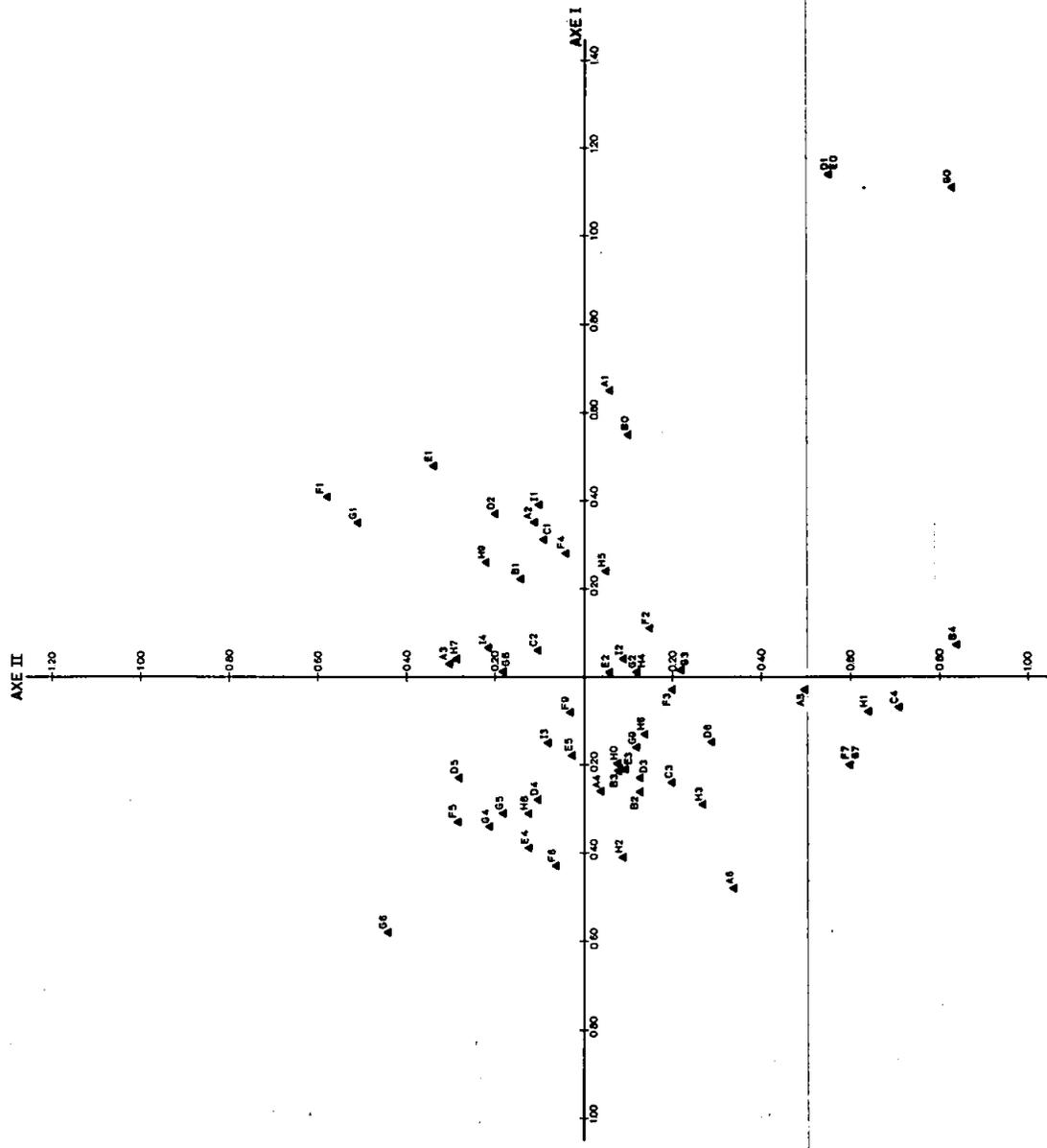


Figure 2 — Diagramme des états des variables de production

simplifiés qui en sont extraits (figures 6 à 9). Le second moyen est l'étude de trois séries de coefficients (définis plus haut): les contributions absolues, les contributions relatives et les corrélations. Pour nous, le premier moyen est un complément au second.

4.4.1 LE PREMIER FACTEUR

Dans l'espace des variables du milieu (figure 2), certains états de variables de production jouent un grand rôle dans l'inertie expliquée par le premier facteur (ou axe I). Généralement, ces importants états se subdivisent en deux groupes: un premier groupe se retrouve du côté positif de l'axe et le second, du côté négatif. Bien que de poids faibles (poids = $n_{i.}$ ou $n_{.j}$), deux états surface terrière (E_0 et D_1) ainsi qu'un état accroissement annuel moyen (G_0) sont responsables à 28.7 pour 100 (somme de leur contribution absolue) de la construction du facteur. D'autre part, ces états sont expliqués respectivement à 62.4, 62.4 et 50.48 pour cent (contribution relative respective) par le facteur. Ces états sont situés du côté positif de l'axe. Le second groupe, situé du côté négatif de l'axe, se compose de l'état diamètre moyen (B_2), de l'état âge (A_4) et de l'état surface terrière (E_4) (tableau 6). Ce tableau met en évidence, sur une possibilité de 60, les 14 états de variables de production ayant les plus forts pourcentages de contribution absolue au premier facteur. Ils expliquent l'inertie de ce facteur pour plus de 67 pour cent.

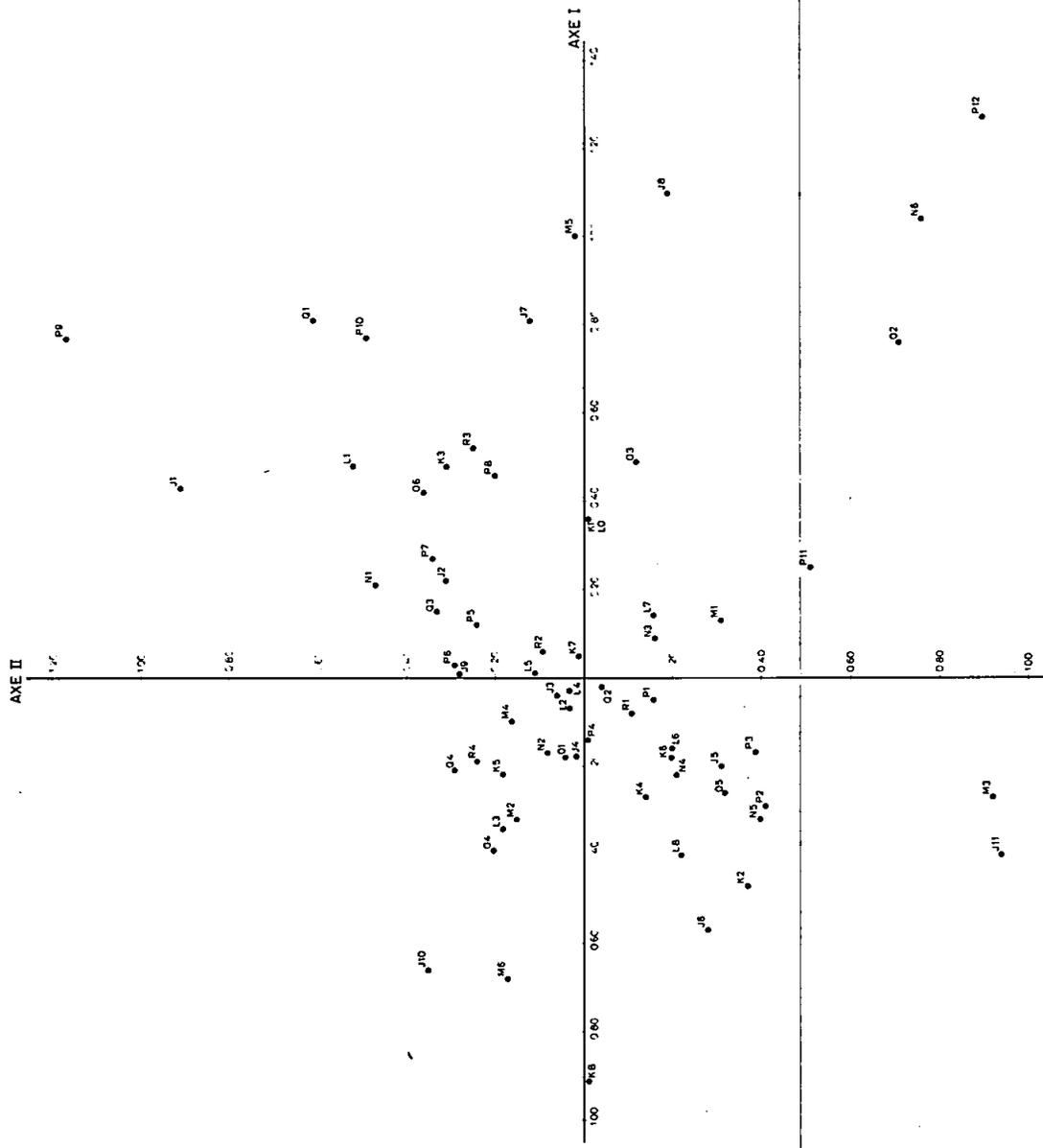


Figure 3 — Diagramme des états des variables du milieu

Tableau 6

Contributions absolues prédominantes des états
des variables de production au premier facteur

Variable	Etat de la variable	Signe sur l'axe	Poids de l'état	Pourcentage de contribution	
				absolue	relative
Surface terrière ¹ (P) ⁵ (E)	0 - 25	+	45	10.44	62.40
Surface terrière (E) ⁴ (P)	26 - 50	+	45	10.44	62.40
Accroissement annuel moyen ² (P) (E)	0 - 19	+	36	7.87	50.48
Surface terrière (E) (P)	51 - 75	+	198	4.94	46.07
Surface terrière (P) (E)	26 - 50	+	117	4.71	36.50
Age (E)	20 - 29	+	162	3.61	30.66
Accroissement annuel moyen (E) (E)	0 - 19	+	9	3.34	20.13
Diamètre à hauteur de poitrine ³ (E) (B ₁)	2.6 - 4.5	+	368	3.24	49.46
Arbres par unité de volume marchand (E)	> 46	+	225	2.68	34.00
Diamètre à hauteur de poitrine (E) (E)	4.6 - 6.5	-	314	3.84	52.55
Age (E)	40 - 49	-	297	3.53	39.00
Surface terrière (P) (E)	101 - 125	-	126	3.33	37.93
Accroissement annuel moyen (E) (E)	60 - 69	-	144	3.78	23.93
Accroissement annuel moyen (P) (E)	50 - 59	-	116	2.40	21.94

1 Exprimé en pi²/ac

2 Exprimé en pi³/ac

3 Exprimé en pouces

4 Peuplement incluant les tiges de 0.6 po et plus à hauteur de poitrine

5 Peuplement incluant les tiges de 3.6 po et plus à hauteur de poitrine

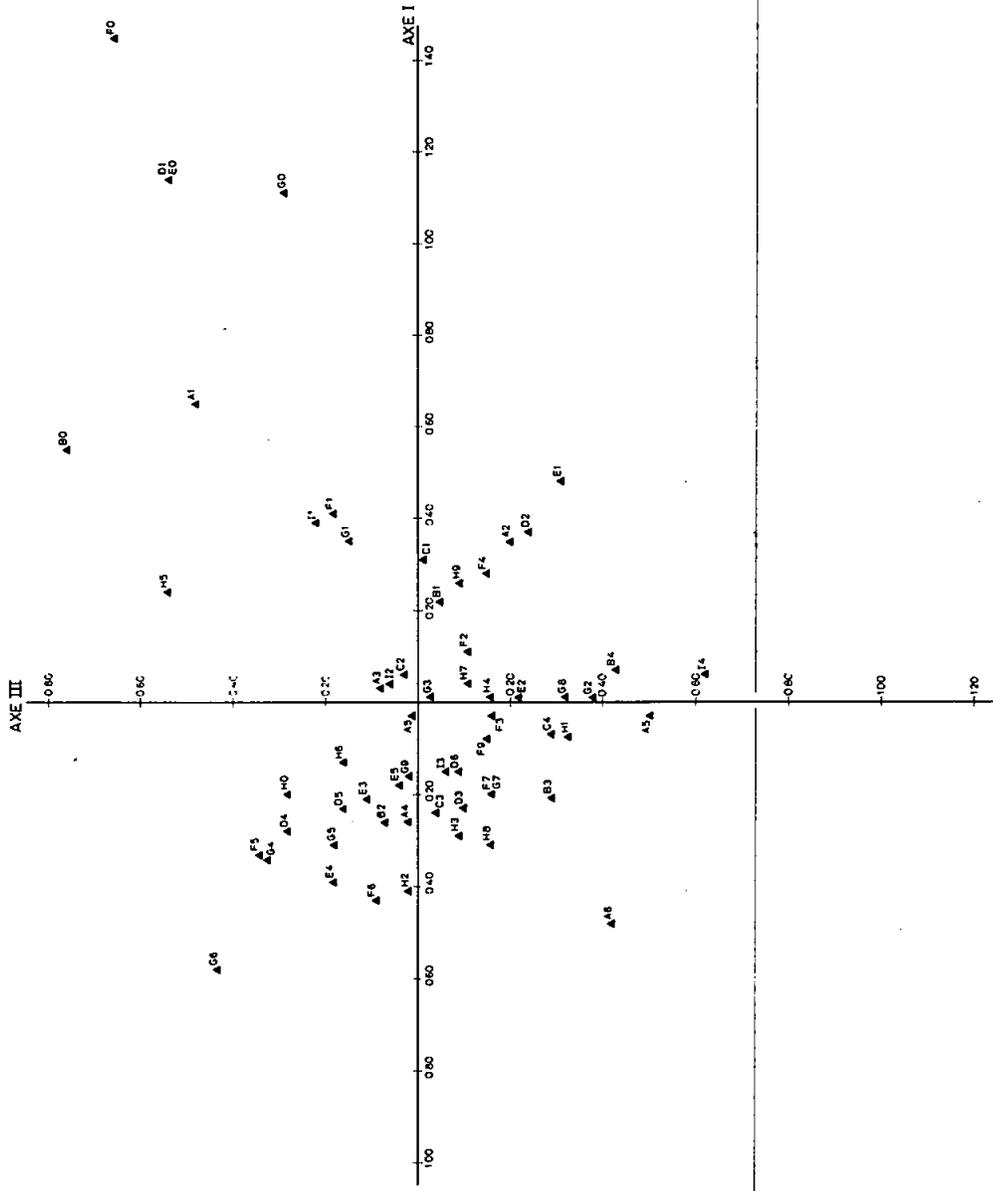


Figure 4 – Diagramme des états des variables de production

Parallèlement, dans l'espace des variables de production (figure 3), l'inertie du premier facteur est surtout expliquée par quelques états de variables du milieu. Situés du côté positif de l'axe I , les principaux états sont: l'altitude (J_8), la formation meuble (M_5), le drainage (N_6) et le sous-groupe de sol (P_{12}). Ces états, de poids faibles, sont responsables à 31.6 pour 100 de la construction du premier facteur, lequel explique l'inertie respective de ces 4 états à 66.63, 74.95, 44.90 et 33.73 pour 100. S'opposent à ces états, du côté négatif, les altitudes (J_6 et J_{10}) et le type d'humus (O_1). Ce dernier état est expliqué par le facteur à 66.88 pour 100 (tableau 7). Les 13 états présentés dans ce tableau et ayant les plus forts pourcentages de contribution absolue, expliquent l'inertie du premier facteur pour plus de 64 pour 100.

Si l'on reportait sur un même graphique, dans le plan des axes I et II , ces états de variables de production et du milieu, l'on verrait que ces états situés soit du côté positif, soit du côté négatif, sont proches les uns des autres. Du côté positif, les états sont caractéristiques d'un groupe de relevés échantillonnés dans des milieux très humides (N_6), sur des talus de terrasse (M_5) et à une altitude variant entre 1 100 (J_6) et 1 300 pieds (J_8). De plus, l'âge de ces peuplements ne dépasse par 30 ans (A_3) et ils sont de production faible, c'est-à-dire d'un accroissement annuel moyen inférieur à 19 pi^3/ac (F_0) et d'un diamètre moyen inférieur à 4.5 po (B_1). En opposition sur le même axe, du côté négatif, on retrouve des états caractéristiques de relevés échantillonnés à des altitudes 1 000 (J_6) et 1 500 pieds (J_{10}) et dont le type d'humus est un mor non

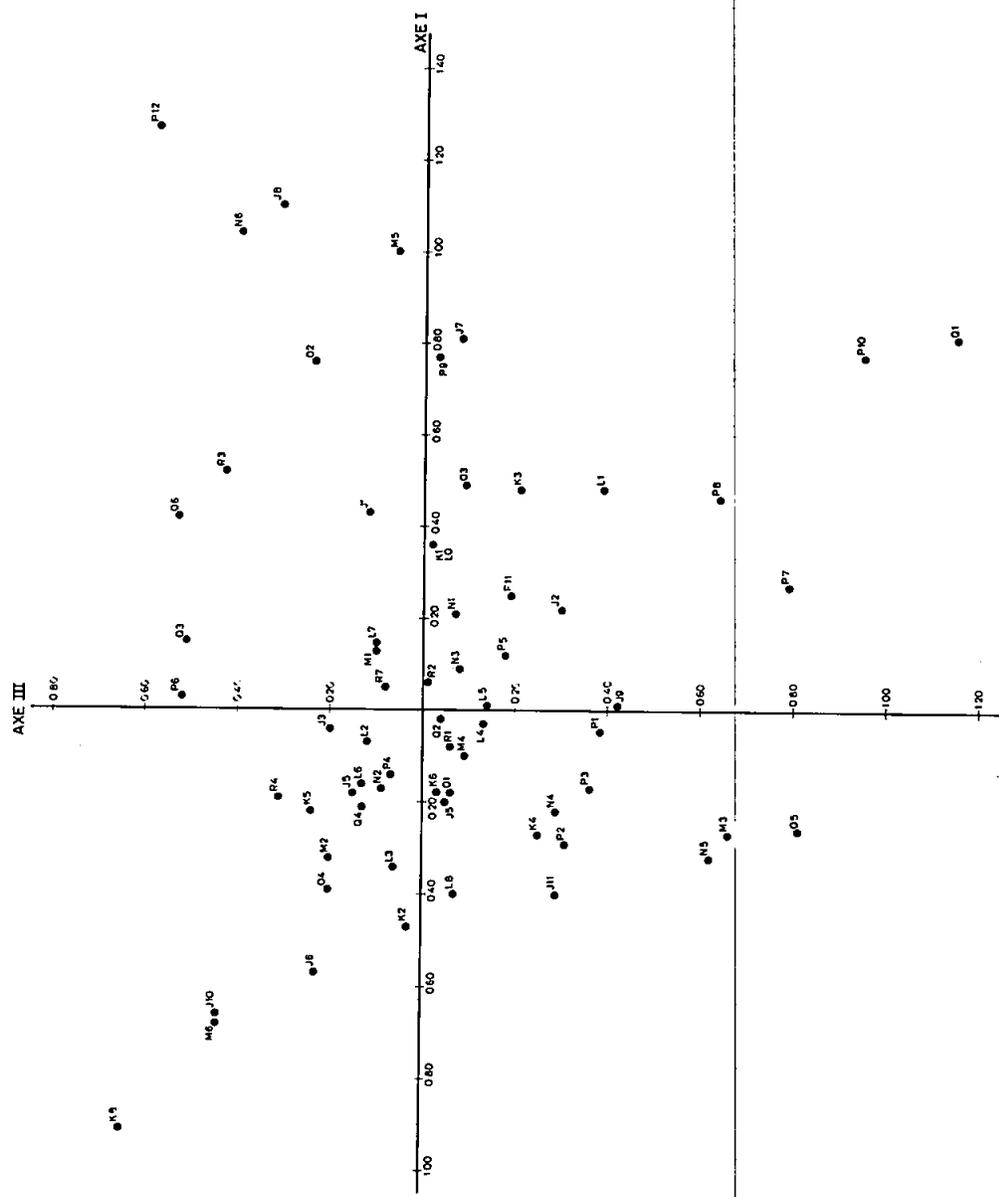


Figure 5 — Diagramme des états des variables du milieu

hybrique (O_1), lequel dénote un drainage plus rapide que celui situé du côté positif. Ces relevés, d'un âge variant entre 40 et 49 ans (A_4) ont une production meilleure que ceux décrits du côté positif de l'axe: le diamètre moyen varie de 4.6 à 6.5 po (B_2), la surface terrière est de 101 à 125 pi^2/ac (E_4) et l'accroissement annuel moyen est situé entre 60 et 69 pi^3/ac (F_5).

Les parties positives et négatives du premier facteur opposent les peuplements dont les diamètres moyens (E) sont respectivement inférieurs et supérieurs à 4.5 pouces (tableau 8) et dont les surfaces terrières (E) sont respectivement inférieures et supérieures à 75 pi^2/ac (tableau 9). Dans ce dernier tableau, on remarque que les éléments qui ont le plus de poids ne sont pas nécessairement ceux qui participent le plus à l'édification du facteur et qu'un élément ayant une contribution absolue faible peut en même temps être caractéristique d'un facteur: par exemple, l'état surface terrière (D_4) a un pourcentage de contribution absolue relativement faible par rapport à l'état surface terrière (D_1).

On remarque que les classes de drainage 1 (N_1) et 6 (N_6) ont des coordonnées positives sur le premier facteur. Elles se rapprochent des états décrivant une faible production (figures 2 et 3). Les tremblaies sont donc peu prospères dans les milieux où le drainage est très rapide ou très lent.

Classer les podzols en fonction de la productivité des tremblaies qui se développent sur ces sols est impossible parce que l'état podzol humo-ferrique orthique est sur-représenté. En revanche

Tableau 7

Contributions absolues prédominantes des états
des variables du milieu au premier facteur

Variable	Etat de la variable	Signe sur l'axe	Poids de l'état	Pourcentage de contribution	
				absolue	relative
Altitude ¹ (J_8)	1 300	+	54	11.56	66.63
Formation meuble (M_5)	Talus de terrasse	+	45	7.94	74.95
Drainage (N_6)	6	+	36	6.97	44.90
Sous-gr. de sol (P_{12})	Humisol terrique	+	18	5.13	33.73
Type d'humus (O_2)	Mor hydrique	+	45	4.62	38.13
Type d'humus (O_5)	Moder hydrique	+	107	4.55	48.17
Altitude (J_7)	1 100	+	36	4.19	45.70
Pente (K_3)	2.1 - 5%	+	81	3.31	40.86
Exposition (L_0)	nulle	+	135	3.03	41.04
Pente (K_2)	0 - 0.5%	+	135	3.03	41.04
Altitude (J_6)	1 000	-	63	3.61	36.10
Altitude (J_{10})	1 500	-	45	3.44	25.04
Type d'humus (O_1)	Mor non hydrique	-	505	3.09	66.88

¹ Exprimée en pieds

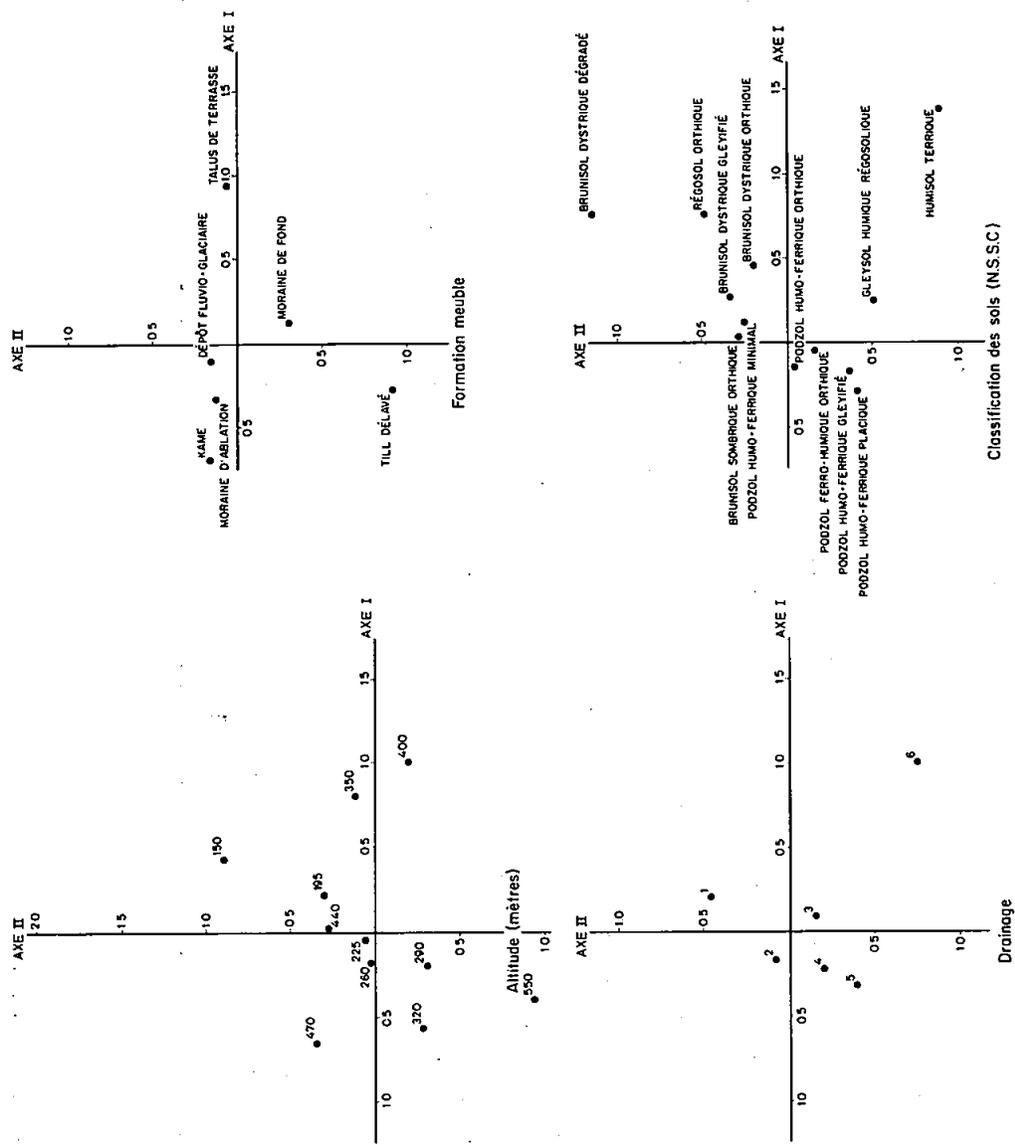


Figure 6 — Diagrammes des états de quatre variables du milieu

Tableau 8

Une variable corrélée avec le premier facteur:
le diamètre moyen

Classes de diamètre (peuplement entier)	Coordonnées sur le premier facteur	Corrélation factorielle	Poids
0.6 - 2.5 (B_0)	.54	.32	18
2.6 - 4.5 (B_1)	.22	.70	368
4.6 - 6.5 (B_2)	- .26	- .72	314
6.6 - 8.5 (B_3)	- .20	- .17	45

Tableau 9

Une variable expliquée par le premier
facteur : la surface terrière

Classes de surface terrière (peuplement entier)	Signe sur l'axe I	Poids	Pourcentage de contribution	
			absolue	relative
26 - 50 (D_1)	+	45	10.44	62.40
51 - 75 (D_2)	+	198	4.94	46.07
76 - 100 (D_3)	-	277	2.73	32.62
101 - 125 (D_4)	-	161	2.30	26.63
126 - 150 (D_5)	-	45	.42	5.47
151 - 175 (D_6)	-	27	.10	1.89

les brunisols se répartissent plus équitablement parmi les différents sous-groupes; ces types de sol s'ordonnent selon des productions croissantes de la façon suivante: brunisol dystrique dégradé (P_9), brunisol dystrique orthique (P_8) et brunisol sombrique orthique (P_6) (figure 2). Etant donné l'échantillonnage actuel, il est donc impossible de comparer la productivité des podzols à celle des brunisols. L'analyse des données devra éventuellement être suivie d'un "retour au fait" dans le cadre d'un échantillonnage progressif (Godron, 1972).

Ainsi, le premier facteur traduit l'évolution des tremblaies échantillonnées et oppose les tremblaies jeunes aux tremblaies plus évoluées. L'étude des variables de production dans leur relation avec le premier facteur sera complétée par la suite lorsqu'il faudra dégager quelques caractères de la dynamique des tremblaies.

4.4.2 LE SECOND FACTEUR

Dans l'espace des variables de milieu (figure 2), le deuxième facteur est expliqué à 55.79 pour 100 par les états de variables de production ayant les plus forts pourcentages de contribution absolue. Du côté positif de l'axe II nous retrouvons les états accroissement annuel moyen (G_1 et F_1), âge (A_3) et surface terrière (E_1). Ces états sont expliqués respectivement à 38.38, 31.73, 29.95 et 18.39 pour 100 par le facteur. Du côté négatif, ce qui semble paradoxal, on retrouve à la fois l'état âge (A_5), l'état nombre d'arbres par unité de volume marchand (H_1) et d'autres états qui dénotent en revanche une faible production: les états accroissement annuel moyen (G_0 et F_0),

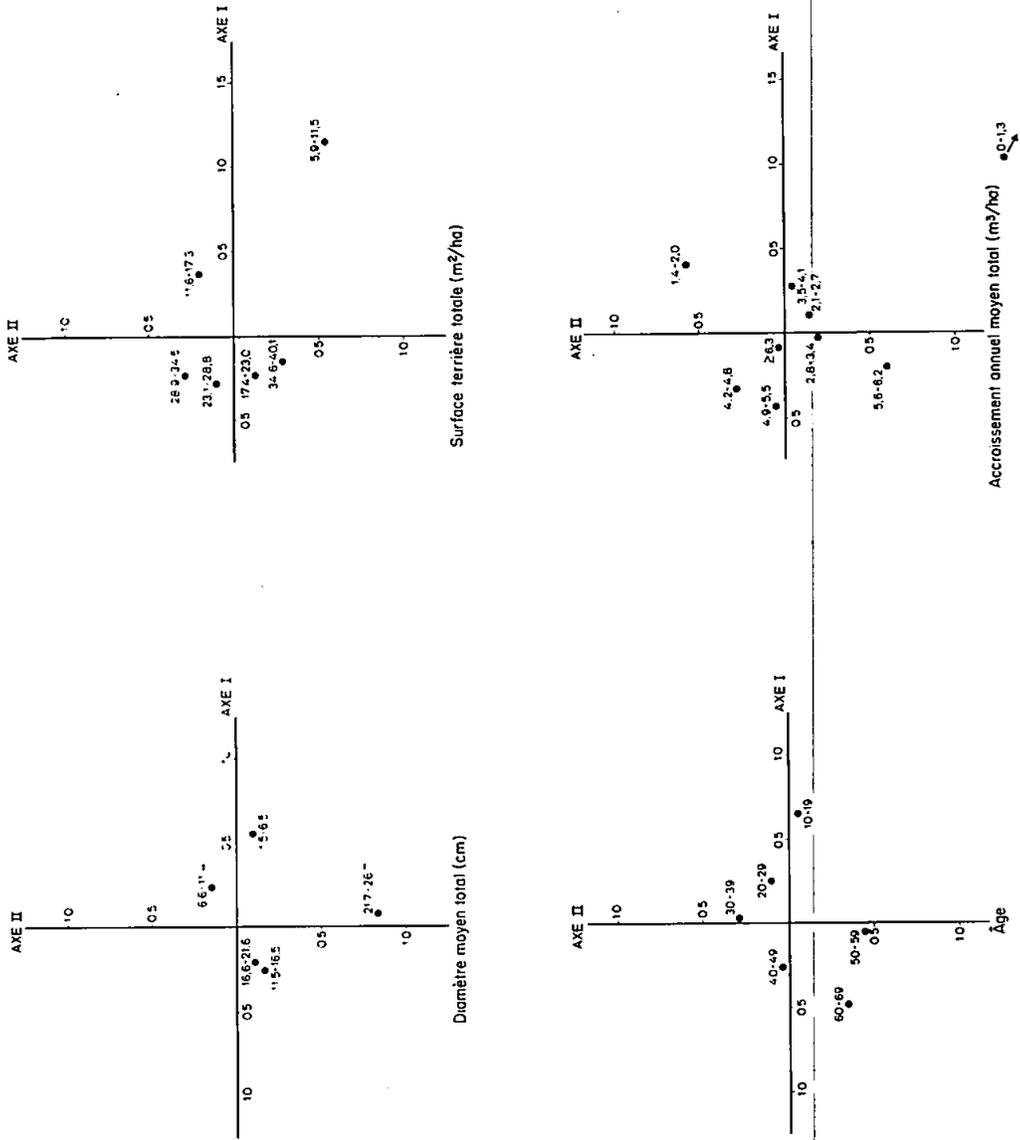


Figure 7 — Diagrammes des états des quatre variables de production

surface terrière (D_1) et surface terrière (E_0). Ces états sont expliqués respectivement à 42.45, 22.84, 28.35, 21.18, 14.60 et 14.60 pour 100 (tableau 10). Si l'on se reporte à la figure représentant les états dans le plan des axes I et II (figure 2), ce qui semble paradoxal ne l'est plus car les états correspondant à une forte production sont nettement séparés des autres.

Dans l'espace des variables de production (figure 3), les 9 états de variables du milieu ayant les plus forts pourcentages de contribution absolue expliquent le deuxième facteur dans une proportion de 50.07 pour 100. Parmi ces états, trois se situent du côté positif de l'axe II: le drainage (N_1) et les altitudes (J_1) et (J_2). Ces états sont expliqués respectivement par le facteur à 39.72, 37.78 et 31.38 pour 100. S'opposent, du côté négatif, les états altitude (J_{11}), type d'humus (O_2), drainage (N_6), formation meuble (M_1), altitude (J_5) et le sous-groupe de sol (P_{12}) qui sont expliqués respectivement par le facteur à 23.55, 32.94, 23.97, 43.15, 30.97 et 17.06 pour 100 (tableau 11).

Ainsi, le second axe rend compte de l'existence d'un groupe d'états de variables de production qui a déjà été déterminé par l'examen du premier axe et d'un autre groupe qui, d'une façon bien différente, est aussi extrême. Ce dernier groupe est caractéristique de relevés effectués dans des tremblaies âgées, où le nombre d'arbres par unité de volume marchand est faible, avec un bon accroissement annuel moyen. Parmi ces relevés il y en a un qui a déjà été signalé, sur till délavé (état mis en élément supplémentaire) avec un indice de fertilité exceptionnel (70 pieds à 50 ans). Les tremblaies de ce milieu ont une faible densité et des arbres de gros diamètres.

Tableau 10

Contributions absolues prédominantes des états
des variables de production au deuxième facteur

Variable	Etat de la variable	Signe sur l'axe II	Poids de l'état	Pourcentage de contribution	
				absolue	relative
Accroissement annuel moyen (P) (G_1)	20 - 29	+	99	7.55	38.38
Accroissement annuel moyen (E) (F_1)	20 - 29	+	63	6.22	31.73
Age (A_3)	30 - 39	+	162	4.23	29.95
Surface terrière (P) (E_1)	26 - 50	+	117	3.99	18.39
Age (A_5)	50 - 59	-	105	7.96	42.45
Accroissement annuel moyen (P) (G_0)	0 - 19	-	36	7.43	28.35
Accroissement annuel moyen (F) (F_0)	0 - 19	-	9	5.91	21.18
Arbres par unité vol. marchand (H_1)	6 - 10	-	35	4.30	22.84
Surface terrière (E) (D_1)	26 - 50	-	45	4.10	14.60
Surface terrière (P) (E_0)	0 - 25	-	45	4.10	14.60

Tableau 11

Contributions absolues prédominantes des états
des variables du milieu au deuxième facteur

Variable	Etat de la variable	Signe sur l'axe II	Poids de l'état	Pourcentage de contribution	
				absolue	relative
Drainage (N_1)	1	+	99	6.48	39.72
Altitude (J_1)	400	+	18	4.45	37.78
Altitude (J_2)	600	+	135	4.01	31.38
Altitude (J_{11})	1 800	-	26	6.92	23.55
Type d'humus (O_2)	mor hydrique	-	45	6.71	32.94
Drainage (N_6)	6	-	36	6.25	23.97
For. meuble (M_1)	moraine de fond	-	216	6.14	43.15
Altitude (J_5)	900	-	163	4.75	30.97
Sous-gr. de sol (P_{12})	humisol terrique	-	18	4.36	17.06

Si du côté négatif du deuxième axe se trouvent des états de variables de production caractéristiques de tremblaies très productives, du côté positif se rassemblent les états descriptifs de tremblaies à production moyenne. Cependant, l'étude des variables du milieu apporte beaucoup plus d'information sur le deuxième facteur.

Les états de la variable drainage s'ordonnent parfaitement sur le deuxième axe, l'état 1 (N_1) étant du côté positif et l'état 6 (N_6) du côté négatif (figure 3 et tableau 12). Par ailleurs, on remarque que les 2 premiers facteurs expliquent une large part de l'inertie des états de drainage. Les types d'humus s'ordonnent également sur le deuxième facteur (tableau 13). Les mulls s'opposent aux mors et moders, mais le drainage paraît être plus important que le type d'humus puisque l'ordination des humus est fonction surtout de l'humidité. Comme l'on pouvait s'y attendre, l'état mull est proche des brunisols et les états mor et moder sont proches des podzols (figures 3 et 7). De plus, mor et moder ont des coordonnées négatives sur l'axe II comme tous les podzols (sauf les podzols humo-ferriques minimaux). L'intérêt de cette dernière observation est de faire apparaître une certaine redondance des notations conjointes du type de sol et du type d'humus.

Si le premier axe rassemble dans sa partie positive les régosols orthiques, les gleysols humiques régosoliques et les humisols terriques, le deuxième axe oppose les régosols aux gleysols et humisols (tableau 14). Ainsi, le deuxième facteur traduit les milieux échantillonés, de types d'humus et de types de sol entre les milieux échantillonés.

Tableau 12

Une variable corrélée avec le deuxième facteur : le drainage

Classe de drainage	Coordonnées sur le deuxième facteur	Corrélation factorielle	Contribution relative cumulée 1 ^{er} et 2 ^e facteurs	
1 (<i>N</i> ₁)	.46	.63		.47
2 (<i>N</i> ₂)	.07	.26		.39
3 (<i>N</i> ₃)	-.16	-.34		.15
4 (<i>N</i> ₄)	-.21	-.27		.14
5 (<i>N</i> ₅)	-.40	-.25		.10
6 (<i>N</i> ₆)	-.76	-.49		.68

Tableau 13

Les types d'humus et le deuxième facteur

Type d'humus	coordonnées sur l'axe II
Mull non hydrique (<i>O</i> ₆)	.36
Moder mulloïde non hydrique (<i>O</i> ₄)	.19
Mor non hydrique (<i>O</i> ₁)	.03
Moder non hydrique (<i>O</i> ₃)	-.11
Moder hydrique (<i>O</i> ₅)	-.32
Mor hydrique (<i>O</i> ₂)	-.70

Tableau 14

Les types de sols

Type de sol (C.C.P.)	coordonnées		
	axe I	axe II	axe III
Régosols orthiques (<i>P</i> ₁₀)	.76	.49	-.94
Gleysols humiques regosoliques	.25	-.51	-.19
Humisols terriques (<i>P</i> ₁₂) (<i>P</i> ₁₁)	1.26	-.90	.57

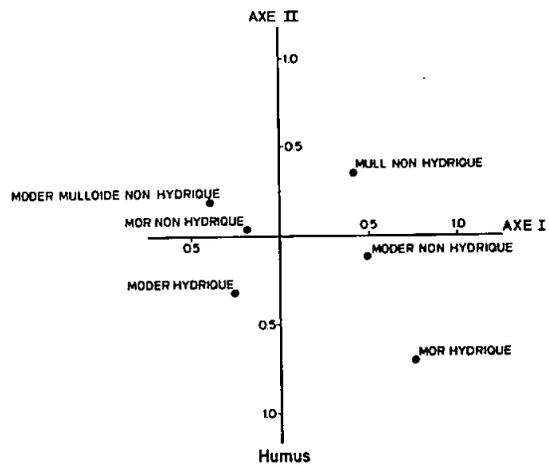
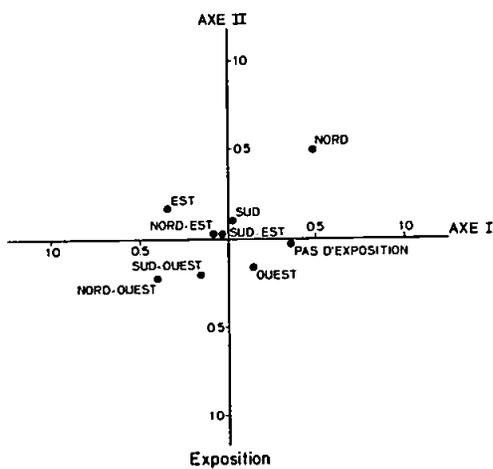
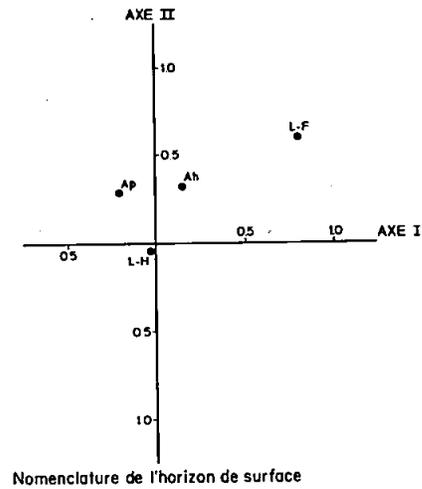
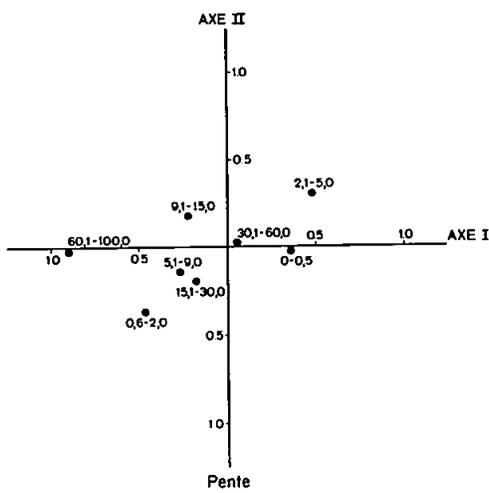


Figure 8 — Diagrammes des états de quatre variables du milieu

En ce qui concerne la variable altitude, certains états sont largement expliqués par les 2 premiers facteurs. Deux oppositions sont mises en évidence par l'analyse factorielle. L'altitude comprise entre 1 100 et 1 300 pieds est opposée à celles comprises entre 1 000 à 1 100 pieds et 1 500 à 1 600 pieds. La deuxième opposition est l'altitude 400 à 700 pieds par rapport à l'altitude comprise entre 900 et 1 000 pieds (tableaux 11 et 17).

Ces oppositions paraissent délicates à interpréter. L'analyse souligne seulement le fait que les milieux les moins productifs ont été échantillonnés entre 1 100 et 1 300 pieds et entre 400 et 700 pieds.

4.4.3 LE TROISIEME FACTEUR

Dans l'espace des variables du milieu (figure 4), le troisième facteur est expliqué à 64.78 pour 100 par les 11 états de variables de production ayant les plus forts pourcentages de contribution absolue au facteur. Se rassemblent du côté positif de l'axe III, 2 types d'états qui ont déjà été définis dans l'étude du premier facteur: ceux qui traduisent une production moyenne et ceux qui indiquent une faible production. Le premier type se compose de deux états accroissement annuel moyen (F_5 et G_4) et de l'état surface terrière (D_4). Ces états sont expliqués respectivement à 24.81, 26.34 et 20.46 pour 100 par le facteur. Le second type est formé de l'état arbres par unité de volume marchand (H_5), des états surface terrière (E_0 et D_1) et de l'état diamètre moyen (B_0). Le facteur explique ces états dans une proportion de 43.31, 13.93,

Tableau 15

Contributions absolues prédominantes des états des variables de production au troisième facteur.

Variable	Etat de la variable	Signe sur l'axe	Poids de l'état	Pourcentage de contribution	
				absolue	relative
Arbres par unité de volume marchand.	26-30	+	81	9.21	43.31
Accroissement annuel moyen (E)	60-69	+	144	6.30	24.81
Surface terrière (P)	0-25	+	45	5.07	13.93
Surface terrière (E)	26-50	+	45	5.07	13.93
Surface terrière (E)	101-125	+	161	4.95	26.34
Accroissement annuel moyen (P)	50-59	+	116	4.87	20.46
Diamètre à hauteur de poitrine (E)	0.6-2.5	+	18	4.06	20.08
Accroissement annuel moyen (P)	30-39	-	196	11.12	51.51
Indice de fertilité	70	-	35	5.24	20.45
Surface terrière (E)	51-75	-	198	4.46	19.09
Surface terrière (P)	26-50	-	117	4.43	15.74

Tableau 16

Contributions absolues prédominantes des états des variables du milieu au troisième facteur.

Variable	Etat de la variable	Signe sur l'axe	Poids de l'état	Pourcentage de contribution	
				absolue	relative
Sous-groupe de sol Nomenclature du premier horizon Type d'humus	Brunisol sombrique orthique	+	81	8.63	51.81
	Ah	+	72	7.22	43.57
	Mull non hydrique	+	54	5.82	31.13
Sous-groupe de sol Altitude Nomenclature du premier horizon	Régosol orthique	-	18	6.23	31.15
	600	-	135	4.71	28.46
	L-F	-	9	4.61	26.01

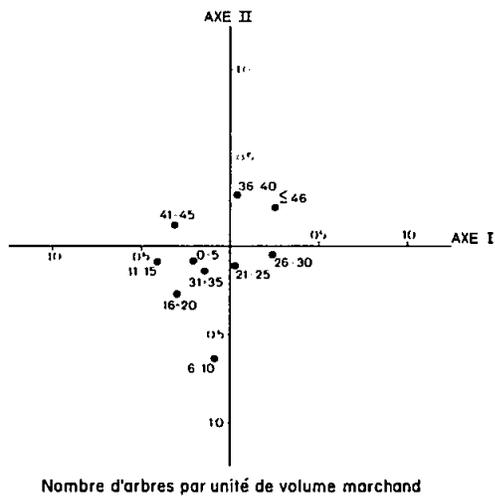
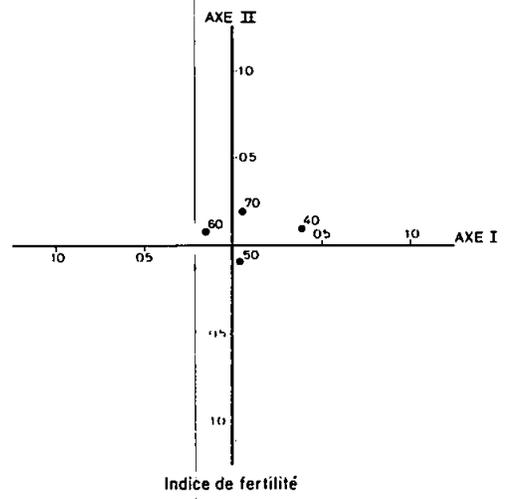
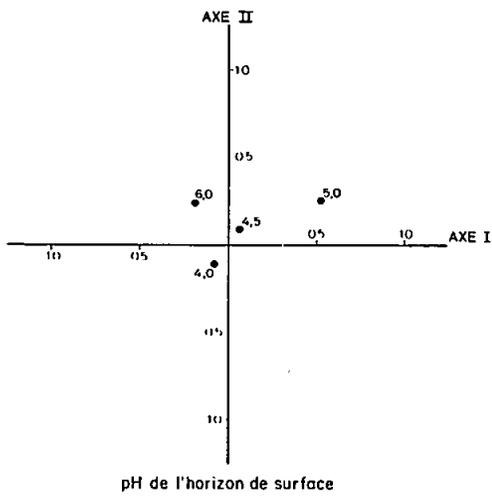


Figure 9 – Diagrammes des états de trois variables du milieu et de production

13.93 et 20.08 pour 100 (tableau 15). On retrouve du côté négatif de l'axe 4 principaux états dont l'un, l'indice de fertilité (70 pieds à 50 ans), est caractéristiques de tremblaies très productives. Les 3 autres états dénotent que certains relevés ont été effectués dans des milieux beaucoup moins productifs: accroissement annuel moyen (G_2), surface terrière (D_2) et surface terrière (E_1). Ces 4 états sont expliqués respectivement par le facteur dans une proportion de 20.45, 51.51, 19.09 et 15.74 pour cent.

Dans l'espace des variables de production (figure 5), les 6 principaux états de variables du milieu au troisième facteur sont, du côté positif de l'axe III: le sous-groupe de sol (P_6), la nomenclature du premier horizon (Q_3) et le type d'humus (O_6); du côté négatif de l'axe: le sous-groupe de sol (P_{10}), l'altitude (A_2) et la nomenclature du premier horizon (Q_1). Ces 6 états sont expliqués respectivement par le facteur à 51.81, 43.57, 31.13, 31.15, 28.46 et 26.01 pour 100 (tableau 16). D'autre part, les états expliquent le facteur dans une proportion de 37.22 pour 100.

Grossièrement, cet axe semble traduire la potentialité en matière ligneuse des milieux étudiés puisque les états de la variable indice de fertilité s'ordonnent sur cet axe, du côté positif (état 40 pieds) au côté négatif (état 70 pieds) (tableau 18). Le pH présente aussi un gradient le long de l'axe III. L'indice de fertilité paraît plus élevé dans les milieux où le premier horizon est acide (tableaux 18 et 19). De plus, le troisième axe oppose les états de drainage 1, 2 et 6 aux états 3, 4 et 5. Les coordonnées sur l'axe III des états

Tableau 17

Une variable expliquée par les deux premiers facteurs: l'altitude

axe	classe d'altitude	signe sur l'axe	poids	Pourcentage de contribution	
				absolue	relative
1	1 300	+	54	11.56	66.63
	1 100	+	36	4.19	45.70
	1 000	-	63	3.61	36.10
	1 500	-	45	3.44	25.04
2	400	+	18	4.45	37.78
	600	+	135	4.01	31.38
	900	-	163	4.75	30.97

Tableau 18

Une variable liée au troisième facteur: l'indice de fertilité

Classe d'indice de fertilité	coordonnées axe 3
40	.21
50	.06
60	- .05
70	- .62

Tableau 19

Une variable liée aux deuxième et troisième facteurs: le pH

classe de pH	coordonnées	
	axe 2	axe 3
4	- .10	- .06
4.5	- .09	- .01
5	.25	.42
6	.24	.31

4 et 5 du drainage ont sensiblement la même valeur que celles des états 60 à 70 pieds de la variable indice de fertilité (tableaux 12 et 18). Les types de sol humisol terrique et brunisol sombrique orthique s'opposent aux autres types et sont proches, d'après la valeur de leurs coordonnées sur l'axe III, des états qui décrivent une faible production (tableaux 14, 15, 16 et 18).

Le troisième axe semble ainsi isoler les relevés où le peuplier faux-tremble colonise depuis peu d'anciennes cultures sur brunisol sombrique ou encore des milieux mal drainés à humisol terrique.

4.4.4 DISCUSSION DES RESULTATS

L'analyse factorielle des correspondances paraît rendre compte des variations essentielles des milieux étudiés et de leur production. Il se dégage de cette analyse que les tremblaies ont un développement meilleur sur les podzols à drainage imparfait et évoluant sur des dépôts morainiques. Les tremblaies sur brunisols semblent les moins productives.

Par ailleurs, une variable comme la pente n'a pu être étudiée parce que les classes de pente ont une trop faible amplitude. La variable exposition a le comportement attendu: sa distribution est désordonnée (figure 8). Les variables décrivant la production semblent *a posteriori* quelque peu redondantes. Un regroupement de certains états des variables aurait sans doute facilité l'interprétation des facteurs.

Quelques aspects de la dynamique des tremblaies apparaissent grâce à l'analyse factorielle des correspondances, bien que les données

utilisées ici n'ont pas été recueillies en vue d'une telle étude. Aussi, les conclusions concernant cette dynamique devront-elles être considérées comme des hypothèses appelées à être confirmées ou infirmées par des travaux ultérieurs.

L'analyse factorielle permet non seulement de reconnaître certaines variables limitatives du milieu mais aussi de préciser le seuil à partir duquel ces variables jouent sur les peuplements de tremble. Ce seuil est défini par les classes-bornes. Selon un axe et pour une variable de production en particulier, celles-ci marquent le fin de la suite ordonnée croissante des états de la variable. Par exemple, elles séparent les états décrivant une production faible à moyenne, qui s'ordonnent suivant le premier axe, et les états décrivant une forte production, qui se dispersent sur le deuxième axe (figure 2).

Sur le premier axe, les états de surface terrière (E) ont des abscisses décroissantes (tableau 20) à l'exception des états (126-150 pi^2/ac) (D_5) et (151-175 pi^2/ac) (D_6). Ainsi, l'état (101-125 pi^2/ac) (D_4) est la classe-borne de la suite ordonnée des états de la variable surface terrière (E) sur le premier axe. En résumé, seront appelées classes-bornes les états suivants:

101-125 pi^2/ac	de surface terrière (P)	(E_4)
101-125 pi^2/ac	de surface terrière (E)	(D_4)
4.6-6.5 po	de diamètre moyen	(E) (B_2)
6.6-8.5 po	de diamètre moyen	(P) (C_3)
40-49 pi^3/ac	d'accroissement annuel moyen	(E) (F_3)
30-39 pi^3/ac	d'accroissement annuel moyen	(P) (G_2)
40-49 ans	d'âge	(A_4)

Tableau 20

Les variables de production. Comparaison des coordonnées sur l'axe des notations sur les peuplements entiers et partiels.

Classe de surface terrière (peuplement entier)	coordonnées sur l'axe I	classe de surface terrière (peuplement partiel)	coordonnées sur l'axe I	différence de coordonnée
26 - 50 (D_1)	1.14	0 - 25 (E_0)	1.14	0
51 - 75 (D_2)	.37	26 - 50 (E_1)	.47	.10
76 - 100 (D_3)	-.23	51 - 75 (E_2)	.00	.23
101 - 125 (D_4)	-.28	76 - 100 (E_3)	-.21	.07
126 - 150 (D_5)	-.22	101 - 125 (E_4)	-.38	-.16
151 - 175 (D_6)	-.14	125 - 150 (E_5)	-.17	-.03

Classe d'accroissement annuel moyen	coordonnées sur l'axe I - accroissement annuel moyen		différence de coordonnée
	peuplement entier	peuplement partiel	
0 - 19	1.44 (F_0)	1.11 (G_0)	.33
20 - 29	.40 (F_1)	.34 (G_1)	.06
30 - 39	.10 (F_2)	.00 (G_2)	.10
40 - 49	.02 (F_3)	.01 (G_3)	.01
50 - 59	.28 (F_4)	-.34 (G_4)	.62
60 - 69	-.33 (F_5)	-.31 (G_5)	-.02
70 - 79	-.43 (F_6)	-.57 (G_6)	.14
80 - 89	-.20 (F_7)	-.20 (G_7)	.00

Classe de diamètre moyen	coordonnées sur l'axe I - diamètre moyen		différence de coordonnée
	peuplement entier	peuplement partiel	
0 - 2.5	.54 (B_0)	-	-
2.6 - 4.5	.22 (B_1)	.31 (C_1)	.09
4.6 - 6.5	-.26 (B_2)	.05 (C_2)	.31
6.6 - 8.5	-.20 (B_3)	-.24 (C_3)	-.04
8.6 - 10.5	.06 (B_4)	-.07 (C_4)	.13

classe d'âge	coordonnées sur l'axe I
10 - 19 (A_1)	.64
20 - 29 (A_2)	.35
30 - 39 (A_3)	.03
40 - 49 (A_4)	-.25
50 - 59 (A_5)	-.03
60 - 69 (A_6)	-.47

Il est à remarquer que les états qui constituent une suite ordonnée sur le premier axe ont des contributions relatives fortes sur cet axe. Par exemple, chaque état de surface terrière (E), de l'état (26-50 pi²/ac) (D_1) à la classe-borne (101-125 pi²/ac) (D_4), voit plus de 26 pour 100 de son inertie expliquée par le premier facteur. A l'inverse, ce qui est normal, les états décrivant une plus forte production ne sont que relativement peu expliqués par le premier facteur (tableau 9) car ils sont expliqués par le second.

De plus, les états qui forment les suites ordonnées sur l'axe I ont des abscisses sur cet axe généralement positives. Plus précisément, leurs abscisses sont supérieures à -0.30 (tableau 20). Une dernière observation a trait à l'aspect du graphique plan obtenu (figure 2). Les états dont les valeurs sont positives sur le premier axe se dispersent peu suivant le second axe alors qu'ils se dispersent selon ce dernier pour les valeurs négatives sur le premier axe.

L'examen du tableau 20 permet de constater que les classes-bornes définissent le niveau à partir duquel la tremblaie entre progressivement dans la catégorie des peuplements exploitables où les tiges marchandes, c'est-à-dire de plus de 4 pouces, forment l'essentiel du peuplement. Par exemple, les états de surface terrière (D_1 et E_0) ont la même abscisse sur l'axe I (tableau 20). Dans un peuplement jeune, les arbres de moins de 4 pouces de diamètre forment la plus grande partie de la surface terrière totale. Par la suite, la part des arbres de plus de 4 pouces augmente mais reste néanmoins inférieure à celles des arbres de moins de 4 pouces. La différence de coordonnée augmente donc

(tableau 20). Enfin, au niveau de la classe-borne, la part des grosses tiges devient nettement prépondérante. Les notations concernant le peuplement entier et le peuplement partiel se confondent presque, c'est-à-dire que l'influence des tiges dont le diamètre est inférieur à 4 pouces est quasi négligeable.

Ces quelques observations permettent de conclure que le premier facteur traduit l'évolution des tremblaies jusqu'à un certain niveau de production. La subdivision 4.4.1 met en évidence les états des variables du milieu qui influencent la productivité des tremblaies échantillonnées.

Le deuxième facteur de l'analyse factorielle a déjà été interprété comme étant surtout lié au drainage et au type de sol. De plus, il fait ressortir les tremblaies à forte production. Globalement, le second facteur ordonne les états des variables de production en fonction de deux variables du milieu qui ont généralement une grande influence sur la productivité des peuplements: le drainage et le type de sol.

Quant au troisième axe, il fait ressortir la potentialité en matière ligneuse des tremblaies. Cette potentialité semble croître quand le pH du premier horizon diminue. Une autre variable limitative de la production est le drainage. La production est plus élevée dans les milieux où le drainage est soit moyen, soit imparfait, soit mauvais. Les types de sol humisol terrique et brunisol sombre orthique sont ceux dont la production en matière ligneuse est la plus faible.

Enfin, un point extrêmement important est celui du choix des relevés. Habituellement, ce choix est basé sur les connaissances et

l'expérience de celui qui effectue l'étude. Afin d'enlever une grande part de subjectivité au choix des relevés, nous suggérons, à partir de différents plans de sondage, que des études soient faites puis comparées entre elles. Nous proposons un échantillonnage basé sur la stratification des peuplements, c'est-à-dire en fonction des renseignements disponibles et relatifs au milieu, par exemple: la pente, le type de dépôt, la classification des sols, etc... Le nombre de relevés à effectuer dans chaque strate pourrait être soit proportionnel à la superficie de la strate, soit encore fixé à l'avance d'après les connaissances du milieu.

Il arrive que l'échantillonnage effectué gêne quelquefois l'interprétation des résultats, car certains états de variables sont très peu représentés. Il y a lieu ainsi d'améliorer la qualité de l'échantillonnage tel que décrit à la subdivision 2.3, par les calculs de l'entropie-
variable et de l'information mutuelle espèce-variable. Il va de soi que l'échantillonnage supplémentaire est réalisable en autant qu'il soit possible de le faire physiquement et financièrement.

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100

CHAPITRE 5

CONCLUSION

Les résultats de l'analyse factorielle des correspondances ont été interprétés du point de vue des relations entre les caractères du milieu et ceux de la production forestière de peuplements de peuplier faux-tremble. Il apparaît que ce type d'analyse est bien adapté aux données dont nous disposons et permet la découverte de certains aspects de la structure des données.

Bien que l'analyse factorielle des correspondances ait été jusqu'à présent peu ou pas utilisée en foresterie, il découle de cet essai un encouragement à utiliser cette méthode de synthèse objective pour les différentes disciplines de la foresterie.

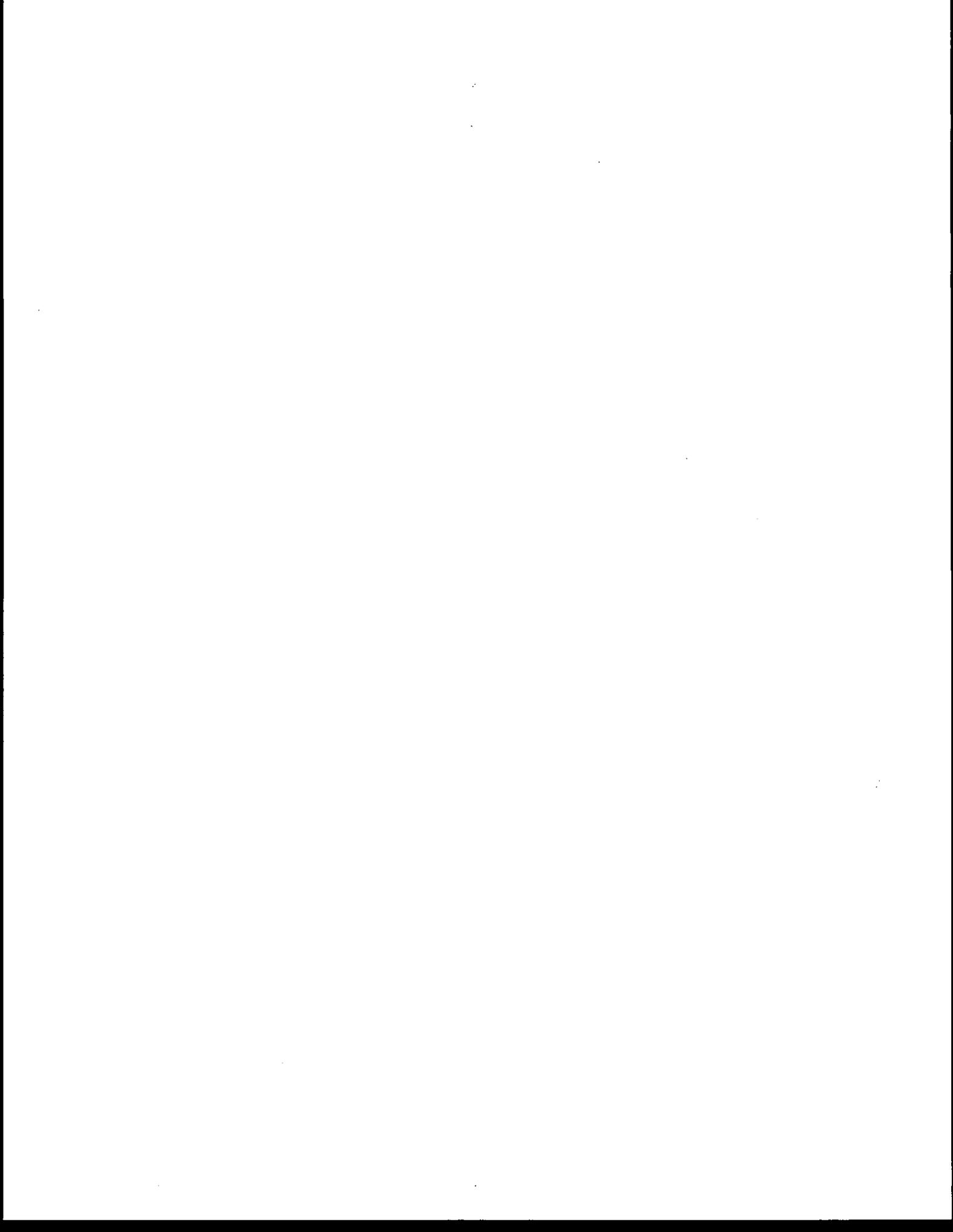
Deux remarques peuvent être dégagées au terme de cette étude. La première concerne les résultats pratiques obtenus et la seconde, l'impact possible de la méthode utilisée.

Sur le plan pratique, cette méthode montre la facilité avec laquelle on peut étudier l'action du milieu sur la production des peuplements forestiers. Cette activité des variables du milieu a surtout été mise en évidence par les deuxième et troisième facteurs. Quant au premier facteur, il traduit l'évolution des tremblaies. Les classes-bornes définissent le niveau à partir duquel la tremblaie entre progressivement dans la catégorie des peuplements exploitables où les tiges de plus de 4 pouces, tiges marchandes, forment l'essentiel du peuplement. Ces classes-bornes ont une double signification: elles définissent le niveau de production à partir duquel les variables du milieu et en particulier le drainage imposent des différenciations, et à partir duquel les grosses tiges deviennent dominantes. Il est intéressant de pouvoir mesurer le niveau de production où les variables du milieu commencent à jouer, de reconnaître ces variables et de déterminer à quel stade de leur développement les peuplements y deviennent sensibles.

Une étude semblable portant sur un ensemble de places-échantillons du même âge, à plus ou moins 5 ans près, devrait définir encore mieux les caractères du milieu qui influencent la productivité des peuplements forestiers.

Le pouvoir objectif de synthèse de l'analyse factorielle des correspondances et la grande capacité des ordinateurs d'aujourd'hui permettent d'étudier simultanément les trois principaux types de variables liés aux peuplements forestiers: les variables floristiques (négligées dans ce cas-ci), les variables du milieu et les variables de production. Il y a là une certaine possibilité de prévoir l'évolution des peuplements et d'ainsi mieux orienter les décisions des aménagistes et des sylviculteurs.

L'analyse multidimensionnelle devient de plus en plus nécessaire aux écologistes du Québec. Elle permet d'accélérer leurs travaux dans la recherche directe des liaisons milieu-végétation. Ils procèdent d'abord par la recherche des relations sociales entre les espèces et les résultats obtenus sont ensuite mis en relation avec les variables du milieu. Par cette étude, nous leur proposons une méthode rapide et globale de recherche directe des relations entre les observations floristiques, les observations écologiques et la production.



BIBLIOGRAPHIE

- BEALS, E.W., 1973. *Ordination: mathematical elegance and ecological naïveté*. J. Ecol. 61 (1): 23-35.
- BENZÉCRI, J.P., et al., 1973. *L'analyse des données: L'analyse factorielle des correspondances*. Tome 2. Dunod, Paris, 619 p.
- BLOUIN, J.-L., 1964. *Etude des tremblais du Bas-St-Laurent*. Fac. For. et Géod., univ. Laval, 130 p. Thèse non publiée.
- BONNET, L. et J. CAPBLANCO, 1973. *Phytoplankton et productivité primaire d'un lac d'altitude dans les Pyrénées. Analyse factorielle des correspondances appliquée aux relevés effectués dans le lac de Port-Bielh*. Ann. Limnol. 9 (3): 183-192.
- BRAUN-BLANQUET, J., 1965. *Plant sociology* (Eng. transl. by G.D. Fueller and H.S. Conard). Hafner Publishing Company, New York and London, 439 p.
- BRAY, J.R. and J.T. CURTIS, 1957. *An ordination of the repland forest communities of southern Wisconsin*. Ecol. Monogr. 27: 325-349.
- CAZES, P., P. SOLETY et Y. VUILLAUME, 1970. *Exemple de traitement statistique de données hydrochimiques*. Extrait du Bull. du B.R.G.M., 2^e série, section III, n^o 4, 75-90.
- CLASSIFICATION CANADIENNE DE PÉDOLOGIE, 1972. *Classification canadienne des sols*. Canada, min. de l'Agri., 270 p.
- CORDIER, B., 1965. *Analyse factorielle des correspondances*. Fac. des Sciences de Rennes, France, 65 p.

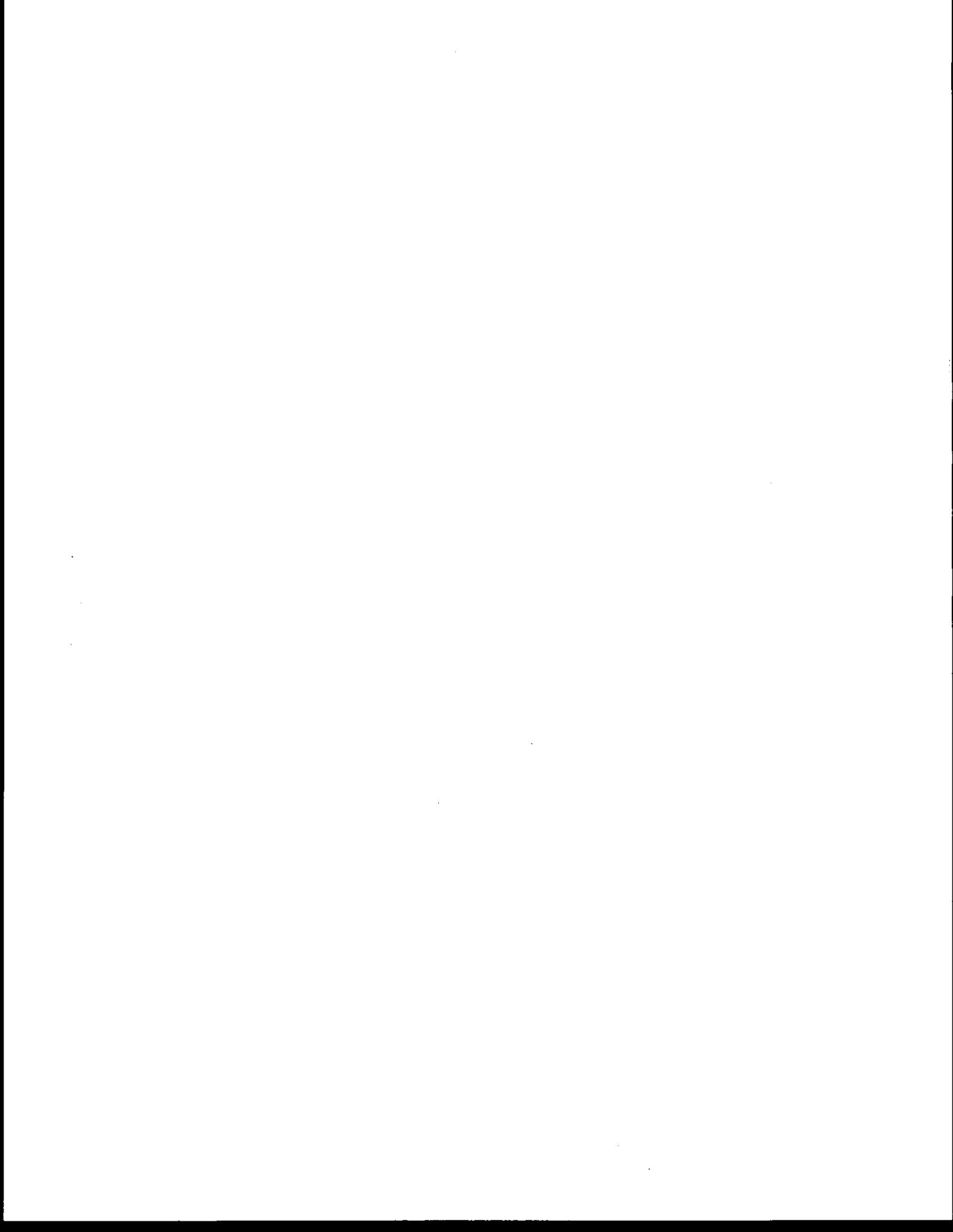
- DAGET, PH., J.-L. GUILLERM et M. GODRON, 1970. *Profils écologiques et information mutuelle entre espèces et facteurs écologiques. Application à l'étude d'un transect dans la vallée de Liptov (Tchécoslovaquie)*. C.E.P.E. (C.N.R.S.), Montpellier, France, 32 p.
- DAGNÉLIE, P., 1960. *Contribution à l'étude des communautés végétales par l'analyse factorielle*. Bull. Serv. Carte phytogéogr., Sér. B 5, 7-71 et 93-195.
- DAGNÉLIE, P., 1961. *L'application de l'analyse multivariante à l'étude des communautés végétales*. Bull. Inst. Intern. Stat. 39, 265-275.
- DAGNÉLIE, P., 1965. *L'étude des communautés végétales par l'analyse statistique des liaisons entre les espèces et les variables écologiques: un exemple*. Biometrics, 890-907.
- DECOURT, N., M. GODRON, F. ROMANE et R. TOMASSONE, 1969. *Comparaisons de diverses méthodes d'interprétation statistique de liaison entre le milieu et la production du pin sylvestre en Sologne*. Ann. Sci. forest. 26 (4): 413-443.
- ESCOUFIER, Y., 1972. *Analyse des données*. Fac. Sci. univ. Montréal, 124 p.
- FRESCO, L.F.M., 1969. *Factor analysis as a method in synecological research*. Acta Bot. Neerl. 18 (3): 477-482.
- FRESCO, L.F.M., 1971. *Compound analysis: a preliminary report on a new numerical approach in phytosociology*. Acta Bot. Neerl. 20 (6): 589-599.
- GAGNON, G. et M.M. GRANDTNER, 1973. *Etude éco-dynamique des tremblais de la section Laurentienne*. Serv. de la rech. Dir. gén. des Forêts, min. des Ter. et For. du Québec. Mém. n° 14, 131 p.
- GAUCH, H.G. and R.H. WHITTAKER, 1971. *Comparison of ordination techniques*. Ecology, 53 (5): 868-875.
- GODRON, M., 1966. *Une application de la théorie de l'information à l'étude de l'homogénéité et de la structure de la végétation*. C.E.P.E. (C.N.R.S.), Montpellier, France, 67 p.
- GODRON, M., 1968. *Quelques applications de la notion de fréquence en écologie végétale*. Oecol. Plant., Gauthier-Villars, 3, 185-212.
- GODRON, M., 1971. *Essai sur une approche probabiliste de l'écologie des végétaux*. Univ. Sci. et Tech. du Languedoc, Montpellier, France, 247 p. Thèse de doctorat.
- GOUNOT, M., 1969. *Méthodes d'étude quantitative de la végétation*. Masson et Cie, Paris, France, 314 p.

- GRANDTNER, M.M., 1960. *La forêt de Beauséjour, comté de Lévis, Québec*.
Fonds rech. for. univ. Laval, Contr. n^o 7, 62 p.
- GREIG-SMITH, P., 1964. *Quantitative plant ecology*. Butterworths, London,
Second edition, 256 p.
- GROUPE D'ÉTUDE SUR L'ÉCOLOGIE APPLIQUÉE À L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE, 1970.
Code pour les relevés d'inventaires écologiques du territoire.
Serv. de la rech., Dir. gén. des For., min. des Ter. et For.
du Québec. Edition 1, tome 1, 132 p.
- GROUPE D'ÉTUDE SUR L'ÉCOLOGIE APPLIQUÉE À L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE, 1974.
Code pour les relevés d'inventaires écologiques du territoire.
Serv. de la rech., Dir. gén. des For., min. des Ter. et For.
du Québec. Edition 2, guide n^o 1, 254 p.
- GUILLERM, J.-L., 1971. *Calcul de l'information fournie par un profil éco-
logique et valeur indicatrice des espèces*. *Oecol. Plant.*,
Gauthier-Villars, 6, 209-225.
- GUINOCHET, M., 1968. *Continu ou discontinu en phytosociologie*. *The
Botanical Review*, 34 (3): 273-290.
- HARMAN, H.H., 1960. *Modern factor analysis*. The Univ. of Chicago Press.
471 p.
- HILL, M.O., 1973. *Reciprocal averaging: an eigenvector method of ordi-
nation*. *J. Ecol.*, 61: 237-249.
- IVIMEY-COOK, R.B. and M.C.F. PROCTOR, 1967. *Factor analysis of data from
an East Devon heath: a comparison of principal component and
rotated solutions*. *J. Ecol.*, 55, 405-413.
- IVIMEY-COOK, R.B., M.G.F. PROCTOR and D.L. WIGSTON, 1969. *On the problem
of the "R/Q" terminology in multivariate analysis of biological
data*. *J. Ecol.* 57, 673-676.
- JURDANT, M., J.-C. DIONNE, V. GÉRARDIN et J. BEAUBIEN, 1969. *Inventaire
biophysique de la région Mistassini-Roberval-Hébertville
(Québec)*. Min. des Pêches et For. du Can., Rapp. d'inf.
Q-X-12, 160 p.
- LACOSTE, A. et M. ROUX, 1972. *L'analyse multidimensionnelle en phytosocio-
logie et en écologie. II - L'analyse des données écologiques
et l'analyse globale*. *Oecol. Plant.* 7 (2): 125-146.
- LADOUCEUR, G., 1971. *Définitions de groupements végétaux à l'aide de
l'ordinateur*. Fonds rech. for. univ. Laval, Contr. n^o 15, 38 p.
- LAFOND, A. et G. LADOUCEUR, 1968. *Les Forêts, les Climax et les Régions
biogéographiques du bassin de la rivière Outaouais, Québec*.
Nat. Can. 95: 317-366.

- LEBART, L. et J.-P. FÉNELON, 1973. *Statistique et Informatique appliquées*. Dunod, Paris, 457 p.
- ORLOCI, L., 1966. *Geometric models in ecology. I - The theory and application of some ordination methods*. J. Ecol. 54 (1): 193-215.
- ORLOCI, L., 1967. *An agglomerative method for classification of plant communities*. J. Ecol. 55, 193-205.
- ROMANE, F., 1972a. *Quelques aspects de l'analyse multivariable des données phyto-écologiques*. Investigacion Pesquera, 36 (1): 131-139.
- ROMANE, F., 1972b. *Application à la phytoécologie de quelques méthodes d'analyse multivariable. Discussion sur des exemples pris dans les Basses Cévennes et les Garrigues occidentales*. Univ. Sc. et Tech. du Languedoc, Montpellier, France, 110 p. Thèse de docteur-ingénieur.
- ROUX, G. et M. ROUX, 1967. *À propos de quelques méthodes de classification en phytosociologie*. Rev. Statis. appliquées, 15 (2): 59-72.
- ROWE, J.S., 1959. *Forest regions of Canada*. Dept. of North. Aff. and Nat. Ress., Canada, For. Br., Bull. 123, 71 p.
- TIMBAL, J., 1973. *La végétation de la forêt de Sainte-Hélène (Vosges)*. Vegetatio 27, 267-321.
- TOMASSONE, R., 1965. *L'analyse en composantes principales*. Inst. nat. de rech. agron., Versailles, France, note sci. n° 1, 11 p.
- TORRENS-IBERN, J., 1972. *Modèles et Méthodes de l'analyse factorielle*. Dunod, Paris, 202 p.
- VAN DER MAAREL, E., 1969. *On the use of ordination models in phytosociology*. Vegetatio, 19: 26-46.
- VEER, G., 1967. *Description sommaire des tremblaies de la région B-7*. Étude préparée pour le min. des Ter. et For. de la P.Q., 49 p. Non publié.
- WILLIAMS, W.T., and J.M. LAMBERT, 1959. *Multivariate methods in plant ecology. I - Associate-analysis in plant communities*. J. Ecol., 47, 83-101.
- WILLIAMS, W.T. and J.M. LAMBERT, 1960. *Multivariate methods in plant ecology. II - The use of electronic digital computer for association-analysis*. J. Ecol. 48, 689-710.
- WILLIAMS, W.T. and J.M. LAMBERT, 1961. *Multivariate methods in plant ecology. III - Inverse association-analysis*. J. Ecol. 49, 717-723.

WILLIAMS, W.T. and J.M. LAMBERT, 1962. *Multivariate methods in plant ecology. IV - Nodal analysis.* J. Ecol. 50, 775-802.

WILLIAMS, W.T., J.M. LAMBERT and G.N. LANCE, 1966. *Multivariate methods in plant ecology. V - Similarity analysis and information-analysis.* J. Ecol. 54: 427-445.



ANNEXE I

DEFINITION DES ETATS DES VARIABLES UTILISEES DANS L'ETUDE

1. VARIABLES DECRIVANT LA PRODUCTION FORESTIERE (SYMBOLISEES PAR LE SIGNE ▲ SUR LES FIGURES 2, 4, 7 ET 9)

Age du peuplement, exprimé en années

A ₁	=	10 - 19
A ₂	=	20 - 29
A ₃	=	30 - 39
A ₄	=	40 - 49
A ₅	=	50 - 59
A ₆	=	60 - 69

Diamètre moyen du peuplement entier, exprimé en pouces *

B ₀	=	0.6 - 2.5
B ₁	=	2.6 - 4.5
B ₂	=	4.6 - 6.5
B ₃	=	6.6 - 8.5
B ₄	=	8.6 - 10.5

Diamètre moyen du peuplement partiel (ou marchand), exprimé en pouces

C ₁	=	2.6 - 4.5
C ₂	=	4.6 - 6.5
C ₃	=	6.6 - 8.5
C ₄	=	8.6 - 10.5

* voir note sur les unités de mesure, p. iv.

Surface terrière du peuplement entier, exprimée en pieds carrés par acre

D ₁	=	26 - 50
D ₂	=	51 - 75
D ₃	=	76 - 100
D ₄	=	101 - 125
D ₅	=	126 - 150
D ₆	=	151 - 175

Surface terrière du peuplement partiel (ou marchand) en pieds carrés par acre

E ₀	=	0 - 25
E ₁	=	26 - 50
E ₂	=	51 - 75
E ₃	=	76 - 101
E ₄	=	101 - 125
E ₅	=	126 - 150

Accroissement annuel moyen du peuplement entier, exprimé en pieds cubes par acre

F ₀	=	0 - 19
F ₁	=	20 - 29
F ₂	=	30 - 39
F ₃	=	40 - 49
F ₄	=	50 - 59
F ₅	=	60 - 69
F ₆	=	70 - 79
F ₇	=	80 - 89
F ₈	=	90 et plus

Accroissement annuel moyen du peuplement partiel (ou marchand) exprimé en pieds cubes par acre

G ₀	=	0 - 19	G ₅	=	60 - 69
G ₁	=	20 - 29	G ₆	=	70 - 79
G ₂	=	30 - 39	G ₇	=	80 - 89
G ₃	=	40 - 49	G ₈	=	90 - 99
G ₄	=	50 - 59	G ₉	=	100 et plus

Nombre d'arbres par unité de volume marchand (1 unité = 100 pi³)

H ₀	=	1 - 5	H ₅	=	26 - 30
H ₁	=	6 - 10	H ₆	=	31 - 35
H ₂	=	11 - 15	H ₇	=	36 - 40
H ₃	=	16 - 20	H ₈	=	41 - 45
H ₄	=	21 - 25	H ₉	=	46 et plus

Indice de fertilité à 50 ans, exprimé en pieds

I₁ = 40 - 49
I₂ = 50 - 59
I₃ = 60 - 69
I₄ = 70 et plus

2. VARIABLES DECRIVANT LE MILIEU (SYMBOLISEES PAR LE SIGNE ● SUR LES FIGURES 3, 5, 6, 8 ET 9)

Altitude, exprimée en pieds

J ₁ = 400 - 599	J ₇ = 1100 - 1199
J ₂ = 600 - 699	J ₈ = 1200 - 1399
J ₃ = 700 - 799	J ₉ = 1400 - 1499
J ₄ = 800 - 899	J ₁₀ = 1500 - 1599
J ₅ = 900 - 999	J ₁₁ = 1600 et plus
J ₆ = 1000 - 1099	

Pente, exprimée en pourcentage

K ₁ = 0.0 - 0.5	K ₅ = 9.1 - 15.0
K ₂ = 0.6 - 2.0	K ₆ = 15.1 - 30.0
K ₃ = 2.1 - 5.0	K ₇ = 30.1 - 60.0
K ₄ = 5.1 - 9.0	K ₈ = 60.1 - 100.0

Exposition

L ₀ = Pas d'exposition	L ₅ = Sud
L ₁ = Nord	L ₆ = Sud-Ouest
L ₂ = Nord-Est	L ₇ = Ouest
L ₃ = Est	L ₈ = Nord-Ouest
L ₄ = Sud-Est	

Formation meuble

M₁ = Moraine de fond
M₂ = Moraine d'ablation
M₃ = Till délavé
M₄ = Dépôt fluvio-glaciaire
M₅ = Talus de terrasse
M₆ = Kame

Drainage

N ₁	=	Rapide
N ₂	=	Bon
N ₃	=	Modéré
N ₄	=	Imparfait
N ₅	=	Mauvais
N ₆	=	Très mauvais

Type d'humus

O ₁	=	Mor non hydrique
O ₂	=	Mor hydrique
O ₃	=	Moder non hydrique
O ₄	=	Moder mullloïde non hydrique
O ₅	=	Moder hydrique
O ₆	=	Mull non hydrique

Classification des sols (Commission canadienne de pédologie)

P ₁	=	Podzol ferro-humique orthique
P ₂	=	Podzol humo-ferrique placique
P ₃	=	Podzol humo-ferrique gleyifié
P ₄	=	Podzol humo-ferrique orthique
P ₅	=	Podzol humo-ferrique minimal
P ₆	=	Brunisol sombre orthique
P ₇	=	Brunisol dystrique gleyifié
P ₈	=	Brunisol dystrique orthique
P ₉	=	Brunisol dystrique dégradé
P ₁₀	=	Régosol orthique
P ₁₁	=	Gleysol humique régosolique
P ₁₂	=	Humisol terrique

Nomenclature du premier horizon

Q ₁	=	L - F
Q ₂	=	L - H
Q ₃	=	Ah
Q ₄	=	Ap

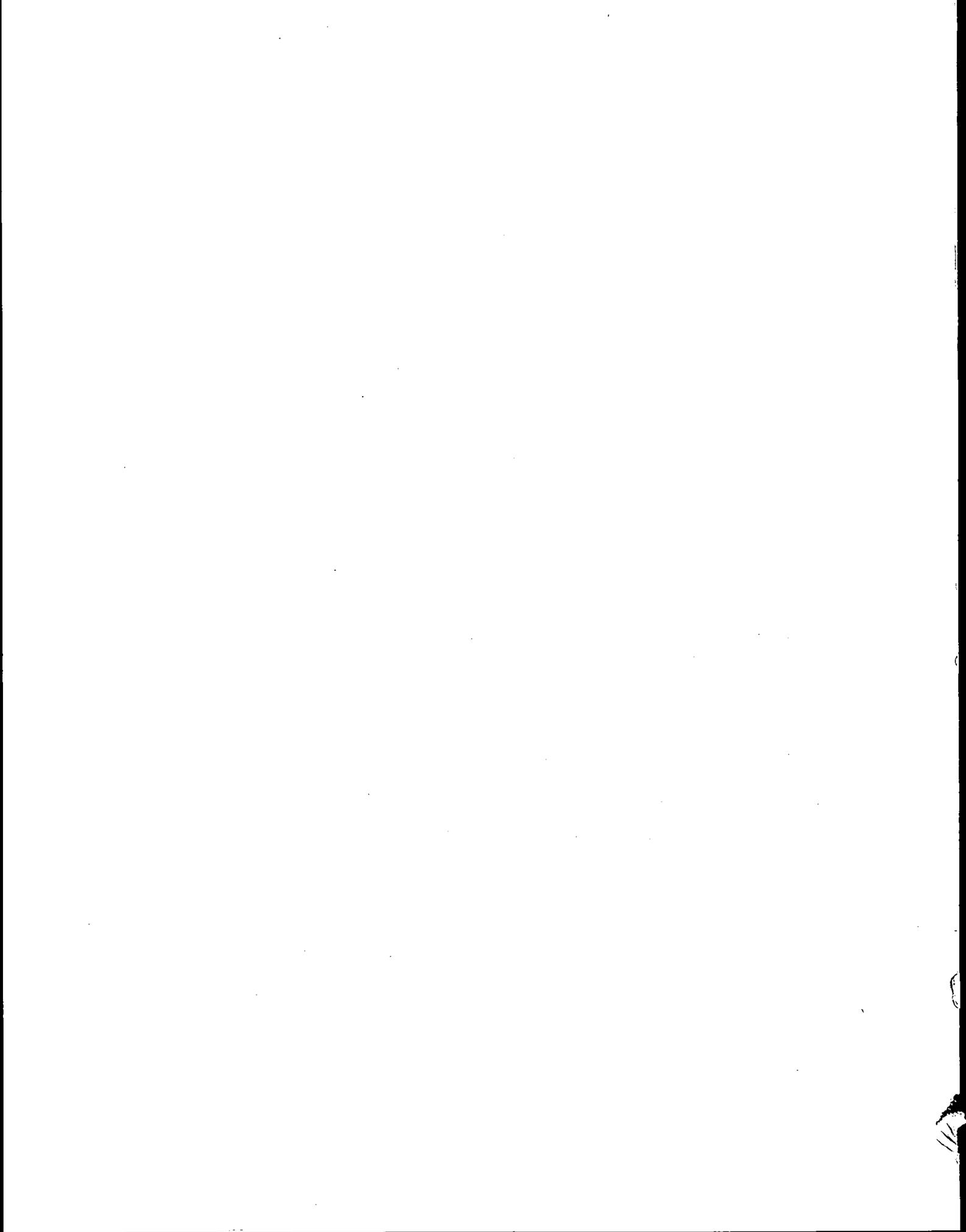
pH du premier horizon

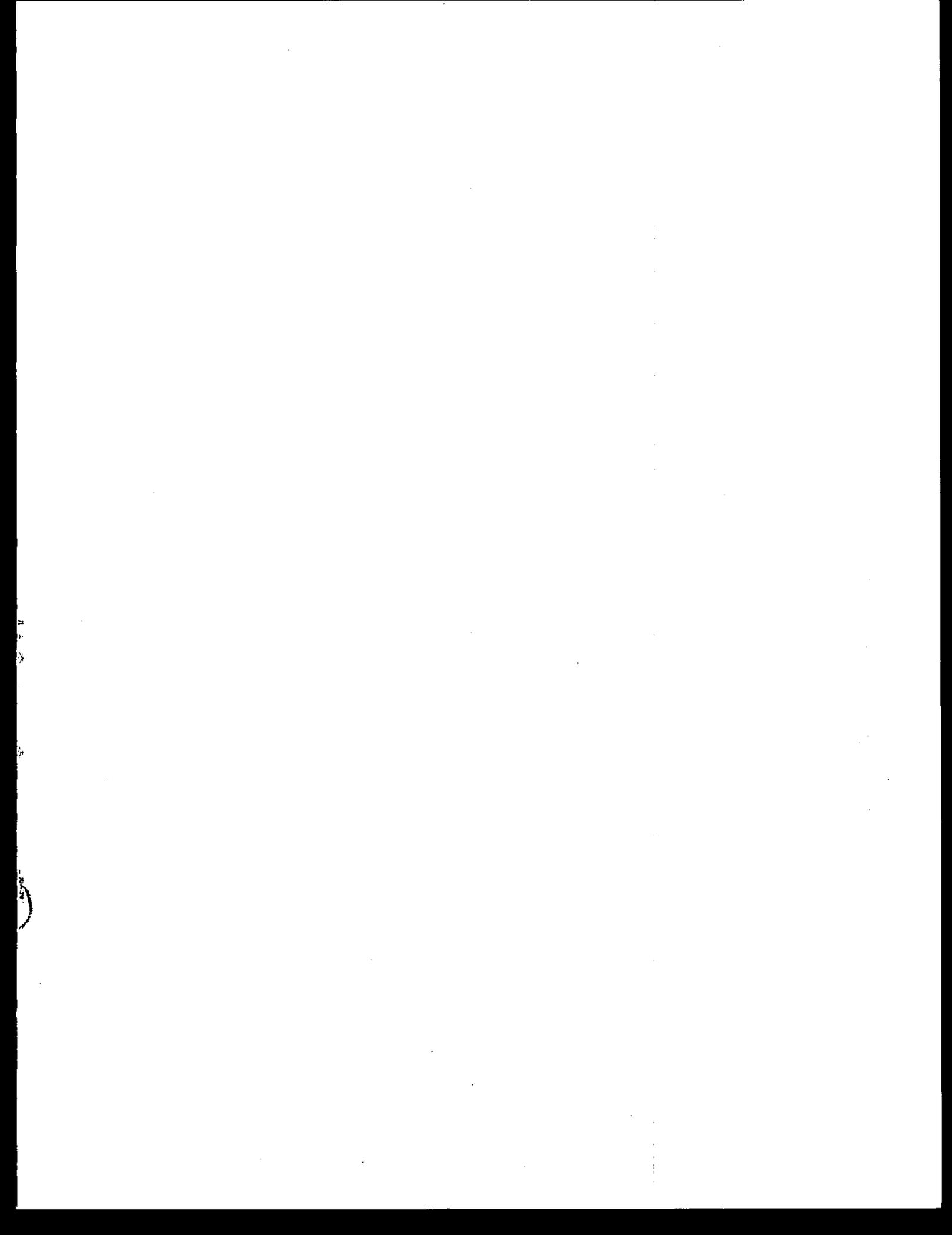
R ₁	=	4.0
R ₂	=	4.5
R ₃	=	5.0
R ₄	=	6.0

ANNEXE II

FACTEURS DE CONVERSION DES MESURES CANADIENNES
EN MESURES METRIQUES (SI ET DERIVES)

1 pied	=	0.3048 m (exact)
1 pouce	=	2.54 cm (exact)
1 mille	=	1.6093 km
1 acre	=	0.4047 ha
1 pied carré	=	0.0929 m ²
1 pouce carré	=	6.4516 cm ² (exact)
1 mille carré	=	2.5900 km ²
1 pied cube	=	0.0283 m ³
1 pied cube par acre	=	0.0700 m ³ /ha
1 pied carré par acre	=	0.2296 m ² /ha







Éditeur officiel du Québec
Imprimé au Québec