

29. Nov. 1991

Thèse no 9567

Productivité du Douglas vert  
(*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco  
*var. menziesii* Franco) en relation  
avec des caractéristiques stationnelles

Thèse présentée  
A L'ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE  
ZURICH  
pour l'obtention  
du grade de Doctor ès sciences techniques  
par

JEAN BÉGIN  
Ingénieur forestier, de Québec (Québec), Canada  
né le 30 août 1958



acceptée sur proposition  
du professeur J.-P. Schütz, rapporteur  
de monsieur J. Bouchon, corapporteur

---

1991, Zurich

## RESUME

=====

Cette étude couvre principalement le plateau Suisse à l'ouest de Zurich et les premiers contreforts du Jura et des Pré-Alpes. Elle a pour buts: (1) de quantifier la productivité du Douglas vert (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco var. *menziesii* Franco), (2) d'identifier les caractéristiques de station différentielles de cette productivité et (3) d'identifier les variables dendrométriques et écologiques responsables de la variabilité des niveaux de production. L'analyse des observations de 15 placettes permanentes, de 35 placettes temporaires et de 188 analyses de tiges a conduit aux résultats suivants:

1. Une analyse en composantes principales des caractéristiques écologiques précise que les 47 stations échantillonnées se distinguent en premier lieu selon le gradient de trophie des sols, puis suivant le gradient altitudinal/thermique et finalement selon le gradient hydrique.
2. L'amplitude de 10 m des valeurs de l'indice de fertilité, justifie le calcul de plus d'une table de production. A cette fin, l'évolution de la hauteur dominante de 22 placettes temporaires est calculée au moyen d'analyses de tiges. La méthode développée pose comme hypothèses: (1) que l'évolution de la hauteur dominante suit celle d'arbres de hauteur égale à la hauteur dominante et (2) qu'il existe une relation linéaire entre la hauteur à un âge quelconque et la hauteur actuelle. Le modèle exprimant l'évolution de la hauteur dominante des placettes permanentes et temporaires et celui exprimant l'indice de fertilité tiennent compte respectivement de 98,9% ( $s_e=0,99$  m) et de 76,4% ( $s_e=1,01$  m) de la variation.
3. Les valeurs d'accroissement en volume des analyses de tiges servent au calcul de l'accroissement en volume des placettes temporaires. Le modèle retenu explique 97,2% de la variation de l'accroissement en volume des tiges âgées de

moins de 50 ans et 89,5% de celle des tiges de plus de 50 ans.

4. L'évaluation de la production totale procède par l'intégration de l'équation de l'accroissement courant en volume par mètre de hauteur des placettes permanentes. Cette équation de l'accroissement courant en volume en fonction de la hauteur dominante et du niveau d'accroissement courant s'ajuste très bien aux observations ( $R^2=0,979$ ). Les valeurs servant au calcul de cette équation proviennent de la dérivée première, par rapport à la hauteur dominante, de l'équation du volume cumulé de chaque placette. On entend par niveau d'accroissement courant la valeur de l'accroissement courant en volume par mètre de hauteur à la hauteur de 30 m. Cette façon de procéder, une alternative à l'approche d'Assmann et Franz (1963), a l'avantage d'utiliser des séries de croissance incomplètes pour l'élaboration de tables de production tenant compte de niveaux de production.
5. L'existence de niveaux de production est confirmée par la comparaison des équations "production-hauteur dominante" des placettes permanentes. Le test de F de comparaison globale avec une valeur de 31,22 démontre une différence très significative. L'évolution divergente des courbes d'accroissement courant en volume par mètre de hauteur étaye davantage l'existence de niveaux de production.
6. En tenant compte d'une variation de 28 à 36 m de l'indice de fertilité et d'une variation de 40 à 60 m<sup>3</sup>/ha/m du niveau d'accroissement courant, la productivité moyenne du Douglas à 50 ans oscille entre 12 et 26 m<sup>3</sup>/ha/an. Cette productivité correspond davantage à celle rapportée dans le nord-est du Massif central en France par Décourt (1967) qu'à celle rapportée en Allemagne par Bergel (1985a) ou par Maurer (1968). L'allure générale de l'évolution de la hauteur et de la production totale présente cependant plus de similitudes avec celle des tables de Bergel (1985a)

qu'avec celle des tables de Maurer (1968) ou de Décourt (1967; 1973b).

7. L'examen des résidus du faisceau de courbes de hauteur en relation avec les unités de végétation, les substrats géologiques ou les niveaux thermiques ne révèle pas de tendance permettant d'établir un lien significatif entre ces caractéristiques et la variation observée, pour un indice de fertilité donné, dans la forme des courbes hauteur-âge.
8. La végétation se distingue des autres caractéristiques écologiques évaluées par sa capacité à expliquer la variation de l'indice de fertilité ( $R^2=0,495$ ). La hêtraie à Millet étalé compte parmi les unités de végétation échantillonnées les plus productives, la hêtraie à Aspérule avec Luzule et la hêtraie à Aspérule typique occupent une position mitoyenne alors que la hêtraie à Cardamine typique et la hêtraie à Sapin riche en fougère comptent parmi les moins productives.

Les combinaisons suivantes de caractéristiques écologiques sont celles qui discriminent le mieux la variation de l'indice de fertilité: substrats géologiques-altitude-pente-exposition ( $R^2=0,64$ ) et profondeur de décarbonatation (squelette du sol ou terre fine)-altitude-niveau des précipitations d'hiver ( $R^2=0,59$  et  $0,61$ ). Les combinaisons suivantes de caractéristiques écologiques comptent parmi celles discriminant le mieux la variation de l'indice de fertilité: unités de végétation-altitude ( $R^2=0,60$ ), substrat géologique-altitude ( $R^2=0,56$ ), substrat géologique-niveau des précipitations d'été ( $R^2=0,55$ ), squelette du sol-altitude ( $R^2=0,50$ ), profondeur de décarbonatation (squelette du sol ou terre fine)-altitude (respectivement  $R^2=0,43$  et  $0,45$ ).

Les indices de fertilité les plus élevés se retrouvent sur les substrats décarbonatés à texture fine, sur les sols à faible proportion de squelette, à des altitudes variant de

600 à 700 m et sur les expositions N., N.-E. et E. A l'opposé, la croissance la plus faible s'observe sur des stations calcaires, sur les sols à forte pierrosité, à des altitudes au-delà de 600 à 700 m. L'indice de fertilité est faible sur les expositions S., S.-O. et O. et diminue avec une réduction de la profondeur de décarbonation.

L'utilisation des axes factoriels comme variables explicatives de l'indice de fertilité est sujette à caution. Le pourcentage de la variation expliquée demeure faible ( $R^2=0,428$ ) malgré le nombre élevé de variables considérées. Il est, par ailleurs, difficile de déterminer avec certitude quelles sont les variables de chaque axe factoriel responsables de la relation observée.

9. La relation croissante et significative ( $r^2=0,628$ ,  $\alpha=0,0000$ ) entre le niveau d'accroissement courant et l'indice de fertilité tend à invalider la loi de Eichhorn élargie. La contribution additionnelle significative ( $\alpha=0,0032$ ) du degré de couverture, dans l'étude de la variation des niveaux d'accroissement courant, met en évidence le rôle déterminant de la sylviculture dans la productivité des peuplements forestiers. Pour les peuplements âgés de plus de 50 ans, les résultats indiquent une augmentation graduelle du niveau d'accroissement courant consécutivement à une augmentation du degré de couverture. Des recherches additionnelles s'avèrent indispensables pour identifier un degré de couverture optimal.
10. L'intensité du régime d'éclaircies apparaît nettement plus importante que les caractéristiques écologiques dans l'explication de la variation du niveau d'accroissement courant. Parmi les 16 caractéristiques écologiques examinées, seules les classes de squelette du sol contribuent significativement ( $R^2=0,317$ ,  $\alpha=0,03$ ) à expliquer la variation des niveaux d'accroissement. La proportion de la variation expliquée par ces 16 caractéristiques devient toutefois non-significative au seuil  $\alpha$  de 5% lorsqu'éva-

luées en présence du degré de couverture et de la hauteur dominante.

## ZUSAMMENFASSUNG

=====

Diese Studie behandelt in erster Linie das schweizerische Mittelland westlich von Zürich und die ersten Ausläufer des Jura und der Voralpen. Sie hat folgende Zielsetzung: (1) die Ertragsleistung der Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco var. *menziesii* Franco) zu quantifizieren, (2) die differentialen Standortmerkmale dieser Ertragsleistung ausfindig zu machen und (3) die für die Variabilität der Ertragsniveaus verantwortlichen dendrometrischen und ökologischen Variablen zu identifizieren. Die Analyse der 15 Permanentstichproben, der 35 temporären Stichproben und der 188 Stammanalysen führte zu folgenden Ergebnissen:

1. Eine Hauptkomponentenanalyse der ökologischen Merkmale ergibt, daß sich die 47 für Probenentnahmen ausgewählten Waldstandorte in erster Linie nach der Variationsbreite des Nährstoffreichtum des Bodens unterscheiden, desweiteren nach der Variationsbreite der Werte für Höhe und Wärme und schließlich nach der Variationsbreite der Feuchtigkeitswerte.
2. Die Amplitude in Höhe von 10 m bei den Werten für die Oberhöhenbonität rechtfertigt die Berechnung von mehr als einer Ertragstafel. Zu diesem Zweck wird die Entwicklung der Oberhöhe von 22 Temporärstichproben mittels Stammanalysen berechnet. Die entwickelte Methode stellt folgende Hypothesen auf: (1) Die Evolution der Oberhöhe folgt derjenigen von Bäumen gleicher Höhe wie die Oberhöhe und (2) es existiert ein Linearzusammenhang zwischen der Höhe bei einem gegebenen Alter und der gegenwärtigen Höhe. Das Modell, das die Oberhöhe der Permanent- und Temporärstichproben widerspiegelt und dasjenige, das die Oberhöhenbonität angibt, berücksichtigen die Variationsbreite jeweils zu 98,9% ( $s_f=0,99$  m) und zu 76,4% ( $s_f=1,01$  m).
3. Die einzelnen Volumenzuwachswerte der Stammanalysen werden zur Berechnung des Volumenzuwachses der Temporärstichproben

benutzt. Das hier beschriebene Modell erklärt 97,2% der Schwankungsbreite des Volumenzuwachses bei Stämmen, die weniger als 50 Jahre alt sind, und 89,5% der Schwankungsbreite bei Stämmen über 50 Jahre.

4. Die Berechnung der Gesamtwuchsleistung erfolgt durch die Integration der Gleichung des laufenden Volumenzuwachses je Meter Oberhöhe der Permanentstichproben. Diese Gleichung des laufenden Volumenzuwachses in Abhängigkeit von der Oberhöhe und vom Niveau des laufenden Volumenzuwachses paßt sich den gemachten Beobachtungen sehr gut an ( $R^2=0,979$ ). Die zur Berechnung dieser Gleichung benutzten Werte ergeben sich aus der ersten Ableitung (im Verhältnis zur Oberhöhe) der Gleichung des kumulierten Volumens bei jeder Stichprobe. Unter laufendem Volumenzuwachsniveau verstehen wir den Wert des laufendes Volumenzuwachses je Meter Höhe bei 30 Meter Höhe. Diese Vorgehensweise, eine Alternative zum Ansatz von Assmann und Franz (1963), hat den Vorteil, unvollständige Wuchsreihen zu benutzen, um Ertragstafeln auszuarbeiten, die die Ertragsniveaus berücksichtigen.
5. Das Vorhandensein von Ertragsniveaus wird durch den Vergleich der Gleichungen "Ertrag-Oberhöhe" der Permanentstichproben bestätigt. Der F-Test eines Globalvergleichs bei einem Wert von 31,22 zeigt einen hochsignifikanten Unterschied. Der divergente Verlauf der Kurven für den laufenden Volumenzuwachs je Meter Höhe belegt zusätzlich die Existenz von Ertragsniveaus.
6. Wenn man eine Variationsbreite von 28 bis 36 m bei der Oberhöhenbonität und eine Variationsbreite von 40 bis 60 m<sup>3</sup>/ha/m beim laufenden Zuwachsniveau berücksichtigt, schwankt die durchschnittliche Ertragsleistung eines 50 Jahre alten Douglasienbestandes zwischen 12 und 26 m<sup>3</sup>/ha/Jahr. Diese Ertragsleistung entspricht eher der von Décourt (1967) für das nord-östliche französische Zentralmassiv beobachteten Ertragsleistung als derjenigen von Bergel (1985a) oder von Maurer (1968) für Deutschland nachgewiesenen. Der allgemeine Verlauf der Entwicklung in



Bezug auf die Höhe und den Gesamtertrag weist jedoch mehr Ähnlichkeit mit dem Verlauf der Ertragstafeln Bergels (1985a) als mit den von Maurer (1968) oder Décourt (1967; 1973b) erarbeiteten Tafeln.

7. Die Untersuchung der Restklassen des Bündels von Oberhöhenkurven im Verhältnis zu den Vegetationseinheiten, dem geologischen Muttergestein oder den Wärmegliederungen läßt keine Tendenz erkennen, die es erlaubte, bei einer gegebenen Oberhöhenbonität, in der Form der Kurven Höhe-Alter einen signifikanten Zusammenhang zwischen diesen Merkmalen und der beobachteten Variationsbreite zu erkennen.
8. Die Vegetation unterscheidet sich von den anderen bewerteten ökologischen Merkmalen in ihrer Eigenschaft, die Variationsbreite der Oberhöhenbonität ( $R^2=0,495$ ) erklären zu können. Der Waldhirschen-Buchenwald zählt zu den ertragfähigsten der untersuchten Vegetationseinheiten, der Waldmeister-Buchenwald mit Hainsimse und der typische Waldmeister-Buchenwald nehmen eine Zwischenposition ein während der typische Zahnwurz-Buchenwald und der farnreiche Tannen-Buchenwald zu den weniger ertragfähigen zählen.

Die folgenden Kombinationen von ökologischen Merkmalen unterscheiden am besten die Variationsbreite der Oberhöhenbonität: geologisches Muttergestein-Höhe-Neigung-Exposition ( $R^2=0,64$ ) sowie die Kombination Tiefe der Karbonatgrenze (Bodenskelett oder Feinerde)-Höhe-Winterniederschlagsmenge (jeweils  $R^2=0,59$  und  $0,61$ ). Die folgenden Kombinationen von ökologischen Merkmalen zählen zu denjenigen, die am besten die Variationsbreite der Oberhöhenbonität unterscheiden: Vegetationseinheiten-Höhe ( $R^2=0,60$ ), geologisches Muttergestein-Höhe ( $R^2=0,56$ ), geologisches Muttergestein-Sommerniederschlagsmenge ( $R^2=0,55$ ), Bodenskelett-Höhe ( $R^2=0,50$ ), Tiefe der Karbonatgrenze (Bodenskelett oder Feinerde)-Höhe (jeweils  $R^2=0,43$  und  $0,45$ ).

Die höchsten Oberhöhenbonitäten findet man bei feinlehmigen, karbonatfreien Böden, bei Böden mit einem niedrigem

Anteil an Bodenskelett, in Höhen zwischen 600 und 700 Metern und bei Expositionen gen Norden, Nord-Osten und Osten. Den geringsten Zuwachs beobachtet man dagegen bei kalkreichen Standorten, bei sehr steinigen Böden, in Höhen über 600 bis 700 m. Die Oberhöhenbonität ist gering bei südlichen, südwestlichen und westlichen Expositionen und nimmt ab bei einer Verringerung der Tiefe der Karbonatgrenze.

Bei der Benutzung von Faktorenachsen als erklärende Variablen für die Oberhöhenbonität ist Vorsicht angebracht. Der Prozentsatz der erklärten Variationsbreite bleibt gering ( $R^2=0,428$ ) trotz der hohen Anzahl der in Betracht gezogenen Variablen. Es ist außerdem schwierig, mit Gewißheit festzustellen, welche Variablen von jeder Faktorenachse für den beobachteten Zusammenhang verantwortlich sind.

9. Die zunehmende und signifikante Relation ( $r^2=0,628$ ,  $\alpha=0,0000$ ) zwischen dem laufenden Zuwachsniveau und der Oberhöhenbonität tendiert dazu, das erweiterte Gesetz von Eichhorn in Frage zu stellen. Die signifikante zusätzliche Berücksichtigung des Beschirmungsgrades bei der Untersuchung der Variationsbreite der laufenden Zuwachsniveaus verdeutlicht die wesentliche Rolle des Waldbaus bei der Ertragsleistung der Waldbestände. Für die über 50 Jahre alten Bestände zeigen die Ergebnisse eine graduelle Erhöhung des laufenden Zuwachsniveaus in Folge einer Erhöhung des Beschirmungsgrades an. Zusätzliche Forschungen erweisen sich als unerlässlich, um den optimalen Beschirmungsgrad auszumachen.
10. Die Durchforstungsintensität erscheint eindeutig wichtiger als die ökologischen Merkmale für die Erklärung der Variationsbreite des laufenden Zuwachsniveaus. Unter den 16 untersuchten ökologischen Merkmalen sind lediglich die Bodenskelettklassen signifikant ( $r^2=0,317$ ,  $\alpha=0,03$ ) bei der Erklärung der Variationsbreite der Zuwachsniveaus. Die Proportion der durch die 16 Merkmale erklärten Variationsbreite verliert jedoch ihre Signifikanz bei der Schwelle  $\alpha$

von 5%, wenn die Merkmale unter Berücksichtigung des Beschirmungsgrades und der Oberhöhe bewertet werden.

## SUMMARY

=====

This study encompassed an area including the Swiss Plateau west of Zurich and the foothills of the Jura and Pré-Alpes mountain ranges. The objectives were to (1) quantify the productivity of Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco var. *menziesii* Franco) in this region, (2) identify site characteristics that differentiate the productivity and (3) identify mensurational and ecological variables controlling the variation in yield levels. The analysis of observations of 15 permanent sample plots, 35 temporary plots and 188 stem analysis generated the following results:

1. A principal components analysis of ecological characteristics determined that the 47 stands sampled were primarily differentiated along a gradient of soil nutrient condition, secondly an elevational/thermal gradient, and finally according to the soil moisture gradient.
2. A range of 10 m in the site index justified the construction of yield tables for this region. With this objective, the development of dominant height in 22 temporary sample plots was calculated by means of stem analysis. The method developed was based on the following assumptions: (1) the development of the dominant height follows that of trees of height equal to the dominant height, (2) there exists a linear relationship between the height at a certain age and the present height. The model describing height development in permanent and temporary sample plots and the model describing site index accounted for 98,9% ( $s_e=0,99$  m) and 76,4% ( $s_e=1,01$  m) of the variation.
3. Volume increment values from stem analysis were used to calculate volume increment in temporary sample plots. The model retained explained 97,2% of the variation in volume increment of stems at least 50 years old and 89,5% of volume increment of stems less than 50 years old.

4. The evaluation of total production was achieved by integration of the equation for current volume increment per metre height from permanent sample plots. This equation of current volume increment as a function of dominant height and current volume increment level fit the observations very well ( $R^2=0,979$ ). The values used as a basis for this equation were generated from the first derivative of the equation for cumulative volume of each plot, in terms of dominant height. The current volume increment level was understood to be the value of current volume increment per metre height at 30 m height. This procedure, an alternative to the approach of Assmann and Franz (1963), has the advantage of using incomplete growth series to elaborate production tables that take production levels into account.
5. The existence of production levels was confirmed by the comparison of production-dominant height equations from permanent sample plots. The global F test values of 31,22 indicated very significant differences between equations. The divergent evolution of curves of current volume increment per metre height favourably supported the existence of different production levels.
6. Considering the variation of 28 to 36 m in site index and the variation of 40 to 60 m<sup>3</sup>/ha/m in current increment, the average productivity of Douglas fir at 50 years varied between 12 and 26 m<sup>3</sup>/ha/year. This productivity corresponded more with that reported by Décourt (1967) for the northwest region of the Massif central of France, than levels reported in Germany by Bergel (1985a) and Maurer (1968). However, the general aspects of height development and total production were more similar to the tables of Bergel (1985a) than tables of Maurer (1968) or Décourt (1967, 1973b).
7. The examination of residuals of series of dominant height curves in relation to vegetation type, parent material and thermal level did not indicate any tendencies that establish a significant association between these characteris-

tics and the observed variation for a given site index, in the form of height-age curves.

8. The vegetation type was unique among the ecological characteristics evaluated in its explanation of variation in site index. The *Milio-Fagetum* vegetation type was one of the most productive types, the *Galio odorati-Fagetum luzuletosum* and *Galio odorati-Fagetum typicum* types were associated with intermediate productivity, and the *Cardamino-Fagetum typicum* and *Abieti-Fagetum polystichetosum* types were among the least productive.

The following combinations of ecological characteristics were those which best explain the variation in site index: parent material-elevation-slope-exposure ( $R^2=0,64$ ), and depth to carbonates-gravel content or clay content-elevation-winter precipitation level ( $R^2=0,59$  and  $0,60$ , respectively). The following combinations of variables were also among those that best explain site index variation: vegetation type-elevation ( $R^2=0,60$ ), parent material-elevation ( $R^2=0,56$ ), parent material-summer precipitation level ( $R^2=0,55$ ), gravel content-elevation ( $R^2=0,50$ ), depth to carbonates-gravel content or clay content-elevation ( $R^2=0,43$  and  $0,45$ , respectively).

The highest site indices were found on non-calcareous parent materials of fine texture, and soils of low gravel content, at elevations of 600 to 700 m and N., N.E., and E. exposures. In contrast, the poorest growth was observed on calcareous parent material and soils of high gravel content, at elevations above 600 to 700 m. The site index was lower on S., S.W. or W. exposures, and diminished with decreasing depth to carbonates.

The use of factorial axes as variables to explain site index is cautioned. Despite the large number of variables included, the percentage of variation explained was low ( $R^2=0,428$ ). Further more, it was difficult to determine

with certainty which variables on each axis were most important in the relationship observed.

The positive and significant relationship ( $R^2=0,628$ ,  $\alpha=0,0000$ ) between the current volume increment level and site index tended to invalidate the extended Eichhorn law. The additional significant ( $\alpha=0,0032$ ) contribution of the canopy density demonstrated the role of silvicultural effects on the productivity of these stands. For stands greater than 50 years old, the results indicated a gradual increase in current increment following an augmentation in canopy density. Additional research is necessary to establish the optimal canopy density.

10. The intensity of thinning regimes clearly appeared more important than the ecological characteristics of sites in explaining variation in current volume increment level. Among the 16 ecological characteristics examined, only the gravel content class contributed significantly ( $r^2=0,317$ ,  $\alpha=0,03$ ) in explaining variation in current volume increment level. The proportion of variation explained by the 16 characteristics became non-significant at a level  $\alpha$  of 5% when evaluated in conjunction with canopy density and dominant height.