

Thèse no 4136

**Etude des phénomènes de la croissance  
en hauteur et en diamètre du sapin  
(*Abies alba* Mill.) et de l'épicéa (*Picea abies*  
Karst.) dans deux peuplements jardinés  
et une forêt vierge**

Thèse présentée

**A L'ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE  
ZURICH**

pour l'obtention  
du grade de Docteur ès sciences techniques  
par

**JEAN-PHILIPPE SCHÜTZ**

Ingénieur forestier EPF  
né le 4 juin 1939  
de Thielle-Wavre, Canton de Neuchâtel

acceptée sur proposition  
du professeur H. Leibundgut, rapporteur  
du professeur Dr. A. Kurth, corapporteur

---

1969, Bühler Buchdruck, Zürich

TABLE DES MATIERES

=====

page

AVANT-PROPOS	1
1. EXPOSE DU PROBLEME	2
2. METHODES D'ANALYSE	5
21. Choix des peuplements	5
211. Localisation	5
212. Conditions écologiques	6
213. Description des peuplements étudiés, dans leur état actuel	9
214. Evolution passée	16
22. Méthodes de mesure	21
221. Choix des tiges analysés	21
222. Mesure de la croissance en hauteur	21
223. Mesure de la croissance en diamètre	23
224. Mesures complémentaires	24
23. Méthodes d'interprétation	26
231. Courbes individuelles de la croissance et de la vitesse de croissance en hauteur	26
232. Courbes individuelles de la croissance et de la vitesse de croissance en diamètre	27
233. Détermination de la durée de compression	27
234. Détermination des classes de développement sociologique dans le peuplement de Janj	28
235. Analyse statistique	28
3. DESCRIPTION DES PHENOMENES DE LA CROISSANCE EN HAUTEUR ET EN DIAMETRE EN FONCTION DU TEMPS	30
31. Croissance en hauteur	30
311. Distinction des phases de croissance	30
312. Importance des points de référence	31
313. Caractéristiques et formes des courbes au cours des différentes phases	31
314. Courbes de hauteur particulières	33
32. Croissance en diamètre	33
4. METHODES DE COMPARAISON DE LA CROISSANCE EN HAUTEUR	35
41. Comparaison de la vitesse de croissance par tranches de hauteur	35
42. Comparaison de la forme des courbes	37

43. Etude de la hauteur finale atteinte	37
44. Etude du potentiel de croissance	38
<b>5. RESULTATS</b>	<b>39</b>
51. Variabilité des grandeurs caractéristiques de la phase de jeunesse	39
511. Durée de compression	39
512. Hauteur atteinte à la fin de la période de compression	41
513. Importance de l'intensité de compression	41
52. Variabilité des grandeurs caractéristiques de la phase adulte et répercussions sur la phase de vieillesse	45
521. La vitesse de croissance maximale	45
522. Conséquences de la vitesse de croissance maximale sur la forme des courbes	47
523. Variations du potentiel de croissance	53
53. Etude des phénomènes du vieillissement	56
531. Décélération de la croissance dans la phase de sénescence	56
532. Variabilité de la hauteur atteinte à la phase de sénescence, importante de la fertilité et des cimes	59
533. Le phénomène du gigantisme	64
54. Influence de différentes grandeurs de croissance sur une partie ou l'ensemble de la croissance en hauteur	67
541. Influence de la durée de compression	67
542. Influence de l'intensité de compression	75
55. Comparaison de la vitesse de croissance entre les essences et les peuplements	78
551. Comparaison entre les essences	78
552. Comparaison entre les peuplements	82
56. Influence du développement sociologique dans le peuplement vierge	82
57. Rapport entre la croissance en hauteur et la croissance en diamètre	86
571. Evolution du rapport hauteur au diamètre au cours de la vie des arbres	86
572. Variabilité du rapport hauteur au diamètre à différentes hauteurs	88
<b>6. CONCLUSIONS</b>	<b>89</b>
61. Importance des résultats sur la production et	

l'aménagement des futaies jardinées	89
62. Répercussions sylvicoles des résultats	95
7. RESUME	97
ZUSAMMENFASSUNG	102
SUMMARY	108
8. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	112

AVANT-PROPOS  
=====

Cette thèse n'aurait jamais vu le jour sans la collaboration de nombreuses personnes qui se sont dévouées et intéressées à mon travail. Elle a été réalisée à l'institut de sylviculture de l'EPF où j'ai eu le privilège de travailler en qualité d'assistant.

Mes remerciements vont en premier chef à M. H. Leibundgut, professeur de sylviculture, directeur de l'institut de sylviculture de l'EPF, qui suscita mon intérêt toujours grandissant pour les problèmes sylviculturaux en général et ceux de la forêt jardinée en particulier.

M. F. Fischer, privat-docent à l'EPF n'épargna ni son temps ni sa patience à me conseiller et me diriger tout au long de mes investigations.

M. F. Borel, inspecteur forestier à Neuchâtel et M. R. Neuenchwander, inspecteur forestier à Thoun, m'ont permis d'obtenir un matériel de recherches précieux autant qu'indispensable.

M. K. Pintarić, professeur de sylviculture à Sarajevo me facilita grandement la tâche, lors des relevés dans les forêts vierges de Yougoslavie. M. A. Panov, ingénieur forestier, me permit de vaincre les difficultés de la langue en m'accompagnant lors des relevés dans les forêts vierges de Janj et me fournit renseignements et conseils dans ce domaine.

Les propriétaires des forêts étudiées, la Commune de Neuchâtel, la Commune de Steffisburg, l'entreprise forestière "Gorica" de Šipovo, n'ont pas hésité à mettre à ma disposition, le magnifique champ d'essai que représentent leurs forêts. Pour leur compréhension et amabilité je leur voue mes plus chaleureux remerciements.

M. P. Schmid, docteur en mathématiques m'a aimablement conseillé dans les problèmes statistiques.

Toutes ces personnes et bien d'autres encore ont contribué pour beaucoup à la réalisation de ce travail. Qu'ils en soient ici sincèrement remerciés.

Zürich, décembre 1967

## 1. EXPOSE DU PROBLEME =====

Les phénomènes de la croissance des arbres en futaie jardinée sont encore mal connus. En futaie équienne, les différents grandeurs de croissance sont presque toujours étudiées en fonction de l'âge. En effet, que ce soit en ce qui concerne les problèmes d'aménagement, de production ou de physiologie, l'âge exerce une influence importante, voire déterminante.

La croissance des arbres en futaie jardinée se caractérise généralement par de plus ou moins longues périodes de compression ou périodes de latence, pendant lesquelles les arbres ne croissent que très lentement. Les différences considérables de durée de cette période de compression à l'intérieur d'un même peuplement rendent complètement illusoire la notion d'âge réel des différentes tiges. On a tenté d'éviter cette difficulté en étudiant la croissance en fonction d'autres variables que l'âge, mais jusqu'à présent les solutions proposées ne sont le plus souvent que des palliatifs.

La détermination de la fertilité en futaie jardinée, généralement caractérisée par le développement du rapport de la hauteur au diamètre n'est pas satisfaisante. Badoux (1961) rend attentif au fait que ce genre de représentation n'est que l'image du coefficient de sveltesse des différentes tiges. En effet vouloir représenter la croissance d'un peuplement par deux variables dépendantes de la même croissance peut être sujet à caution.

La vitesse de croissance en diamètre a été étudiée par différents auteurs (Schaeffer, 1935; François, 1938) pour déterminer l'âge d'exploitabilité des arbres et, partant, une notion de révolution pour les futaies jardinées. La vitesse de croissance en hauteur n'a jusqu'à présent fait l'objet d'aucune étude à notre connaissance.

Des relations ordonnées entre l'âge et la croissance en hauteur n'ont pu être obtenues qu'en faisant abstraction d'une partie de vie, cette partie justement où la croissance est lente, pour ne considérer que l'âge de croissance, c'est-à-dire l'âge des arbres à partir d'un moment donné (Flury, 1929; Sommer, 1962). Il s'agit là d'une simplification qui, faisant abstraction d'une partie de la croissance, conduit certes à un certain groupement

des données, mais ne peut pas rendre le phénomène de la croissance dans son ensemble.

Et pourtant l'âge exerce une influence importante à plus d'un égard sur la dynamique des peuplements jardinés. Jusqu'à présent, les comparaisons de la production des peuplements jardinés et équiennes n'ont pas abouti à des résultats satisfaisants, parce que les phénomènes de la croissance en futaie équienne se passent dans des laps de temps définis et connus, tandis que ce n'est pas le cas pour la futaie jardinée.

L'étude de la croissance en futaie jardinée revêt un intérêt tout aussi grand du point de vue biologique. Un peuplement jardiné se caractérise par rapport à un peuplement équienne par la complexité de sa structure. Les conditions de croissance peuvent être fondamentalement différentes selon les phases de vie que parcourent les arbres et selon les étages où ils se trouvent. On sait qu'une essence forestière, à côté de sa variabilité héréditaire possède également une certaine plasticité à l'égard du milieu ambiant. On ignore encore l'importance de l'action de ce milieu sur la croissance et la part qui en échoit aux facteurs endogènes et exogènes. Les peuplements jardinés, de par la complexité des facteurs du milieu, en particulier leur structure qui conditionne la répartition de la lumière, peuvent exercer un rôle défavorable ou bénéfique sur la croissance. Biolley (1923) estimait que l'effet du milieu était le facteur déterminant et que le sylviculteur par son action sur le milieu, en modelant à sa guise la structure des peuplements, pouvait exercer une influence importante sur les phénomènes de la croissance. C'est ce que nous avons tenté d'étudier dans ce travail.

Nous avons limité notre étude aux deux essences résineuses principales de futaie jardinée dans notre pays, le sapin A b i e s a l b a Mill.) et l'épicéa (P i c e s a b i e s Karst.). Nous avons porté l'accent de notre étude sur la croissance en hauteur, parce qu'elle représente mieux le phénomène de la croissance, étant moins dépendante des facteurs externes et plus facile à déterminer objectivement. La croissance en diamètre a été étudiée accessoirement et en fonction de la croissance en hauteur.

Dès lors le problème expérimental pouvait se poser comme suit:

- 1) Déterminer les phénomènes généraux de la croissance en hauteur et en diamètre.
- 2) Trouver des méthodes permettant de comparer la croissance des différents individus d'un peuplement
- 3) Rechercher l'action des facteurs exogènes et endogènes sur la croissance. En particulier l'importance de:
  - la durée de compression et l'intensité de compression
  - la vitesse de croissance
  - le développement sociologique des individus
  - la structure des peuplements
  - la grandeur des cimes
  - la fertilité



## 2. METHODES D'ANALYSE

=====

### 21. Choix des peuplements

Le terme de peuplement jardiné caractérise un genre de régime plutôt qu'une structure particulière. En fait, selon la distribution des tiges dans les plans vertical et horizontal, selon la composition et le mélange des essences ou du matériel sur pied, on peut imaginer une quantité quasi illimitée de peuplements jardinés différents. Notre choix s'est porté sur deux peuplements traités par le jardinage, l'un en conversion (Les Joux), l'autre ayant déjà perdu sa structure jardinée caractéristique (Steffisburg), et un peuplement vierge (Janj), ce dernier dans le dessein de mieux étudier les problèmes du vieillissement et de la concurrence. On a essayé de limiter le plus possible les différences climatiques et de station.

#### 211. Localisation (Cf. tab. 1)

##### Les Joux

Le peuplement étudié se trouve dans le complexe forestier de la Grande Joux, appartenant à la Commune de Neuchâtel et situé sur le territoire de la Commune des Ponts-de-Martel, sur la troisième chaîne du Jura.

##### Steffisburg

Le deuxième peuplement se trouve dans les forêts de la commune des habitants de Steffisburg, dans la série d'aménagement du Neuenbann. Il est situé sur le territoire de la commune de Oberlangenegg, aux confins de l'Emmental.

##### Janj

Le peuplement vierge de Janj se situe dans la république yougoslave de Bosnie-Herzégovine à environ 40 km au sud de Jajce. Il se trouve dans le complexe forestier de Gornij Janj exploité et géré par l'entreprise forestière "Preduzeće Gorica" de Šipovo. La division étudiée est une ancienne réserve forestière intégrale.

Géographiquement la région appartient aux Alpes dinariques.

Tabelle 1: Situation des peuplements étudiés

Peuplement nature	Les Joux Jardiné	Steffisburg Jardiné	Janj vierge
Localisation	Coord. 544250/206300	623530/183450	44° 08' lat.N 17° 17' long.E
Division No	29	3	18
Dénomination	Le Cachot	Schwand	
Surface	9.5 ha	21.0 ha	env. 50 ha
Altitude	1130 - 1150	950 - 990	1150 - 1230
Exposition	NNO	NNW - NNO	WNW
Inclinaison	8 - 10 %	20 - 30 %	20 - 30 %
Date des relevés	Printemps 1965	Hiver 1965/66	Eté 1966

## 212. Conditions écologiques

### 1. Climat (Cf. tab. 2)

Les Joux: Le climat est froid, jurassien, avec de fortes précipitations. On ne compte que quatre mois où il ne gèle pas. La période de végétation dure environ 6 mois.

Steffisburg: Le climat est celui des Préalpes, caractérisé par des précipitations abondantes avec de fortes tombées de neige, des périodes de froid prononcées, des hivers longs.

Janj: Le climat, malgré la présence de la mer Adriatique (50 à 60 km) est continental, transitoire, mais assez prononcé. Il n'y a pratiquement qu'un seul mois sans gel. Les précipitations sont abondantes, plus en été que pendant la saison froide, caractéristiques du régime pluviométrique continental.

Tabelle 2 Données climatiques des régions étudiées

	JOUX 1)	STEFFISBURG 1)	JANJ 2)
Station la plus proche	Les Ponts-de-Martel	Groupe de station	Mlinište
altitude (m)	1023	994	1156
distance du peuplement (km)	2 ESE		39 WNW
Temp.moyenne mensuelle (°C)			
J	- 3.1	- 3.3	- 4.6
F	- 1.0	- 1.4	- 3.6
M	0.5	1.1	- 0.1
A	5.3	5.7	3.2
M	8.8	9.6	8.5
J	12.6	13.2	11.8
J	14.9	15.1	13.6
A	14.1	14.2	14.0
S	11.4	11.5	9.8
O	5.6	6.3	5.8
N	0.9	1.5	0.2
D	- 2.5	- 2.6	- 2.1
Moyenne annuelle	5.6	5.9	4.7
Temp.min.absolue	-25.6 (CdF) 3)	-20.6 (Ba)	-25.4
Temp.max.absolue	29.2 (CdF)	30.0 (Ba)	29.3
Précipitations tot.	1362	1200 (Sch)	1629
Différence d'altitude entre station et peuplement (m)	- 120	+ 20	~ =
Temp.moy.annuelle à l'altitude du peuplement	5.0°	6.0°	4.7°
Durée vég. 5° journ.	173 (B)	193 (Ba)	-
nb. jour gel	121 (B)	107 (Ba)	-

1) d'après Maurer, J.; Billwiller, R.; Hess, C.: Das Klima der Schweiz. Huber & Co., Frauenfeld, 1909.

2) Données aimablement mises à notre disposition par M. A. Panov, Ing. forestier

3) Abréviations: CdF la Chaux-de-Fonds, alt. 990 m  
 B la Brévine, alt. 1080 m  
 Ba Beatenberg, alt. 1148 m  
 Sch Schwarzenegg, alt. 920 m

## 2. Sous-sol

Les Joux: Le sous-sol est composé de roches calcaires, sédiments calcaires du Jurassique supérieur et du Crétacé. Les sols sont marneux et stables. Par endroits affleure la roche.

Steffisburg: Le sous-sol est une molasse composée de poudingue coloré et de grès entremêlés de couches de marnes. Par endroits apparaît la moraine. Les sols sont argileux, profonds et frais, riches en humus, mouilleux par endroits.

Janj: Le sous-sol est dolomitique. Le type dominant des sols est la rendzine. Le drainage y est élevé, malgré une grande teneur en argiles.

## 3. Sociologie végétale

Nous disposons de bons renseignements sur la sociologie végétale dans les trois peuplements qui nous intéressent. Le premier a été étudié et cartographié par Richard, (1965). Les associations du sapin dans l'Emmental ont été étudiées par Kuoch, (1954) qui a fait des relevés dans les environs immédiats du peuplement étudié. A Janj, la réserve forestière avoisinant notre division a fait l'objet d'études approfondies du Prof. Fukarek.

Les Joux: D'après la carte phytosociologique du Canton de Neuchâtel, toute la surface de la division étudiée excepté trois petites enclaves appartient à l'association de la hêtraie à sapin à facies de Pétasites (A b i e t i - F a g e t u m p e t a s i t e - t o s u m). Cette association colonise généralement les sols marneux, stables des versants nord. Les conditions sont favorables au sapin, à l'érable et au hêtre.

Trois petites enclaves de peu d'étendue appartiennent à l'association de la pessière à asplenium (A s p l e n i o - P i c e e t u m). Cette association colonise les stations hostiles à toutes essences excepté l'épicéa, le sorbier des oiseleurs et le saule, sur des sols physiologiquement secs. Elle n'est que de peu d'étendue dans la division étudiée.

Steffisburg: D'après les relevés de Kuoch, notre division appartient à l'association de la sapinière à myrtille (M y r t i l l o -

*A b i e t e t u m*) dans ses variantes typiques et à *Pleuroschisma*. La variante typique se rencontre sur les parties plates et peu inclinées sur des sols bien drainés. La capacité de concurrence du sapin y est au maximum, l'épicéa produit bien en mélange avec le sapin et le hêtre.

La variante à *Pleuroschisma* se rencontre plutôt dans les cuvettes ou les plateaux légèrement inclinés avec tendance au rassemblement des eaux stagnantes. Elle colonise les sols plus compacts et acides, sur la molasse et la moraine de fond. Ici seul le sapin présente une grande capacité de production.

Janj: Fukarek attribue cette région à des mosaïques d'associations de l'alliance du *F a g i o n i l l y r i c u m*, avec pénétration des éléments de l'ordre *V a c c i n i o - P i c e e t a l i a*. Une grande partie de la forêt de Janj, comme la division étudiée appartient à l'association de la hêtraie à sapin illyrique (*A b i e t i - F a g e t u m i l l y r i c u m* Fuk. et Stef.).

La comparaison des conditions climatiques, édaphiques et phytosociologiques nous montre des différences assez prononcées entre les trois peuplements. On peut cependant leur trouver un dénominateur commun, tous appartiennent à des associations phytosociologiques de la hêtraie à sapin. Climatiquement les peuplements des Joux et de Janj se rapprochent, bien que ce dernier ait une tendance plus continentale. Des trois stations, c'est certainement Steffisburg qui présente les meilleures conditions de croissance: altitude plus basse, sols plus riches et plus profonds.

### 213. Description des peuplements étudiés, dans leur état actuel

Pour les deux peuplements jardinés étudiés, nous disposons des inventaires complets récents, des diamètres à hauteur de poitrine, de plus de 16 cm (17.5 aux Joux), sur l'ensemble des divisions en question. Afin de mieux caractériser la structure, nous avons relevé dans les deux peuplements une placette échantillon de 0.4 ha, où tous les arbres dépassant 50 cm de hauteur furent mesurés par leurs diamètres, hauteurs, dimensions des cimes, coordonnées de position.

## 1. Description générale

Les Joux: Le peuplement étudié possède actuellement une structure jardinée convenable. La distribution des hauteurs dans les plans vertical et horizontal y est proche de la normale. L'étage supérieur est cependant composé presque exclusivement de gros épicéas. Dans les étages intermédiaire et inférieur le sapin domine nettement, accompagné du hêtre et de l'érable. Le rajeunissement se passe par pieds d'arbres.

Steffisburg: Actuellement le peuplement ne se trouve plus dans un état jardiné normal. L'étage supérieur contient la majorité des tiges, aussi bien de sapin que d'épicéa, mais avec une légère prédominance de celui-ci. L'étage intermédiaire est trop peu représenté, alors que dans l'étage inférieur une forte régénération par groupes, de sapins et épicéas, s'est formée à la suite des interventions assez fortes des dernières 5 à 10 années.

Janj: Le peuplement étudié se trouve sur un terrain plus tourmenté que les précédents. Il est composé d'un étage supérieur de très gros sapins et épicéas, par endroits encore fermé, dense, ailleurs il est entrecoupé de trouées où une nouvelle génération s'est installée. Ce sont des perchis de hêtre principalement, très denses, avec au-dessous des recrûs de sapin et épicéa. Le peuplement principal possède une structure très uniforme et se trouve dans une phase de régénération lente.

## 2. Structure verticale

La distribution du nombre de tiges par catégories de hauteur sur une surface de 0.4 ha (fig. 1) montre que dans le peuplement des Joux, pratiquement toutes les hauteurs sont représentées excepté entre 28 et 32 m. Il s'agit là du décalage entre la première génération d'épicéas et celle de sapins. A Steffisburg on constate un net déficit de tiges entre 16 et 32 m de hauteur, donc sur une partie de l'étage intermédiaire.

A Janj, la structure verticale varie passablement dans les différentes parties du peuplement, selon l'état de développement des parties considérées. Le peuplement est composé de groupes et bouquets d'une certaine étendue, complètement fermés, à structure

uniforme, où les sapins sont mélangés par groupes et les épicéas par touffes ou pieds d'arbres. Ces groupes sont entrecoupés de surfaces plus ou moins ouvertes où s'est développé une nouvelle génération de hêtre principalement.

### 3. Structure du matériel sur pied

Les valeurs par ha du matériel sur pied et de la surface terrière, par étage de hauteur et pour les différentes essences (tab. 3), calculées sur la base des placettes échantillons de 0,4 ha, nous montrent que malgré un matériel sur pied assez proche, 611 sv/ha aux Joux et 674 sv/ha à Steffisburg, la distribution du volume dans les trois étages du peuplement est fort différente. Aux Joux où la structure verticale est équilibrée on trouve 79 % du matériel sur pied dans l'étage supérieur et 21 % dans l'étage intermédiaire. A Steffisburg où l'équilibre jardinatoire a été rompu, l'étage supérieur contient 93 % du matériel sur pied pour 5 % dans l'étage intermédiaire. Cet état est dû au vieillissement du peuplement, l'étage supérieur étant resté trop dense par le régime conservateur des exploitations et la régénération n'a pas pu se développer normalement.

Les valeurs de la surface terrière présentent les mêmes analogies que le volume, cependant de façon plus atténuée.

A Janj, M. A. Panov a relevé une placette échantillon de 0,15 ha dans une partie encore fermée du peuplement. Le matériel sur pied s'élevait à 633 sv/ha. Si l'on tient compte de la coupe d'exploitation effectuée il y a quelques années, on peut reconstituer le matériel sur pied du peuplement initial, naturel, à environ 800 sv/ha. Cette valeur correspond à celles obtenues dans les phases optimales de la réserve avoisinante. Ce matériel sur pied est formé uniquement par de très gros sapins et épicéas de l'étage supérieur, formant l'ossature du peuplement.

### 4. Composition des essences

A Steffisburg, l'épicéa, se rencontre à raison de environ 1/3 dans l'étage supérieur, pratiquement pas dans l'étage intermédiaire et à nouveau dans l'étage inférieur. Le sapin compose le reste alors que le hêtre n'est que très faiblement représenté et ne se rencontre que dans l'étage inférieur. Sur l'ensemble du

Fig. 1 Distribution du nombre de tiges par catégories de hauteur de 2 m, dans les deux peuplements jardinés

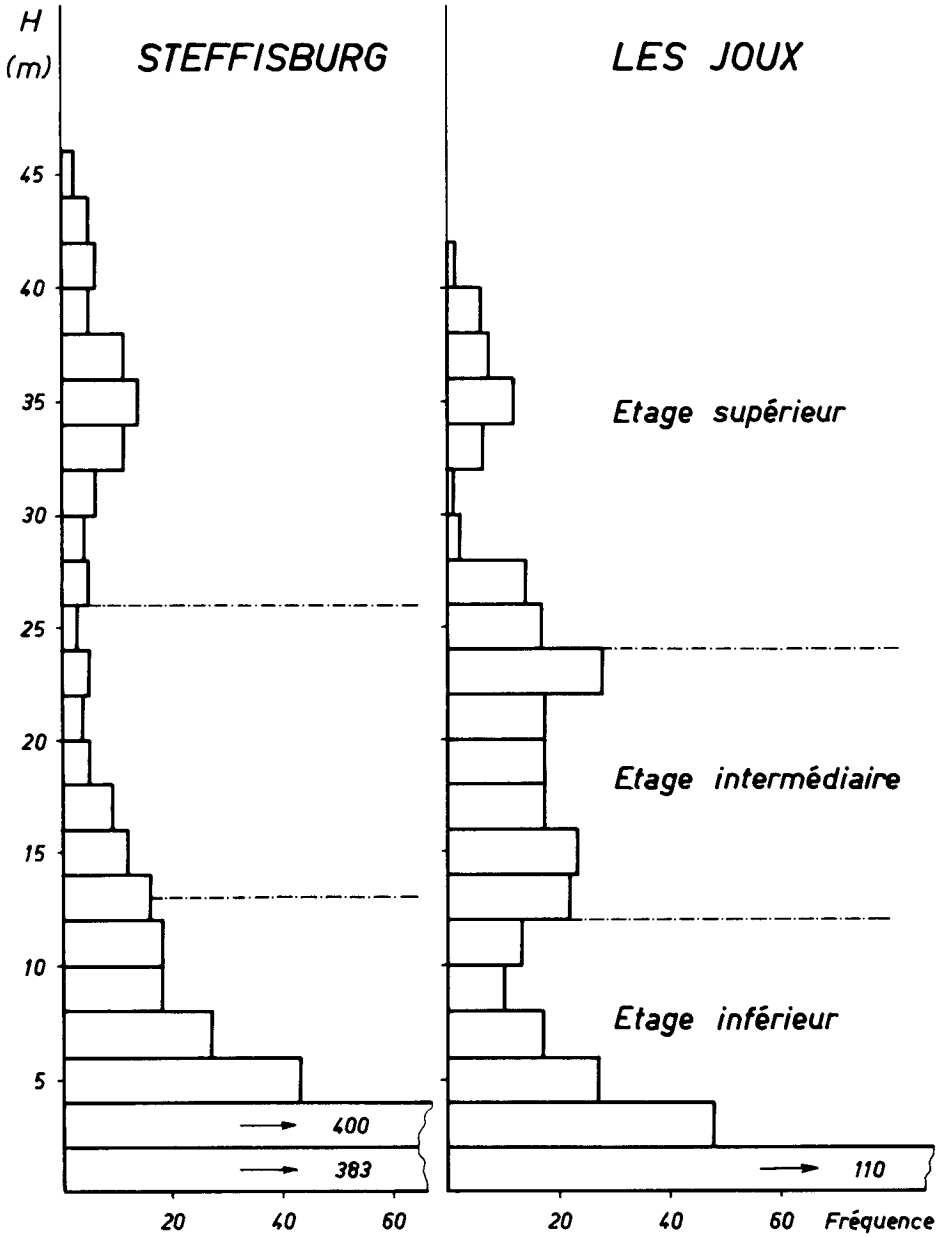




Tabelle 3 Valeurs par ha du matériel sur pied, de la surface derrière et de la surface de projection des cimes, par étage de hauteur et par essences dans les deux peuplements jardinés

Peuplement Étage 1)	LES JOUX				STEFFISBURG				
	1	2	3	Σ	1	2	3	Σ	%
Volume sur pied (m <sup>3</sup> /ha)	sa	117.40	2.57	217.69	417.90	36.60	8.97	463.47	68.8
	ep	366.32	2.07	368.52	210.00	-	0.15	210.15	31.2
	feu	16.07	7.55	1.00	24.62	-	0.93	0.93	-
	Σ	480.11	127.02	3.70	610.83	627.90	36.60	10.05	674.55
%	78.6	20.8	0.6	100	93.1	5.4	1.5	100	x
Surface ter- rière (m <sup>2</sup> /ha)	sa	7.045	11.187	0.668	18.900	25.465	1.875	30.979	70.5
	ep	23.233	0.188	0.052	23.362	12.658	0.070	12.729	29.0
	feu	1.288	0.805	0.255	2.388	-	0.216	0.216	0.5
	Σ	31.455	12.220	0.975	44.650	38.123	3.639	43.923	100
%	70.4	27.4	2.2	100	86.8	8.3	4.9	100	x
Surface pro- jection des cimes (m <sup>2</sup> /ha)	sa	885.20	2360.25	903.48	4148.93	2682.75	4345.82	13153.97	76.9
	ep	1846.42	37.12	46.50	1930.04	-	1274.90	2805.42	16.4
	feu	384.63	570.23	432.75	1387.61	-	1148.57	1148.57	6.7
	Σ	3116.25	2967.60	1382.73	7466.58	7655.92	2682.75	6769.29	17107.96
%	41.7	39.7	18.6	100	44.7	15.7	39.6	100	x

1) les étages se déterminent par tiers de la hauteur dominante, arrondie au m près Hdcm 36 m aux Joux, 39 m à Steffisburg

peuplement on compte 31 % d'épicéa et 69 % de sapin.

Aux Joux, l'épicéa compose la majeure partie de l'étage supérieur et ne se trouve pratiquement pas dans les étages intermédiaire et inférieur. Le hêtre et les autres feuillus tels que l'érable sycomore et le sorbier des oiseleurs se rencontrent en petite quantité dans les trois étages. Sur l'ensemble du peuplement on trouve 36 % de sapin, 60 % d'épicéa et 4 % de feuillus.

A Janj, l'étage supérieur est composé de 87 % de sapin et 13 % d'épicéa, le hêtre en occupe une portion minime. Dans les recrûs et fourrés on trouve 64 % de hêtre et 36 % de résineux; dans les gaulis et perchis la prédominance du hêtre est encore plus marquée avec 96 % de participation pour 4 % de résineux.

### 5. Structure horizontale

La fig. 2 nous montre la répartition horizontale des tiges dans les deux peuplements jardinés. On voit combien l'étage supérieur à Steffisburg occupe de place par la projection de ses cimes. 76 % de la surface du peuplement est recouverte par la projection des cimes de l'étage dominant, tandis qu'aux Joux ce n'est que 31 %. On imagine bien les conséquences que cela implique, à Steffisburg l'étage supérieur capte une grande partie de la lumière incidente, tandis qu'aux Joux la distribution de la lumière dans le peuplement est bien meilleure. Sur l'ensemble du peuplement, le degré de couverture est plus proche de 2 que de 1 à Steffisburg (1.71), alors qu'il n'est que de 0.75 aux Joux, pour un matériel sur pied assez proche dans les deux peuplements.

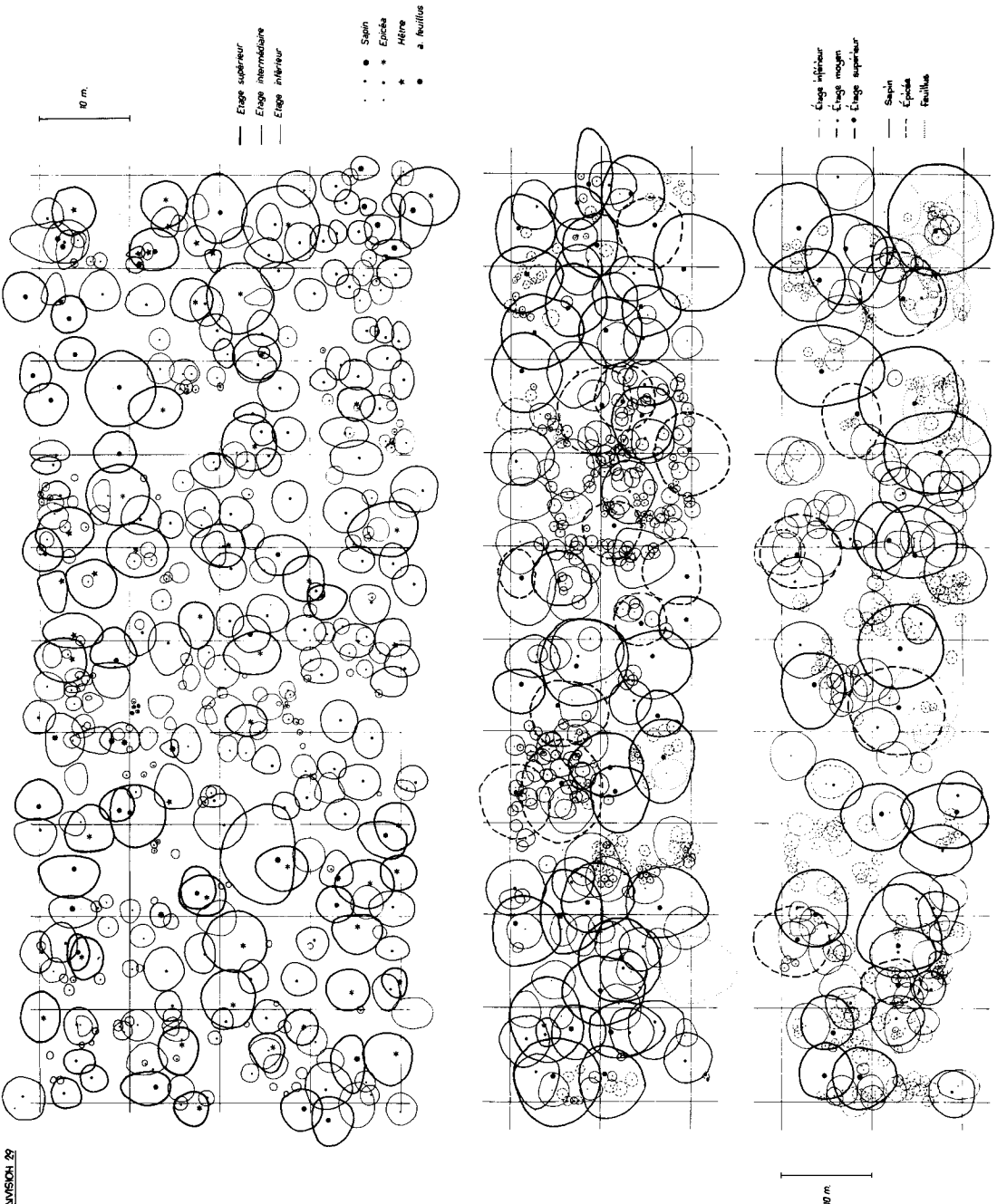
La répartition des tiges des étages supérieur et intermédiaire se passe par pieds d'arbres, dans l'étage inférieur on a généralement une répartition par taches ou groupes.

A Janj, la structure horizontale est différente, et dépend de l'alternation de groupes ou surfaces plus étendues de peuplements encore fermés avec des trouées plus ou moins grandes où s'est installée la nouvelle génération.

### 6. Structure des cimes

La comparaison de la somme des surfaces latérales des cimes de l'étage supérieur dans les deux peuplements jardinés (tab. 4) montre que les deux peuplements ne diffèrent que de 6 %, celui de

Fig. 2: Projections des cimes sur des placettes échantillons de 0.4 ha dans les deux peuplements jardinés



Steffisburg ayant un peu plus de surface latérale de cime. Pourtant la surface de projection des cimes est plus de deux fois supérieure à Steffisburg qu'aux Joux. Les tiges de l'étage supérieur aux Joux ont par conséquent des cimes bien plus longues et moins trapues qu'à Steffisburg.

Tabelle 4 Somme des surfaces latérales des cimes et des surfaces de projection des cimes de l'étage supérieur des deux peuplements jardinés

Peuplement Essence	LES JOUX				STEFFISBURG		
	Sapin	Epicéa	Feuillus	Total	Sapin	Epicéa	Total
Surface de proj. des cimes (m <sup>2</sup> /ha)	885	1846	385	3116	6125	1530	7655
Surface latérale des cimes (m <sup>2</sup> /ha)	11455	12412		23867	17072	8390	25462

#### 214. Evolution passée

Bien plus que l'état actuel, l'étude de l'évolution passée des peuplements est importante. Nous disposons ici d'un matériel d'étude intéressant, s'étendant sur les 60 à 70 dernières années. En effet, le peuplement des Joux a été inventorié entièrement en 1901, par la méthode du contrôle et révisé depuis à intervalles de temps réguliers. De même pour le peuplement de Steffisburg, inventorié pour la première fois en 1898. La période où l'on connaît assez bien l'évolution de la structure est cependant trop courte pour embrasser toute la vie des tiges analysées. On peut dans une certaine mesure reconstituer indirectement une certaine partie du développement en recherchant sur les arbres eux-mêmes des signes de l'évolution antérieure. Cette méthode indirecte reste très aléatoire et ne peut fournir que des renseignements à

utiliser avec beaucoup de précautions.

## 1. Etude de l'évolution de la structure au cours de la période aménagée

Les résultats des inventaires (nombre de tiges par catégories de diamètre) ont été réduits à l'unité de surface (ha) et transformés en catégories de diamètre de 4 cm pour le peuplement des Joux, relevé par catégories de 5 cm. Le volume a été calculé à l'aide d'un tarif identique à deux entrées, se fondant sur la hauteur et le diamètre moyen, d'après Bachmann (1967).

Nous constatons que le matériel sur pied n'est pas resté constant dans les deux peuplements des Joux et de Steffisburg, durant les 70 années de la période aménagée (fig. 3). Bien au contraire, il a suivi des fluctuations assez importantes. Depuis le début du siècle, le peuplement des Joux a accusé une diminution assez nette du matériel sur pied, jusqu'en 1930, pour augmenter à nouveau par la suite. Parallèlement la répartition des classes de grosseur évoluait vers une meilleure distribution. Les gros bois, trop fortement représentés en 1900 (46 %) diminuaient fortement au profit des moyens et petits bois. Si actuellement la structure des classes de grosseur devient satisfaisante, il n'en a pas toujours été ainsi.

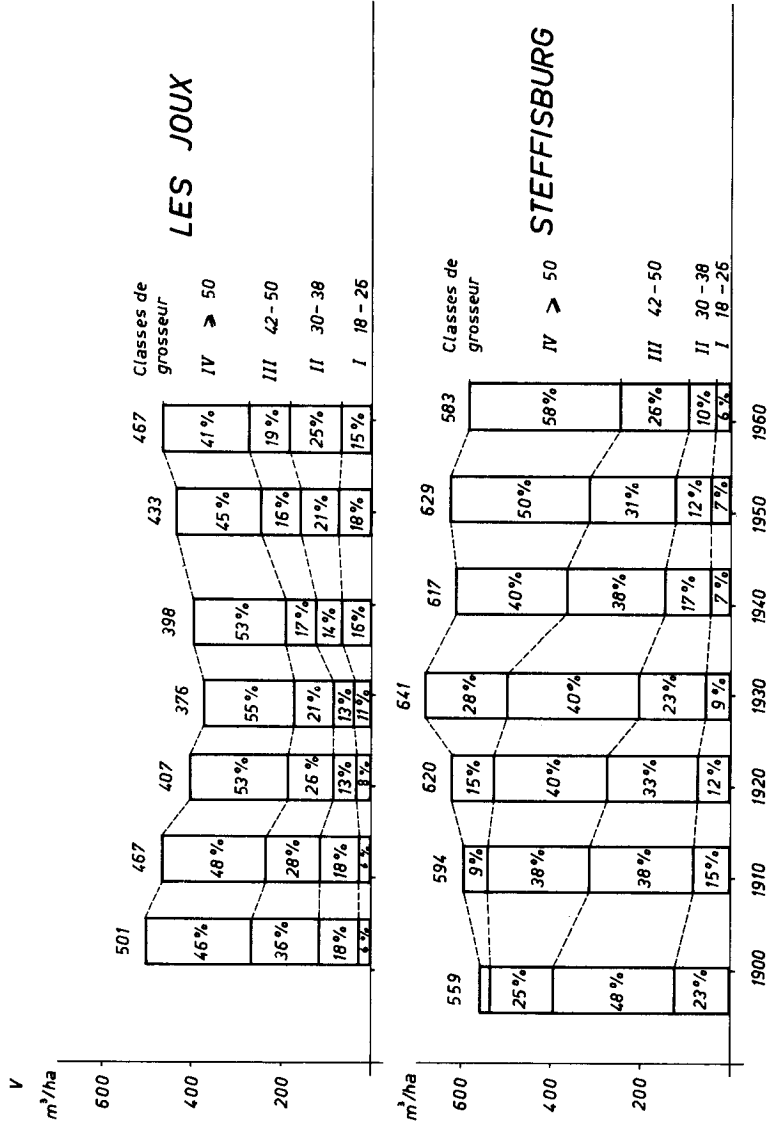
Le peuplement de Steffisburg, plus riche en matériel sur pied que celui des Joux, voyait ce matériel sur pied augmenter encore jusqu'en 1930, pour diminuer faiblement depuis. La répartition des classes de grosseur montre que jamais il n'y a eu équilibre, que le peuplement a vieilli "d'un bloc".

## 2. Evolution des peuplements avant la période aménagée

La reconstitution de la structure des peuplements avant 1900 est plus difficile. En fait seule l'histoire de la forêt des Joux peut être quelque peu reconstitués sur la base des anciens plans d'aménagement. Il nous a fallu procéder de façon déductive en étudiant la fréquence de régénération des arbres étudiés.

Les Joux: Des anciens plans d'aménagement, remontant jusqu'en 1841 on peut noter qu'avant 1880 le peuplement était encore ouvert au parcours du bétail. La plupart des arbres que nous avons analysés se sont donc rajeunis dans un peuplement relativement ouvert. En effet, en 1880, l'aménagiste estime le matériel sur pied à 240

Fig. 3 Evolution du volume sur pied total, par ha, depuis le début du siècle, dans les deux peuplements jardinés



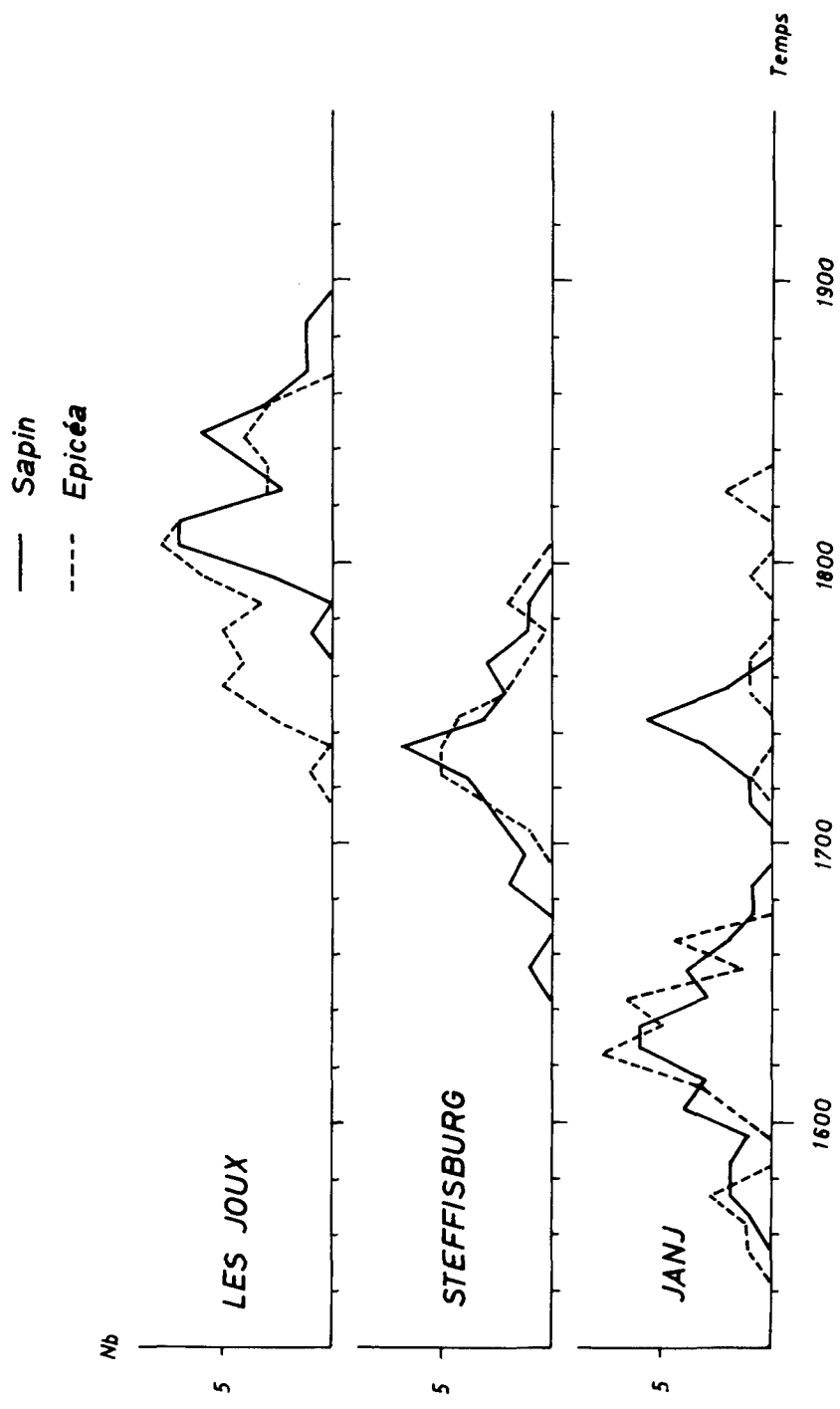
sv/ha et qualifie la structure de très irrégulière. La fig. 4 montre que les épicéas analysés, formant la majeure partie de l'étage supérieur actuel, se sont régénérés bien avant les sapins. Il y a donc eu un net décalage de temps entre une génération d'épicéas et une génération de sapins. La génération d'épicéas n'a probablement pas cru dans des conditions jardinées caractéristiques, tandis que la seconde génération, les sapins, a certainement supporté des conditions jardinées. Malheureusement les sapins n'atteignent aujourd'hui que des dimensions moyennes, ne permettant pas une étude de l'ensemble de la croissance.

Steffisburg: On peut admettre sans trop se tromper que depuis fort longtemps a régné à Steffisburg une sorte de jardinage empirique, avec un matériel sur pied plutôt élevé. Les longues durées de compression enregistrées sur les tiges analysées en témoignent.

L'étude de la fréquence de régénération (fig. 4) nous montre que toutes les tiges (sapins et épicéas) se sont régénérés au cours d'une période de temps assez courte, de 1710 à 1760, sans décalage entre les essences. Sapins et épicéas ont donc supporté pratiquement les mêmes conditions.

Janj: On ne connaît que très peu de chose sur l'histoire des forêts de Janj. En 1951 pour la première fois, une partie du complexe forestier de Janj a été mis en exploitation. Auparavant vu l'inaccessibilité des peuplements, il n'existait aucun moyen de communication et de dévestiture à moins de 30 à 40 km, on peut admettre que le complexe forestier est resté pratiquement vierge. Il est possible néanmoins que les paysans des alentours aient exploité quelques tiges en bordure de forêt. Cependant la division étudiée se trouve à l'intérieur des massifs et on peut supposer qu'aucune exploitation notoire n'a pu s'y passer. Une réserve forestière intégrale a été créée au moment de la mise en exploitation et elle comprenait alors la division où nous avons effectué les mesures. Cette réserve a été restreinte en 1954, lors de la construction d'un chemin de fer forestier et en 1964, lors de la transformation du réseau de chemin de fer en routes forestières. D'après les renseignements pris sur place, il a été effectué en 1959 une coupe d'exploitation dans la division étudiée, mais cela n'a en rien changé les conditions de croissance des arbres, pour la plupart vieux de plus de 300 ans.

Fig. 4 Fréquence de la régénération des tiges analysées dans les trois peuplements





L'étude de la fréquence de régénération (fig. 4) montre que la régénération s'est effectuée au cours de trois phases distinctes de durée et d'intensité différentes. Il y a donc eu plusieurs vagues de régénération passablement espacées dans le temps.

## 22. Méthodes de mesure

La méthode utilisée consista dans l'analyse complète d'un certain nombre d'arbres abattus, sapins et épicéas, permettant de reconstituer la croissance individuelle en hauteur et en diamètre.

### 221. Choix des tiges analysées

Dans les trois peuplements les tiges analysées furent choisies parmi celles martelées en vue d'une coupe normale. Le choix porta sur les tiges de l'étage supérieur qui n'étaient pas gênées considérablement par des voisins et dont la cime était dégagée. Après l'abattage, il fallut en éliminer quelques unes, qui en raison de la pourriture ne pouvaient être parfaitement analysées.

Le nombre de tiges à disposition, une fois éliminées celles qui étaient sujettes à caution, fut de:

	Sapin	Epicéa	Total
Les Joux	36	61	97
Steffisburg	23	26	49
Janj	50	43	93
<hr/>			
Total	109	130	239

Les surfaces sur lesquelles s'étendirent les mesures furent de 6 ha environ aux Joux, 10 à 12 ha à Steffisburg et 15 ha environ à Janj.

### 222. Mesure de la croissance en hauteur

La courbe de la croissance en hauteur en fonction de l'âge fut déterminée par la mesure de l'âge à différentes hauteurs de l'arbre. Les tiges une fois abattues furent débitées en billons de 5 à 6 m (aux Joux et à Steffisburg) et 4 m (à Janj) dans leur

partie inférieure. Dans la partie supérieure du fût on disposa de sections tous les 2 m. Connaissant l'âge total de l'arbre et les âges atteints aux différentes sections, par comptage des cernes, on trouve par différence, l'âge aux différentes hauteurs en question.

L'âge total fut déterminé par comptage des cernes annuels sur la souche à l'aide d'une loupe et lorsque cela était nécessaire, si les cernes étaient trop resserrés, de la machine de Eklund. Afin de déterminer le nombre d'années depuis le niveau du sol jusqu'à la section d'abattage, nous avons procédé à des sondages à la tarière de Pressler, perpendiculairement à la surface de la souche. Nous avons pu ainsi prélever la partie centrale du tronc sur laquelle sont nettement marqués les entrenœuds délimitant les pousses annuelles. Dans 20 % des cas environ, ce sondage ne réussit pas ou seulement partiellement et il fallut procéder par estimation. La principale erreur sur l'âge total provient des cernes discontinus ou manquants. Bormann (1965), a montré que sur les pins de Weymouth dominés, les cernes manquants et discontinus ne se rencontraient pratiquement pas au pied des arbres et qu'ils augmentaient plus on s'élève dans la tige. On peut donc admettre que l'erreur possible n'est pas très élevée, d'autant plus que les comptages se sont fait sur une section entière et répétés dans plusieurs directions, ce qui a permis de détecter les cernes discontinus. On n'en a d'ailleurs pratiquement pas rencontré. Quoi qu'il en soit, une erreur de quelques années sur l'âge total n'exerce pas d'influence sur la forme de la courbe de la croissance.

La justesse de la courbe de la croissance à déterminer dépend de l'exactitude des mesures de la hauteur et de l'âge aux différentes sections. Les erreurs possibles affectant ces deux grandeurs de mesure proviennent principalement du fait que les sections faites dans le fût de l'arbre ne sont généralement pas situées à l'extrémité d'une pousse annuelle. Il s'en suit une erreur possible de  $\pm 1$  année sur la détermination de l'âge. La principale erreur affecte la mesure de la hauteur. Thomasius (1962) a déjà rendu attentif à ce genre d'erreur systématique qui peut atteindre au maximum  $\pm 30$  à 40 cm. Afin d'éliminer cette source d'erreur, la hauteur atteinte à une section donnée fut mesurée non pas jusqu'à la section elle-même, mais jusqu'à l'empla-

cement du prochain verticille de branches. Dans les cas limites, la couleur de la moelle permettait d'indiquer si la dernière pousse annuelle avait été sectionnée dans sa partie inférieure ou supérieure. Une étude préliminaire nous a montré en effet que dans la partie inférieure d'une pousse annuelle, la moelle est de couleur claire, dans sa partie supérieure elle devient brun-noir.

La méthode employée a permis de diminuer sensiblement l'erreur faite sur les mesures de la hauteur. Celle-ci devrait rester dans les limites de la précision des mensurations, faites au moyen d'un ruban métrique, à la précision du décimètre. Quoi qu'il en soit l'erreur possible porte sur l'ensemble de la croissance, car elle s'équilibre de points en points.

### 223. Mesure de la croissance en diamètre

La mesure de la croissance en diamètre bien qu'apparemment plus facile est soumise à des erreurs beaucoup plus grandes que la croissance en hauteur, pour les raisons suivantes:

1) Parce que la croissance en diamètre n'est pas la même dans toutes les parties du fût. On sait en effet qu'elle augmente plus on s'élève dans le fût, mais que cette relation peut être inverse selon l'âge et la position sociologique des arbres (Myers, 1963).

2) Parce qu'elle dépend du développement de la cime. La croissance en diamètre est maximale à la base de la cime.

3) Parce qu'à une hauteur donnée elle n'est pas la même dans toutes les directions, en raison de l'excentricité de la tige.

4) Parce que dans la partie inférieure du fût, et particulièrement pour les grosses tiges, elle est fortement déformée par le prolongement des racines (empatement).

Désirant étudier le comportement de la croissance en diamètre dans son développement dynamique, nous avons tenté de réduire les principales sources d'erreurs en déterminant la croissance en diamètre théorique. Celle-ci représente la croissance en diamètre de la partie inférieure du fût, sous écorce, considérée au niveau du sol mais sans tenir compte de l'empatement des racines. Pour ce faire, nous avons combiné la croissance en diamètre au niveau de la souche, dans sa portion non influencée

par l'empatement des racines et celle de la première section d'abattage. Au centre on a ajouté par estimation la croissance des quelques années depuis le niveau du sol à celui de la souche.

La mesure de la croissance en diamètre s'est effectuée par groupes de 5 années, sur le parterre de la coupe, au moyen d'une règle et d'une loupe. La précision des mesures a été fixée à 0.5 mm sur le rayon. Elle porte sur l'ensemble de la croissance. Selon l'excentricité de la section on a mesuré la croissance radiale dans 2 ou 4 directions différentes et formé les moyennes.

Cette croissance en diamètre théorique représente donc assez bien le phénomène de la croissance dans son ensemble, tel qu'il se passe dans la région de la hauteur de poitrine. La comparaison du diamètre théorique au diamètre à hauteur de poitrine pour les différentes catégories de diamètre à 1.3 m, à Janj (tab. 5), nous montre que le diamètre théorique est toujours plus petit que le diamètre à hauteur de poitrine, et que la différence augmente plus les diamètres sont gros.

Ces différences sont à attribuer d'une part au fait que le diamètre théorique s'entend sous écorce et d'autre part à l'influence de l'empatement des racines, ceci particulièrement pour les gros diamètres. La différence peut être de l'ordre de 10 à 12 cm.

#### 224. Mesures complémentaires

Avant que les tiges soient abattues on a procédé alors qu'elles étaient encore dans leur milieu ambiant à différentes mesures:

1. Le diamètre moyen sur écorce à 1.3 m a été déterminé au mm près d'après la mesure de la circonférence, au moyen d'un ruban métrique.

2. Le coeur serré. Sur la souche on a relevé le nombre d'années en jeunesse où la croissance en diamètre se distingue nettement par sa lenteur d'une croissance normale. Dans la plupart des cas on distingue très bien ce coeur serré.

3. Aux Joux la longueur de la cime verte fut mesurée après l'abattage à  $\frac{1}{2}$  m près. Cette méthode est soumise à certaines erreurs du fait qu'il est assez difficile de déterminer sur une tige abattue la position exacte des branches vertes. Aussi, dans

Tabelle 5 Comparaison du diamètre à hauteur de poitrine et du diamètre théorique, à Janj

Catégories de $\varnothing$ à 1.3 m	nb.de mesures	Différence entre $\varnothing$ 1.3 m et $\varnothing$ théorique		Epaisseur de l'écorce		Différence entre $\varnothing$ 1.3 m et $\varnothing$ théorique diminuée de l'épaisseur de l'écorce	
		cm	%	cm	%	cm	%
30 - 39.9	1	+ 4.00	11.4				
40 - 49.9	6	+ 5.13	11.4	2.90	6.4	+ 2.23	5.0
50 - 59.9	8	+ 7.49	13.7	3.22	5.8	+ 4.27	7.8
60 - 69.9	26	+ 7.87	13.1	3.56	5.5	+ 4.31	6.6
70 - 79.9	16	+ 11.60	15.5	3.98	5.3	+ 7.62	10.2
80 - 89.9	10	+ 16.06	18.9	4.22	5.0	+ 11.84	13.9
90 - 99.9	4	+ 14.80	15.6	4.80	5.1	+ 10.00	10.5
100 - 109.9	2	+ 18.00	17.9	5.10	4.9	+ 12.90	12.3

le peuplement de Steffisburg et de Janj, on a eu recours à une autre méthode. Toutes les tiges furent photographiées sur pied, au moyen d'un appareil photographique à grand angle d'ouverture. Connaissant la distance de l'appareil à l'arbre, l'angle qu'il forme par rapport à l'horizontale et la distance focale, on peut reconstituer graphiquement les dimensions des cimes (longueur et largeur), la représentation photographique étant une projection centrale. A titre de comparaison on a mesuré à Janj la longueur des cimes après l'abattage. La comparaison des résultats a montré que les mesures obtenues par la méthode photogrammétrique étaient très proches de celles faites sur le terrain. Les différences sont de l'ordre de  $\pm 1.5$  m, et sont à attribuer à la détermination exacte du point d'attache de la cime qui reste très subjective, aussi bien sur les tiges abattues que sur pied.

### 23. Méthodes d'interprétation

#### 231. Courbes individuelles de la croissance et de la vitesse de croissance en hauteur

Pour chaque tige analysée, on reporta graphiquement les différentes mesures de l'âge et de la hauteur. La courbe moyenne reliant ces points représente la courbe de la croissance en hauteur. Par dérivation graphique (en mesurant la différence de hauteur par intervalle de temps de 10 ans), on obtient la courbe de la vitesse de croissance en hauteur ou courbe d'accroissement. Cette dernière fut égalisée au moyen de l'appareil à égaliser les courbes de Bitterlich (Bitterlich, 1965). Sur cette courbe, on nota l'emplacement et la grandeur du point où la vitesse de croissance est maximale (là où la courbe atteint son maximum), ainsi que les points d'inflexion de cette courbe.

Une comparaison de différentes façons d'égaliser graphiquement les courbes a montré qu'il fallait s'attendre à une erreur de l'ordre de:

- 30 à 40 cm sur les différents points de la courbe de la croissance
- 20 à 30 cm sur les points de la courbe de la vitesse de croissance dans la zone de culmination, 5 à

- 10 cm dans les zones de vitesse plus faible.
- 2 à 4 ans sur la détermination de la date de culmination de la vitesse de croissance
- 5 à 20 cm sur la détermination de la vitesse de croissance maximale
- 2 à 4 ans sur la détermination de la date des points d'inflexion de la vitesse de croissance.

Il faut s'attendre à une erreur allant jusqu'à 2 m et 7 ans sur la détermination de la hauteur parcourue et de la durée des différentes phases.

### 232. Courbes individuelles de la croissance et de la vitesse de croissance en diamètre

Les points du diamètre théorique mesurés, par groupes de 5 années, furent reportés sur un graphique de façon cumulée pour la courbe de la croissance en diamètre et par les différences pour la courbe de la vitesse de croissance. Vu la grande variabilité on n'égalisa pas les courbes, ni ne détermina les points marquants.

### 233. Détermination de la durée de compression

Par durée de compression on entend généralement la période de la vie d'une tige en futaie jardinée où la croissance est très réduite et se distingue nettement du reste de la croissance. Nous avons vu que pour chaque tige analysée, nous avons relevé la durée du coeur serré, cette partie au centre de la tige où la vitesse de croissance en diamètre est très faible. Cette notion de coeur serré est cependant très subjective et la largeur des cerne peut y varier fortement. Afin d'avoir un critère de détermination plus objectif de cette période de vie très intéressante, nous avons étudié sur les tiges analysées l'épaisseur des cerne au cours de la période du coeur serré. Nous avons constaté que dans la plupart des cas, l'accroissement annuel en diamètre du coeur serré était plus petit que 1 mm. Nous définissons donc la durée de compression par le nombre d'années au cours de la phase de jeunesse où l'accroissement en diamètre annuel est plus petit que 1 mm.

## 234. Détermination des classes de développement sociologique dans le peuplement de Janj

---

L'étude de la forme des courbes de la croissance en hauteur à Janj nous a montré des différences fondamentales de développement selon l'évolution passée. D'une façon générale, on peut distinguer quatre classes de tiges, selon leur développement sociologique:

1) Les tiges qui n'ont pas subi de période de compression pendant la jeunesse, qui se sont régénérées sur une surface libre et qui sont restées toujours dominantes tout au long de leur développement.

2) Les tiges qui n'ont pas subi de compression en prime jeunesse, mais qui en raison de leur retard au moment de la régénération ou de leur moins bonne capacité de croissance ont été fortement comprimées par la suite, en général entre 5 et 15 m.

3) Les tiges qui ont eu en jeunesse une croissance fortement atténuée et qui à un moment donné ont pu se dégager et présentent une croissance rapide.

4) Les tiges à croissance très lente en jeunesse et qui n'ont jamais pu se développer normalement, qui sont restées pratiquement toujours comprimées.

Cette classification convient très bien pour l'épicéa, pour le sapin il faut faire une restriction en ce qui concerne la classe 1. En fait, jamais le sapin ne présente un développement rapide dès le début, aussi, pour cette essence avons nous étendu la classe 1 à une période de compression de courte durée, ne dépassant pas 100 ans.

## 235. Analyse statistique

Les analyses statistiques utilisées dans ce travail ont été essentiellement les tests de comparaison de moyennes par le calcul de la valeur de  $t$ , l'analyse de la variance et l'étude de la corrélation, en particulier le calcul du coefficient de corrélation ( $r$ ). Toutes ces analyses se fondent sur l'ouvrage de Vessereau (1960).

Nous avons choisi le seuil de probabilité de  $p = 0.05$  au delà duquel les résultats sont statistiquement assurés. Ci-dessous l'échelle de gradation des assurances statistiques et les



abréviations mentionnées dans le travail:

Assurance statistique		abréviation
faible	p entre 0.10 et 0.05	(+)
normale	p entre 0.05 et 0.01	+
forte	p entre 0.01 et 0.001	++
très forte	p plus petit que 0.001	+++

### 3. DESCRIPTION DES PHENOMENES DE LA CROISSANCE EN HAUTEUR ET EN DIAMETRE EN FONCTION DU TEMPS

---

#### 31. Croissance en hauteur

La courbe de la croissance en hauteur en fonction du temps en futaie équienne présente la forme d'une courbe en S, assymétrique et penchée. Sa dérivée, la courbe de la vitesse de croissance ou courbe de l'accroissement, présente la forme d'une courbe en cloche assymétrique. De nombreux chercheurs ont essayé de définir mathématiquement ces courbes, mais jusqu'à présent aucune fonction mathématique proposée n'a rencontré d'approbation unanime.

Vouloir caractériser la croissance en futaie jardinée est une gageure, du fait de l'énorme variabilité des courbes. On peut dire en généralisant quelque peu que la courbe de la croissance en futaie jardinée se présente sous la forme d'une courbe en S, nettement moins assymétrique qu'en futaie équienne. Cela est dû au fait du prolongement dans le temps de la partie ascendante de la courbe de l'accroissement, parce que la vitesse de croissance est beaucoup plus lente pendant la jeunesse. La courbe de la vitesse de croissance se présente sous la forme d'une courbe en cloche plus ou moins assymétrique, parfois pas du tout.

#### 311. Distinction des phases de croissance

On peut distinguer différentes phases de croissance selon la forme de la courbe de la vitesse de croissance. Comme le font de nombreux auteurs (Lyr, Polster, Fiedler 1967; Assmann 1961; Leibundgut 1966), nous distinguons les différentes phases de croissance par les points d'inflexion de la courbe de la vitesse de croissance. Dans la majorité des courbes étudiées, ces points sont au nombre de 3 et permettent donc de distinguer 4 phases (fig. 5):

- la phase de jeunesse
- la phase adulte
- la phase de vieillesse
- la phase de sénescence

La succession des différentes phases ne se passe pas toujours de la même façon. Chez certains individus on ne distingue pas de troisième point d'inflexion et le passage de la phase de vieillesse à la phase de sénescence se fait progressivement. Chez d'autres la phase de jeunesse est de durée tellement courte qu'elle n'apparaît pratiquement pas sur les courbes. Dans les cas extrêmes, on ne distingue qu'une seule phase de croissance, la courbe de la croissance étant tellement aplatie qu'elle se rapproche d'une droite.

### 312. Importance des points de référence

Les différentes phases se distinguent par trois points de référence qui mathématiquement ont la même signification. Ce sont les points d'inflexion de la courbe de la vitesse de croissance. Ces points caractérisent le moment où l'accélération ou la décélération de la croissance est maximale. Ils se situent là où la seconde dérivée de la courbe de la croissance atteint un maximum ou un minimum.

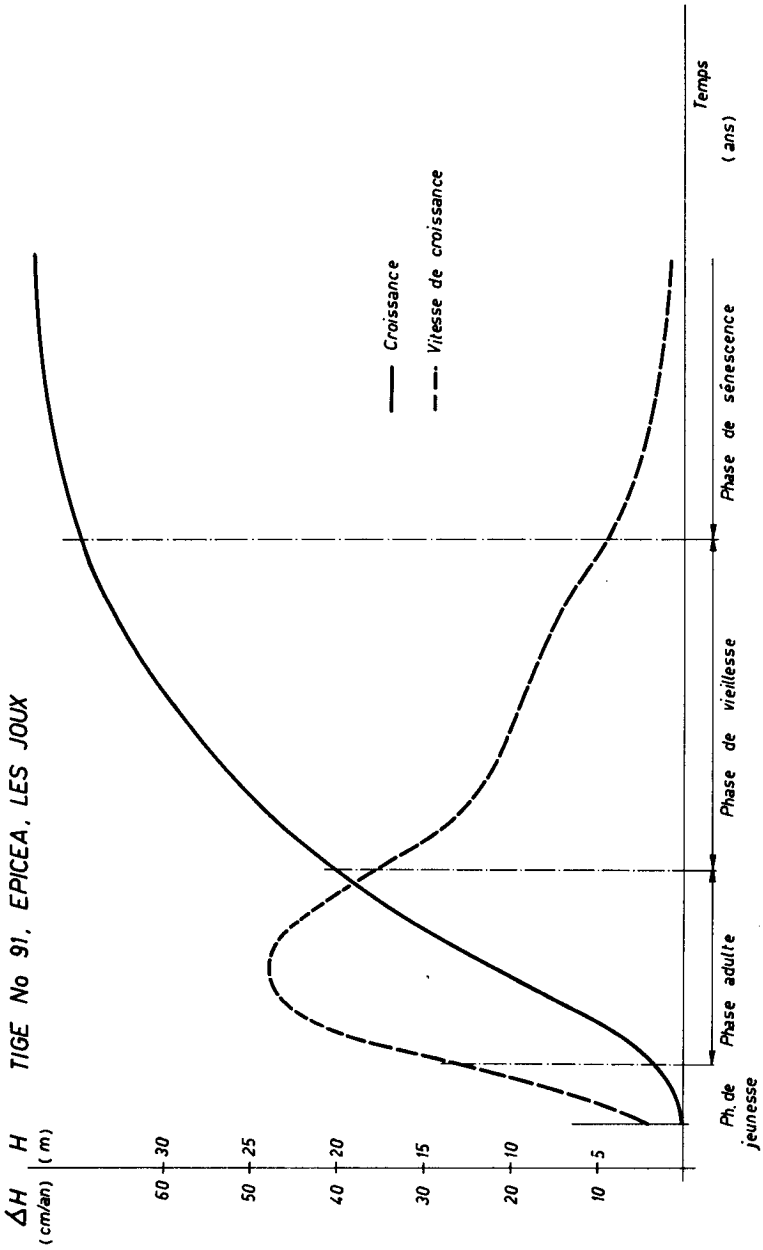
Du point de vue biologique, ces points ont également une grande importance. Ils représentent le moment où la plante fournit le plus grand effort d'augmentation ou la plus grande diminution de son accroissement. En d'autres termes ils représentent le moment où la différence entre deux accroissements annuels est la plus grande.

### 313. Caractéristiques et formes des courbes au cours des différentes phases

La phase de jeunesse peut se prolonger très longtemps en futaie jardinée, plus de 200 ans. En futaie équienne elle ne dure que quelques années, c'est donc une des principales différences de croissance entre les deux genres de régime. On peut caractériser cette phase où la croissance est lente par la période de compression (Cf. chap. 233) dont la durée est très variable dans un même peuplement. La vitesse de la croissance au cours de cette phase peut également varier passablement.

La phase adulte voit la vitesse de croissance augmenter fortement pour atteindre un maximum puis diminuer. Par rapport aux autres phases de croissance, la phase adulte est généralement

Fig. 5 Distinction des phases de croissance



de courte durée. On peut la caractériser par la vitesse maximale de croissance, valeur absolue de la courbe d'accroissement au moment de sa culmination.

La phase de vieillesse est caractérisée par un ralentissement de la diminution de la vitesse de croissance, une espèce de stabilisation. Pendant plusieurs années la croissance reste presque constante.

La phase de sénescence marque la fin du développement de l'arbre, elle se caractérise par une diminution très nette de la vitesse de croissance, qui se rapproche de plus en plus de la valeur 0, valeur atteinte au moment de la mort naturelle. L'arbre atteint alors sa hauteur finale. Cette phase peut se prolonger très longtemps, mais le gain de hauteur est minime.

#### 314. Courbes de hauteur particulières

Nous avons déjà dit que toutes les courbes ne présentent pas un passage distinct entre les différentes phases. D'autre part la diversité des formes de croissance que l'on rencontre dans un peuplement nous suggère combien l'action du milieu ambiant peut se faire ressentir sur la croissance. On rencontre dans les peuplements qui ont été assez denses des arbres sur lesquels l'action du milieu a été si prononcée que la croissance a subi une deuxième compression, pour reprendre plus tard à une vitesse normale.

Nous pensons donc qu'on ne peut pas vouloir étudier la croissance comme phénomène en tant que tel, sans la dissocier du milieu spécifique dans lequel elle s'est passée.

#### 32. Croissance en diamètre

La forme de la courbe de la croissance en diamètre (fig. 6) montre que la croissance se passe de façon beaucoup plus irrégulière que la croissance en hauteur, et par conséquent on y distingue moins bien les différentes phases. On sait que l'influence du milieu et particulièrement des variations climatiques se font beaucoup plus ressentir sur la croissance en diamètre que sur la croissance en hauteur (Bormann, 1965; Thomasius, 1963).

D'une façon générale, la forme de la courbe de la croissan-

ce en diamètre suit à peu près le même cours que celle de la croissance en hauteur, en tous cas dans sa partie inférieure. Les différences d'accélération et de décélération de la croissance sont cependant bien plus atténuées. La principale différence, et elle est importante, réside dans le comportement des courbes à la fin du développement. Alors que la croissance en hauteur depuis la phase de sénescence diminue progressivement pour tendre vers 0, la croissance en diamètre semble rester plus ou moins constante.

Certes chez les tiges très âgées (plus de 350 ans), comme celles que nous trouvons dans le peuplement vierge de Janj, la croissance en diamètre finit par diminuer très fortement.

#### 4. METHODES DE COMPARAISON DE LA CROISSANCE EN HAUTEUR

---

La diversité de forme des courbes individuelles de la croissance dans un même peuplement nous incite à chercher différentes méthodes de comparaison, afin de pouvoir analyser les relations entre les différentes phases de vie ou avec différents facteurs du milieu.

Le fait que les courbes présentent des déformations différentes aussi bien dans le temps que en hauteur, nous conduit à utiliser parallèlement différentes méthodes dont aucune ne peut représenter à elle seule l'ensemble des déformations en question.

##### 41. Comparaison de la vitesse de croissance par tranches de hauteur

---

Le temps de passage en hauteur est le nombre d'années nécessaires pour parcourir un intervalle de hauteur donné (2 m.). C' est également une expression de la vitesse de croissance dans l' intervalle considéré.

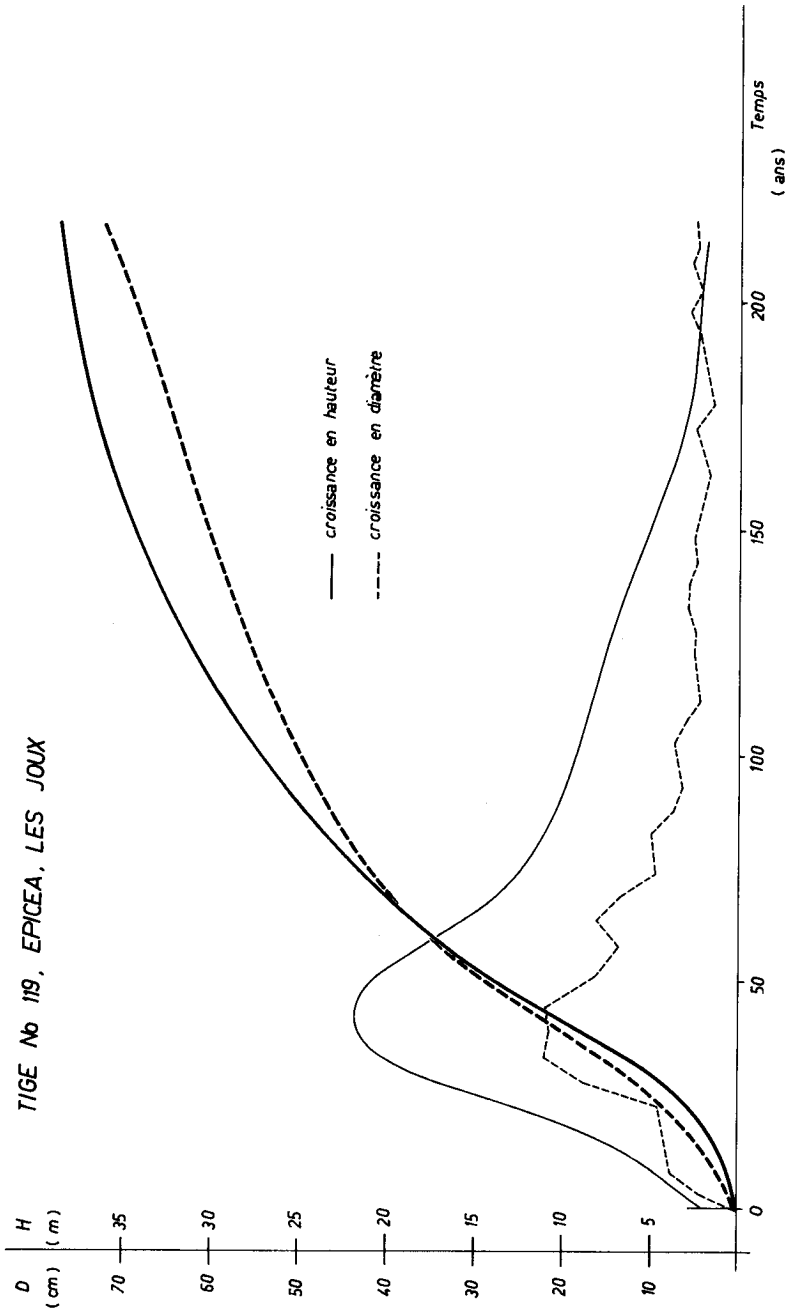
Si on partage la courbe de la croissance en hauteur en tranches de 2 m, et que l'on mesure le temps de passage des différents segments de courbe ainsi délimités, on obtient par ces temps de passage les valeurs de la pente des différents segments de courbe, donc la vitesse de croissance.

Le temps de passage est une grandeur chiffrée de la vitesse de croissance qui permet la comparaison statistique de différents groupements de courbes de croissance, segments par segments. En fait chaque segment de courbe doit être considéré pour lui, indépendamment du reste de la croissance.

A partir d'une certaine hauteur, la méthode devient sujette à caution. En effet au moment où la courbe de la croissance culmine, la pente de la courbe tend vers l'infini et la comparaison n'est plus possible.

Cette méthode est donc très utile pour comparer les vitesses de croissance à des hauteurs fixes. Elle est valable jusqu'à la hauteur finale qu'atteignent les arbres à moins bon potentiel de croissance.

Fig. 6 Croissance en hauteur et en diamètre





## 42. Comparaison de la forme des courbes

La méthode du temps de passage permet la comparaison de la vitesse de croissance à des hauteurs fixes, elle ne permet pas d'étudier la forme des courbes individuelles, particulièrement le passage des différentes phases de croissance. Si on veut porter l'attention au phénomène du changement de phase, on a recours aux courbes-robot. Ce sont des courbes moyennes, des modèles, construits à partir des différents points marquants des courbes individuelles. Ces points: début et fin des phases, maximum de la vitesse de croissance, points de même pente dans la zone de culmination sont reportés par leurs abscisses (temps) et ordonnées (hauteur) moyennes, ainsi que par la pente moyenne de la courbe au point considéré. En reliant ces différents points, on obtient une courbe moyenne où la forme des courbes individuelles est conservée.

Cette méthode est particulièrement intéressante pour représenter la forme des courbes d'un même peuplement pour différentes vitesses de croissance. Elle n'a cependant pas une valeur absolue, car les phases représentées ne sont qu'une moyenne de phases de longueurs et de durées différentes. D'autre part toutes les courbes individuelles ne présentent pas toujours nettement les quatre phases de croissance décrites plus haut. Cette méthode ne permet donc de comparer que des courbes présentant distinctement toutes les phases de croissance.

## 43. Etude de la hauteur finale atteinte

Nous avons vu que le temps de passage devient sujet à caution dès le moment où les courbes individuelles de croissance commencent de culminer. Cette partie de la croissance est cependant très intéressante et il faut avoir recours à d'autres méthodes pour l'étudier.

La hauteur finale des arbres, atteinte à la mort naturelle est une grandeur de croissance très importante. Elle n'est cependant pas mesurable en pratique et il faut la remplacer par une estimation. Dans ce travail nous avons estimé la hauteur finale

par la hauteur atteinte au moment où la vitesse de croissance en fin de vie atteint 10 cm/an (au temps de passage 20, TP 20) et 4 cm/an (TP 50). Nous avons dû utiliser ces deux points de référence pour différentes raisons. La hauteur atteinte au TP 50 est bien mieux représentative de la hauteur finale, mais on n'a pu la déterminer que sur un nombre insuffisant de courbes, la plupart n'ayant pas atteint un tel point de développement. C'est pourquoi, pour des raisons statistiques, nous avons également utilisé comme point de référence la hauteur atteinte au TP 20.

#### 44. Etude du potentiel de croissance

La hauteur finale atteinte est l'expression du potentiel de croissance de l'arbre. De même les hauteurs parcourues au cours des différentes phases de croissance représentent le potentiel de croissance au cours des phases en question.

Faisant ainsi abstraction du temps pour ne considérer que le gain de hauteur, on peut comparer les hauteurs parcourues au cours des différentes phases de croissance.

## 5. RESULTATS

### 51. Variabilité des grandeurs caractéristiques de la phase de jeunesse

---

La caractéristique principale de la phase de jeunesse est la période de compression (Cf. chap. 233, p. 27). C'est elle qui selon sa durée et son intensité conditionne la forme de la courbe de la croissance pendant cette phase de vie.

#### 511. Durée de compression

L'étude de la distribution de la durée de compression par catégories de 20 ans, dans les trois peuplements, pour le sapin et l'épicéa (fig. 7) nous montre que:

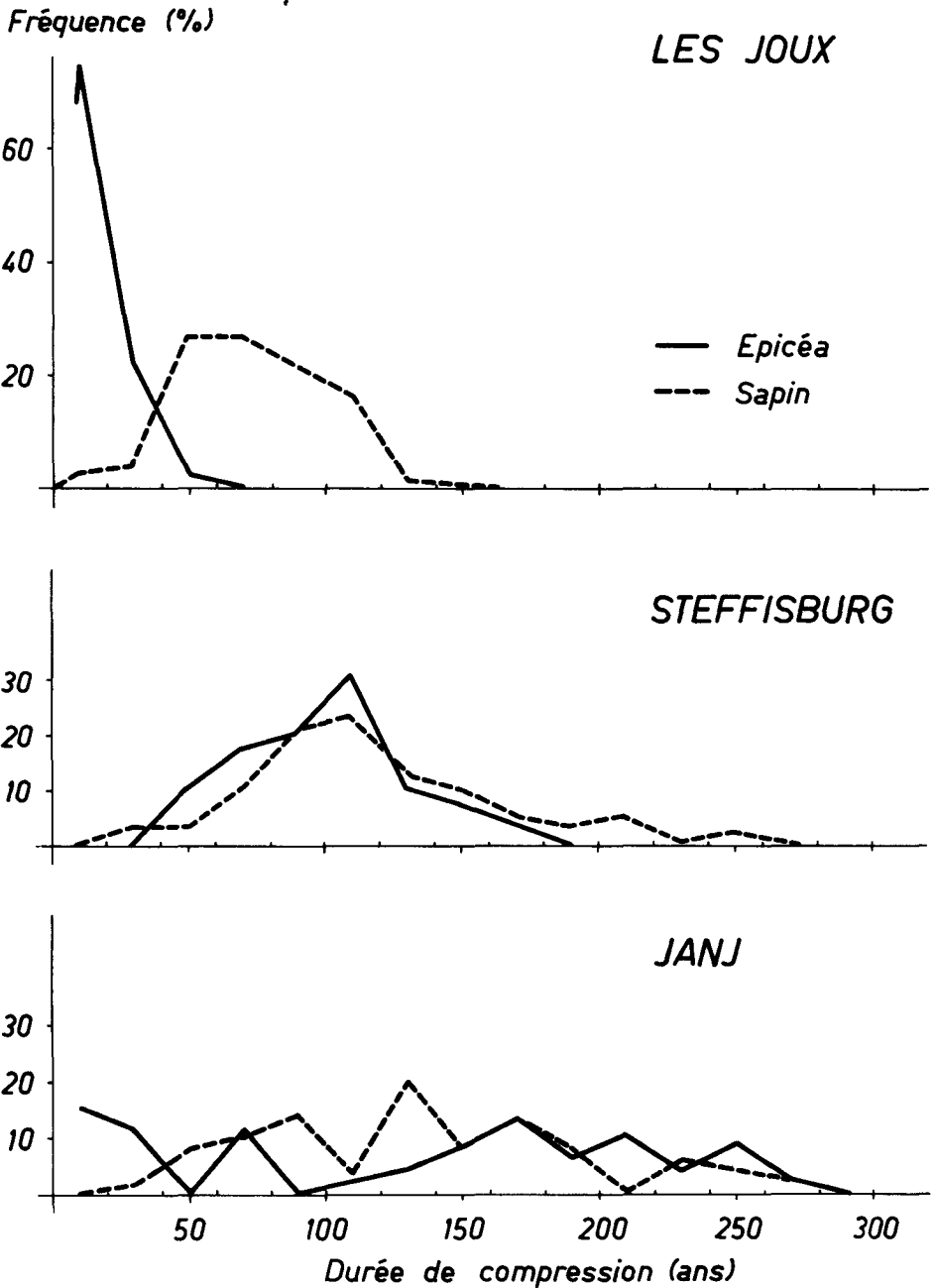
1. Dans les deux peuplements jardinés, la durée de compression se distribue selon une courbe normale, variant par sa moyenne et sa dispersion. Dans le peuplement vierge de Janj, la distribution suit un cours irrégulier, présentant plusieurs maximums.

2. Aux Joux, on constate un net décalage entre la distribution du sapin et de l'épicéa. D'autre part la dispersion est plus large pour le sapin que l'épicéa. Le décalage entre les deux distributions s'explique par le fait que la régénération des deux essences a été différée et que les contraintes exercées par le peuplement au moment de la régénération étaient différentes. A Steffisburg par contre, où les deux essences se sont régénérées simultanément, les moyennes des deux distributions coïncident pratiquement. La dispersion est cependant plus large pour le sapin que l'épicéa.

3. La variation de la durée de compression est très grande. A Janj où les différences d'évolution des peuplements sont très importantes, elle est de l'ordre de 260 à 280 ans. A Steffisburg, la majeure partie de la distribution s'étend sur 140 années environ, l'ensemble porte sur 240 ans. Aux Joux la distribution s'étend sur 60 ans pour l'épicéa et 140 pour le sapin. Ces différences dans la durée de compression confèrent donc aux arbres des âges extrêmement différents, au sortir de la phase de jeunesse.

4. La durée de compression peut atteindre pour le sapin com-

Fig. 7 Distribution de la fréquence relative de la durée de compression, par catégories de 20 ans



me pour l'épicéa des valeurs très élevées, sans qu'apparemment les arbres perdent la faculté de se développer jusque dans l'étage supérieur, puisque les tiges analysées appartenaient toutes à l'étage supérieur. Dans le peuplement vierge de Janj, 26 % des tiges pour le sapin et 12 % pour l'épicéa ont une durée de compression supérieure à 200 ans; à Steffisburg 7 % des sapins dépassent cette limite.

#### 512. Hauteur atteinte à la fin de la période de compression

D'une façon générale, plus la durée de compression est de longue durée, plus les arbres atteignent une hauteur élevée à la fin de cette période (Cf. fig. 8). La croissance annuelle moyenne pendant la période de compression est de l'ordre de 7 à 8 cm/an. Après une période de compression de plus de 200 ans, les arbres peuvent donc atteindre des hauteurs respectables, de l'ordre de 15 m.

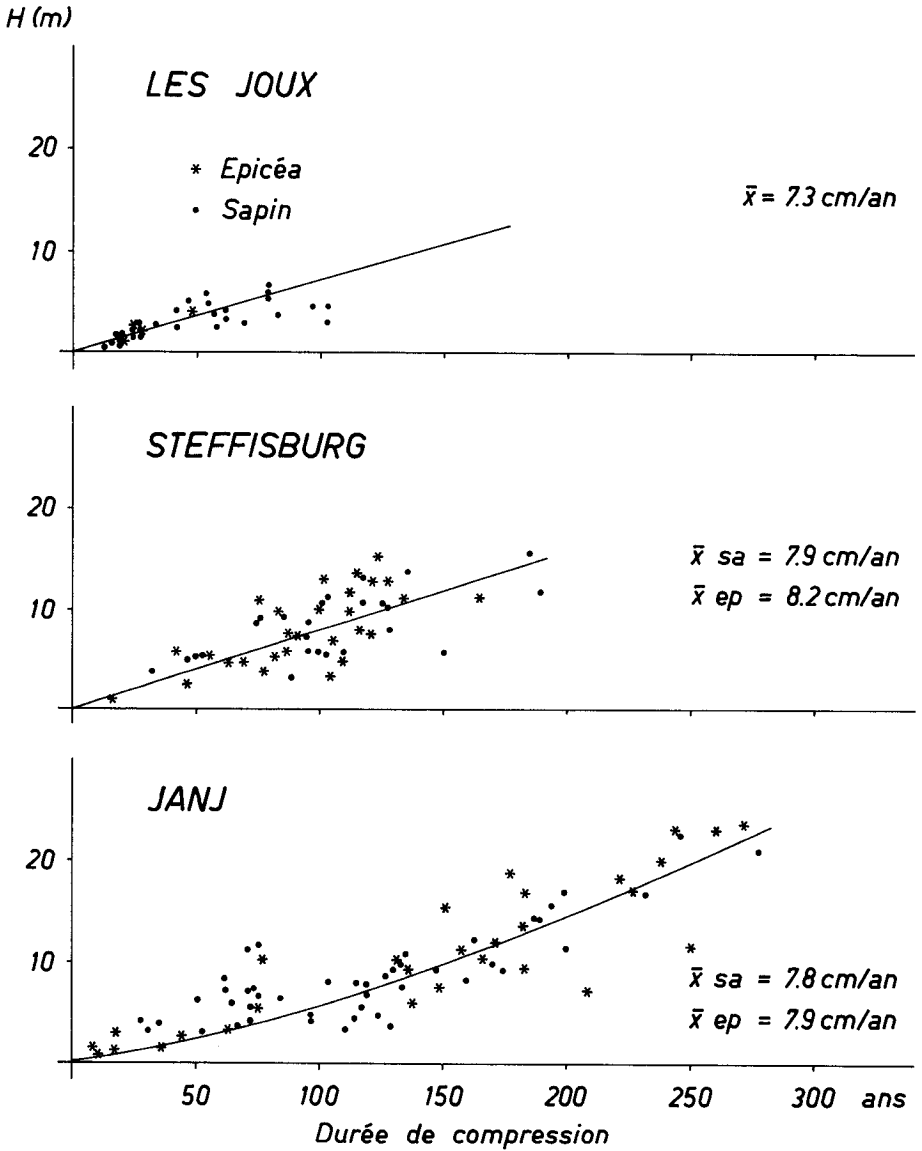
La fig. 8 montre d'autre part que la dispersion des points autour de la moyenne est très élevée. A même hauteur à la fin de la période de compression, une tige peut varier de 100 ans d'âge. Réciproquement à égale durée de compression la hauteur atteinte peut varier fortement. La durée de la compression ne suffit donc pas à caractériser le développement des arbres pendant cette portion de leur vie.

La relation entre la durée de la compression et la hauteur atteinte est linéaire dans les deux peuplements jardinés, où la durée de compression n'est pas excessivement élevée. A Janj, à partir de 150 ans de durée de compression, on constate que cette relation augmente très distinctement.

#### 513. Importance de l'intensité de compression

Nous venons de voir que la hauteur atteinte à la fin de la période de compression ne dépendait pas absolument de la durée de cette période, en raison des variations de la vitesse de croissance. L'intensité de compression en plus de la durée de compression doit permettre de mieux caractériser cette portion de vie. Par intensité de compression nous entendons la valeur de la vitesse de croissance moyenne pendant la période de compression.

Fig. 8 Hauteurs atteintes à la fin de la période de compression



La moyenne des intensités de compression dans les trois peuplements est de:

	sapin (cm/an)	épicéa (cm/an)
Les Joux	7.3	(11.3)
Steffisburg	8.3	8.7
Janj	7.8	7.9

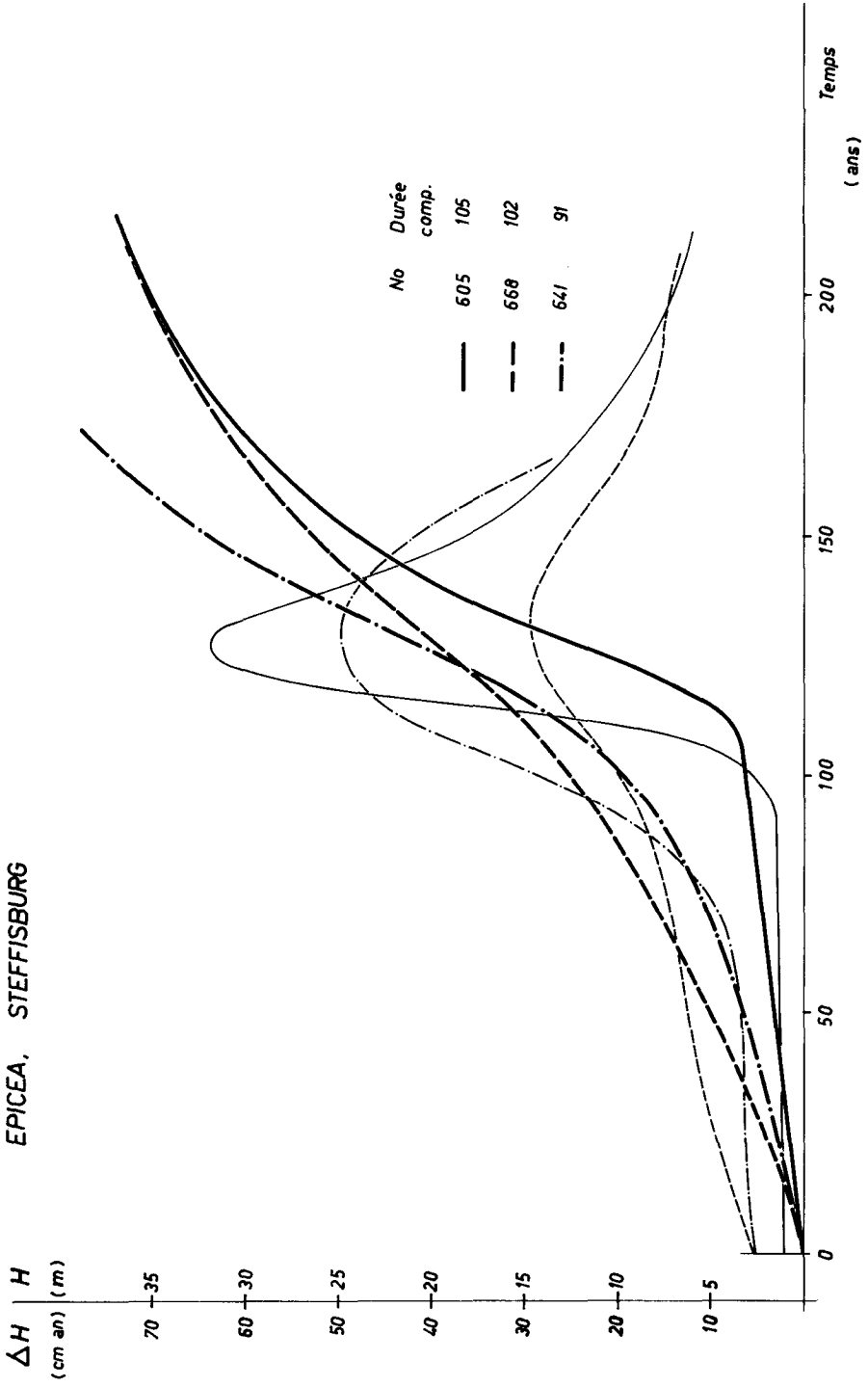
1. La vitesse de croissance au cours de la période de compression est donc pratiquement semblable en moyenne pour l'épicéa et le sapin, bien que légèrement plus élevée pour l'épicéa. Le cas de l'épicéa aux Joux doit être considéré à part, la durée de compression étant de très courte durée.

2. L'intensité de compression varie énormément dans un même peuplement, entre 3 et 15 cm/an. La vitesse de croissance au cours de cette phase de vie peut donc être extrêmement variable et les hauteurs atteintes très différentes. La fig. 9 montre 3 épicéas du peuplement de Steffisburg, présentant à peu près les mêmes intensités de compression mais une croissance très différente. Il est intéressant de constater que malgré les différences de hauteurs appréciables à la fin de la période de compression, la hauteur finale est semblable. Il y a donc plus tard un certain équilibre qui se crée.

3. Les valeurs extrêmes de l'intensité de compression avoisinent 3 à 4 cm/an. La table 6 présente les tiges dont la croissance moyenne au cours de la période de compression a été la plus lente. On constate que aussi bien pour le sapin que pour l'épicéa, une vitesse de croissance très lente, de 3 à 4 cm/an en moyenne, même pendant plus de 100 ans, n'empêche nullement les arbres d'atteindre plus de 30 m de hauteur par la suite.

4. Les énormes variations de la croissance au cours de la période de compression doivent être causées par les variations de la lumière disponible dans le sous-étage du peuplement. Kern (1966) a en effet montré que dans un peuplement jardiné, les variations de la lumière incidente parvenant à 2 m du sol, par temps couvert, étaient de l'ordre de 33 à 38 %. Zuckrigl, Eckhart, Nather (1963) arrivent aux mêmes résultats dans la petite forêt vierge de Rothwald en Autriche.

Fig. 9 Différentes formes des courbes de croissance individuelles pendant la phase de jeunesse, pour une même durée de compression





Tablelle 6 Répertoire des tiges présentant les plus fortes intensités de compression relevées

Tige No	Peuple-ment	Essen-ce	intensité de comp. (cm/an)	durée de c. (ans)	hauteur à la fin de la comp.	hauteur totale mesurée (m)
310	Janj	sa	3.0	130	3.95	36.7
329	Janj	sa	3.1	111	3.45	37.7
304	Janj	sa	4.0	115	4.55	41.0
383	Janj	ép	3.4	209	7.15	29.6
379	Janj	ép	4.2	139	5.80	36.6
603	Steff.	ép	3.0	105	3.20	33.0
653	Steff.	sa	3.6	151	5.50	34.3
629	Steff.	sa	3.8	89	3.35	33.2
150	Joux	sa	3.0	103	3.10	24.4

52. Variabilité des grandeurs caractéristiques de la phase adulte et répercussions sur la phase de vieillesse

Au cours de la phase adulte, la courbe d'accroissement atteint son maximum au moment où la vitesse de croissance est maximale. Cette dernière grandeur est caractéristique non seulement de la phase adulte, mais encore dans une certaine mesure de l'ensemble de la croissance.

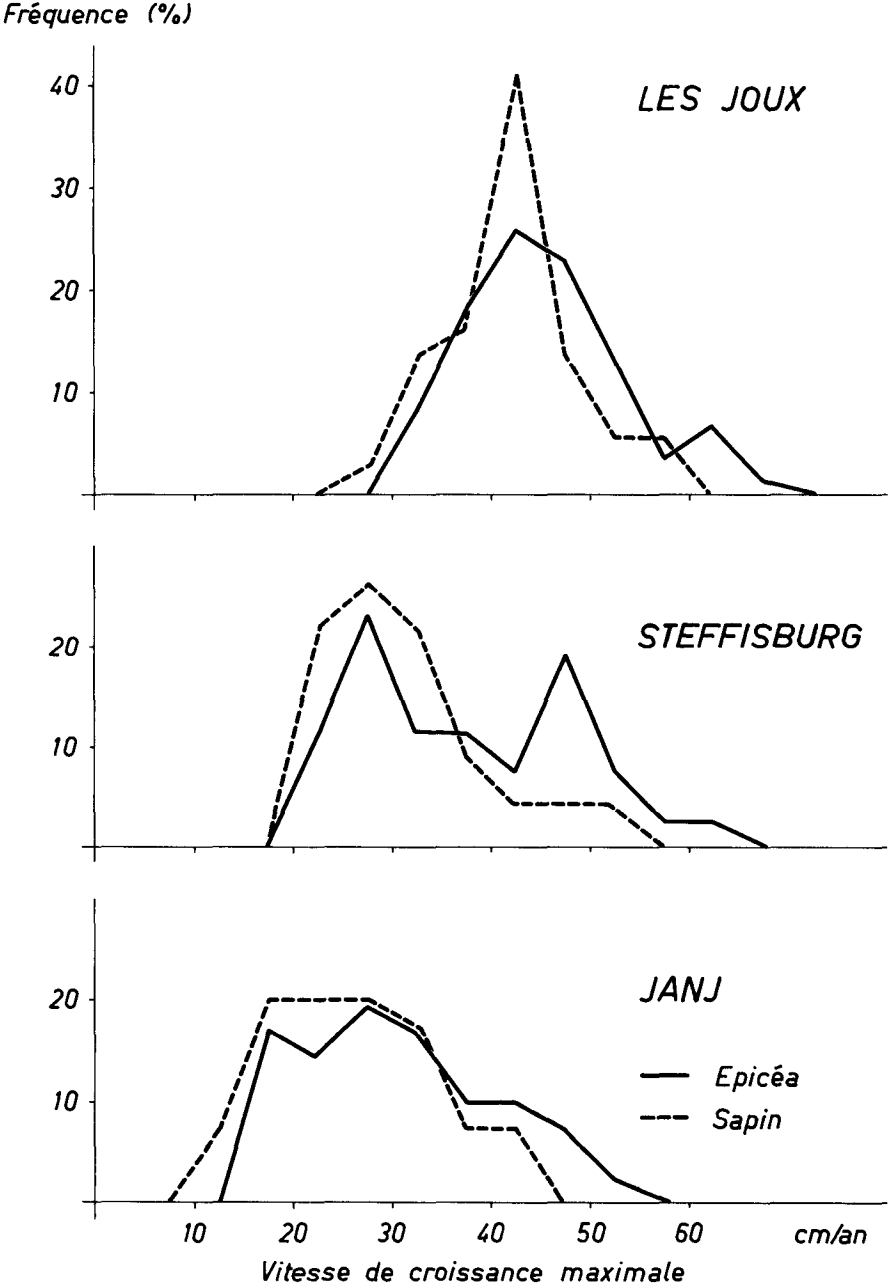
521. La vitesse de croissance maximale

La fig. 10 présente la fréquence relative de la vitesse de croissance maximale. Sa distribution amène les constatations suivantes.

1. L'amplitude entre maximum et minimum de la vitesse de croissance est sensiblement la même pour les trois peuplements, elle est légèrement inférieure pour le sapin (40 cm/an) que pour l'épicéa (45 à 50 cm/an). L'épicéa présente donc une plus grande capacité de réaction à la lumière que le sapin.

2. La vitesse de croissance maximale moyenne (tab. 7) diffère fortement entre les peuplements, pour la même essence. Les différences sont statistiquement fortement assurées. La vitesse de croissance moyenne est la plus élevée aux Joux (45 cm/an), de 9 cm/an inférieure à Steffisburg et de 7 cm/an encore inférieure à Janj. La comparaison des moyennes des classes de développement

Fig. 10 Distribution de la fréquence relative de la vitesse de croissance maximale, par catégories de 5 cm/an



sociologique à Janj d'avec celles des peuplements jardinés fait penser que ces différences sont dues en majeure partie à la structure du peuplement au moment de la croissance maximale. En effet, chez l'épicéa, la moyenne de la classe 1, qui a poussé sans grandes contraintes apparentes, se rapproche très nettement de celle du peuplement des Joux, et se distingue également nettement de celles des autres classes de développement sociologique. Pour le sapin les différences sont moins grandes, mais nous avons vu que le sapin ne présentait jamais à Janj un développement complètement libre de toutes contraintes extérieures.

3. Les moyennes entre sapin et épicéa dans un même peuplement sont toujours plus élevées pour l'épicéa que le sapin, mais les différences sont nettement moindres que celles entre les peuplements, quoique tout de même statistiquement assurées (tab. 8). L'épicéa par son tempéramment plus héliophile est mieux à même de profiter de la lumière et croît plus vite que ce dernier. Il reste cependant clair que l'influence exercée par le peuplement est bien plus importante que les différences entre les essences. Le sapin croît plus vite aux Joux que l'épicéa à Steffisburg et à Janj.

#### 522. Conséquences de la vitesse de croissance maximale sur la forme des courbes

L'importance de la vitesse de croissance sur la forme des courbes est mise en évidence par les courbes-robot, dans le peuplement des Joux (épicéa), pour différentes catégories de vitesse de croissance maximale (fig. 11). Cette représentation est particulièrement intéressante, parce que les épicéas aux Joux forment un matériel d'analyse homogène, où la phase de jeunesse est de très courte durée et ainsi se trouve éliminée l'influence possible exercée par la phase de jeunesse sur la croissance.

Les courbes-robot montrent que plus la croissance est rapide au moment du maximum de vitesse de croissance, plus la période où la croissance est forte est de courte durée. Jusqu'ici il n'y a rien de bien nouveau, mais ce qui est intéressant, c'est d'étudier le rapport entre la phase adulte et la phase de vieillesse. La tab. 9 nous indique les hauteurs et âges atteints à la fin des phases adulte et de vieillesse, ainsi que les hauteurs et les temps parcourus au cours de ces deux phases, pour différentes classes de vitesse de croissance. On constate:

Tablelle 7 Moyennes et écart-type de la vitesse de croissance maximale dans les différents peuplements, pour le sapin et l'épicéa et pour les classes de développement sociologique à Janj

Peuplement	S a p i n		E p i c é a		
	moyenne vitesse de croissance (cm/an)	écart-type	moyenne vitesse de croissance (cm/an)	écart-type	
Les Joux	41.7	6.86	45.4	6.76	
Steffisburg	32.6	10.47	38.2	11.79	
Janj	25.8	8.67	31.3	13.20	
===== Classes socio- logiques à Janj		extrêmes min. max.		extrêmes min. max.	
Classe 1	33.5	24.0 43.0	44.3	32.0 45.0(850)	
Classe 3	30.3	24.0 42.0	28.9	23.0 32.0	
Classe 4	17.4	12.0 23.0	21.0	16.0 26.0	

Tablelle 8 Comparaison statistique des moyennes de la vitesse de croissance maximale par le test de t, entre les peuplements et entre les essences

Comparaison des moyennes du sapin entre les peuplements		
	t	assurance statistique
Les Joux/Steffisburg	4.0243	+++
Les Joux/Janj	8.9182	+++
Steffisburg/Janj	2.7893	++
Comparaison des moyennes de l'épicéa entre les peuplements		
	t	assurance statistique
Les Joux/Steffisburg	3.6319	+++
Les Joux/Janj	6.3500	+++
Steffisburg/Janj	2.1616	+
Comparaison entre sapin et épicéa dans les peuplements		
	t	assurance statistique
Les Joux	2.6827	++
Steffisburg	1.7451	(+)
Janj	2.2479	+

Fig. 11 Courbes-robot pour différentes catégories de vitesse de croissance maximale

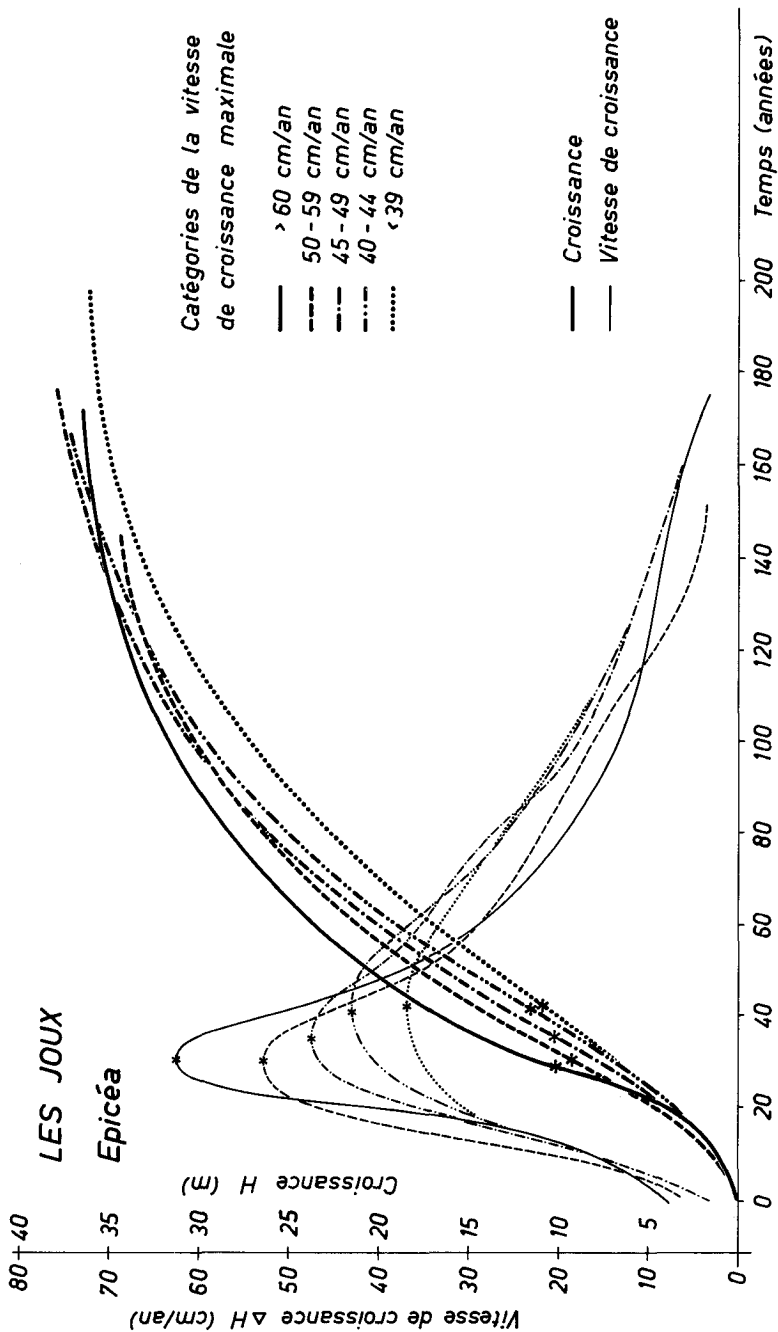


Tabelle 9 Hauteurs et temps parcourus au cours de la phase adulte et de la phase de vieillesse pour différentes vitesses de croissance

Epicéa, Les Joux

catégories de la vitesse de croissance maximale cm/an (1)	Nb. de tiges (2)	Nb. de tiges en % du total (3)	Hauteurs moyennes parcourues pendant les phases de rapport de vieillesse			Temps parcourus pendant les phases de vieillesse			Hauteurs moyennes à la fin des phases de vieillesse		
			adulte m (4)	% (6)	adulte ans (7)	adulte m (9)	adulte ans (8)	adulte m (10)	adulte ans (11)		
> 60	4	100	12.2	67	19	81	16.4	34.3	121		
50 - 60	8	89	12.0	60	27	76	14.4	34.5	119		
45 - 50	9	69	15.9	85	50	71	17.6	34.8	134		
40 - 45	8	67	17.3	109	53	70	18.8	34.4	135		
30 - 40	5	50	17.0	106	61	67	18.6	34.7	139		

1. Quelque soit la vitesse de croissance maximale, les arbres atteignent à la fin de la phase de vieillesse la même hauteur (col. 10) en un temps assez semblable (col. 11).

2. Les tiges à croissance rapide parcourent rapidement la phase adulte (col. 7), mais par contre passent plus de temps dans la phase de vieillesse (col. 8). Inversement, les tiges à croissance lente peuvent rester aussi longtemps dans la phase adulte que dans la phase de vieillesse.

3. Les hauteurs parcourues dans les deux phases vont de pair avec les temps parcourus. Les tiges à croissance rapide gagnent peu de hauteur au cours de la phase adulte (col. 4) et beaucoup dans la phase de vieillesse (col. 5). Les tiges à croissance lente par contre gagnent plus de hauteur dans la phase adulte que dans la phase de vieillesse.

4. On constate d'autre part que plus la vitesse de croissance est lente, moins on trouve de tiges présentant un passage marqué entre la phase adulte et la phase de vieillesse (col. 3). Donc plus la croissance est lente, plus le passage de la phase adulte à la phase de vieillesse se fait régulièrement et progressivement.

On voit donc que les phénomènes du vieillissement ne se passent pas de façon continue au cours de la vie. Un arbre qui croît rapidement dans la phase adulte, ralentit son développement dans la phase de vieillesse, pour atteindre en fin de compte la même hauteur dans un temps semblable qu'un arbre à croissance lente. Il y a donc un équilibre qui se crée entre ces deux phases de croissance. La diminution de la vitesse de croissance ne se passe donc pas progressivement, mais suit un cours irrégulier.

A Steffisburg, les phénomènes constatés aux Joux sont moins bien marqués (fig. 12 et 13), en raison surtout de l'importance de la phase de jeunesse et par conséquent des énormes différences d'âge entre les tiges. Bien qu'ici le matériel statistique soit moins important, on peut constater les mêmes phénomènes:

1. La hauteur atteinte à la fin de la phase de vieillesse est la même, quelque soit la vitesse de croissance maximale (Cf. table ci-dessous):



	Catégories de vitesse de croissance (cm/an)	Hauteur à la fin de la phase de vieillesse (m)
Epicéa	45	36.8
	30 - 45	36.7
	30	36.1
Sapin	45	37.2
	30	35.4

2. Plus la vitesse de croissance est élevée, plus la phase adulte est de courte durée.

3. L'âge total est bien sûr très différent, dépendant principalement de la durée de la période de compression. En fait, ce n'est pas en premier lieu l'âge physique qui conditionne les phénomènes du vieillissement.

### 523. Variations du potentiel de croissance

Les phénomènes que nous venons de constater pour des moyennes de courbes ne sont en réalité pas aussi constant que ne le font imaginer les courbes-robot. En fait à égalité de vitesse de croissance maximale, la forme de la courbe de la croissance peut varier passablement. Les fig. 14 et 15 montrent une série de courbes de croissance individuelles de même vitesse de croissance maximale, dont les potentiels de croissance sont fort différents.

On peut constater que le potentiel de croissance ne se manifeste par forcément par une courbe d'accroissement très convexe dans la région du maximum, mais que la vitesse de croissance au cours de la phase de vieillesse est tout aussi importante. Une courbe longtemps soutenue dans la phase de vieillesse a pour résultat une hauteur finale plus élevée.

Le potentiel de croissance, au demeurant fort différent entre les individus, ne se manifeste donc pas uniquement par la vitesse de croissance maximale et la concavité ou convexité de la courbe d'accroissement dans sa partie ascendante.

Fig. 12 Courbes-robot, pour différentes catégories de vitesse de croissance maximale Epicéa, Steffisburg

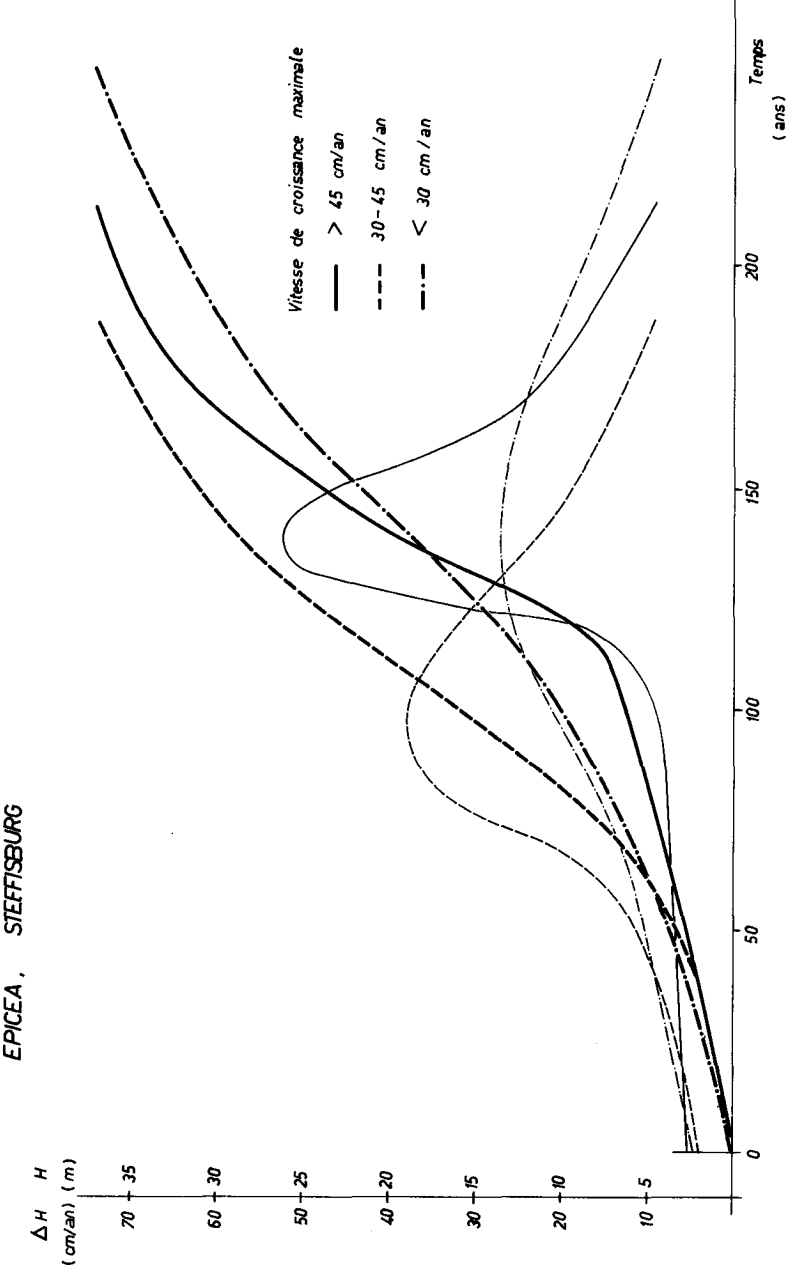
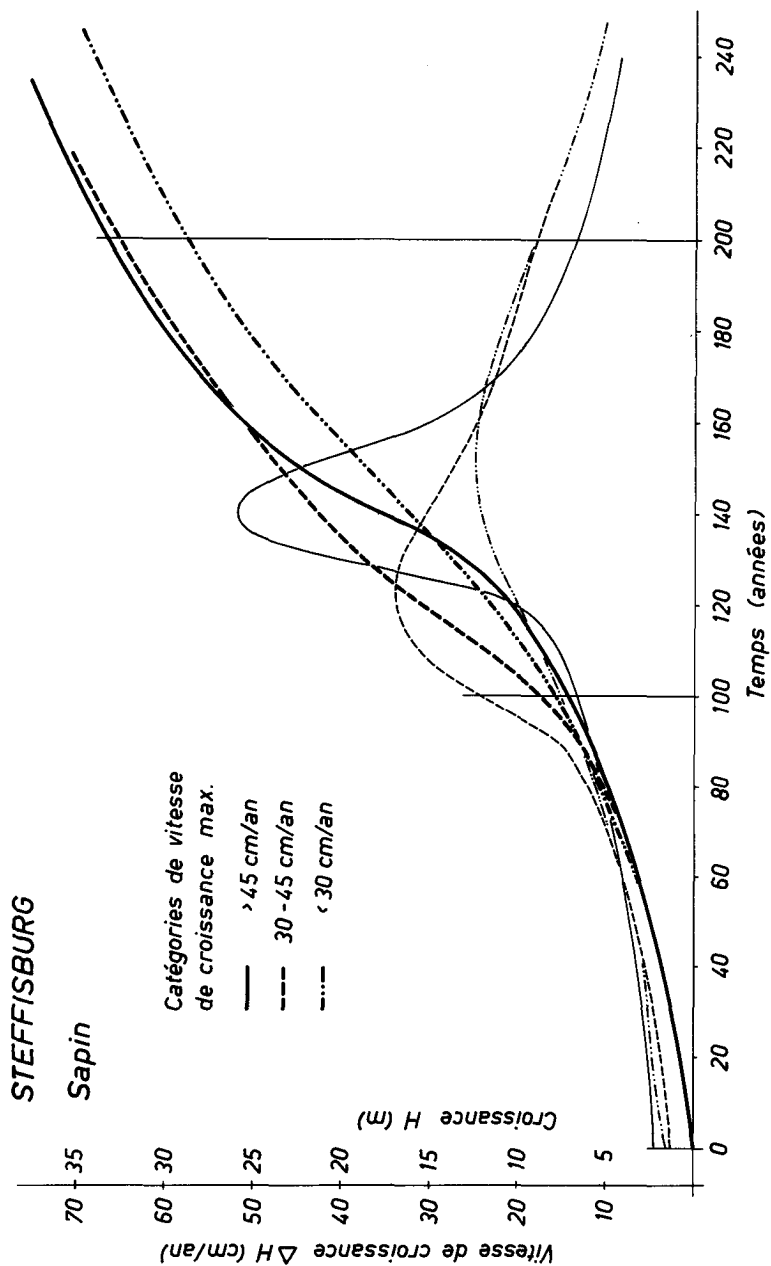


Fig. 13 Courbes-robot, pour différentes catégories de vitesse de croissance maximale Sapin, Steffisburg



### 53. Etude des phénomènes du vieillissement

On emploie généralement le terme de vieillissement pour qualifier l'ensemble des phénomènes ayant trait à la diminution de la vitesse de croissance. Le vieillissement commence une fois passé le maximum de la vitesse de croissance, il continue en passant par différentes phases où l'intensité de vieillissement est différente, jusqu'à la mort naturelle. A ce moment, l'arbre atteint sa hauteur finale. Cette grandeur présente un intérêt particulier, elle représente en effet le résultat final de la croissance, caractérise le potentiel de croissance.

Les phénomènes du vieillissement n'ont pu être étudiés convenablement que pour l'épicéa aux Joux et dans le peuplement vierge de Janj, où les arbres avaient atteint un état assez avancé de leur développement physiologique.

#### 531. Décélération de la croissance dans la phase de sénescence

Au cours de la phase de sénescence, les arbres continuent de croître très lentement pendant un grand nombre d'années. La hauteur qu'un arbre peut encore parcourir est cependant minime par rapport à la hauteur acquise à la fin de la phase de vieillesse.

Aux Joux, nous avons constaté que la fin de la phase de vieillesse se situe à peu près au moment où la vitesse de croissance descend au-dessous de 10 cm/an (TP 20). La différence entre la hauteur à la fin de la phase de vieillesse et celle atteinte au TP 20 est de  $\pm 0.48$  m, c'est-à-dire 1.4 % de la hauteur atteinte. On peut donc admettre que le point du TP 20 correspond à la fin de la phase de vieillesse.

Pour l'étude de la décroissance des courbes dans la zone de culmination, nous avons comparé le gain de hauteur et le temps écoulé entre trois points où la vitesse de croissance est identique, à savoir les points où le temps de passage est de 20, 50 et 100 (vitesse de croissance respectivement de 10, 4, 2 cm/an)

L'étude du temps et de la hauteur parcourus entre ces points, pour l'épicéa aux Joux, montre:

1. La vitesse de croissance maximale ne semble pas avoir d'influence sur la rapidité de la décroissance des courbes dans la région de la culmination (Cf. tab. 10).

Fig. 14 Différentes formes des courbes individuelles, pour une même vitesse de croissance maximale

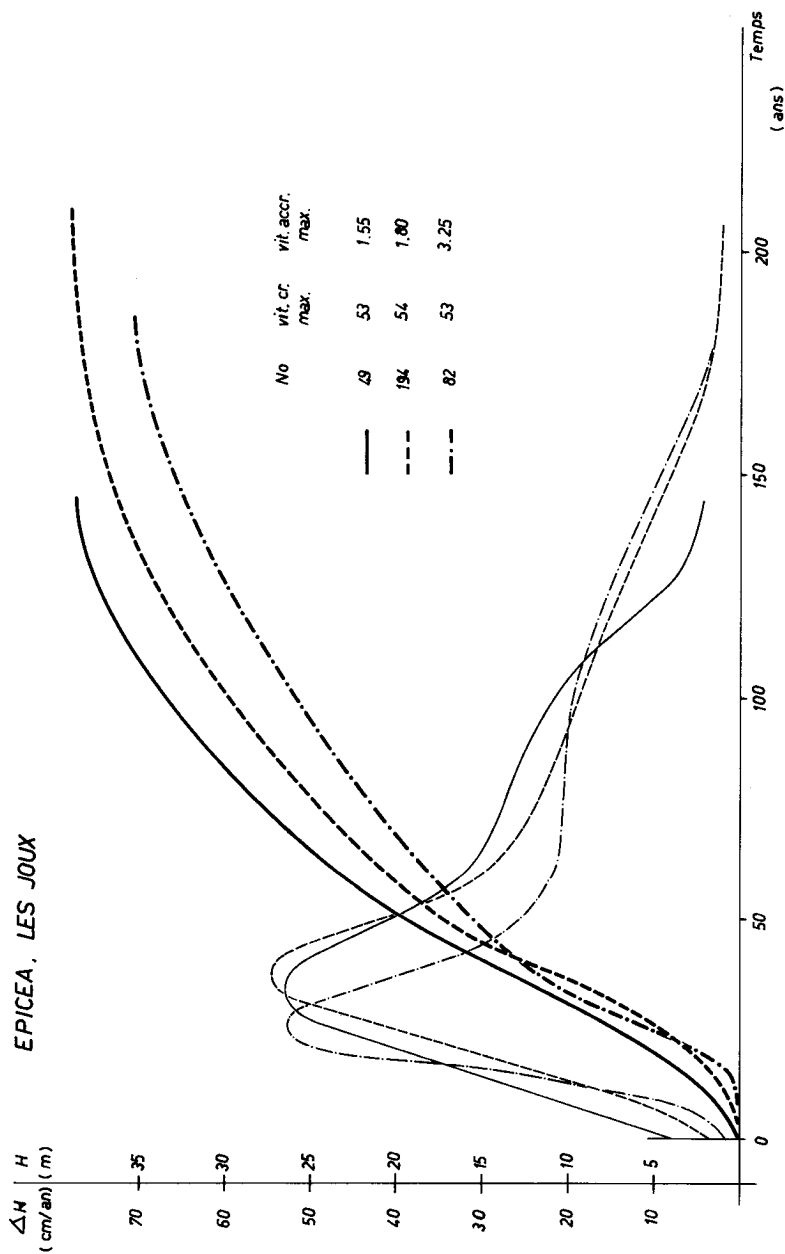
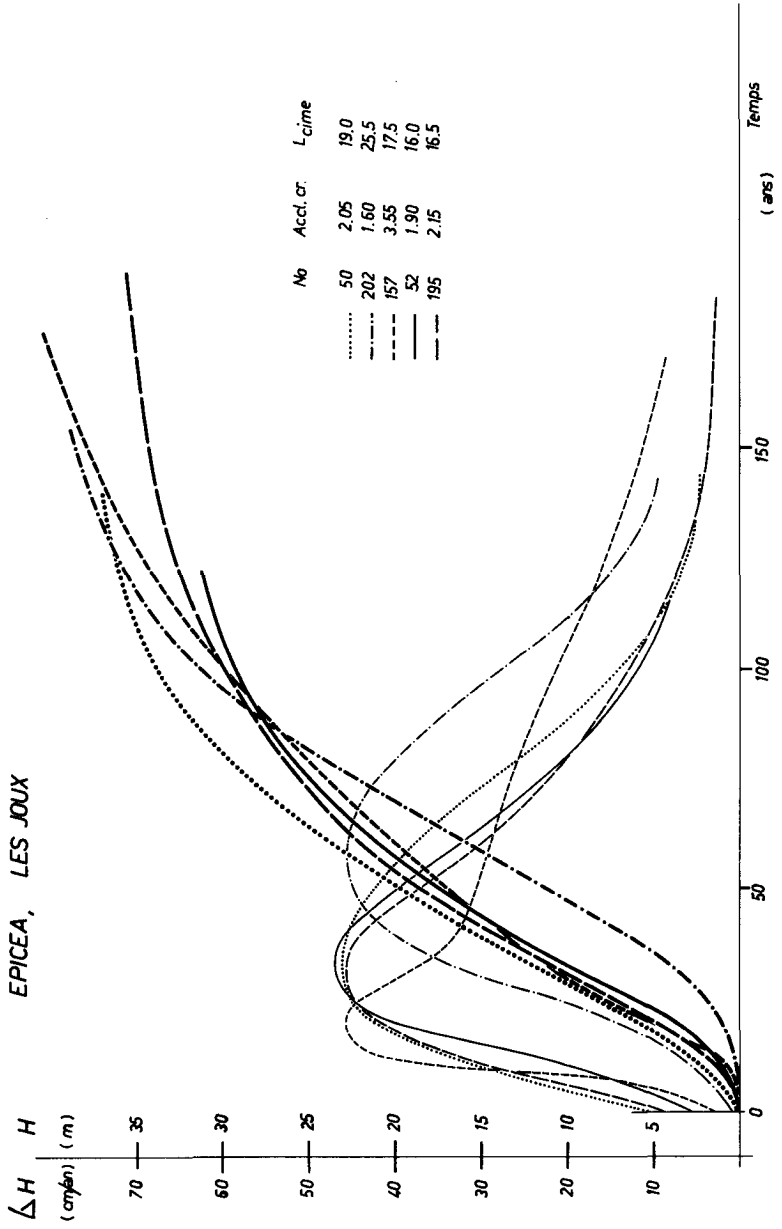


Fig. 15 Différents potentiels de croissance de courbes individuelles de même vitesse de croissance maximale



2. Par contre la longueur des cimes a pour résultat un ralentissement du vieillissement dans la phase de sénescence (Cf. tab. 11). Les arbres à cimes courtes culminent plus rapidement (atteignent plus rapidement la hauteur finale), que les arbres à cimes longues. Un bon développement de la cime permet donc de ralentir quelque peu le vieillissement, par conséquent l'arbre atteindra sa hauteur finale plus tard et cette hauteur sera plus élevée.

532. Variabilité de la hauteur atteinte à la phase de sénescence, importance de la fertilité et des cimes.

L'étude de la distribution des hauteurs atteintes au moment où la vitesse de croissance descend en-dessous de 10 cm/an (TP 20), (fig. 16) montre des courbes de distribution normales, dont les caractéristiques principales sont:

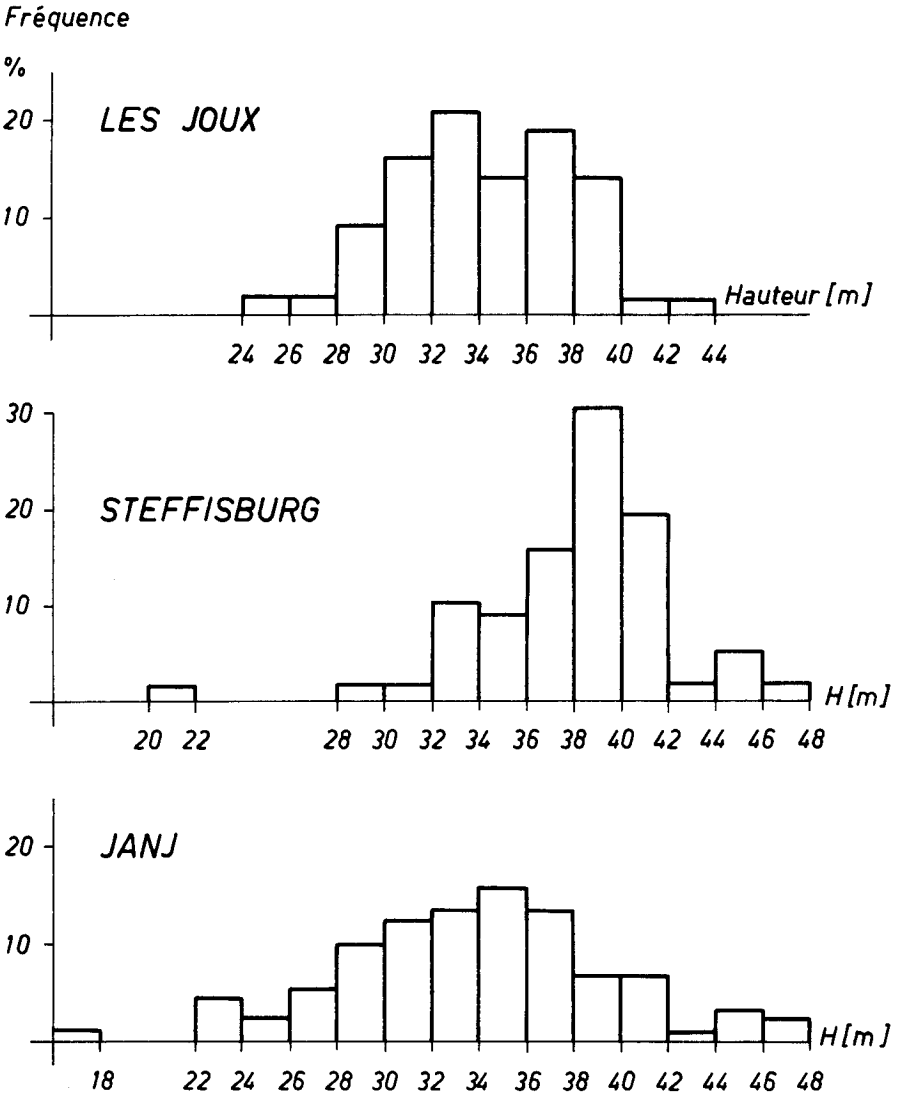
1. La variance est très grande. Le 95 % de la distribution (4 fois l'écart-type) est compris dans un intervalle de hauteur de:

	Epicéa (m)	Sapin (m)
Les Joux	14.4	19.3
Steffisburg	13.5	13.9
Janj	26.0	18.9

Tabelle 10 Différences de temps et de hauteur parcourus entre les points où la vitesse de croissance est de 10 cm/an et 4 cm/an (TP 20/TP 50) et 4 cm/an et 2 cm/an (TP 50/TP 100)  
Epicéa, Les Joux

Catégories de vitesse de croissance maximale (cm/an)	Différence entre TP 20 et TP 50				Différence entre TP 50 et TP 100			
	$\Delta H$ (m)	$\Delta t$ (ans)	Nb	$\Delta H/\Delta t$ (cm/an)	$\Delta H$ (m)	$\Delta t$ (ans)	Nb	$\Delta H/\Delta t$ (cm/an)
> 60	1.87	37	3	5.0	0.20	10	1	2.0
50 - 60	1.33	22	8	6.0	0.68	25	7	2.7
45 - 50	2.62	33	7	7.9	1.35	33	2	4.1
40 - 45	2.44	39	7	6.3	0.50	18	5	2.8
< 30	2.77	37	8	7.5	0.57	16	2	3.6

Fig. 16 Distribution de la fréquence des hauteurs finales atteintes, dans les trois peuplements étudiés





Tablelle 11 Différences de hauteur et de temps parcourus entre les points où la vitesse de croissance est de 10 cm/an et 4 cm/an (TP 20/TP 50), pour différentes catégories de longueur de cime, épicéa, Les Joux

Catégories de longueur de cime (m)	Différence entre TP 20 et TP 50			
	$\Delta H$ (m)	$\Delta t$ (ans)	Nb	$\Delta H/\Delta t$ (cm/an)
< 17.0	1.53	26.9	8	5.7
17.0 - 18.5	2.21	35.3	7	6.3
18.5 - 22.5	2.65	37.4	7	6.8
> 22.5	2.95	36.3	8	8.1

A titre de comparaison, une telle variation de hauteur correspondrait en futaie équienne, pour l'épicéa, à une différence de 6 classes de fertilité d'après la table de production de Badoux (1964). On voit que dans un peuplement jardiné, l'ensemble des facteurs de croissance peuvent se combiner de façon plus ou moins favorable et conduire à des hauteurs finales extrêmement différentes.

La dispersion de ces distributions n'est pas semblable dans les trois peuplements et pour les deux essences. Elle est particulièrement élevée à Janj, dans le peuplement vierge où les conditions de croissance ont été particulièrement extrêmes. Le sapin qui présente moins de différences de croissance (les types de développement sociologique sont moins marqués que pour l'épicéa), a une distribution nettement moins large que celle de l'épicéa. Aux Joux où le sapin s'est régénéré après l'épicéa, et a subi de la part du peuplement des contraintes plus marquées, a une distribution plus large que l'épicéa. A Steffisburg, où sapins et épicéas ont crûs simultanément, on ne constate pas de différence entre les distributions des deux essences.

On peut donc dire que plus les différences des facteurs de croissance sont accentuées dans un peuplement, plus il faudra s'attendre à de grandes variations dans les hauteurs finales atteintes.

2. Les moyennes de ces distributions (tab. 12) montrent que dans un peuplement, le sapin et l'épicéa présentent des moyennes pratiquement semblables. Dans aucun des peuplements, la comparaison statistique des moyennes entre les essences ne donne de différences assurées.

Entre les peuplements par contre, on constate des différences assez nettes. Le peuplement de Steffisburg, poussant dans des conditions écologiques nettement plus favorables (Cf. chap. 212), présente une hauteur finale moyenne de 4 m plus élevée que dans les deux autres peuplements, dont les moyennes sont pratiquement semblables.

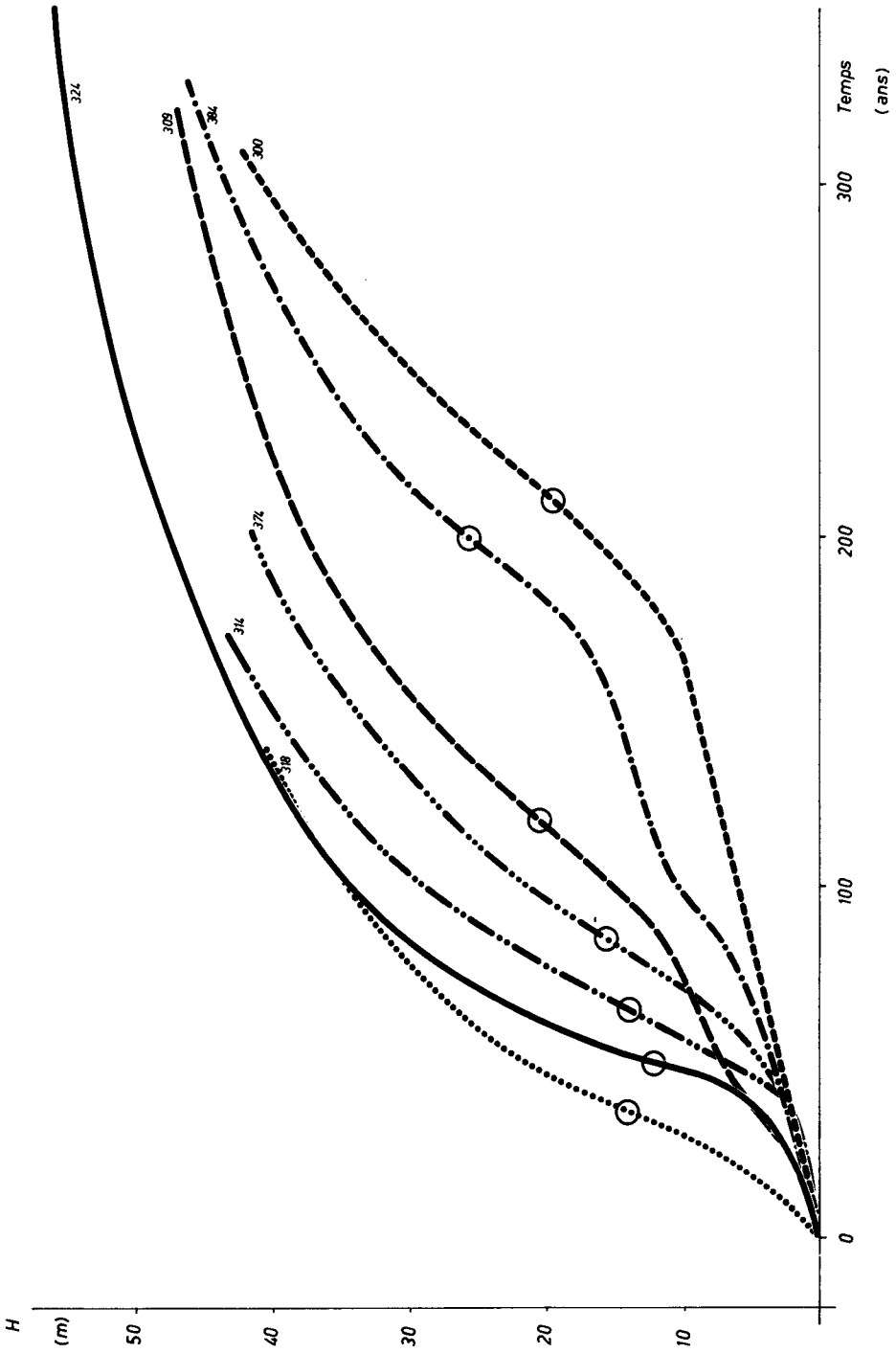
La fertilité dans son sens étendu conditionne donc la hauteur moyenne des tiges, cependant les conditions de croissance et en particulier de concurrence ont pour résultat de faire varier la distribution autour de la moyenne dans une très grande mesure. Dans un peuplement jardiné, du fait des grands contrastes de croissance, il faut s'attendre à une structure naturelle très inégale des tiges physiologiquement âgées du peuplement.

Tabelle 12 Moyennes et écart-type des hauteurs atteintes au moment où la vitesse de croissance est de 10 cm/an, dans les trois peuplements, pour le sapin et l'épicéa.

	Sapin			Epicéa			Ensemble		
	$\bar{h}$ (m)	s (m)	N	$\bar{h}$ (m)	s (m)	N	$\bar{h}$ (m)	s (m)	N
Les Joux	34.4	4.83	9	34.2	3.59	48	34.2	3.76	57
Steffisburg	38.4	3.49	23	38.0	3.37	32	38.2	3.36	55
Janj	34.5	4.73	46	33.1	6.51	42	33.8	5.63	88

La grandeur des cimes doit également avoir une influence sur la variation de la hauteur finale (Cf. chap. 531 et 533.3). Il n'en reste pas moins vrai que la hauteur finale moyenne est représentative de la fertilité.

Fig. 17 Courbes individuelles à meilleur potentiel de croissance Epicéa, Janj



### 533. Le phénomène du gigantisme

La variation de la hauteur atteinte au moment où la vitesse de croissance est de 10 cm/an, nous a montré que dans un peuplement jardiné et plus encore dans un peuplement naturel on trouve des tiges dont la hauteur finale est particulièrement élevée.

Dans le peuplement vierge de Janj, on rencontre un certain nombre de tiges dont le développement en hauteur peut être qualifié d'extraordinaire et ceci particulièrement chez l'épicéa. Nous avons choisi parmi les tiges étudiées à Janj, non pas les plus hautes, mais celles qui potentiellement sont susceptibles d'atteindre et de dépasser 50 m de hauteur (fig. 17), sur la base de la vitesse de croissance entre 36 et 38 m. Si on étudie certaines des caractéristiques de croissance de ces tiges à très bon potentiel de croissance (tab. 13) on peut constater:

1. On rencontre des tiges à potentiel de croissance très élevé dans toutes les classes de développement sociologique excepté la classe 4, les tiges toujours dominées. La majorité appartient cependant à la classe 1, les tiges toujours dégagées. Le fait d'avoir subi une période de compression prolongée en jeunesse ou plus tard ne diminue donc pas en soi la faculté d'atteindre des dimensions très grandes.

Le cas de la tige No 300 qui présente une durée de compression de 170 ans montre bien qu'après une compression très prolongée, la vitesse de croissance peut être tout aussi élevée par la suite que pour des tiges non comprimées. Une compression secondaire entre 5 et 10 m de hauteur n'est pas non plus défavorable, comme le montre l'exemple des tiges No 384 et 309.

2. L'étude de la vitesse de croissance maximale montre que cette grandeur n'est pas non plus limitative. Des tiges croissant très rapidement au moment du maximum de la vitesse de croissance (No 324) ou plus lentement (Nos 300, 309, 384) peuvent atteindre des hauteurs élevées. Parmi les tiges à très bon potentiel de croissance, on n'en rencontre pas dont l'accroissement est très faible pendant la phase adulte, cependant la majorité présentent une vitesse de croissance maximale moyenne (28 à 45 cm/an).

3. La constatation la plus intéressante est sans doute que toutes les tiges à potentiel de croissance élevé possèdent de très longues cimes, nettement plus longues en valeur réelle et en

Table 13 Caractéristiques de croissance des tiges à meilleur potentiel de croissance, Epicéa, Janj

Tige No	Classe de développement socio-logique	Durée de compression an	Intensité de compression cm/an	Vitesse de croissance maximale cm/an	Vitesse de croissance entre 36-38 m cm/an	Longueur de la cime m	Longueur relative %
314	1 (+)	33	3.9	46.0	20	23	54
324	1	21	8.6	85.0	20	37	66
300	3	167	6.0	29.0	19	24	60
374	1 (+)	45	7.8	38.0	18	23	56
318	1	0		54.0	17	23	57
384	2	(156)		29.0	16	26	56
309	2	(74)		28.0	12	27	57
moyenne				44.2		26.2	58.0
moyenne du peuplement			7.9	31.3		19.6	49.6

Tabelle 14 Caractéristiques de croissance des tiges à meilleur potentiel de croissance, Sapin, Janj

Tige No	Classe de développement socio-logique	Durée de compression an	Intensité de compression cm/an	Vitesse de croissance maximale cm/an	Longueur de la cime m	Longueur relative %
très bon potentiel	1/3	62	13.7	38.0	18	42
328		31	11.1	29.0	22	52
326	1	115	4.0	42.0	23	48
305	3	116	6.9	34.0	25	55
333	3	(162)	-	40.0	26	56
336	2					
bon potentiel	3	115	4.0	23.0	16	39
304		148	6.2	27.0	21	54
346	3	28	14.6	34.0	16	39
355	1					

valeur absolue que l'ensemble du peuplement. La fig. 18 nous montre d'autre part un très bon rapport entre la longueur de la cime verte et la hauteur finale atteinte (Hauteur au TP 50). La grandeur de la cime exerce une influence certaine et importante sur le développement.

En ce qui concerne le sapin, à Janj, on trouve moins de tiges présentant un excellent potentiel de croissance. On a relevé 5 arbres à très bon potentiel de croissance, pouvant dépasser 45 m de hauteur et 3 à bon potentiel de croissance, pouvant atteindre 43 à 45 m (tab. 14). On constate comme pour l'épicéa que les caractéristiques d'un bon potentiel de croissance sont principalement la longueur des cimes et une vitesse de croissance modérée. La durée et l'intensité de la période de compression peuvent varier passablement et n'exercent pas d'influence importante, l'appartenance au développement sociologique non plus, sauf bien entendu pour la classe 4.

Ces résultats corroborent les recherches de Liebold (1965) dans les futaies équiennes, qui montrent qu'on reconnaît les arbres à bon potentiel de croissance, en vieillisse, principalement à la longueur de la cime.

#### 54. Influence de différentes grandeurs de croissance sur une partie ou l'ensemble de la croissance en hauteur

---

#### 541. Influence de la durée de compression

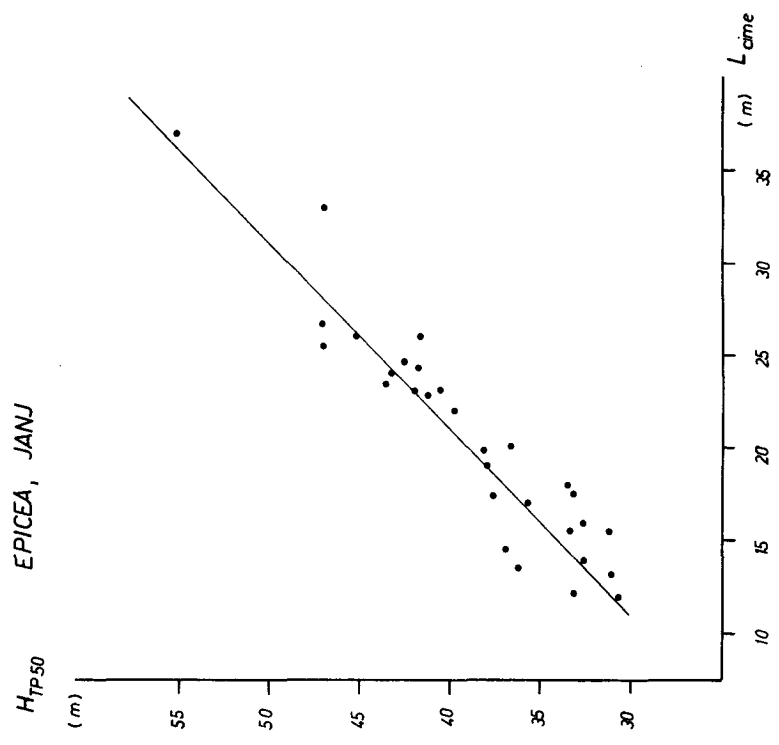
##### 1. Effet de la durée de compression sur la hauteur de différents points caractéristiques du développement

Si on étudie le rapport existant entre la durée de la compression et les hauteurs atteintes à différents états de développement:

- a) à la fin de la période de compression
- b) au moment où la vitesse de croissance est maximale
- c) à la fin de la phase adulte
- d) au temps de passage 20

Les fig. 19 et 20 montrent que en moyenne plus la durée de compression est élevée, plus on assiste à un décalage en hauteur

Fig. 18 Rapport entre la longueur de la cime verte et la hauteur atteinte au TP 50





des différents états de développement. C'est principalement le maximum de la vitesse de croissance (culmination de la courbe d'accroissement) qui est d'autant plus élevé dans le peuplement que la période de compression est de longue durée. Par contre la hauteur atteinte à la fin de la phase adulte et la hauteur finale (au TP 20) ne semblent guère varier en fonction de la durée de compression.

Nous avons déjà vu (Chap. 512, fig. 8) la relation existant entre la durée de la compression et la hauteur atteinte à la fin de la période de compression. Si on étudie maintenant la corrélation existant entre la durée de compression et b) la hauteur atteinte au maximum de vitesse de croissance et c) la hauteur atteinte à la fin de la phase adulte, on trouve:

Corrélation entre la durée de compression et la hauteur atteinte au moment du maximum de vitesse de croissance:

	Coefficient de corrélation	valeur de t	assurance statistique
Les Joux	0.160	0.9992	-
Steffisburg	0.812	9.3319	+++
Janj	0.651	6.8071	+++

Corrélation entre la durée de la compression et la hauteur atteinte à la fin de la phase adulte:

	coefficient de corrélation	valeur de t	assurance statistique
Les Joux	0.035	0.2042	-
Steffisburg	0.158	1.0734	-
Janj	0.031	0.2426	-

On constate que la durée de la compression n'est en liaison stochastique qu'avec la hauteur atteinte au maximum de vitesse de croissance, et seulement pour les peuplements de Steffisburg et de Janj. La liaison n'est pas marquée entre la durée de la compression et la hauteur atteinte à la fin de la phase adulte.

Une période de compression prolongée a donc pour conséquence un décalage de la hauteur à laquelle se passe la pleine croissance,

Fig. 19 Rapport entre la durée de la compression et a) la hauteur atteinte à la fin de la période de compression, b) la hauteur atteinte au moment du maximum de vitesse de croissance, c) la hauteur atteinte à la fin de la phase adulte, d) la hauteur atteinte au TP 20

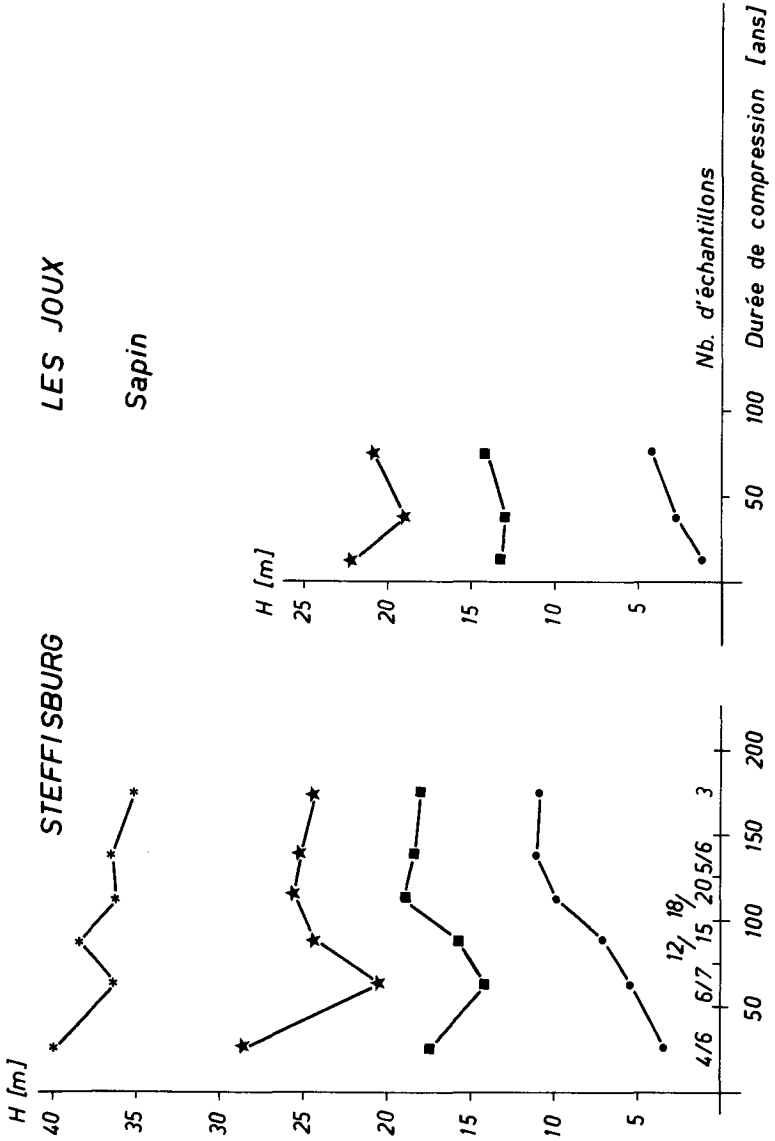
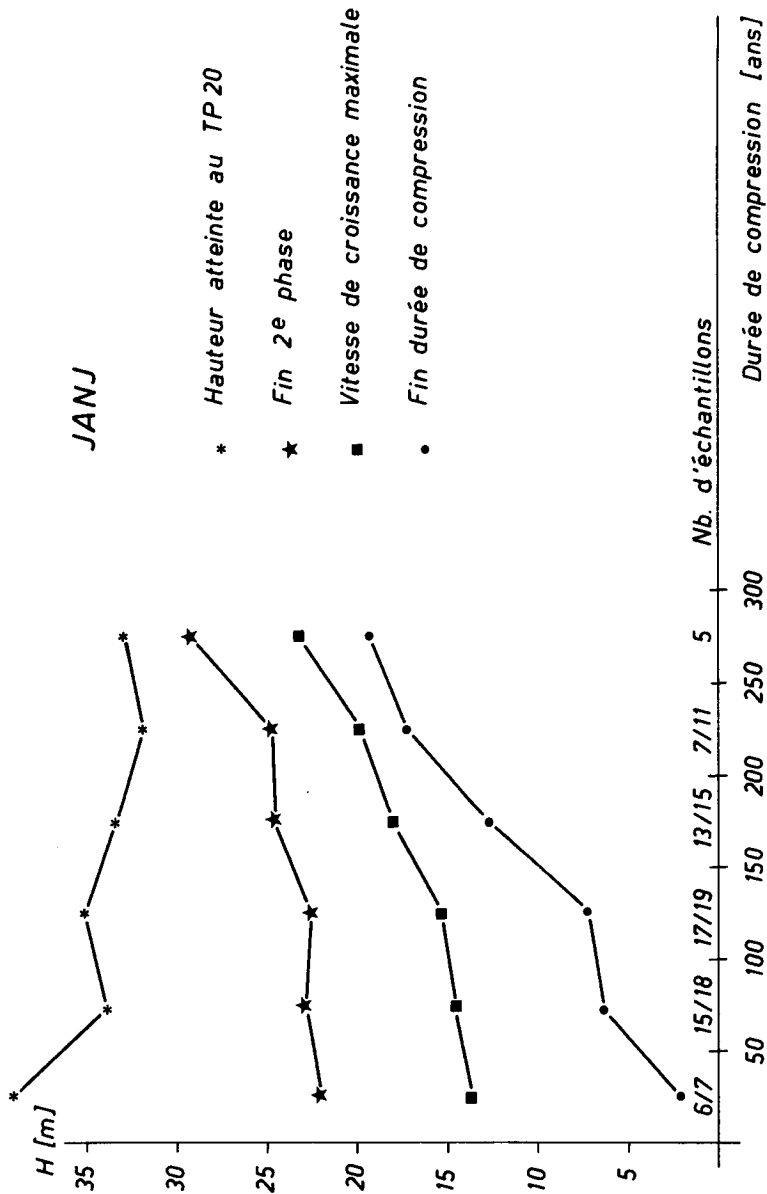


Fig. 20 Rapport entre la durée de compression et les hauteurs atteintes à différents états de développement des tiges Jan]



elle n'a par contre pas d'influence marquée sur la hauteur à laquelle se passent les phénomènes de vieillissement.

Dans une futaie jardinée, donc, le prolongement de la phase de jeunesse en hauteur, causé par de longues durées de compression, réduit considérablement la hauteur à parcourir dans les phases de pleine croissance.

## 2. Influence de la durée de compression sur la vitesse de croissance

L'étude de l'influence de la durée de compression sur la vitesse de croissance à différentes hauteurs, s'est faite par la comparaison du temps de passage (vitesse de croissance) des différentes tranches de hauteurs, entre 2 classes de tiges d'un même peuplement (Steffisburg), une classe comprenant les tiges ayant une durée de compression inférieure à la moyenne, l'autre supérieure (tab. 15). On a comparé statistiquement par tranches de hauteur les temps de passage moyens à l'aide du test de t. On constate:

1. Pour des classes de durée de compression semblables, la hauteur où culmine la vitesse de croissance maximale n'est pas la même pour le sapin et l'épicéa. Cela provient du fait que le sapin a une amplitude de distribution de la durée de compression nettement plus large que l'épicéa (Cf. fig. 12).

2. D'une façon générale les arbres de longues durées de compression croissent légèrement plus vite par la suite que ceux à petite durée de compression.

3. A hauteur semblable, les tiges longtemps comprimées poussent un peu plus rapidement dans l'étage intermédiaire. Les différences ne sont statistiquement assurées que pour le sapin entre 18 et 22 m et 30 et 32 m. Chez l'épicéa elles ne sont jamais assurées. On ne peut donc guère conclure à un rapport entre la durée de compression et la vitesse de croissance.

La comparaison de la vitesse de croissance par tranches de hauteur de 2 m, entre les différents peuplements, pour des classes de durée de compression semblables (tab. 16) nous montre que l'influence d'autres facteurs sur la vitesse de croissance est bien plus marquée que la durée de compression en soi. La comparaison de deux groupes de sapins d'une égale durée de compression aux Joux et à Steffisburg montre que les arbres des Joux croissent

Tabelle 15 Temps de passage par catégories de hauteur de 2 m pour deux classes de durée de compression, à Steffisburg

Catégories de hauteur m	S a p i n		E p i c é a		Comparaisons Sapin		Epicéa	
	Durée de compression < 100 ans	Durée de compression > 100 ans	Durée de compression < 100 ans	Durée de compression > 100 ans	t	ass. stat.	t	ass. stat.
	Nb. passage moyen	Nb. passage moyen	Nb. passage moyen	Nb. passage moyen				
	ans	ans	ans	ans				
0 - 2	14	14	13	13	2,048	(+)	0,4189	-
2 - 4	14	14	13	13	3,705	++	2,9560	++
4 - 6	14	14	13	13	4,8330	+++	3,1814	+++
6 - 8	14	14	13	13	6,9273	+++	3,8867	+++
8 - 10	14	14	13	13	3,8858	+++	3,6221	++
10 - 12	14	14	13	13	2,4929	+	1,0420	-
12 - 14	14	14	13	13	1,0184	-	0,6551	-
14 - 16	14	14	13	13	0,9611	-	0,1543	-
16 - 18	14	14	13	13	2,0226	(+)	0,2226	-
18 - 20	14	14	13	13	2,2233	+	0,6756	-
20 - 22	14	14	13	13	2,1648	+	0,7497	-
22 - 24	14	14	13	13	2,0276	(+)	0,8586	-
24 - 26	14	14	13	13	0,0206	-	0,7749	-
26 - 28	14	14	13	13	0,3779	-	0,4552	-
28 - 30	12	14	13	13	1,1621	-	0,0254	-
30 - 32	10	12	12	13	3,8448	++	0,8946	-
32 - 34	9	10	11	13	2,1262	(+)	0,7155	-
34 - 36	9	11	8	13	0,1308	-	0,8449	-
36 - 38	6	2	5	13	0,3791	-	1,2235	-



nettement plus rapidement et de façon statistiquement assurée à partir de 6 m de hauteur. La comparaison des peuplements de Janj et de Steffisburg montre une très bonne analogie de la vitesse de croissance jusqu'à 20 m. Compte tenu du décalage de la vitesse de croissance maximale on peut estimer que la vitesse de croissance y est pratiquement semblable. A partir de 20 à 24 m il y a une très nette différence de vitesse de croissance (statistiquement assurée); les sapins à Janj croissant nettement plus lentement qu'à Steffisburg. Ceci est probablement dû à la forte concurrence des cimes à Janj, au moment de la pleine fermeture du peuplement.

Il apparaît donc que la durée de compression exerce une influence toute relative sur le développement de la croissance. Elle assure certes un certain décalage en hauteur des phénomènes de croissance par sa durée, mais les facteurs de concurrence, de jouissance de la lumière du peuplement ont une influence bien plus marquée.

#### 542. Influence de l'intensité de compression

Nous avons déjà vu (Chap. 513) combien pouvait être différente la croissance au cours de la phase de jeunesse et que l'intensité de compression pouvait varier énormément. Les figures 9, 11, 12 et 13 permettaient de supposer que l'intensité de la compression pouvait exercer un rôle sur la vitesse de croissance. Si on étudie le problème en comparant les temps de passage moyens par catégories de hauteurs pour des classes d'intensité de compression différentes (tab. 17 et 18) on peut constater:

Dans le peuplement des Joux, les sapins fortement comprimés pendant la période de compression ont une croissance ultérieure plus rapide que ceux qui ont été moins fortement comprimés. Les différences sont statistiquement assurées jusqu'à 14 m de hauteur. A Steffisburg on peut faire les mêmes constatations. Les sapins et les épicéas fortement comprimés en jeunesse croissent plus vite par la suite que ceux faiblement comprimés. Les différences sont statistiquement assurées jusqu'à 30 m pour le sapin et 24 m pour l'épicéa, excepté bien sûr dans la partie où le rapport entre les vitesses de croissance change. Les différences sont plus marquées chez l'épicéa que le sapin. La comparaison de ces résultats avec ceux obtenus en fonction de la durée de compression à Steffisburg

Table 17 Temps de passage moyen par catégories de hauteur pour différentes intensités de compression, Les Joux

Catégories de hauteur m	S a p i n Intensité de compression				Comparaison	
	< 7,3 cm/an		> 7,3 cm/an		t	assurance statistique
	Nb.	temps de passage moyen ans	Nb.	temps de passage moyen ans		
0 - 2	19	43.01	17	23.70	4,6744	+++
2 - 4	19	19.05	17	11.04	3,2761	++
4 - 6	19	9.19	17	8.24	0,8467	-
6 - 8	19	6.44	17	6.91	0,7015	-
8 - 10	19	5.12	17	6.08	2,1719	+
10 - 12	19	4.64	17	5.56	2,5770	++
12 - 14	19	4.54 <sup>†</sup>	17	5.25 <sup>†</sup>	2,1321	+
14 - 16	19	4.69	17	5.38	1,8302	(+)
16 - 18	19	4.91	17	5.74	1,9169	(+)
18 - 20	19	5.46	17	6.11	0,9220	-
20 - 22	19	6.28	17	7.37	1,4418	-
22 - 24	19	7.26	17	9.20	1,3997	-
24 - 26	17	8.33	15	8.99	0,6587	-
26 - 28	11	9.14	13	10.48	1,0957	-
28 - 30	6	12.43	9	11.49	0,4442	-
30 - 32	4	15.90	5	11.68	1,1126	-
32 - 34						
34 - 36						
36 - 38						
38 - 40						



Tabelle 18 Temps de passage moyen par catégories de hauteur pour différentes intensités de compression, Steffisburg

Catégories de hauteur	S a p i n			E p i c é a			Comparaisons			Epicéa		
	Intensité de compression 8,8 cm/an	temps de passage moyen ans	Nb. passage	Intensité de compression 8,8 cm/an	temps de passage moyen ans	Nb. passage	Sapin	t	ass. stat.	t	t	ass. stat.
0 - 2	14	52.39	14	12	44.32	13	5,7698	+++	4,4438	+++	4,4438	+++
2 - 4	14	33.34	14	12	27.56	13	4,8858	+++	3,1011	++	3,1011	++
4 - 6	14	20.23	14	12	17.77	13	2,7284	+	1,0043	-	1,0043	-
6 - 8	14	14.24	14	12	13.37	13	1,8177	(+)	0,4658	-	0,4658	-
8 - 10	14	11.09	14	12	9.24	13	0,9246	-	0,6966	-	0,6966	-
10 - 12	14	9.49	14	12	6.17	13	0,4633	-	3,0438	++	3,0438	++
12 - 14	14	8.74	14	12	5.09	13	0,4757	-	3,3499	++	3,3499	++
14 - 16	14	8.46	14	12	4.88+	13	1,0291	-	2,1032	++	2,1032	++
16 - 18	14	7.16+	14	12	4.90	13	1,8538	(+)	3,8396	++	3,8396	++
18 - 20	14	7.26	14	12	4.98	13	2,1023	+	2,4940	+	2,4940	+
20 - 22	14	7.64	14	12	5.17	13	2,7091	+	2,3618	+	2,3618	+
22 - 24	14	7.94	14	12	5.62	13	2,0463	(+)	2,2450	+	2,2450	+
24 - 26	14	8.49	14	12	6.33	13	1,8890	(+)	1,8147	(+)	1,8147	(+)
26 - 28	14	8.86	14	12	7.51	13	2,5199	+	1,2579	-	1,2579	-
28 - 30	13	9.60	13	12	8.60	13	3,2915	++	0,7171	-	0,7171	-
30 - 32	12	10.68	10	11	9.47	12	1,2456	-	0,5809	-	0,5809	-
32 - 34	10	11.31	8	10	10.24	10	0,2720	-	0,5887	-	0,5887	-
34 - 36	8	11.66	7	9	12.32	7	0,7628	-	0,4657	-	0,4657	-
36 - 38	4	11.26	4	5	12.14	4	0,1304	-	0,1467	-	0,1467	-
38 - 40												

fait apparaître que l'intensité de compression exerce une influence plus marquée sur la vitesse de la croissance que la durée elle-même de la compression, et ceci particulièrement chez l'épicéa.

Ces résultats peuvent être mis en parallèle avec certaines constatations concernant le système racinaire des jeunes arbres comprimés, en futaie jardinée. Săfar (1954) a en effet montré que la diminution de l'accroissement en hauteur pendant la période de compression n'était pas liée à une diminution correspondante de la croissance des racines et que les arbres longtemps comprimés possédaient un système racinaire plus développé que ceux de même hauteur, mais dont la croissance avait été plus forte. Cette constatation a été corroborée par les recherches de Mitscherlich et Weihe (1952) sur de jeunes arbres de futaie jardinée.

L'intensité de compression ou exprimé de façon plus précise la vitesse de la croissance pendant la période de compression exerce donc une influence sur la forme du développement ultérieur, bien que les facteurs spécifiques du peuplement peuvent en contrebalancer l'effet.

#### 55. Comparaison de la vitesse de croissance entre les essences et les peuplements

---

##### 551. Comparaison entre les essences

Si on compare le développement moyen de la vitesse de croissance du sapin et de l'épicéa, par catégories de hauteur, dans les deux peuplements jardinés (tab. 19), on constate:

Les Joux: Du fait du décalage dans le temps des générations de sapin et d'épicéa, les conditions de milieu dans lesquelles ces arbres ont cru n'ont probablement pas été les mêmes. On constate une phase de jeunesse bien plus marquée pour le sapin. Malgré cette différence au départ, les vitesses de croissance ne se distinguent presque pas. L'épicéa croît légèrement plus rapidement que le sapin, mais nous avons vu qu'il s'agissait là d'un phénomène général. Statistiquement la vitesse de croissance entre les deux essences n'est différente de façon assurée que pendant la phase de jeunesse (jusqu'à 12 m de hauteur). Conclusion: malgré une nette différence de développement en jeunesse, la croissance

Tabelle 19 Moyennes, écart-type et comparaison statistique entre le sapin et l'épicéa des temps de passage par catégories de hauteur. Peuplements des Joux et de Steffisburg

Cat. de haut.		LES JOUX										STEFFISBURG										Comparaison sa / ep			
		S a p i n					E p i c é a					S a p i n					E p i c é a								
	m	X	S	N	X	S	N	X	S	N	X	S	N	X	S	N	X	S	N	X	S	N	t	ass. stat.	
0-2		33.89	15.63	36	15.40	4.94	54	8,1257	+++	44.37	12.72	23	36.97	12.41	26	2,1550	+								
2-4		15.27	7.15	36	6.74	4.80	54	6,7752	+++	26.33	11.40	23	23.58	9.70	26	0,9898	-								
4-6		8.74	3.35	36	5.28	1.29	54	6,8856	+++	17.15	8.05	23	16.41	7.68	26	0,3338	-								
6-8		6.67	1.99	36	4.76	0.88	54	6,2053	+++	12.61	5.44	23	12.81	5.98	26	0,1156	-								
8-10		5.57	1.36	36	4.59	0.77	54	4,3653	+++	10.29	4.44	23	10.00	4.19	26	0,2396	-								
10-12		5.08	1.16	36	4.59 <sup>+</sup>	0.78	54	2,4102	+	9.00	3.12	23	7.91	4.42	26	1,2076	-								
12-14		4.88 <sup>+</sup>	1.05	36	4.81	0.83	54	0,3526	-	8.26	2.79	23	6.72	2.83	26	1,9585	(+)								
14-16		5.02	1.18	36	5.15	0.95	54	0,5735	-	7.55	2.59	23	6.32	2.28	26	1,9343	(+)								
16-18		5.30	1.35	36	5.70	1.19	54	1,4803	-	7.56 <sup>+</sup>	2.26	23	6.09	2.45	26	2,1794	+								
18-20		5.91	1.66	36	6.53	2.28	54	1,4021	-	7.97	2.25	23	6.10 <sup>+</sup>	2.87	26	2,4029	+								
20-22		6.79	2.30	36	7.05	2.26	53	0,5281	-	8.63	2.19	23	6.29	3.40	26	2,5374	+								
22-24		8.18	4.21	36	7.70	1.84	52	0,7297	-	8.48	2.26	22	6.60	2.58	26	2,6685	++								
24-26		8.64	2.80	32	9.22	4.46	52	0,6593	-	9.04	2.35	22	7.18	2.54	26	2,6625	++								
26-28		9.86	3.33	24	10.05	3.85	49	0,2067	-	9.72	2.59	22	8.20	2.60	26	2,0890	+								
28-30		11.87	5.81	15	11.41	3.99	45	0,3434	-	10.48	3.30	21	9.30	2.77	26	1,4682	-								
30-32		13.52	8.82	9	12.67	4.01	39	0,5247	-	11.49	3.21	20	10.09	2.98	24	1,5773	-								
32-34		12.90	9.77	5	16.95	9.77	34	0,6516	-	11.64	3.68	16	11.01	3.04	21	0,9006	-								
34-36		12.33	4.11	3	18.44	8.32	24	1,2366	-	12.00	3.62	13	11.98	2.73	16	0,0192	-								
36-38		12.10		2	22.93	7.78	16	1,9112	(+)	12.54	4.10	7	12.28	3.10	9	0,1610	-								
38-40										12.60		2	13.40	3.61	3	0,2117	-								

ultérieure n'est pas notablement différente.

Steffisburg: Ici sapin et épicéa ont cru dans des conditions semblables. On ne constate pas de différences fondamentales dans la forme du développement de la croissance. Le point de culmination de la vitesse de croissance se passe grosso modo à la même hauteur. L'effet de la structure du peuplement se fait sentir par une vitesse de croissance nettement plus lente qu'aux Joux. Le sapin se distingue par sa croissance plus lente que l'épicéa et ceci pratiquement pendant tout le développement. Les différences ne sont cependant statistiquement assurées que entre (12) 16 et 28 m. Cette différence de vitesse de croissance peut provenir du fait que le sapin plus résistant à l'ombre que l'épicéa a pu se développer dans des parties denses de peuplement où l'épicéa n'aurait pas pu croître. En effet on trouve plusieurs tiges de sapin à croissance très lente tout au long de leur vie (correspondant à la classe de développement sociologique 4 à Janj) qui réduisent sensiblement la vitesse de croissance moyenne sur l'ensemble du développement.

Janj: Dans le peuplement vierge de Janj, en raison du développement et de l'évolution du peuplement par surfaces, il faut distinguer entre les classes de développement sociologique. L'étude de la vitesse de croissance dans les classes 1 et 3 (tab. 20) montre une analogie frappante avec le développement dans les deux peuplements jardinés. Dans la classe 1 les sapins et épicéas se comportent comme dans le peuplement des Joux: Décalage du point de la vitesse de croissance maximale du sapin, croissance légèrement plus lente du sapin dans la partie inférieure du développement, jusqu'à 22 m, mais les différences ne sont pas statistiquement assurées. La classe 3 présente des conditions analogues au peuplement de Steffisburg. La vitesse de croissance maximale se passe à la même hauteur pour le sapin et l'épicéa, cependant à Janj c'est le sapin qui croît plus rapidement que l'épicéa pratiquement tout au long du développement. Les différences ne sont pourtant pas statistiquement assurées.

Dans un peuplement relativement ouvert à la lumière (Les Joux), il n'y a pas de différences énormes entre la vitesse de croissance du sapin et de l'épicéa, même si en jeunesse le sapin a subi une période de compression plus prononcée que l'épicéa. Dans un peuplement plus dense (Steffisburg) par contre, les différences de structure en surface et dans le temps peuvent agir

Table 20 Moyennes et comparaison statistique du temps de passage par tranche de hauteur entre le sapin et l'épicéa à Janj pour différentes classes de développement sociologique

cat. de hauteur m	C l a s s e 1						C l a s s e 3					
	Sapin		Epicéa		Comparaison		Sapin		Epicéa		Comparaison	
	$\bar{x}$	N	$\bar{x}$	N	t	ass. stat.	$\bar{x}$	N	$\bar{x}$	N	t	ass. stat.
0 - 2	37.35	9	18.00	13	3,7756	++	58.81	15	55.14	8	0,3835	-
2 - 4	16.01	9	9.60	13	2,8965	++	31.48	15	38.40	8	1,4988	-
4 - 6	9.97	9	6.79	13	2,9174	++	20.77	15	29.44	8	1,6963	-
6 - 8	8.10	9	5.52	13	3,0317	++	16.47	15	22.72	8	1,3283	-
8 - 10	6.99	9	5.04+	13	3,1967	++	10.99	15	15.89	8	1,5394	-
10 - 12	6.46	9	5.15	13	1,8119	(+)	8.23	15	10.39	8	0,9254	-
12 - 14	6.18	9	5.28	13	1,4019	-	7.15	15	8.39	8	1,4537	-
14 - 16	6.03+	9	5.72	13	0,3904	-	6.74+	15	7.76+	8	1,4305	-
16 - 18	6.35	9	6.17	13	0,1935	-	6.91	15	8.02	8	1,5123	-
18 - 20	6.84	9	7.25	13	0,3541	-	7.32	15	8.86	8	1,7168	-
20 - 22	7.41	9	8.22	13	0,5807	-	8.28	15	9.60	8	1,1438	-
22 - 24	8.58	9	9.67	13	0,6337	-	10.53	15	11.90	8	0,7532	-
24 - 26	9.37	9	10.97	13	0,8421	-	13.23	15	14.69	8	0,4684	-
26 - 28	10.47	9	12.01	13	0,8000	-	15.03	15	16.60	8	0,5099	-
28 - 30	11.99	9	13.25	13	0,6250	-	16.67	15	16.34	7	0,1030	-
30 - 32	13.90	8	15.27	13	1,0238	-	17.38	15	18.40	7	0,3179	-
32 - 34	13.03	6	16.80	11	1,1508	-	17.67	15	19.77	7	0,6606	-
34 - 36	17.94	5	19.88	11	0,4083	-	18.80	10	22.47	7	0,9075	-
36 - 38	15.58	4	20.54	10	0,9647	-	19.31	8	26.22	4	1,2586	-
38 - 40	14.97	4	23.82	10	1,5778	-	19.86	5	14.95	2	2,2585	(+)
40 - 42	18.80	2	26.79	8	1,1735	-						

comme catalyseur ou inhibiteur sur la croissance de l'une ou l'autre essence.

### 552. Comparaison entre les peuplements

La comparaison entre les peuplements des Joux et de Steffisburg (tab. 21), montre le décalage de tout le développement. A Steffisburg le maximum de vitesse de croissance se passe 6 m plus haut qu'aux Joux. A hauteurs semblables la vitesse de croissance est toujours différente, plus rapide aux Joux jusqu'à 22 m ensuite plus rapide à Steffisburg. Statistiquement les différences sont toujours assurées sauf bien entendu dans la zone où le rapport de la vitesse de croissance dans les deux peuplements change. Que ces différences soient dues en partie au décalage de tout le phénomène de la croissance est clair.

### 56. Influence du développement sociologique dans le peuplement vierge

---

Les problèmes de la concurrence dans les différentes parties de vie doivent bien sûr exercer une certaine influence sur le développement de la hauteur. Nous avons déjà vu qu'à Janj, dans le peuplement vierge, l'évolution des arbres était différente selon le développement sociologique des individus.

La fig. 21 montre la hauteur parcourue au cours des différentes phases de croissance, pour les quatre types de développement sociologique. On constate que les hauteurs atteintes au temps de passage 50 (hauteur finale) diffèrent fortement entre les classes. Pour l'épicéa à part la classe 2 (tiges ayant subi une compression secondaire), où la variation est énorme, on trouve les moyennes suivantes:

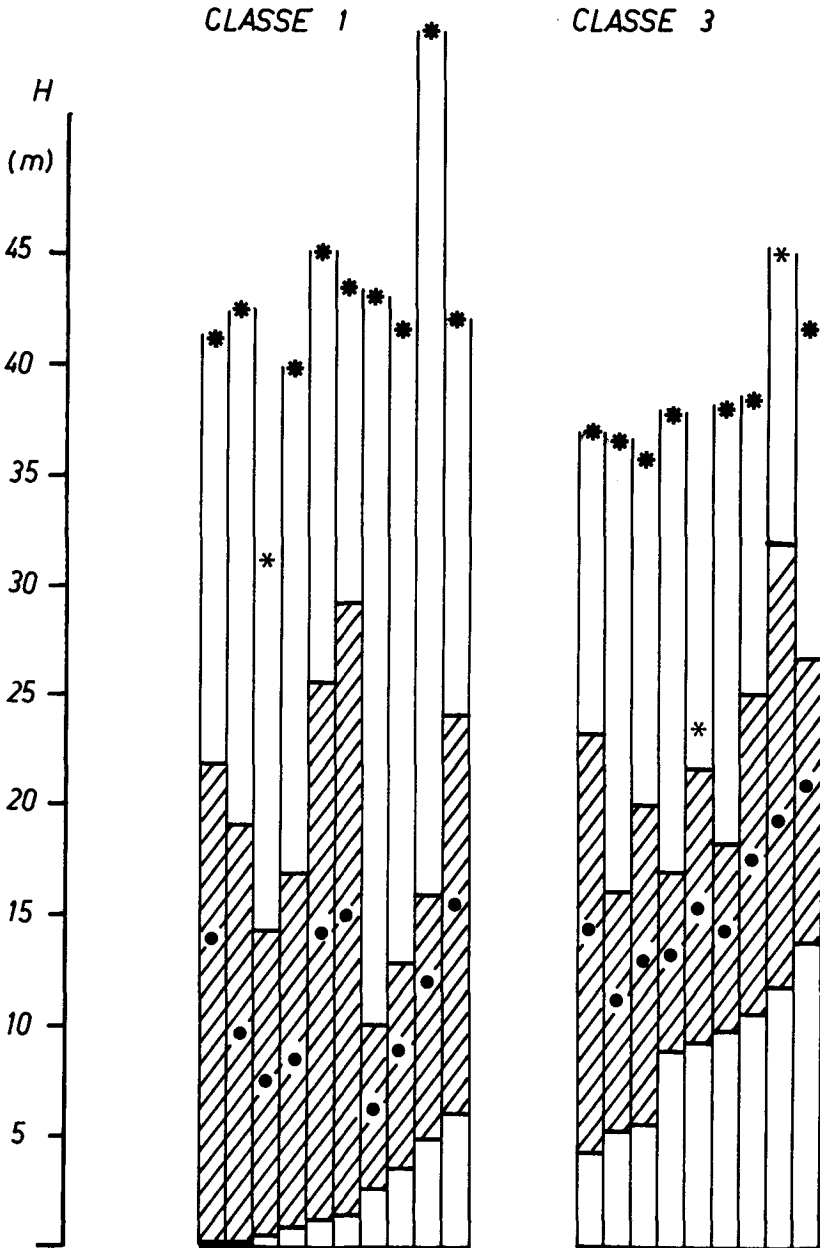
Moyennes des hauteurs atteintes au TP 50 dans trois classes de développement sociologique, pour l'épicéa, à Janj

	hauteur finale (m)
Classe 1	42.5
Classe 2	38.7
Classe 3	32.7

Tabelle 21 Moyennes, écart-type et comparaison statistique du temps de passage moyen entre le peuplement des Joux et de Steffisburg

catégories de hauteur m	Les Joux			Steffisburg			Comparaison assurance stat.	
	$\bar{x}$	s	N	$\bar{x}$	s	N	t	
0 - 2	22.80	13.91	90	40.44	12.41	49	7,4121	+++
2 - 4	10.15	6.35	90	24.87	9.70	49	10,7807	+++
4 - 6	6.67	2.88	90	16.76	7.68	49	11,2036	+++
6 - 8	5.52	1.70	90	12.72	5.98	49	10,6793	+++
8 - 10	4.98	1.14	90	10.13	4.19	49	10,9621	+++
10 - 12	4.78	0.97 <sup>+</sup>	90	8.42	4.42	49	7,5144	+++
12 - 14	4.84	0.92	90	7.44	2.83	49	8,0049	+++
14 - 16	5.09	1.05	90	6.90	2.28	49	6,3935	+++
16 - 18	5.54	1.26	90	6.79	2.45 <sup>+</sup>	49	3,9707	+++
18 - 20	6.28	2.07	90	6.98	2.87	49	1,6560	-
20 - 22	6.95	2.27	89	7.38	3.40	49	0,8881	-
22 - 24	7.89	3.02	88	7.46	2.58	48	0,8324	-
24 - 26	9.00	3.90	84	8.04	2.54	48	1,5253	-
26 - 28	9.99	3.64	73	8.89	2.60	48	1,8012	(+)
28 - 30	11.53	4.46	60	9.83	2.77	47	2,2856	+
30 - 32	12.83	4.35	48	10.73	2.98	44	2,6779	++
32 - 34	16.56	9.70	39	11.28	3.04	37	3,1655	++
34 - 36	17.76	8.15	27	11.99	2.73	29	3,6035	+++
36 - 38	21.73	8.11	18	12.39	3.10	16	4,3245	+++
38 - 40	22.61	5.90	7	13.08	3.61	5	3,1860	++

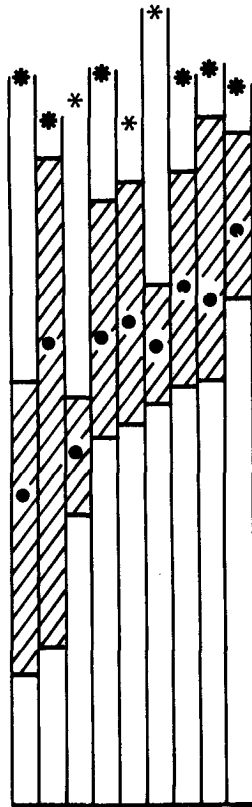
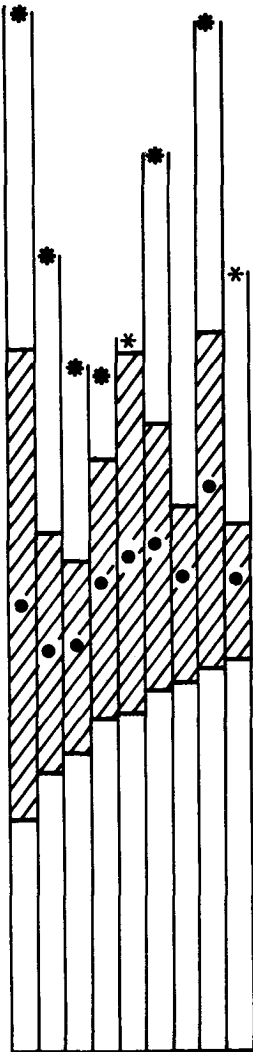
Fig. 21 Gain de hauteur au cours des différentes phases en fonction de la hauteur atteinte à la fin de la phase de jeunesse, pour différentes classes de développement sociologique, Epicéa, Janj





CLASSE 2

CLASSE 4



*Hauteur atteinte au*

\* TP 50

\* TP 20

• max. vitesse cr.

 Phase adulte

Donc évoluant de façon différente, les arbres atteignent des hauteurs différentes en fin de vie. On remarque d'autre part que la variation des points où la vitesse de croissance est maximale, et la variation de la hauteur parcourue pendant la phase adulte est beaucoup plus grande pour la classe 1 que pour les autres classes, signe que les tiges des classes comprimées ont cru dans des conditions extérieures plus régulières que celles de la classe 1.

#### 57. Rapport entre la croissance en hauteur et la croissance en diamètre

---

Nous avons vu au chap. 32 (fig. 6) que la croissance du diamètre en fonction du temps suivait dans sa partie inférieure à peu près le même cours que la croissance en hauteur. Elle n'en différerait fondamentalement qu'en fin de vie, au moment où la vitesse de croissance en hauteur diminue fortement, tandis que la croissance en diamètre restait plus ou moins constante.

#### 571. Evolution du rapport hauteur au diamètre au cours de la vie des arbres

---

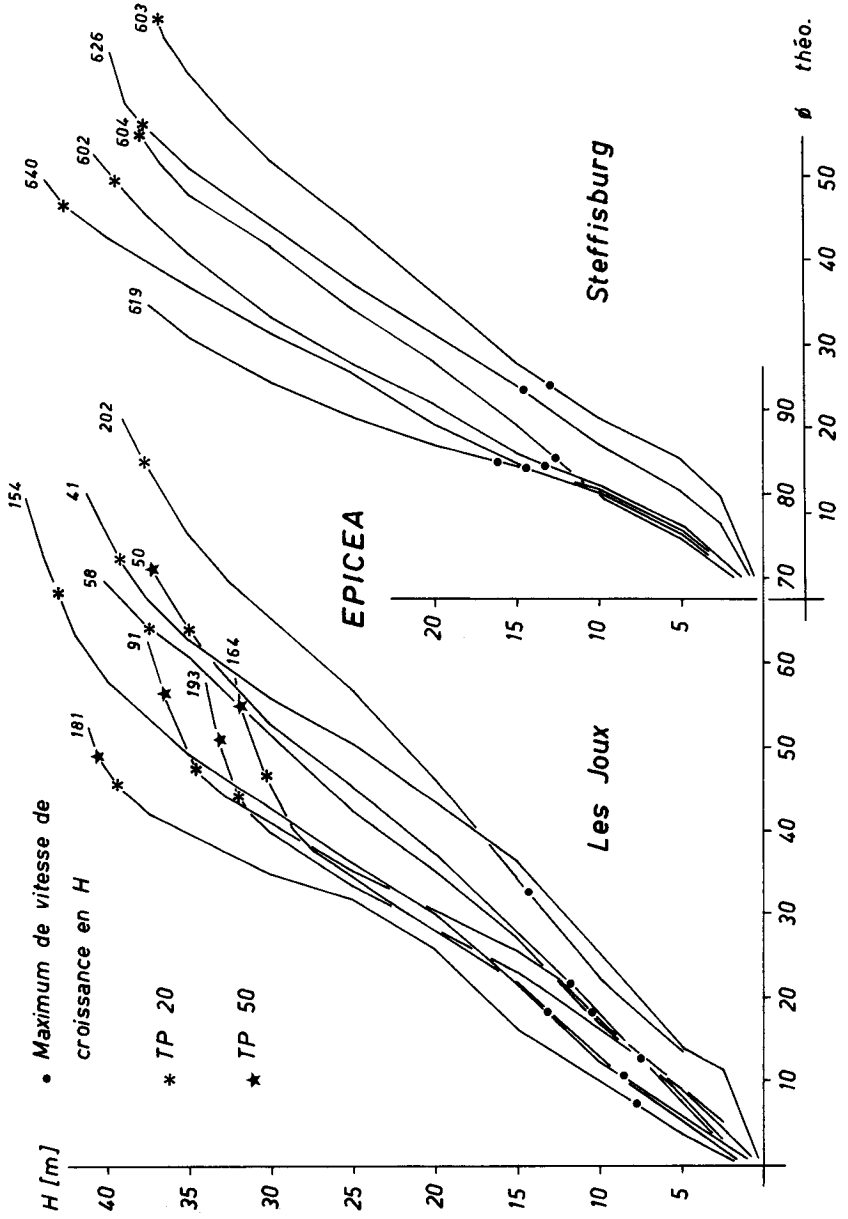
La représentation du rapport hauteur au diamètre théorique sous écorce de différentes tiges individuelles (fig. 22) montre les particularités suivantes:

1. D'une façon générale le rapport hauteur au diamètre d'un arbre est à peu près constant dans la plus grande partie de sa vie. A partir d'un certain moment, qui se trouve être généralement au début de la phase de sénescence, ce rapport diminue très fortement et la courbe s'aplatit plus ou moins rapidement. Cela est dû au fait que quand la croissance en hauteur ralentit fortement, la croissance en diamètre continue plus ou moins régulièrement.

2. Le rapport hauteur au diamètre dans la première partie de la vie varie passablement d'une tige à l'autre. Les différences entre les tiges d'un peuplement augmentent avec la hauteur. Le coefficient de sveltesse (= rapport  $h/d$ ) n'est donc pas représentatif de l'état de développement des tiges.

3. La hauteur à partir de laquelle le rapport hauteur au diamètre diminue fortement n'est pas la même pour toutes les tiges,

Fig. 22 Evolution du rapport hauteur au diamètre théorique, pour différentes tiges individuelles



puisque la croissance en hauteur ne culmine pas à des hauteurs semblables.

#### 572. Variabilité du rapport hauteur au diamètre à différentes hauteurs

---

La représentation de la variabilité des diamètres à des hauteurs fixes, sans tenir compte de la variabilité à l'intérieur des tranches de hauteurs, par reconstitution du diamètre théorique à différentes hauteurs (fig. 23), permet d'éliminer dans une certaine mesure le phénomène de la diminution du rapport  $h/d$ , dû à l'effet de vieillissement. On constate que la variation de la distribution des diamètres augmente régulièrement avec la hauteur. La moyenne se place approximativement sur une droite. Ce n'est qu'à des hauteurs assez élevées que cette droite s'incurve vers l'axe des diamètres. La variation de la distribution des diamètres à hauteur égale est cependant différente dans les trois peuplements. Dans celui des Joux, la variation est nettement plus élevée que dans les deux autres peuplements, ce qui provoque le décalage vers la droite des moyennes. Dans des conditions favorables de croissance, les arbres sont donc en moyenne plus larges à hauteur égale.

## 6. CONCLUSIONS

=====  
Nous nous sommes proposés au début de ce travail de rechercher les influences exercées sur la croissance des arbres dans un peuplement jardiné par les facteurs endogènes et exogènes. A vrai dire une délimitation nette entre ces deux groupes de facteurs est par trop arbitraire et en réalité il est souvent difficile de distinguer si tel ou tel facteur est plutôt de nature endogène qu'exogène. Les facteurs de croissance sont tous plus ou moins dépendants les uns des autres et l'intensité avec laquelle ils s'impriment sur les phénomènes de la croissance est mal connue et dépend souvent de conditions particulières.

La variabilité des facteurs du milieu dans un peuplement jardiné et l'évolution de ces facteurs au cours du temps compliquent grandement l'interprétation des résultats. De fait, les observations relevées et les résultats trouvés ne sont valable de façon absolue que dans les trois peuplements étudiés. Certains résultats peuvent faire présumer des conclusions d'une portée plus générale, des contrôles sur d'autres peuplements sont absolument indispensables avant de vouloir établir des conclusions définitives.

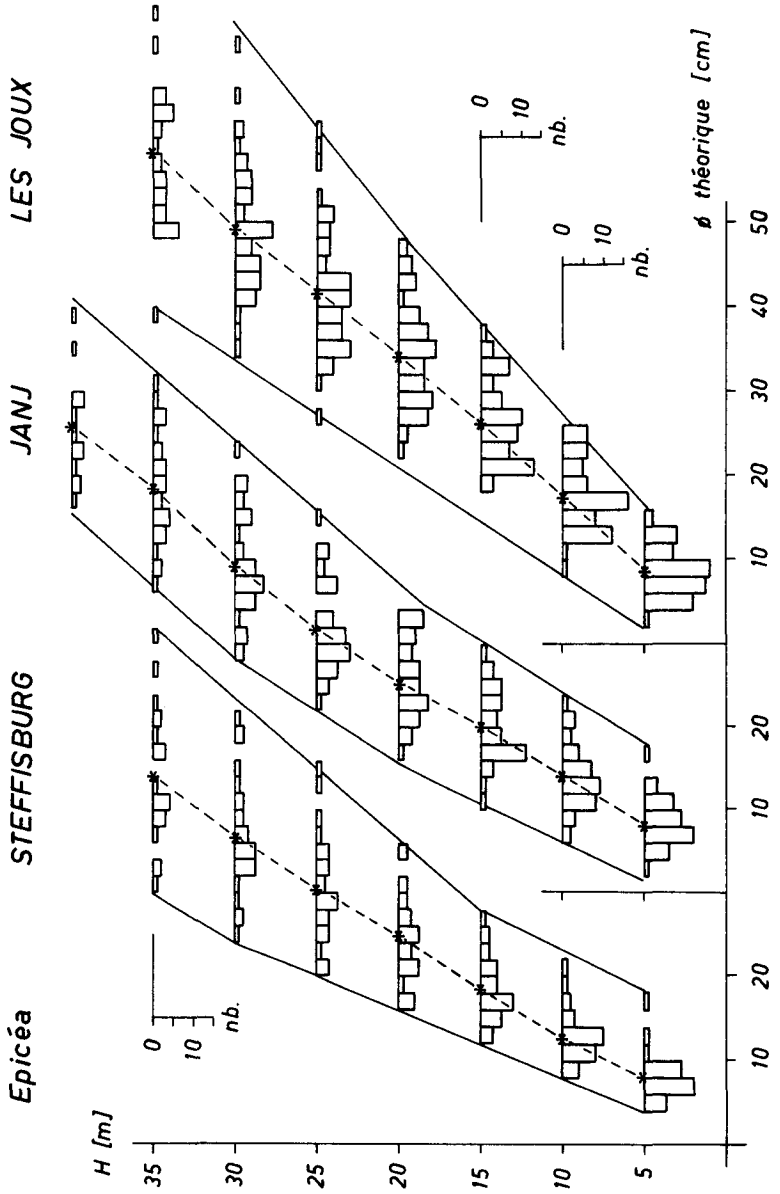
Les méthodes d'analyse employées ayant pour but d'embrasser l'ensemble du développement des arbres au cours de leur vie, il n'a pas été possible d'éliminer certains facteurs influençant la croissance pour se concentrer sur d'autres.

### 61. Importance des résultats sur la production et l'aménagement des futaies jardinées

---

Avant de mieux situer les problèmes de la production et d'aménagement de la futaie jardinée, parfois fondés ou dérivés de ceux de la futaie équienne, il convient de mettre en évidence les différences fondamentales entre ces deux genres de régime. Du point de vue de la production, la futaie équienne se fonde sur les propriétés de production maximale des peuplements. La production maximale ne se réalise qu'au prix de pertes de production inhérentes aux propriétés fondamentales de la croissance des arbres. Il faut donc compter avant que la production maximale ne se réalise,

Fig. 23 Distribution des diamètres théoriques à des hauteurs fixes dans les trois peuplements Epicéa



des délais plus ou moins longs où les arbres produisent très peu, avant d'atteindre les stades de productivité. On a donc avantage afin d'améliorer la production de diminuer le plus possible la durée de ces périodes improductives, en d'autres termes d'accélérer la croissance dans la jeunesse. La futaie jardinée se fonde sur des considérations fondamentalement différentes. On utilise la production optimale permanente des peuplements et non plus une production maximale intermittente. Pour ce faire la production se concentre sur les tiges de l'étage supérieur, celles des étages intermédiaire et inférieur étant en quelque sorte en délais d'attente ou en préparation, n'étant engagées dans la production que pour remplacer les éléments de production ne travaillant plus rationnellement ou ayant atteint des dimensions fixées. Afin d'augmenter la production on n'a donc plus avantage d'accélérer la croissance des tiges non engagées dans la production, mais à augmenter la production des tiges y participant.

En futaie équienne c'est la notion d'âge qui domine les phénomènes de croissance et partant, de production, parce que toutes les tiges évoluent ensemble et dans une certaine mesure dans des conditions semblables. Les phénomènes de croissance peuvent donc être mis en relation avec le développement dans le temps du peuplement. Dans la futaie jardinée, non seulement les arbres ont des âges physiques et physiologiques fort différents, mais ils sont soumis de la part du peuplement à des contraintes différentes selon les étages où ils se trouvent et les phases de croissance qu'ils parcourent. Ce n'est pas une notion d'âge ou de temps qui domine les phénomènes de croissance en futaie jardinée, mais une notion d'augmentation de hauteur ou plus exactement de vitesse de croissance.

La continuité de la production au cours du temps en futaie équienne dépendra d'un certain équilibre des classes d'âge, sur une surface donnée. En futaie jardinée, elle exige un certain nombre d'arbres en délais d'attente, non engagés dans la production. Cette exigence pose un certain nombre de sujétions au peuplement lui-même. Il faut que l'étage producteur du peuplement laisse filtrer suffisamment de lumière pour que les tiges non engagées dans la production de l'étage inférieur puissent subsister en nombre assez élevé pour permettre une sélection qui se passe dans l'étage intermédiaire. Il faut donc régler les phénomènes de la croissance

de façon à conserver l'équilibre en concentrer la production sur les tiges engagées.

L'aménagement des futaies jardinées se trouve placé devant un double problème: augmenter la production des arbres effectivement engagés dans la production (l'étage supérieur) pour atteindre la production optimale, tout en assurant l'équilibre de la production dans le temps. La solution du problème sera de savoir dans quelle mesure on peut sacrifier provisoirement l'équilibre à la production ou la production à l'équilibre et sur quelle durée de temps.

L'étude de la structure idéale, permettant de remplir les conditions mentionnées ci-dessus s'avère assez complexe. En effet, il s'agit de connaître un certain nombre de relations pouvant dépendre les unes des autres. Il s'agit par exemple de savoir dans quelle mesure la production individuelle élevée d'un petit nombre de tiges de l'étage supérieur compensera la production réalisée par un plus grand nombre de tiges. C'est-à-dire les relations existant entre la densité, la distribution de la lumière et la grandeur des cimes qui en résulte et leur effet sur la production totale. Ce problème, comme d'autres, n'est pas facile à résoudre, parce que les phénomènes observés sur des peuplements dans une structure déterminée ne seront pas forcément les mêmes dans le peuplement idéal, puisqu'il doit y avoir des rapports de cause à effet entre la structure et les phénomènes de la croissance.

D'autre part le critère de production n'est pas le seul en futaie jardinée, il faut encore que la production soit soutenue dans le temps. Cela nécessite la présence de suffisamment de tiges dans les étages inférieur et intermédiaire pour assurer le remplacement des éléments réalisés et aussi, et l'argument n'est pas sans importance, pour pratiquer la sélection de ces éléments d'avenir. Ce travail a montré en effet une grande variabilité des caractéristiques de la croissance et que selon les conditions de milieu particulier dans lequel ils ont cru dans un peuplement et leur constitution génétique, les arbres présentent des phénomènes de croissance très favorables à la production dans certains cas, mais aussi beaucoup moins dans d'autres. Une augmentation de la production et la réalisation de la production optimale exige donc une sélection des arbres ayant le meilleur potentiel de croissance. Or ce potentiel de croissance ne s'exprime pas forcément dans les premières années de la vie des arbres, où la croissance est forte-



ment dépendante des conditions de lumière, mais il faut attendre qu'ils aient une certaine hauteur, en tous cas qu'ils aient dépassé le moment du maximum de la vitesse de croissance en hauteur, c'est-à-dire lorsqu'ils se trouvent dans l'étage intermédiaire. La production optimale ne sera pas possible sans un nombre assez élevé de tiges dans l'étage intermédiaire, afin de pouvoir exercer une sélection selon le potentiel de production de ces éléments. D'autre part la sélection se fera également selon des critères de qualité. En effet un nombre suffisamment élevé de tiges dans l'étage intermédiaire ne s'obtiendra qu'au prix d'une diminution des tiges dans l'étage supérieur. Il faudra donc pour que la production soit rentable que seules les tiges ayant la meilleure qualité atteignent l'étage supérieur et réalisent ainsi mieux la perte d'accroissement due justement à la diminution de leur effectif. Il restera à savoir quel niveau cette diminution peut atteindre sans que la production s'en ressente.

On objecte souvent à la futaie jardinée, que les phénomènes de la croissance se passent trop lentement et que les arbres nécessitent des délais de production trop élevés avant d'atteindre des dimensions exploitables. Il n'est pas juste d'appliquer aux peuplements jardinés une période de révolution telle qu'on la conçoit en futaie équienne, puisque l'âge des tiges en délais d'attente n'exerce absolument aucune influence sur leur développement futur. Il faut reconnaître cependant que le temps que mettent les arbres depuis la fin de la période de compression pour atteindre les dimensions d'exploitabilité est très important. En effet, la vitesse de croissance au cours de la phase de production doit permettre de déterminer la structure de l'étage supérieur permettant la production optimale. Cette structure ne sera pas la même si les arbres mettent 60 ou 120 ans pour parcourir la phase de production. Plus ce temps sera de courte durée, moins il faudra de tiges dans l'étage supérieur pour arriver à la même production.

L'avantage de la futaie jardinée est en fait à cet égard que la hauteur à parcourir dans la phase de production est moins grande qu'en futaie équienne, du fait du prolongement de la phase non productive (période de compression).

La fertilité en futaie jardinée joue un rôle différent qu'en futaie équienne. Certes la fertilité a pour résultat que la hauteur finale moyenne des tiges est plus ou moins grande que la fertilité

est bonne, et par là même la production totale s'en trouve influencée. Selon la fertilité on pourra donc avoir une répartition différente des tiges dans le peuplement idéal. Cependant, nous avons vu que la fertilité n'était pas responsable de la vitesse de croissance en hauteur et en diamètre, mais qu'à cet égard, la structure du peuplement et la grandeur des cimes jouait un rôle déterminant. En effet dans le peuplement des Joux où la hauteur finale est de 4 m inférieure en moyenne à celle du peuplement de Steffisburg, la vitesse de croissance en hauteur et en diamètre est supérieure. D'autre part, la grande dispersion des hauteurs finales individuelles autour de la moyenne, montre les différences importantes de potentiel de production, donc des possibilités d'améliorer la production par le traitement sylvicole, en particulier par la sélection.

#### Les méthodes d'aménagement

Dans l'état actuel des connaissances, il est pratiquement impossible de connaître la structure permettant la production optimale en futaie jardinée. On peut supposer sur la base des peuplements étudiés qu'une densité moyenne, c'est-à-dire une bonne distribution de la lumière et par conséquent une bonne structure des cimes sera plus favorable à la production qu'un peuplement dense, parce que la vitesse de croissance en sera accélérée.

Pour les peuplements jardinés, il convient de connaître d'une part si l'équilibre de la production est respecté et d'autre part si les éléments producteurs (arbres de l'étage supérieur) produisent suffisamment. La première condition est difficile à réaliser car on ne connaît pas le rapport du nombre de tiges nécessaire à la production soutenue et à la sélection. D'autre part les méthodes d'inventaire pratiquées (inventaire complet des tiges de plus de 16 ou 17.5 cm de diamètre) ne permettent de connaître qu'une partie du peuplement. A Steffisburg, les arbres de 16 cm de diamètre ont en moyenne 14 m de hauteur, aux Joux 13. La méthode pratiquée ne permet donc pas d'analyser l'étage inférieur où se trouvent les réserves de production. La distribution de tiges par catégories de diamètre ne nous permet donc de juger que des étages intermédiaire et supérieur. Baisser le seuil d'inventaire à 10 cm nous permettrait de relever les tiges de plus de 7 à 8 m de hauteur et nous donnerait une meilleure idée de la stabilité des peuplements mais ne résoudrait pas entièrement le problème.

Du point de vue de la production, à part le calcul de l'accroissement total, il serait très intéressant de connaître la vitesse de croissance en diamètre des arbres engagés dans la production, afin de juger de leur potentiel de production. L'étude de l'accroissement par catégories de diamètre et du temps de passage des différentes catégories de diamètre pourront nous fournir des renseignements de haute valeur à cet égard.

## 62. Répercussions sylvicoles des résultats

Les répercussions des résultats sur le traitement sylvicole dépendent directement des considérations faites sur la production des peuplements jardinés. Il a été intéressant de constater l'énorme variabilité des caractéristiques de la croissance et du potentiel de croissance dans un peuplement jardiné. De par la diversité des éléments du milieu, la croissance peut être très différente et atteindre des grandeurs très variables. On conçoit donc l'importance que le traitement sylvicole est appelé à jouer en futaie jardinée, d'une part la sélection des meilleurs potentiels de croissance et d'autre part en favorisant le développement individuel de la croissance.

Dans l'étage inférieur on pourra conserver très longtemps les recrûs, même s'ils ont une croissance très lente (3 à 4 cm/an), sachant que la durée de la compression n'exerce pratiquement pas d'influence sur la vitesse de croissance dans les phases ultérieures. D'autre part nous avons vu qu'une vitesse de croissance lente pendant la période de compression correspondait en moyenne à un développement plus rapide par la suite. Les recrûs n'ont donc pas besoin d'être dégagés pour subsister, sauf si leur croissance est par trop lente. Cependant une fois dégagés il leur faudra suffisamment de lumière pour croître. Il ne faudra donc dégager les recrûs que dans la mesure où l'étage intermédiaire a besoin d'être renforcé. Un dégagement trop tôt et insuffisant ne correspondrait pas à une réponse favorable de la croissance. L'important est qu'une tige une fois dégagée ait la possibilité de croître sans contrainte, jusque dans l'étage supérieur. Dès qu'une tige est dégagée, c'est-à-dire qu'elle quitte la phase de compression, elle est engagée dans le cycle de production.

Dans l'étage inférieur donc, le sylviculteur n'interviendra que si les recrûs sont par trop comprimés en les dégageant légèrement ou si le rajeunissement n'est pas assez abondant, encore qu'à cet égard un peuplement où le rajeunissement est trop peu représenté n'est pas nécessairement un signe que la production soutenue n'est plus possible, les périodes de compression pouvant s'étendre sur plusieurs dizaines d'années.

En fait les véritables interventions sylvicoles ne devraient commencer que dans les gaulis au moment où les arbres quittent la période de compression. A ce stade, un dégageement progressif sera très important, avec pour dessein de former des cimes bien développées. Par la suite, c'est-à-dire relativement tard, interviendra la sélection selon le potentiel de croissance, étant donné que le potentiel de croissance ne se manifeste que très tard, après le maximum de vitesse de croissance. Cette sélection sera difficile, car on ne sait pas exactement, à part le fait d'avoir une cime bien développée, quels sont les autres critères phénologiques d'un bon potentiel de croissance. Une sélection d'après la vitesse de croissance est souhaitable, dans la mesure où les arbres croissant rapidement et de façon soutenue arriveront plus rapidement à maturité, ce qui permettra de ne pas trop surcharger l'étage supérieur du peuplement. Cependant la vitesse de croissance à un moment donné de l'évolution (au maximum par exemple) n'implique pas forcément que cette vitesse de croissance restera soutenue. D'autre part la hauteur à laquelle se passe le maximum de vitesse de croissance peut être fortement différente selon le développement des individus.

Il reste donc encore bien des inconnues à résoudre afin d'arriver à une meilleure production des fûtaies jardinées, aussi bien en ce qui concerne le traitement sylvicole que la structure à donner aux peuplements.

## 7. RESUME

=====

Ce travail, en se fondant sur l'analyse complète d'arbres abattus et la reconstitution de la croissance en hauteur et en diamètre en fonction du temps, dans deux peuplements jardinés et un peuplement vierge, poursuivait le but de rechercher l'effet des facteurs endogènes et exogènes sur la croissance en hauteur et en diamètre du sapin (*Abies alba* Mill.) et de l'épicéa (*Picea abies* Karst.) dans le régime de la futaie jardinée. Les principaux phénomènes ont été analysés sur la croissance en hauteur, la croissance en diamètre n'ayant été étudiée que par rapport à cette dernière.

La comparaison des principales caractéristiques de la croissance des 239 tiges étudiées a conduit aux résultats suivants.

1. Les phénomènes de la croissance en hauteur varient énormément dans un peuplement jardiné. La vitesse de croissance n'est pas constante au cours de la vie et permet de déterminer différentes phases de croissance. Délimitant les phases par les points d'inflexion de la courbe de la vitesse de croissance, on trouve selon les cas trois ou quatre phases de croissance: Une phase de jeunesse qui se caractérise par un développement lent de la vitesse de croissance, une phase adulte où la vitesse de croissance atteint un maximum puis diminue, une phase de vieillesse où la diminution de la vitesse de croissance se stabilise et une phase de sénescence où la vitesse de croissance tend vers 0.

2. Il est apparu que la vitesse de croissance maximale jouait un rôle sur la succession des différentes phases. Plus la vitesse de croissance maximale est élevée, moins longtemps dure la phase adulte, et plus le développement dans le temps de la phase de vieillesse est prolongé. D'autre part plus la vitesse de croissance est lente, moins le passage de la phase adulte à la phase de vieillesse est nettement marqué. Cependant la vitesse de croissance n'exerce pas d'influence sur la hauteur finale des arbres, ni sur la durée de temps nécessaire à atteindre cette hauteur.

3. En futaie jardinée, la croissance des arbres se caractérise par un développement très lent en jeunesse. On peut caractériser ce développement par la période de compression, que l'on a défini par la durée de temps où la croissance en diamètre reste inférieure

à 1 mm/an. Caractéristique importante des phénomènes de croissance en futaie jardinée, la période de compression a été étudiée sous divers aspects. On a constaté:

a) La période de compression est de durée très variable dans un peuplement jardiné. Elle se distribue selon une courbe normale. Sapins et épicéas ont dans un même peuplement pratiquement la même moyenne de distribution, à condition que les deux essences se soient régénérées au cours des mêmes laps de temps. Cette période peut être très élevée, dépasser 200 ans, dans les cas extrêmes atteindre 260/280 ans, pour les deux essences.

b) La vitesse de croissance au cours de la période de compression varie énormément, de 3 à 12 cm/an. Elle est en moyenne de 7 à 8 cm/an, assurant à la plante un gain de hauteur pouvant dépasser 15 m, si elle se prolonge très longtemps. D'une façon générale, c'est-à-dire en moyenne, plus la durée de compression est de longue durée, plus le gain de hauteur pendant cette période est élevé. Cependant la variation est telle que à une hauteur donnée, l'âge des tiges peut varier de 100 ans et plus.

c) Il n'existe pas de relation marquée entre la durée de la compression et la vitesse de croissance dans les phases ultérieures. Après une longue compression (plus de 150 ans) une tige peut croître plus rapidement dans certains cas qu'une tige ayant été comprimée pendant 20 à 30 ans.

d) La durée de compression a pour effet de décaler les phénomènes de la croissance. Plus elle est de longue durée plus le point du maximum de la vitesse de croissance se passe haut dans le peuplement. Cependant la hauteur finale atteinte est pratiquement la même dans un peuplement quelque soit la durée de la période de compression. Après une durée de compression élevée, la hauteur à parcourir pendant les phases de bonne croissance est par conséquent plus courte.

e) La vitesse de croissance pendant la période de compression ou intensité de compression exerce une influence sur la vitesse de croissance dans les phases ultérieures. En moyenne une vitesse de croissance lente pendant la période de compression correspond à un développement plus rapide de la croissance dans les phases ultérieures. Les différences de croissance entre deux classes d'intensité de compression différentes sont nettement distinctes et statistiquement assurées sur une grande partie du développement en

hauteur.

4. La phase adulte se caractérise par la culmination de la vitesse de croissance. Dans les peuplements étudiés, au moment de son maximum la vitesse de croissance varie énormément. Elle est en moyenne plus élevée pour l'épicéa que le sapin dans un peuplement. Les différences entre les peuplements sont très nettes et statistiquement plus assurées que entre les deux essences. La structure des peuplements exerce une influence marquée sur la vitesse de la croissance. En général la vitesse de croissance diminue plus le peuplement est dense.

La comparaison de tiges individuelles montre que plus la vitesse de croissance maximale est élevée, moins elle est soutenue dans le temps. A égalité de vitesse de croissance, on constate des différences assez importantes dans la durée de la phase adulte, c'est-à-dire de la période où la vitesse de croissance est soutenue. Il existe donc des différences importantes de potentiel de croissance.

5. Une estimation de la hauteur finale par la hauteur atteinte au moment où la vitesse de croissance est de 10 (ou 4) cm/an, a montré une variation énorme de cette grandeur, de l'ordre de 14 m pour l'intervalle de  $\pm$  deux fois l'écart-type de la distribution ( $\pm$  2 s). Cette variation est nettement plus élevée dans le peuplement vierge. La moyenne de la distribution de cette hauteur est pratiquement la même pour le sapin et l'épicéa. Entre les peuplements elle est représentative de la fertilité. Les variations constatées montrent les différences considérables de potentiel de croissance dans les peuplements jardinés.

Il n'y a aucun rapport entre la vitesse de croissance, la durée de la période de compression et la hauteur finale atteinte. Cependant les conditions de concurrence semblent exercer à cet égard un rôle important. Dans le peuplement vierge, différents types de croissance à développement sociologique différents, présentent des différences importantes dans la hauteur finale atteinte.

6. La comparaison du développement de la croissance en hauteur entre les différents peuplements a montré que l'influence exercée par le peuplement, en particulier sa structure était plus marquée que celle des facteurs endogènes. C'est vraisemblablement la densité des peuplements qui joue à cet égard le plus grand rôle. En effet

le peuplement des Joux présentant une structure plus ouverte et un matériel sur pied moins élevé au cours du temps et par conséquent une bonne répartition de la lumière, a une croissance nettement plus rapide que celui de Steffisburg qui cependant possède une fertilité manifestement supérieure. A égalité de durée de compression les différences entre les peuplements restent prononcées. A égalité de vitesse de croissance, ce sont les différences en jeunesse ou en vieillesse qui se différencient. Il semble donc que la structure du peuplement est donc un des facteurs déterminants des phénomènes de croissance en futaie jardinée.

7. La grandeur des cimes doit exercer une influence importante en ralentissant l'apparition dans le temps des phénomènes du vieillissement. Le gain de hauteur au cours de la phase de sénescence est en effet plus élevé pour les arbres possédant une longue cime. On a constaté d'autre part que les arbres pouvant atteindre potentiellement les hauteurs les plus élevées sont ceux qui possèdent en valeur absolue et relative les cimes les plus longues.

8. Les phénomènes de la croissance en forêt vierge dépendent fortement du développement sociologique des individus et des phénomènes de concurrence qui en découlent. Ils ne peuvent pas être comparés sans autre à ceux de la futaie jardinée, parce que les conditions de croissance peuvent être soumises à des facteurs fondamentalement différents. Ils montrent néanmoins l'énorme plasticité des arbres vis-à-vis du milieu et la diversité des formes de croissance.

9. L'étude de la croissance en diamètre au niveau du sol, mais sans tenir compte de la déformation due à l'empatement des racines, de façon à reconstituer le cours normal de la croissance, a montré que dans la première partie de la vie, la croissance en diamètre correspondait assez bien à la croissance en hauteur, mais toutefois les différences de vitesse de croissance sont plus atténuées. A partir d'une certaine hauteur qui se trouve être environ à la fin de la phase de vieillesse, la croissance en diamètre diffère fondamentalement de la croissance en hauteur. Elle ne présente pas de diminution aussi nette de la vitesse de croissance. Bien au contraire, la vitesse de croissance reste constante ou diminue très légèrement. Par conséquent la forme des tiges change au cours de la vie. L'étude du rapport hauteur au diamètre individuel a montré que celui-ci est approchant linéaire jusqu'à une certaine



hauteur, au delà il diminue plus ou moins fortement. Le rapport hauteur au diamètre est par ailleurs très différent à même hauteur entre les tiges, les différences augmentent avec la hauteur. Il s'en suit que à partir d'une certaine hauteur (30 m environ) la variation des diamètres à hauteur donnée est considérable. Cette variation dépend en partie de l'état de vieillissement du peuplement.

10. Les conséquences de ces résultats sur la production et l'aménagement des forêts sont que le développement des grandeurs de croissance et par conséquent de production en futaie jardinée ne dépend pas principalement de l'âge des arbres. A la notion d'âge doit se substituer celle de vitesse de croissance. La fertilité ne joue pas en futaie jardinée un rôle aussi important qu'en futaie équienne sur la production. Mais la structure des peuplements est à cet égard déterminante. Etant donné qu'il existe des relations de cause à effet entre la structure et les phénomènes de la croissance on ne peut pas appliquer sans autre les résultats obtenus dans des exemples particuliers à des cas généraux ou des modèles.

## ZUSAMMENFASSUNG

=====

Untersuchungen über Höhen- und Durchmesser-Wachstumsvorgänge an Tanne (*Abies alba* Miller) und Fichte (*Picea abies* Karst.) in Plenterwäldern und einem Urwald

---

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit den Einflüssen endogener und exogener Faktoren auf die Abläufe des Höhen- und Durchmesserwachstums von Fichte und Tanne. Als Untersuchungsmaterial dienten 239 gefällte Bäume aus den Plenterwäldern von Les Joux/NE und von Steffisburg/BE, sowie aus dem Urwald von Janj/Jugoslawien. Gestützt auf Stammanalysen dieser Bäume wurden die Höhen- und Durchmesser-Wachstumskurven in Funktion des Alters ermittelt. Das Schwergewicht der Untersuchung wurde indessen auf die Höhenwachstumsvorgänge gelegt. Das Durchmesserwachstum wurde hauptsächlich in Funktion des Höhenwachstums untersucht. Vergleiche der wesentlichen Charakteristiken der Wachstumsvorgänge zwischen einzelnen Stämmen und zwischen den beiden Baumarten innerhalb der einzelnen Bestände sowie zwischen den Beständen ergaben folgende wichtigste Resultate:

1. Die Höhenwachstumsvorgänge der Bäume der untersuchten Bestände variieren in ausserordentlich starkem Umfange. Die im Verlaufe des Baumlebens wechselnden Wachstumsgeschwindigkeiten lassen verschiedene Wachstumsphasen erkennen, die sich am eindeutigsten durch die jeweiligen Wendepunkte in den Kurvenverläufen abgrenzen lassen. Je nach individueller Lebensgeschichte des Baumes sind drei oder vier Phasen erkennbar: Eine Jugendphase (phase de jeunesse), die durch niedrige Wachstumsgeschwindigkeiten (H und D) charakterisiert ist, eine Hauptwachstumsphase (phase adulte) während der die Wachstumsgeschwindigkeit (H) zunächst ein Maximum erreicht und dann abzunehmen beginnt; eine Alterungsphase (phase de vieillesse), die durch ein allmählich sich einstellendes Gleichgewicht in der Verminderung gekennzeichnet ist; eine Senilitätsphase (phase de sénescence) in deren Verlauf die Wachstumsgeschwindigkeit sich dem Wert 0 anzunähern beginnt.

2. Auffallend ist der Zusammenhang zwischen der Art des Verlaufs der maximalen Wachstumsgeschwindigkeit mit den Eigentümlichkeiten der darauf folgenden Phasen. Je höher die maximale Wachs-

tumsgeschwindigkeit liegt, umso kürzer ist die Hauptwachstumsphase bemessen und umso weiter wird die Dauer der Alterungsphase gedehnt. Je tiefer dagegen die maximale Wachstumsgeschwindigkeit ist, umso undeutlicher ist der Uebergang der Hauptwachstums- zur Alterungsphase. Dennoch vermag der Charakter der maximalen Wachstumsgeschwindigkeit offenbar weder einen Einfluss auf die erreichbare End-Baumhöhe, noch auf die dazu benötigte Zeit auszuüben. Ein derartiger Einfluss scheint sich vielmehr auf den Verlauf der Uebergänge zwischen den verschiedenen Phasen auszuwirken. Das Tempo der Alterung ist nicht vom gesamten Wachstumsablauf, sondern vielmehr von der Art des Verlaufes bestimmter Wuchsperioden abhängig.

3. Je nach der für den Ablauf der Wachstumsphasen beanspruchten Zeit lassen sich verschiedene Wachstumstypen unterscheiden. Im Plenterwald ist das Baumwachstum gekennzeichnet durch ein ausgeprägt langsames und lange dauerndes Jugendwachstum. Diese Phase stellt die Unterdrückungsperiode dar, welche definiert ist durch einen Durchmesserzuwachs (gemessen auf Bodenhöhe, vergl. 9.), der weniger als 1 mm beträgt. Als wichtigstes Merkmal der Wachstumsercheinungen im Plenterwald wurde die Unterdrückungsperiode von verschiedenen Gesichtswinkeln her näher untersucht:

a) Die Unterdrückungsperiode ist von sehr unterschiedlicher Dauer, deren Ausmasse einer Normalverteilung folgen. Tanne und Fichte weisen innerhalb des gleichen Bestandes nahezu übereinstimmende Mittelwerte der Verteilung auf, vorausgesetzt allerdings, dass die beiden Arten innerhalb der gleichen Zeitspanne zur Verjüngung kamen. Das heisst: die beiden Arten weisen nur gleiche Mittelwerte der Unterdrückungsperiode auf, wenn sie unter vergleichbaren bestandesstrukturellen Bedingungen aufgewachsen sind. Sind dagegen die Verjüngungen der beiden Arten aus je verschiedenen Ansamungsperioden entstanden, können die Mittelwerte der Unterdrückungsdauer der beiden Arten beträchtlich voneinander abweichen. Meistens verschieben sich in den Zwischenzeiten die bestandesstrukturellen Verhältnisse. Aus dieser Feststellung geht aber auch hervor, dass der Verjüngungsnachschub, zeitlich gesehen, nicht kontinuierlich erfolgt. Die Unterdrückungsdauer kann sehr ausgedehnt sein; sie kann 200 Jahre überschreiten und für beide Arten Extremwerte von 260 - 280 Jahren erreichen.

b) Die Höhenwachstumsgeschwindigkeit während der Unterdrückungsperiode kann sehr verschieden grosse Werte erreichen. Sie

liegt zwischen 3 und 12 cm/Jahr und beträgt im Mittel 7-8 cm/Jahr. Die am Ende sehr gedehnten Unterdrückungsperioden erreichte Baumhöhe kann 15 m überschreiten. Allgemein gilt: Je gedehnter die Unterdrückungsdauer ist, umso grösser ist der Gewinn an Baumhöhe in dieser Periode. Die Variabilität ist immerhin so gross, dass gleiche Baumhöhen Altersunterschiede von mehr als 100 Lebensjahren aufweisen können.

c) Zwischen der Unterdrückungsdauer und den Wachstumserscheinungen (insbesondere der Wachstumsgeschwindigkeit) der nachfolgenden Lebensphasen bestehen keine offensichtlichen Zusammenhänge. Auch nach einer langen, mehr als 150 Jahre betragenden Unterdrückungszeit kann in manchen Fällen ein solcher Baum rascher wachsen, als ein Baum, der nur während 20 bis 30 Jahren unterdrückt war.

d) Die Unterdrückungsdauer verursacht eine Verschiebung der gegenseitigen Verhältnisse zwischen den Wachstumsabläufen; je länger die Unterdrückung dauert, in umso grösserer Baumhöhe tritt das Maximum der Wachstumsgeschwindigkeit auf. Dennoch ist, etwas überraschend, die erreichte Endhöhe in einem gegebenen Bestand die gleiche, wie lange die Unterdrückungszeit immer auch gewesen sein mag. Dementsprechend wird also die nach einer langen Unterdrückungszeit noch zu durchwachsende Höhe rascher überwunden als bei kurzer Unterdrückungszeit.

e) Das von der Unterdrückungsintensität abhängige Tempo der Wachstumsgeschwindigkeit wirkt sich auf dieses Mass während den anschliessenden Lebensphasen aus. Im allgemeinen entspricht einer geringen Wachstumsgeschwindigkeit während der Unterdrückungsperiode eine hohe Wachstumsgeschwindigkeit während den anschliessenden Lebensphasen. Die Unterschiede zwischen zwei verschiedenen Graden der Unterdrückungsintensität können sehr deutlich und während längerer Zeiten der anschliessenden Entwicklung statistisch gesichert sein.

4. Die Hauptwachstumsphase ist dadurch gekennzeichnet, dass in ihr die Wachstumsgeschwindigkeit kulminiert. Die Werte dieses Maximums variieren zwischen den untersuchten Beständen ausserordentlich stark. Innerhalb eines gegebenen Bestandes liegt der Mittelwert des Maximums höher für die Fichte als für die Tanne. Auch zwischen den Beständen sind die Unterschiede ausgeprägt und statistisch besser gesichert als die Unterschiede zwischen den beiden Arten im selben Bestand. Dies weist darauf hin, dass die Bestandesstruktur offenbar einen deutlich mitbestimmenden Einfluss auf

die Wachstumsgeschwindigkeit haben muss: Die Tendenz ist dahin zu deuten, dass mit zunehmender Bestandesdichte (Les Joux - Steffisburg - Janj) die Wachstumsgeschwindigkeit abnimmt.

Aus dem gegenseitigen Vergleich der Untersuchungsergebnisse von Einzelbäumen ergibt sich auch, dass die Periode hoher Wachstumsgeschwindigkeit umso kürzer ist, je grössere Werte das Maximum erreicht hatte. Dennoch ergeben sich bei Bäumen mit unter sich gleichen Maxima der Wachstumsgeschwindigkeit grosse Verschiedenheiten in der Dauer der Hauptwachstumsphase. Die Wachstumsfähigkeit (potentiel de croissance) muss demnach von Baum zu Baum in ausschlaggebender Weise verschieden sein.

5. Eine Schätzung der Endhöhe mit Hilfe der Baumhöhe, welche in dem Moment erreicht ist, in welchem die Wachstumsgeschwindigkeit noch 10, bzw. 4 cm/Jahr beträgt ("Temps de passage" TP = 20, bzw. TP = 50) definiert als die Zeit, welche der Baum benötigt, um 2,0 m höher zu werden) ergibt allerdings eine sehr starke Variabilität dieser Ausgangswerte; sie betragen immer um die 14.0 m und entsprechen damit der vierfachen Streuung (2 . (Is)). Diese Variabilität ist eindeutig noch höher im untersuchten Urwaldbestand. Der Mittelwert der statistischen Verteilung dieser geschätzten Endhöhe ist für Fichte und Tanne annähernd gleich. Die zwischen den Beständen gefundenen Unterschiede der Endhöhenwerte sind ein Ausdruck für die Bonität. Die festgestellte Variabilität ihrerseits zeigt in welchem Masse das baumindividuelle Wachstum in Plenterbeständen verschieden sein kann.

Zwischen der Wachstumsgeschwindigkeit, der Dauer der Unterdrückungsperiode und der Endhöhe scheinen keine offensichtlichen Beziehungen zu bestehen. Immerhin üben die Konkurrenzverhältnisse einen nicht zu übersehenden Einfluss auf den Endhöhenwert aus. Gerade im Urwaldbestand ergeben sich für Individuen, die verschiedenen Wachstumstypen zuzuordnen sind, bedeutsame Unterschiede der Endhöhen auf.

6. Vergleiche zwischen den untersuchten Beständen zeigten, dass der Einfluss des Bestandes, im besonderen der Bestandesstruktur, auf den jeweiligen Verlauf des Höhenwachstums entscheidender sein muss als jener der endogenen Faktoren. Am einfachsten lässt sich der bestimmende Einfluss der Bestandesdichte nachweisen. So sind die Zuwachsabläufe im Bestand Les Joux, der zur Zeit eine gute Struktur und damit eine allgemein günstige Verteilung der Be-

lichtungsverhältnisse aufweist, eindeutig beschleunigt, gegenüber dem Stand Steffisburg, obwohl dieser eine nachweisbar bessere Bonität aufweist. Auch bei gleichem Unterdrückungszeitraum der zum Vergleich herangezogenen Individuen bleiben diese Unterschiede zwischen den beiden Beständen deutlich. Als meist verantwortlicher Faktor für die unterschiedlichen Zuwachsabläufe, besonders für ihr Tempo, kann demnach nur die Bestandesstruktur in Frage kommen.

7. Die Grösse der lebenden Krone als Träger der Assimilationsorgane dürfte einen wichtigen Einfluss auf den Zeitpunkt des Eintretens der Alterungserscheinungen ausüben. Tatsächlich ist der Höhengewinn während der Senilitätsphase grösser bei Bäumen, die lange Kronen aufweisen. Ferner war im Urwaldbestand festzustellen, dass jene Bäume, welche die besten Aussichten haben, grössere Höhen zu erreichen, absolut und bezogen auf die gerade erreichte Baumhöhe die längsten Kronen aufweisen.

8. Die Wachstumserscheinungen im Urwald sind in hohem Masse abhängig von der individuellen, soziologischen Baumartentwicklung und den sich daraus ergebenden Konkurrenzverhältnissen. Ein unmittelbarer Vergleich mit den eigentlichen Plenterwäldern ist nicht möglich, weil die Wuchsbedingungen im Urwald in zu tiefgreifender Weise Veränderungen und Schwankungen unterworfen sein können. Umso mehr zeigt sich hier die ausserordentliche Plastizität der Bäume gegenüber den mannigfaltigen Veränderungsmöglichkeiten ökologischer Bedingungen.

9. Die Untersuchung des auf Bodenhöhe bezogenen Durchmesserzuwachses, wobei die durch die Wurzelanläufe bedingten Störungen nicht berücksichtigt, bzw. ausgeglichen wurden, zeigt, dass dieser während des ersten Lebensabschnittes weitgehend dem aus dem Höhenzuwachs gewonnenen Bild übereinstimmt. Die Unterschiede in der Geschwindigkeit des Durchmesserwachstums sind allerdings weniger ausgeprägt als jene des Höhenwachstums in dieser Phase. Von einer gewissen Höhe an, etwa jener, die bei Ende der Alterungsphase erreicht ist, unterscheidet sich dagegen der Durchmesserzuwachs grundlegend von den beim Höhenwachstumsverlauf gefundenen Verhältnissen. Die Wachstumsgeschwindigkeit ist nicht in gleicher Weise verlangsamt, sondern hält im Gegenteil unvermindert an oder vermindert sich nur viel allmählicher. In dieser Erscheinung liegt die Ursache für die Veränderung der Stammform im Verlaufe des Baumlebens. Die einzelbaumweise Untersuchung der Verhältnisse von Höhe zu

Durchmesser zeigte, dass diese bis zu einer gewissen Baumhöhe einen linearen Verlauf zeigen; nachher nehmen diese Verhältniszahlen geringere Werte an: Die Bäume werden vollholziger. Bei gleicher Baumhöhe kann das Verhältnis  $H : D$  sehr verschieden sein, wobei diese Variabilität mit zunehmender Baumhöhe zunimmt. Dies ist in ausgesprochenen Masse der Fall ab Baumhöhen von etwa 30.0 m. Die Variabilität des Wertes  $H : D$  ist teilweise abhängig vom Alterungszustand des jeweiligen Bestandes.

10. Die Folgerung der Resultate hinsichtlich Leistung und Einrichtung der Plenterbestände sind, dass der Verlauf der Wachstumsgrößen und infolgedessen der Leistung nicht wesentlich vom Alter der Bäume abhängig sind. Der Begriff "Alter" soll durch "Wachstumsgeschwindigkeit" ersetzt werden. Die Bonität spielt im Plenterwald nicht die gleiche entscheidende Rolle auf die Leistung wie im gleichaltrigen Wald. Sondern die Struktur der Bestände ist in dieser Hinsicht entscheidend. Da eine Beziehung der Ursache und Wirkung zwischen Struktur und Wachstumsphänomene besteht, kann man die gefundenen Resultate einzelner Beispiele nicht ohne weiteres auf allgemeine Fälle oder Modelle anwenden.

## SUMMARY

=====

Investigations on height and diameter growth of fir (*Abies alba* Miller) and spruce (*Picea abies* Karst.) in selection and virgin forests

---

Endogenous and exogenous factors affecting the development of height and diameter growth among fir and spruce will be dealt with in this thesis. Investigations were carried out on 239 felled trees from the selection forest of Les Joux (NE) and Steffisburg (BE), both in Switzerland, as well as from Janj, a virgin forest in Yugoslavia. Based on analysis of stems, diameter and height-age curves have been plotted. The emphasis of the investigations has been on height growth, the diameter growth was investigated mainly as a function of the height growth. By comparing the relevant growth characteristics between different stems; between the two species within stands and also among the tree stands, the most important results are as follow.

1. There is a large variation in height growth within the stands under study. From the changing rates of growth during the life of a tree, different stages of growth can be distinguished which are limited by the points of inflexion on the growth curves. Depending of the individual history of a tree, it is possible to distinguish three or four stages. Firstly, a juvenile stage characterised by a low growth rate; an adult stage during which the height growth capacity reaches a maximum before deceleration; a senescent stage characterised by a slow arrival at a constant rate of deceleration, and, finally a stage of senility during the course of which the growth rate approaches zero.

2. A distinct relationship exists between the value of the maximum growth rate and the following stages. The higher the maximum growth rate, the shorter the adult stage and the more extended the stage of senescence. The lower the maximum rate of growth, the less obvious is the transition from the adult stage to that of senescence. However, these rates do not seem to have an effect upon the final height of a tree, nor do they influence the time required to reach that height. The senescence rate is influenced only by the pattern of certain growth periods.



3. From the time needed to pass from stage to stage different types of growth can be distinguished. In a selection forest the trees grow remarkably slowly in their juvenile stage, and this period lasts a long time. It is known as the period of suppression, which is defined by a diameter increment of less than 1 mm per year at ground level. Since the suppression period is the most important growth factor in a selection forest, special emphasis has been given to its investigation.

a) The duration time of the suppression period follows a normal distribution. If spruce and fir have been regenerated together in a stand, the mean values of their distribution are almost identical. On the other hand, the mean values of the two species may be significantly different if regeneration originates from different seed periods, since in most cases the conditions of growth will be changed. For instance, the suppression period might last as long as 200 years although extreme values of 200 - 280 years have been recorded for both species.

b) During the suppression period, the rate of height growth may vary greatly. The mean value is 7 to 8 cm per year, the extremes being 3 cm and 12 cm per year. After an extended suppression period, the height of a tree may exceed 15 m. Generally, it holds that the longer the period of suppression, the greater the gain in height. However, due to a great variation, it is possible that trees of equal height may differ in their age up to 100 years.

c) No definite relationship exists between the suppression period and the growth characteristics of the following stages. Even after a period of suppression of 150 years a tree may grow faster than another that has been suppressed for 20 to 30 years only.

d) The length of the suppression period causes some changes to the proportions within the growth stages. The longer the period of suppression the higher the tree when the growth maximum is reached. Surprisingly, the final height of individual trees in a particular stand does not depend on the length of suppression.

e) The growth rate, depending on the intensity of suppression, influences the rate of the following stages, which could be statistically proven, but only for a certain time. The lower the rate during the suppression period, the higher it is in the successive stages.

4. The value of the maximum height growth rate varies extremely

among the stands in question. Within stands, the mean values for spruce are significantly higher than those for fir, while even greater differences exist between stands. This points out the governing importance of the stand structure, e.g. with increasing stand density the growth rate declines. For single trees, it has been found that the period of accelerated growth is shorter the greater the value of the maximum growth rate. Therefore the growth potential of different trees varies decisively.

5. An estimation of the final height by means of the tree height at the stage at which growth rate amount to 10 or 4 cm/annum yields widely differing results. The value of four standard deviations ( $\pm 2s$ ) is approximately 14 m, in the virgin forest even greater. Within a stand the average final height of spruce and fir is almost equal.

The different final height of the stands equal the site index. The variability of the individual growth of trees is one characteristic of the selection forest.

No obvious relationship exists between the growth rate, the length of the suppression period and the final height. However the competition between trees does noticeably influence the final height. In the virgin stand, especially, individual tree associated with certain types of growth show significant differences in their heights.

6. The influence of the stand, particularly the stand structure, on the height growth pattern must be more decisive than exogenous factors. Accordingly this is the reason why the Les Joux stand, which has a fairly well balanced structure, shows an accelerated increment as compared to the Steffisburg stand, which belongs to a higher site class. The same results are found if we compare individuals from the two stands, suppressed for an equal period. On the other hand, by comparing the growth rates, it has been found that the pattern of the juvenile stage and the senescent stage are responsible for the afore-mentioned differences. Therefore, it is assumed that the stand structure is the most important single factor responsible for the various increment patterns.

7. The size of the assimilating crown seems to strongly influence the beginning of senescence. Trees with large crowns show a higher height increment during the senility stage. Furthermore, in the virgin forest, trees with a potential to arrive at dominant

height possessed the longest crown, absolute and relative to their current height.

8. In a virgin forest, the growth characteristics are highly dependent on the individual, social development of the trees, and the resulting competition. Due to the widely differing growth conditions, it was not possible to directly compare the virgin stand with the selection forest.

9. The increment in diameter growth at ground level corresponds fairly well with the values of height growth, but only for the early stages, although the variation in the growth rate is not as distinct as for the diameter. Towards the end of the senescent stage the diameter growth does not slow down as does the height growth. The former remain constant or decelerates at a much slower pace. The changing form of the trunk during the life of a tree is thus explained. From the above, it follows that the relationship between height and diameter is linear up to a certain height. Thereafter, this ratio diminishes, meaning the trees get more voluminous. For trees of similar height, the ratio  $h/d$  may be very different; this has been found most clearly for heights above 30 m. The variation of the  $h/d$  ratio partially depends on the stand's age conditions.

10. The conclusion concerning the management and productivity of selection forests are that the pattern of growth is rather independent from the tree age. Also, the term "age" should be replaced by "rate of growth". The structure of a selection forest is most important, and may outweigh the importance of the site class. Since a close relationship exists between the stand structure and growth phenomena, results cannot be generalized by basing conclusions on only a few stands.

## 8. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- =====
1. Assmann, E., 1953 Die Verlagerung der Höhenkurven von Plenterwaldflächen und ihre Ursachen Allg. Forst- u. Jagdztg., 125, (6), 175-177
  2. Assmann, E., 1961 Waldertragskunde - BLV Verlagsges., München, Bonn, Wien
  3. Bachmann, P., 1967 Vereinfachte Wert- und Wertzuwachsbe-  
rechnung - Polycolie de l'institut de  
sylviculture de l'EPF, Zürich
  4. Badoux, E., 1961 Courbes de hauteur et tarifs de cuba-  
ge dans une forêt jardinée de ferti-  
lité moyenne - Mém. de l'inst. suisse  
de rech. forest., 37, (2), 131-158
  5. Badoux, E., 1964 Ertragstafeln für die Fichte in der  
Schweiz - Publ. ind. de l'inst.  
suisse de rech. forest.
  6. Biolley, H., 1923 Les allures de l'accroissement - Jour-  
nal forest. suisse, 74 (12), 229-236
  7. Bitterlich, W., 1965 Das Biegelinien- Ausgleichs- und In-  
terpolationsgerät - Allg. Forstztg.,  
76 (8)
  8. Bormann, F.H., 1965 Changes in the Growth Pattern of  
White Pine Trees Undergoing Suppres-  
sion - Ecology, 46 (3), 269-277
  9. Bünning, E., 1953 Entwicklungs- und Bewegungsphysiolo-  
gie der Pflanze - In: Lehrbuch der  
Pflanzenphysiologie, 2. u. 3. Band,  
3. Aufl. - Springer Verlag, Berlin
  10. De Coulon, M., 1962 Structure et évolution de peuplements  
jardinés - Jour. forest. suisse, 113  
(10). 543-557
  11. Flury, Ph., 1929 Ueber den Aufbau des Plenterwaldes -  
Ann. de la station féd. de rech.  
forest., 15 (2), 305-340
  12. François, T., 1938 La composition théorique normale des  
futaies jardinées de Savoie - Rev.  
des Eaux et Forêts, 76, 1-18 et 101-  
115
  13. Kennel, R., 1966 Soziale Stellung, Nachbarschaft und  
Zuwachs - Forstwiss. Cbl., 85 (7/8),  
193-204

14. Kern, K.G., 1966 Wachstum und Umweltfaktoren im Schlag- und Plenterwald - Schriftenreihe d. forstl. Abt. d. Albert-Ludwigs- Univ. Freiburg i.Br., Bd. 5, BLV Verlages, München, Basel, Wien
15. Kozlowski, T.T., 1963 Physiological Implications in Tree Improvement - FAO/FORGEN (World Consultation on Forest Genetics and Tree Improvement) 63-5/1
16. Krajicek, J.E.;  
Brinkman, K.A.;  
Gingrich, S.F., 1961 Crown Competition, a Measure of Density - Forest sci., 7 (1), 35-42
17. Kuoch, R., 1954 Wälder der Schweizer Alpen im Verbreitungsgebiet der Weisstanne - Mitt. d. schw. Anst. f.d. forstl. Versuchswes., 30 (3), 133-260
18. Leibundgut, H., 1945 Waldbauliche Untersuchungen über den Aufbau von Plenterwäldern - Mitt. d. schw. Anst. f. d. forstl. Versuchswes., 24 (4), 219-296
19. Leibundgut, H., 1966 Die Waldpflege - Verlag Haupt, Berne
20. Liebold, E., 1965 Die Erkennbarkeit der Wuchspotenz des Einzelbaumes im gleichaltrigen Fichtenreinbestand - Archiv f. Forstwes., 36 (11/12), 1285-1316
21. Lyr, H.; Polster, H.;  
Fiedler, H.-J., 1967 Gehölzphysiologie - VEB G. Fischer Verlag, Jena
22. Mitscherlich, G.;  
Weihe, J., 1952 Untersuchungen an Tannenjungwüchsen - Allg. Forst- u. Jagdztg., 124 (2), 33-38
23. Moorby, J.;  
Wareing, P.F., 1963 Ageing in Woody Plants - Ann. of Bot., 27 (106), 291-308
24. Myers, C.A., 1963 Vertical Distribution of Annual Increment in Thinned Ponderosa Pine - Forest sci., 9 (4), 394-404
25. Richard, J.-L., 1965 Extraits de la carte phytosociologique des forêts du Canton de Neuchâtel - Comm. phytogéogr. d. l. sté. helv. d. sci. nat., matériaux pour le relevé géob. d. l. Suisse, fasc. 47 Editions Huber, Berne

26. Šafar, J., 1954 Die Entwicklung des Tannenjungwuchses in den Plenterwäldern Kroatiens - Jour. forest. suisse, 105 (11 et 12), 592-613 et 712-733
27. Schaeffer, L., 1935 La notion d'âge en futaie jardinée - Bullt. d. l. sté. centr. forest. de Belgique, 38, 501-508
28. Schaffalitzky de Muckadell, M., 1958/59 Investigations on aging of Apical Meristems in Woody Plants and its Importance in Sylviculture - Det Forsøgsvaesen i Danmark, 25 (201), 307-455
29. Schmidt, H.G., 1953 Kronen- und Zuwachsuntersuchungen an Fichten des bayerischen Alpenvorlandes - Forstwiss. Cbl., 72, 276-286
30. Sommer, H.G., 1962 Alter und Baumhöhen in Plenterbeständen - Forstwiss. Cbl., 81 (1/2), 11-17
31. Smith, N.F.; Dubow, D.A., 1960 Crown Length and Crown Ratio as Indicators of Diameter Growth of Loblolly Pine - Forest sci., 6 (2), 164-168
32. Thomasius, H., 1962 Untersuchungen über systematische Fehler bei der Ermittlung des Höhenwachstums und des Höhenzuwachses von Einzelbäumen - Archiv f. Forstwes., 11 (2), 137-167
33. Thomasius, H., 1963 Untersuchungen über die Brauchbarkeit einiger Wachstumsgrößen von Bäumen und Beständen für die qualitative Standortsbeurteilung - Archiv. f. Forstwes., 34 (12), 1267-1323
34. Vessereau, A., 1960 Méthodes statistiques en biologie et en agronomie - J.-B. Ballière et fils éditeurs, Paris
35. Wareing, P.F., 1964 La physiologie de l'arbre dans ses relations avec la génétique et l'amélioration - Unasyuva, 18 (2/3), 61-70
36. Zuckrigl, K.; Eckhart, G.; Nather, J., 1963 Standortkundliche und waldbauliche Untersuchungen in Urwaldresten der niederösterreichischen Kalkalpen - Mitt. d. forstl. Bundesversuchsanst. Mariabrunn, Heft 62