

Zeitschrift: Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles
Herausgeber: Société Vaudoise des Sciences Naturelles
Band: 81 (1992)
Heft: 1

Artikel: L'accroissement en diamètre des arbres : évolution des connaissances : influence du climat, de la sylviculture et de la pollution
Autor: Hartmann, Philippe / Schneider, Olivier / Petter, David
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-279863>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 16.03.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

**L'accroissement en diamètre des arbres.
Evolution des connaissances.
Influence du climat, de la sylviculture
et de la pollution**

par

*Philippe HARTMANN¹, Olivier SCHNEIDER²,
David PETTER³ et Daniel ZIMMERMANN⁴*

Abstract.—HARTMANN P., SCHNEIDER O., PETTER D., ZIMMERMANN D., 1992. Increase in Stem Diameter - Development of Knowledge - Influence of Climate, Silviculture and Pollution. *Bull. Soc. vaud. Sc. nat. 81*: 131-151.

A satisfactory explanation of increase in stem diameter has only been proposed a little more than a century ago. It had long been a subject of debate, as E. Chavannes discussed at the SVSN in 1842. At this time, numerous naturalists showed interest in the question of increase in stem diameter, and foresters began to develop methods for its measurement. During the 19th century, with the appearance of proper forest planning, the need to quantify the forest timber production became apparent.

Since the turn of the century, diameter increment of the stem gained more and more attention, as obtained by the measure of annual rings. It has found application in new fields of research, such as dendrochronology, dendroclimatology and later, environmental sciences where tree rings are particularly used as a bioindicator for forest decline.

Our recent studies on spruce in the canton of Vaud (Switzerland) have confirmed that there is a relationship between the state of health of the tree crown and ring width. In addition, examination of the long term mean development of individual trees revealed a continuous increase in ring width during the past hundred years. Climatic variations do not provide a satisfactory explanation for this long term variation. However, short and middle term variations of ring width have been shown to be closely correlated to climate. The majority of our studies on whole stands have produced higher values for increment than those commonly assumed up to now (yield table). Thus, in contrast to the alarming expectations of the early 80's, spruce growth certainly displays no serious decline. As far as present knowledge extends, it is possible that atmospheric pollutants (NO_x, NH₃, CO₂) act as fertilizers. This could explain the higher stem increments observed. However, a potential role of silvicultural operations cannot be excluded.

Keywords: crown health, dendrochronology, dendroclimatology, forest decline, *Picea abies*, yield table

.....

¹Ingénieur forestier, Grand-Faubourg, CH-1147 Montricher.

²Ingénieur forestier, Chemin Vieux 8, CH-2003 Neuchâtel.

³Inspecteur des forêts, Moulinet 19 bis, CH-1350 Orbe.

⁴Service des forêts et de la faune, Caroline 11 bis, CH-1014 Lausanne.

Résumé.—HARTMANN P., SCHNEIDER O., PETTER D., ZIMMERMANN D., 1992. L'accroissement en diamètre des arbres - Evolution des connaissances - Influence du climat, de la sylviculture et de la pollution. *Bull. Soc. vaud. Sc. nat.* 81: 131-151.

Il n'y a guère plus d'un siècle que le processus de l'accroissement endiamètre des arbres est expliqué de façon satisfaisante. Il fit auparavant l'objet de controverses, ainsi que le rapporte M. Ed. Chavannes dans son exposé présenté à la SVSN en 1842. A cette époque, la compréhension du fonctionnement de l'accroissement intéresse de nombreux naturalistes, et les forestiers commencent également à se préoccuper de sa mesure. Dans le courant du XIX^e siècle, avec la mise en place progressive d'une gestion forestière digne de ce nom, apparaît en effet le besoin de quantifier la production de la forêt.

A partir du début du XX^e siècle, l'accroissement en diamètre des arbres, par le biais de la mesure des cernes annuels, va gagner en intérêt dans plusieurs domaines nouveaux: la dendrochronologie et la dendroclimatologie, puis les sciences de l'environnement, où le cerne est notamment utilisé comme bioindicateur pour l'analyse du dépérissement des forêts.

Nos travaux de recherche sur l'accroissement de l'épicéa, menés actuellement dans le canton de Vaud (Suisse), ont confirmé la relation existant entre l'état sanitaire du houppier et la largeur des cernes. De plus, l'examen de l'évolution à long terme du niveau de l'accroissement moyen de l'arbre (pris comme individu) a mis en évidence une hausse marquée au cours de ce siècle. Le climat, dont les liens étroits avec les variations du cerne à court et moyen termes sont concrètement démontrés ici, ne permet pas de l'expliquer. Quant à l'accroissement actuel de massifs forestiers entiers, il s'avère dans la majorité des cas étudiés supérieur aux valeurs de référence utilisées jusqu'à maintenant. Contrairement à ce que certains propos alarmistes du début des années 1980 pouvaient laisser craindre, la croissance de l'épicéa n'accuse donc certainement aucune baisse massive. En l'état actuel de nos connaissances, un effet d'engrais de la pollution atmosphérique (NO_x, NH₃, CO₂) constitue une hypothèse tout à fait plausible pour expliquer les accroissements élevés que l'on observe. Cependant, on ne peut exclure qu'une évolution du traitement sylvicole ait aussi joué un certain rôle.

1. INTRODUCTION

L'accroissement en diamètre de l'arbre, phénomène observable par chacun, suscite depuis bien longtemps un large intérêt qui ne se limite pas aux milieux forestiers.

La question de l'explication de son déroulement a fait l'objet d'un exposé lors de la séance ordinaire du 2 février 1842 de la Société vaudoise des Sciences naturelles (SVSN). A partir de là, il nous a paru intéressant de retracer l'évolution des connaissances en la matière et surtout de décrire le développement des principaux domaines d'utilisation de l'accroissement en diamètre des arbres.

En rapport direct avec le sujet traité lors de ladite séance, nous aborderons tout d'abord la question du fonctionnement de l'accroissement en diamètre. Puis nous fournirons quelques indications succinctes sur ce qu'est un cerne annuel de croissance, comment il est structuré et quels sont les facteurs qui influencent sa formation. Nous nous étendrons ensuite plus longuement sur le rôle de l'accroissement en diamètre dans des domaines aussi divers que la gestion forestière, la dendrochronologie et la dendroclimatologie, ainsi que les sciences de l'environnement. Nous présenterons enfin deux études réalisées récemment par le Service des forêts vaudois, en relation avec la problématique du dépérissement forestier. Toutes deux se basent sur des analyses de cernes et touchent aux domaines évoqués ci-dessus.

2. PROCESSUS DE L'ACCROISSEMENT EN DIAMÈTRE

Chez nos essences résineuses (gymnospermes) et feuillues (angiospermes dicotylédones), les tissus primaires assurent la rigidité et l'approvisionnement en eau et en sels minéraux d'une pousse annuelle durant sa première année d'existence seulement. Pour soutenir et alimenter une couronne grandissante, une croissance secondaire en épaisseur se produit dès la deuxième période de végétation, augmentant progressivement la solidité et la capacité de conduction de la tige (NULTSCH 1977).

Avant de reprendre la question sous un angle historique, rappelons succinctement le fonctionnement de cette croissance tel qu'on le comprend aujourd'hui. Situé entre le bois et l'écorce, le cambium est constitué d'une fine couche de cellules génératrices. Par mitose puis différenciation, il produit des cellules de bois vers l'intérieur et des cellules d'écorce vers l'extérieur. De cette façon, le diamètre du tronc augmente et le cambium s'éloigne sans cesse de l'axe central. Dans le bois, les couches internes sont donc les plus anciennes, les couches externes les plus récentes; dans l'écorce, c'est l'inverse.

«Une jeune pousse [...] acquiert, pendant sa première année, une certaine épaisseur déterminée par l'épaisseur des cônes ligneux et corticaux; à la seconde année, en même-temps qu'une nouvelle pousse naît de son sommet, il se forme, dans celle de l'année précédente, une nouvelle zone ligneuse, qui se place en-dehors de l'ancienne, et une nouvelle zone corticale située en-dedans de la précédente: ces deux zones naissent donc toutes deux dans l'espace situé entre le corps ligneux et le corps cortical. Quelle est leur origine ? telle est la question délicate qui a occupé la plupart des anatomistes et des physiologistes» (DE CANDOLLE 1827, p. 203). Ces propos du botaniste genevois illustrent bien à quel niveau se situaient les interrogations au XIX^e siècle. On savait déjà que l'accroissement en diamètre avait lieu entre le bois et l'écorce, mais on ignorait encore de quelle façon.

Ce thème est abordé en 1842 lors d'une séance de la SVSN, par M. Ed. Chavannes. Selon son exposé, l'accroissement en diamètre des arbres a déjà fait l'objet de nombreuses explications, qui peuvent cependant se résumer à deux théories principales. Pour les partisans de la première, *«...l'augmentation en diamètre des arbres est due à une production intérieure de fibres descendant des bourgeons comme des espèces de racines qui seraient nourries et développées dans leur route par la sève élaborée»* (CHAVANNES 1842). Ces fibres *«...forment par leur réunion un étui ligneux qui se glisse entre le bois et l'écorce [...] et y détermine une nouvelle couche ligneuse, superposée à l'ancienne»* (DE CANDOLLE 1827). La seconde théorie est celle des auteurs *«...qui considèrent la formation des fibres et des couches ligneuses comme due à une production des couches préexistantes, développée par le liquide nourricier ou le cambium»* (CHAVANNES 1842).

La façon dont se déroule l'accroissement en diamètre de nos arbres restera encore très mal connue durant quelques décennies. L'ouvrage de botanique de M. Adrien DE JUSSIEU, publié en 1874, indique par exemple que les deux théories sus-mentionnées sont toujours au centre des discussions trente ans plus tard.

Si la première, connue sous le nom de *«théorie de M. Du Petit-Thouars»*, ne s'est point confirmée par la suite, elle avait cependant de nombreux

défenseurs et le parallèle qu'elle faisait entre le bourgeon et la graine avait un côté séduisant. On relèvera, petite anecdote, qu'une des objections formulées à son encontre était qu'à aucun moment on ne voit descendre le long du bois ces prétendues racines de bourgeons. Selon DE CANDOLLE (1827), «*M. Du Petit-Thouars a été obligé, pour répondre à cette objection, de supposer que cette descente se fait avec une telle rapidité qu'elle nous échappe; il va même jusqu'à la comparer à celle de l'électricité et de la lumière, et dit qu'elle semble ne point connaître de distance*».

Soutenue notamment par DE CANDOLLE (1827), la seconde théorie est plus proche des connaissances actuelles, car elle suppose que l'accroissement en diamètre a lieu horizontalement et qu'il est provoqué par des tissus déjà présents sur place.

BOSSHARD (1974a, b) attribue à HARTIG (1853) et surtout à SANIO (1873) la découverte du cambium en tant que tissu générant, par division cellulaire, le bois et le liber¹. Avant cette découverte, le cambium était souvent désigné comme une gelée semi-fluide située entre le bois et l'écorce et se transformant tantôt en cellules du bois, tantôt en cellules d'écorce (BOSSHARD 1974a, DE JUSSIEU 1874). On a parfois imaginé que le bois produisait l'écorce, mais surtout que l'écorce produisait le bois ou se transformait en bois; on a aussi émis l'hypothèse que le bois formait des nouvelles couches de bois et l'écorce des nouvelles couches d'écorce (DE CANDOLLE 1827).

Au début du XX^e siècle, le principe de base de l'accroissement en diamètre tel qu'on le connaît aujourd'hui semble acquis; dans son ouvrage de référence sur le bois, BEAUVÉRIE (1905) n'en mentionne par exemple pas d'autre. Le sujet continuera pourtant d'intéresser de nombreux chercheurs, qui l'exploreront de manière toujours plus détaillée.

3. LE CERNE, OU ANNEAU DE CROISSANCE LIGNEUX

Dans les régions tempérées de notre globe, le cambium élabore une nouvelle couche de bois au cours de chaque période de végétation. En section transversale, cette couche annuelle représente le cerne, expression de l'activité rythmée du cambium.

En règle générale², les cellules produites au printemps ont un grand diamètre et des parois minces; ce bois tendre et clair, qui constitue le début du cerne, est surtout destiné à transporter les grandes quantités d'eau requises à cette saison. Pendant l'été ou vers la fin de la période de végétation, la croissance ralentit; les cellules produites sont plus petites et leurs parois plus épaisses; ce bois plus dur et plus foncé, qui constitue la fin du cerne annuel,

¹Le bois ou xylème secondaire, outre sa fonction de soutien, transporte la sève brute (eau et sels minéraux) des racines aux feuilles, donc de bas en haut.

Le liber ou phloème secondaire est la fine couche interne de l'écorce, attenante au cambium. Il transporte la sève élaborée (sucres) des lieux de production, les feuilles, aux lieux d'utilisation, donc essentiellement de haut en bas.

²Le bois de nos résineux et de nos feuillus est composé de types distincts de cellules, ce qui entraîne des différences fondamentales dans son architecture même. Parmi les essences feuillues, on distingue en outre trois différents types de structure du cerne.

assume surtout une fonction mécanique. Après le repos hivernal, la formation de grosses cellules reprend, marquant ainsi une limite généralement nette entre la fin du cerne précédent et le début du nouveau.

Par comptage des cernes sur la souche d'un arbre, on peut déterminer son âge. Toutefois, des faux cernes ainsi que des cernes discontinus (anneau incomplet) ou manquants, quoiqu'assez rares, peuvent biaiser le résultat. Un faux cerne est provoqué par un épisode anormalement sec ou froid durant la période de végétation, qui cause un ralentissement passager de la croissance se marquant dans le bois comme un cerne achevé. Les cernes discontinus ou manquants s'observent surtout sur des arbres peu vigoureux, lorsque les conditions météorologiques sont défavorables ou lorsque le cambium est âgé. Ce phénomène est connu depuis longtemps des forestiers, puisque HARTIG le décrivait en 1869 déjà.

En fonction de toute une série de paramètres, la largeur du cerne peut varier de quelques centièmes de millimètre à plus d'un centimètre. Certains facteurs comme l'essence, l'altitude, l'exposition, la profondeur du sol ou le type de climat, qui ne se modifient pas au cours de l'existence de l'arbre, déterminent son niveau général d'accroissement. D'autres, tels que l'espace disponible, la position sociale, l'âge cambial ou l'état de santé, peuvent évoluer progressivement et influencent les variations du cerne à long terme. Enfin, la météorologie, les attaques de ravageurs, les dégâts de neige, les interventions sylvicoles, la fructification, etc. changent d'année en année et déterminent la variation des largeurs de cerne à court et à moyen terme.

Précisons que la plupart des faits mentionnés dans ce chapitre sont connus depuis longtemps, puisque divers ouvrages du siècle passé en font déjà état.

4. IMPORTANCE DE L'ACCROISSEMENT EN DIAMÈTRE

4.1. *Gestion forestière*

L'accroissement en volume d'un peuplement forestier, soit la production de bois que l'on peut exploiter sans porter atteinte au capital, est constitué des accroissements en diamètre et en hauteur de chacun des arbres qui le composent. Ainsi, la mesure de l'accroissement en diamètre a pris une importance considérable lorsqu'on a véritablement réalisé, il y a deux siècles seulement, que les ressources ligneuses n'étaient pas inépuisables et qu'elles devaient par conséquent être gérées.

Divers règlements visant à limiter l'exploitation effrénée des forêts furent certes édictés dès la fin du Moyen Âge, mais il fallut attendre la fin du XVIII^e siècle pour voir naître progressivement en Suisse une gestion forestière digne de ce nom. Au XIX^e siècle, les forêts furent souvent aménagées par surfaces, c'est-à-dire qu'on réalisait chaque année une coupe rase sur une parcelle correspondant à la surface totale divisée par l'âge d'exploitation. Mais on chercha aussi à les aménager par volumes, avec pour objectif de n'exploiter que l'accroissement. Parfois, on a aussi utilisé une combinaison des deux systèmes (FAVRE 1948, ROBERT 1972 et 1978).

Dans un aménagement par volumes, on détermine la quantité de bois exploitable durant la période à venir, aussi appelée possibilité. Au XIX^e siècle, ce calcul se basait souvent sur une estimation de l'accroissement futur, laquelle reposait sur l'extrapolation de la longueur des pousses annuelles et

des largeurs de cernes observées sur quelques troncs entaillés horizontalement ou abattus, sur des tables de production³, ou encore sur des expériences faites dans le voisinage pour des forêts semblables de divers âges (COMBE 1964, DE SALOMON 1837). De manière générale, l'estimation du volume sur pied et de l'accroissement posait cependant de gros problèmes pratiques et les aménagements par volumes de cette époque faisaient souvent appel à des techniques et des calculs fort compliqués, tout en livrant des résultats peu précis (ROBERT 1978).

En Suisse, avec l'introduction progressive des inventaires forestiers et du contrôle sur pied des exploitations (mesure du diamètre avant l'abattage), l'aménagement par volumes s'imposera au XX^e siècle. Aujourd'hui encore, l'accroissement passé (mesuré) ou l'accroissement futur (estimé) constitue une des bases pour la fixation de la possibilité. Dans le premier cas, il est déterminé par comparaison de deux inventaires successifs, en tenant compte des exploitations effectuées dans l'intervalle. Exceptionnellement, on a aussi recours à l'analyse de cernes sur des carottes de sondage. Dans le second cas, l'accroissement est estimé à l'aide des tables de production; c'est de cette façon que l'on procède dans le canton de Vaud.

L'accroissement en volume du massif forestier (calculé principalement à partir de l'accroissement en diamètre des arbres) représente donc depuis deux siècles environ une donnée essentielle qu'on a cherché à estimer, calculer ou mesurer de diverses manières. De nos jours, il constitue toujours une grandeur fondamentale pour la gestion des forêts, même si propriétaires et forestiers sont placés dans une situation opposée à celle qui prévalait par le passé: ils ne sont plus confrontés à une surexploitation, mais bien plutôt à une sous-exploitation des forêts, qui pourrait d'ailleurs entraîner à terme une capitalisation et un vieillissement excessifs.

4.2. *Dendrochronologie et dendroclimatologie*

En Europe au XV^e siècle, Leonard de Vinci s'intéressait déjà aux cernes et étudiait l'influence du climat sur leurs variations. Pourtant, la dendrochronologie et la dendroclimatologie ne verront le jour que vers 1900-1920, dans une région aride du globe, le sud-ouest des Etats-Unis (SCHWEINGRUBER 1983).

C'est à cette époque que l'astronome américain Andrew Douglass, qui étudie l'influence de l'activité solaire sur le climat de la Terre, imagine de recourir à la largeur des cernes pour remédier au manque de données climatiques anciennes. Il émet alors l'hypothèse, rapidement vérifiée, que les années sèches sont caractérisées par la production d'un cerne étroit. Constatant que la succession de cernes larges et étroits est similaire sur un territoire relativement vaste, Douglass réalise qu'en dépit des influences individuelles et locales que subissent les arbres, la météorologie joue un rôle dominant. Il

³Une table de production est un modèle représentant l'évolution probable de la forêt en matière de production de bois. Les différentes grandeurs qu'elle contient (volume sur pied, accroissement en volume, etc.) sont généralement exprimées en fonction de l'âge et classées par essence et par fertilité. Une table de production se base en principe sur l'observation et l'analyse d'une série de parcelles d'essais couvrant une grande région, voire un pays.

réalise aussi que cette propriété peut être utilisée pour dater très précisément des échantillons de bois (FRITTS 1976 et SCHWEINGRUBER 1983).

Grâce à la longévité du pin à bois lourd (*Pinus ponderosa* Laws.) qui lui permet de mesurer sur un même arbre une très longue suite ininterrompue de cernes, Douglass parvient alors à construire une chronologie absolue (datée) de près de 500 ans, basée sur de nombreux individus d'une grande région. Il démontre aussi que pour les années dont il possède les données météorologiques, la largeur du cerne dépend directement des précipitations de l'hiver précédent (FRITTS 1976, SCHWEINGRUBER 1983). Pour établir sa chronologie, Douglass emploie ce qui deviendra le principe essentiel de la dendrochronologie, à savoir la synchronisation ou interdatation. Ce procédé consiste à placer correctement chaque séquence de cernes dans l'échelle du temps, sachant qu'à une même période doit correspondre pour tous les arbres une succession semblable de cernes larges et étroits. Qu'il s'agisse de calculer une courbe moyenne au niveau d'un arbre (plusieurs rayons de mesure), d'un massif forestier ou d'une région, ce travail préalable de synchronisation est incontournable.

Avec l'aide d'archéologues, Douglass utilisera bientôt ses découvertes pour dater la construction de villages indiens (FRITTS 1976 et SCHWEINGRUBER 1983), donnant ainsi véritablement naissance à la dendrochronologie.

C'est selon le principe illustré par la figure 1 qu'ont été construites petit à petit les très longues chronologies continues dont on dispose aujourd'hui. Aux Etats-Unis, l'extrême longévité d'espèces telles que le pin à queue de renard (*Pinus aristata* Engelm.) a permis d'établir des chronologies de plusieurs milliers d'années vers 1960-1970 déjà (Fritts 1976). En Europe, où les arbres ne dépassent habituellement pas 150 à 300 ans, ce n'est que récemment que

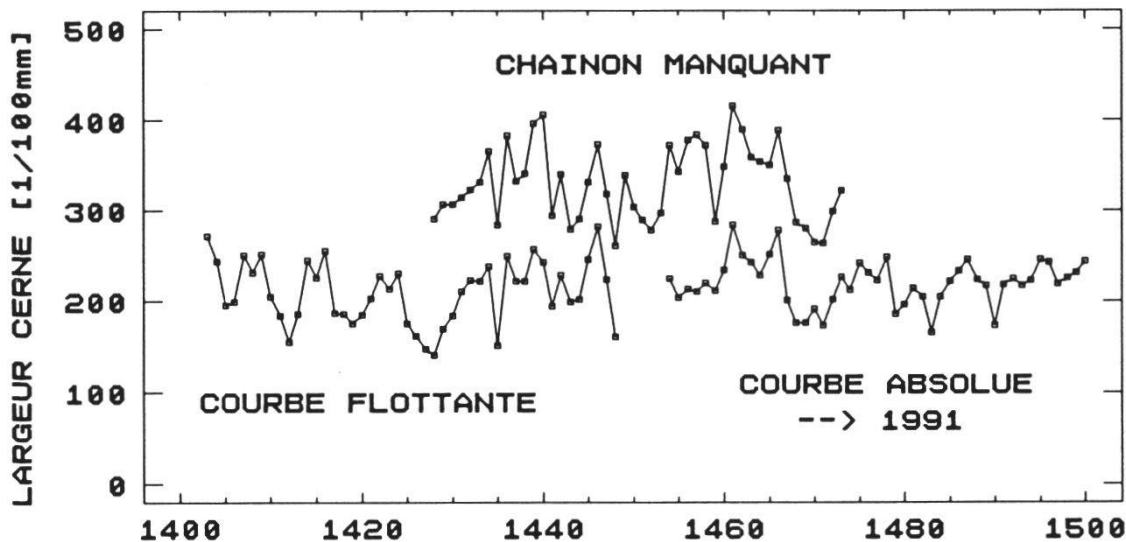


Figure 1.—Exemple de prolongement d'une chronologie, ou courbe de cernes, par la synchronisation de trois courbes existantes. La chronologie datée de façon absolue (ici: 1454-1991) se base sur les courbes individuelles d'arbres vivants et de bois historiques. La chronologie flottante, basée sur des bois historiques, ne peut être datée avant la découverte d'une troisième courbe chevauchant les deux premières. Ce «chaînon manquant» permet de faire le lien et d'attribuer ainsi une année du calendrier à chaque cerne de la chronologie flottante (ici: 1403-1448).

l'on est parvenu à une référence de l'ordre de 6000 ans pour le chêne. Mais aujourd'hui, la chronologie de cette essence approche les 10'000 ans dans certaines régions (GASSMANN, Laboratoire de dendrochronologie du Musée cantonal d'archéologie de Neuchâtel, comm. pers., SEIFERT 1991). Pour les autres essences, dont le bois se conserve moins bien, les références sont beaucoup plus courtes. Très schématiquement, l'établissement des chronologies européennes se fait de la façon suivante: pour les 150 à 300 années les plus récentes on utilise des arbres vivants; au-delà et jusqu'au début du Moyen Age environ on a recours aux bois de bâtiments; pour les périodes plus reculées encore, on se sert de troncs enfouis dans des moraines, des marais ou les lits d'anciens cours d'eau, ou on utilise les pilotis d'habitations lacustres.

Grâce à la dendrochronologie, il est possible de dater de façon extrêmement précise un échantillon de bois ancien ou récent conservé jusqu'au cambium, puisque non seulement l'année mais parfois la saison de l'abattage peuvent être déterminées. Une si grande précision n'est évidemment pas possible lorsque les derniers cernes produits ne sont plus présents. Aujourd'hui, la dendrochronologie est largement utilisée et ses applications sont multiples: datation et étude de sites lacustres du néolithique et de l'Age du bronze, datation et étude des réfections et transformations d'édifices historiques, datation d'oeuvres d'art ou d'instruments de musique pour examiner leur authenticité, etc. (SCHWEINGRUBER 1983).

Tandis que la dendrochronologie se sert des variations annuelles de l'épaisseur du cerne pour dater des objets, la dendroclimatologie étudie pour sa part les relations entre ces variations et celles du climat. Une fois connues, ces relations permettent de reconstituer le climat de périodes antérieures aux mesures météorologiques, ce qui, on s'en souvient, n'était autre que l'objectif de départ des travaux de Douglass. Une autre application de la dendroclimatologie est développée au § 5.1.3.

Précisons pour terminer que si nous n'avons parlé ici que de l'épaisseur du cerne, d'autres grandeurs dérivées du cerne, telle la densité du bois d'automne, sont également utilisées en dendrochronologie et en dendroclimatologie.

4.3. *Sciences de l'environnement*

Avec l'apparition du dépérissement des forêts au début des années 1980, l'accroissement en diamètre a pris une importance considérable en tant qu'indicateur de la vitalité. Cette grandeur présente l'avantage décisif d'être objectivement mesurable et surtout de permettre une analyse rétrospective détaillée, ce qui n'est par exemple pas le cas avec l'état sanitaire du houppier, observé systématiquement en Suisse depuis 1984 seulement.

En 1710 déjà, VON GÖCHHAUSEN attire l'attention sur les effets néfastes des émissions sulfureuses pour la santé des forêts (LEIPOLD 1990) et dès la fin du XIXe siècle, l'influence de la pollution atmosphérique sur les arbres fait l'objet de divers travaux en Europe et en Amérique du Nord. Ce n'est pourtant qu'à partir de la fin des années cinquante que la réaction de l'accroissement à l'action de la pollution bénéficie d'une attention soutenue. Les premières études, qui portent sur des forêts présentant des dommages marqués imputables à une pollution atmosphérique locale importante (dioxyde de

soufre, fluor), concluent à des baisses d'accroissement (ex: POLLANSCHÜTZ 1962, SCHEFFER et HEDGCOCK 1955).

Au début des années 1980, c'est un problème d'une envergure nouvelle qui fait son apparition puisqu'on parle d'un déclin de la vitalité pour une grande partie des écosystèmes forestiers de l'hémisphère Nord. Ce n'est plus l'effet néfaste d'une source locale massive de fumées industrielles qui est en cause, mais l'impact d'une exposition chronique et générale à la pollution ambiante.

L'accroissement bénéficie dans ce contexte d'un intérêt accru non seulement pour la connaissance de la production de bois en elle-même, mais surtout comme paramètre caractérisant la vitalité. Mais contrairement à ce qui se pratiquait pour les dégâts dits classiques, l'ubiquité de la pollution atmosphérique ne permet plus de trouver des forêts préservées de toute atteinte pour définir un accroissement de référence. En outre, les dommages observés sont moins manifestes et moins prononcés que ceux imputés aux fumées industrielles. Les anciennes méthodes d'analyse seront donc développées et affinées, en s'inspirant entre autres des techniques utilisées en dendrochronologie et en dendroclimatologie.

Notre propos n'est pas d'explicitier, ni même de mentionner les très nombreuses et diverses méthodes qui ont été appliquées au cours de la dernière décennie. Ce qu'il faut savoir, c'est que tous les procédés d'analyse ont recours à la comparaison d'un accroissement supposé perturbé avec un accroissement de référence. La variabilité effective des objets étudiés et de leur environnement, mais aussi le choix de la référence et les différentes possibilités d'interprétation expliquent la diversité des conclusions tirées des analyses effectuées dans de nombreux pays depuis 10 à 12 ans.

Soulignons pour terminer qu'une étude de la production, si elle éclaire un aspect de la vitalité, ne peut à elle seule fournir la preuve formelle d'un lien de causalité entre anomalie de l'accroissement et pollution (HARTMANN *et al.* 1987).

5. EXEMPLES DE RECHERCHES ACTUELLES DANS LE CANTON DE VAUD

5.1. *Accroissement de l'arbre*

5.1.1. *Bases de l'étude*

L'étude que nous présentons ici s'appuie principalement sur 739 épicéas (*Picea abies* Karst.) dominants provenant de 143 sites du Jura et du pied du Jura dans la région d'Orbe. L'analyse des cernes se base sur une rondelle prélevée dans la partie inférieure de la couronne d'arbres abattus entre 1984 et 1990.

Sur la rondelle, les cernes sont mesurés le long de deux rayons avec une précision théorique d'un centième de millimètre. Pour identifier les cernes incomplets ou manquants ainsi que les faux cernes, on a recours aux techniques de synchronisation utilisées en dendrochronologie (§ 4.2). Cette opération est facilitée par la présence de plusieurs années caractéristiques, ou années témoins, pour lesquelles le cerne de presque tous les arbres présente une même tendance, à la hausse ou à la baisse.

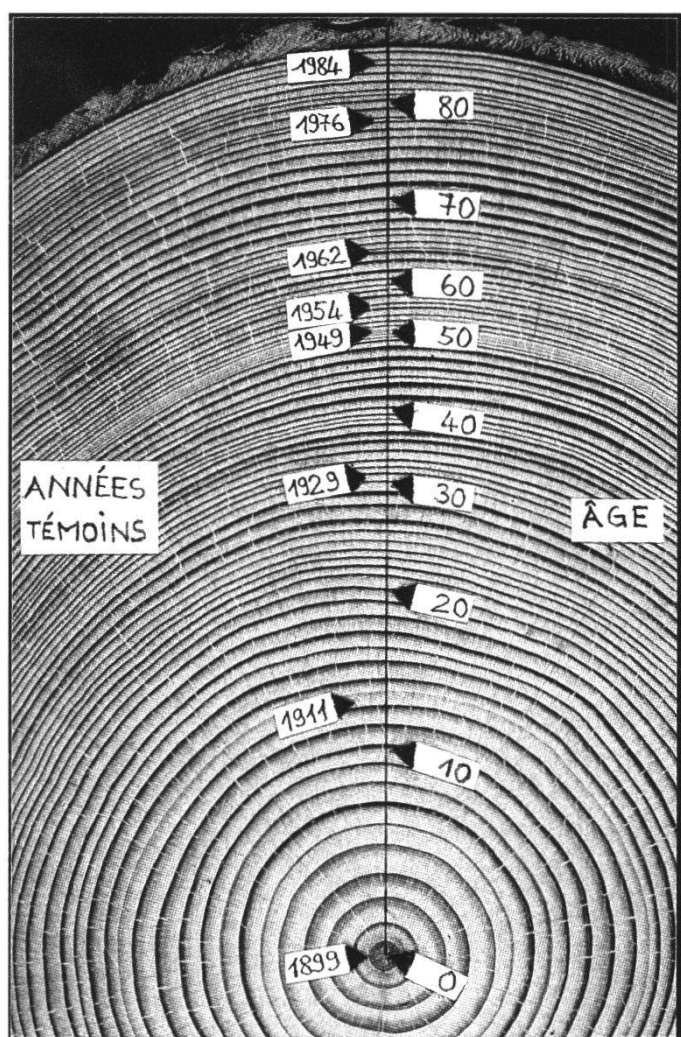


Figure 2.—Rondelle avec indication d'un rayon de mesure, d'années témoins et de l'âge.

Sachant que les épicéas en question proviennent d'une multitude de stations et de massifs forestiers différents pour lesquels seuls les facteurs météorologiques présentent une variation annuelle commune, ces années témoins nous donnent une première indication quant à l'importance du climat pour l'épaisseur du cerne (voir aussi § 4.2 et § 5.1.3). Dans l'analyse ci-dessous (tab. 1 et § 5.1.3), ce sont les données météorologiques de Neuchâtel (405 m) pour la température et celles de Baulmes (642 m) et Valeyres-sous-Rances (512 m) pour les précipitations qui sont utilisées.

Dans toute courbe exprimant l'épaisseur des cernes d'un arbre sur le temps, on distingue deux effets principaux. Le premier effet est celui de l'âge cambial, c'est-à-dire l'âge du cambium au moment de la formation du cerne. Après une courte phase de jeunesse marquée par une augmentation de la largeur du cerne, cette dernière diminue naturellement, chez les conifères selon une fonction exponentielle négative généralement (BRÄKER 1981, FRITTS 1976). Le second effet est celui de la date, qui reflète les influences du climat, de la pollution, de la fructification, des interventions sylvicoles, etc.

En procédant à l'*indexation* (relativisation de la largeur mesurée des cernes par rapport à une largeur théorique), on élimine l'effet indésirable de l'âge dans la représentation des largeurs de cernes en fonction du calendrier (fig. 3,

5, 6). Pour les largeurs théoriques, nous utilisons une courbe de vieillissement (fig. 4) idéalisée à l'aide d'une fonction mathématique.

Les largeurs de cernes représentées sur l'âge cambial (fig. 4) sont libérées pour leur part de l'effet indésirable de la date, puisqu'aux cernes d'un âge donné correspondent des dates très variées.

Tableau 1.—Principales années témoins pour 739 épicéas de la région d'Orbe. Exemple: le cerne 1976 de tous les arbres étudiés est plus étroit que le cerne 1975.

Année	Fréquence	Evénements climatiques marquants de l'année n et n-1
1921	↓ 97%	Automne 1920 sec; 1921 très sec, sauf mai et août.
1955	↑ 99%	1954: août-septembre très pluvieux, juillet-août frais. 1955: mai-août pluvieux.
1962	↓ 99%	Août-novembre 1961 sec; juin-novembre 1962 très sec.
1976	↓ 100%	Janvier-août 1976 très sec.
1984	↓ 98%	Été 1983 chaud; mars-avril et juin-août 1984 secs.

5.1.2. Influence de la transparence du houppier sur la largeur du cerne

L'état sanitaire de la couronne est le seul critère de vitalité observé à une grande échelle. Depuis 1984, il est aussi le baromètre de l'état de santé de la forêt suisse, puisque chaque année la Confédération et certains cantons réalisent un inventaire Sanasilva, basé sur un important échantillon d'arbres sur lesquels on effectue une taxation oculaire de la défoliation, ou transparence de la cime.

La large utilisation du critère défoliation d'un côté et la qualité du critère largeur du cerne de l'autre nous ont conduits à rechercher la relation existant entre ces deux indicateurs de la vitalité.

La figure 3 met en évidence une différenciation nette de l'accroissement entre les trois classes de défoliation, en dépit d'une variation individuelle qui reste importante. La majorité des auteurs qui ont étudié la question obtiennent un résultat similaire tant pour l'épicéa (ex: ATHARI 1983, BRÄKER 1987, SCHNEIDER 1985) que pour le sapin blanc (*Abies alba* Mill.) (ex: BERT et BECKER 1990, BRÄKER 1987, KENK 1983). A Yverdon, l'analyse de 74 hêtres (*Fagus sylvatica* L.) nous livre aussi une image semblable. Quelques auteurs obtiennent une différenciation peu évidente, voire inexistante (ex: STRATMANN 1985, EICKORN 1985).

Les graphiques du type de celui de la figure 3 ont donné lieu à diverses interprétations. Comme KENK (1986), SPELSBERG (1987) et d'autres, nous pensons pour notre part que la différenciation observée pourrait fort bien n'être que l'expression d'un processus naturel de concurrence entre les individus d'un collectif, qui ne traduit pas forcément un dégât d'origine anthropique. Et le fait qu'une différenciation de l'épaisseur du cerne n'apparaisse pas avant la fin des années 1950 ne signifie nullement que l'origine d'un possible dépérissement remonte à ces années-là. En effet, il est vraisemblable que si on avait effectué une même analyse il y a par exemple cinquante ans, on aurait observé un phénomène semblable de hiérarchisation.

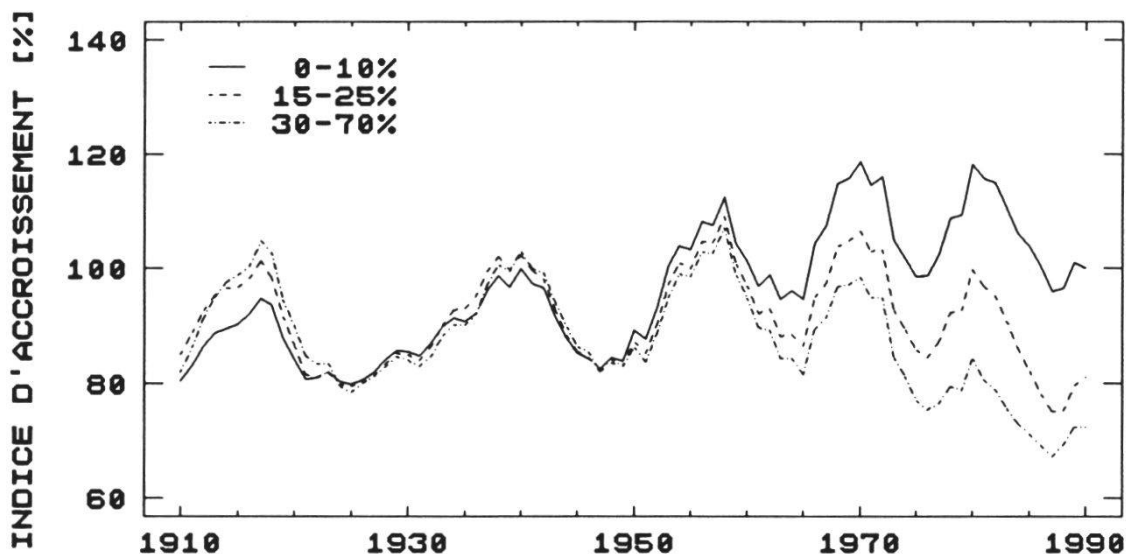


Figure 3.—Relation entre la transparence de la cime (taux de défoliation) et la largeur des cernes pour 727 épicéas de la région d'Orbe. Les trois courbes sont affranchies de l'effet de l'âge cambial par indexation, la référence utilisée pour cette opération étant la courbe de vieillissement des arbres sains. Elles sont lissées à l'aide de moyennes mobiles pour faire ressortir les tendances à moyen et long termes, en atténuant les variations annuelles. Les différences entre les trois courbes sont significatives au niveau de confiance de 95%.

Si cette dernière n'apparaît plus dans nos courbes pour la période allant de 1910 à 1950-1960, c'est qu'au cours du temps l'action conjuguée de la concurrence naturelle et de la sylviculture a éliminé les arbres peu vigoureux à cette époque, qui sont donc absents de notre échantillon.

Ce que nous pouvons retenir de la figure 3, c'est que les épicéas dont la couronne est aujourd'hui transparente forment depuis plusieurs décennies des cernes plus étroits que leurs homologues avec une cime bien fournie. Pour la moyenne des arbres, la transparence de la couronne est par conséquent un bon critère de vitalité. Mais en l'absence d'inventaires anciens, on ne peut malheureusement pas dire si la proportion actuelle d'arbres à la cime dégarnie est supérieure à celle qu'on trouvait dans une forêt «normale».

5.1.3. Evolution de la largeur du cerne au cours du XX^e siècle

Pour étudier l'évolution du niveau moyen d'accroissement de l'arbre au cours du siècle, nous prenons en compte tous les arbres quel que soit leur état sanitaire.

A la figure 4, on a représenté deux courbes de cernes en fonction de l'âge cambial. Il s'avère que le niveau de la première, formée des cernes produits jusqu'en 1955, est nettement dépassé par le niveau de la seconde, formée pour sa part des cernes élaborés à partir de 1956. Cette tendance très nette est confirmée par 116 épicéas provenant du Jura dans la région de Baulmes et Ste-Croix et par 164 épicéas provenant du Plateau soleurois (SCHNEIDER 1990).

La figure 5 présente les mêmes données que la figure 4, mais en fonction de l'année de production du cerne. Comme nous cherchons à déterminer si un phénomène nouveau est apparu au cours des dernières décennies, la correction de l'effet de l'âge (indexation) a lieu sur la base du vieillissement tel qu'il se

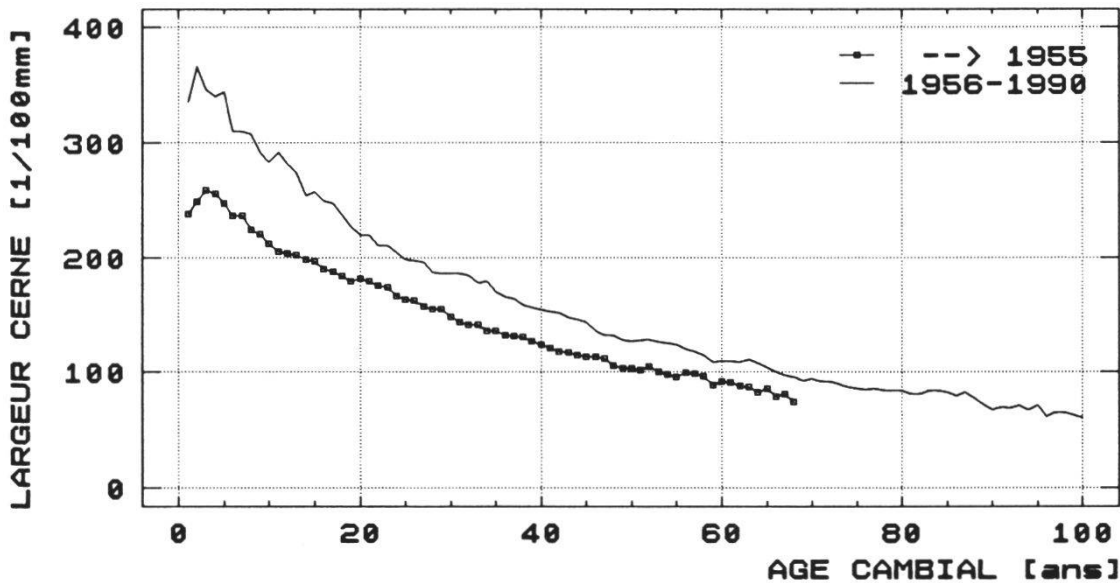


Figure 4.—Largeur du cerne en fonction de l'âge cambial pour 739 épicéas de la région d'Orbe. La courbe du bas est formée des cernes produits jusqu'en 1955; celle du haut est formée des cernes élaborés après 1955. La différence entre les deux courbes est significative au niveau de confiance de 95%. Exemple: les cernes formés avant 1956 par un cambium âgé de 20 ans ont en moyenne une largeur de 176 [1/100mm]; les cernes formés après 1955 par un cambium du même âge présentent une largeur de 220 [1/100mm].

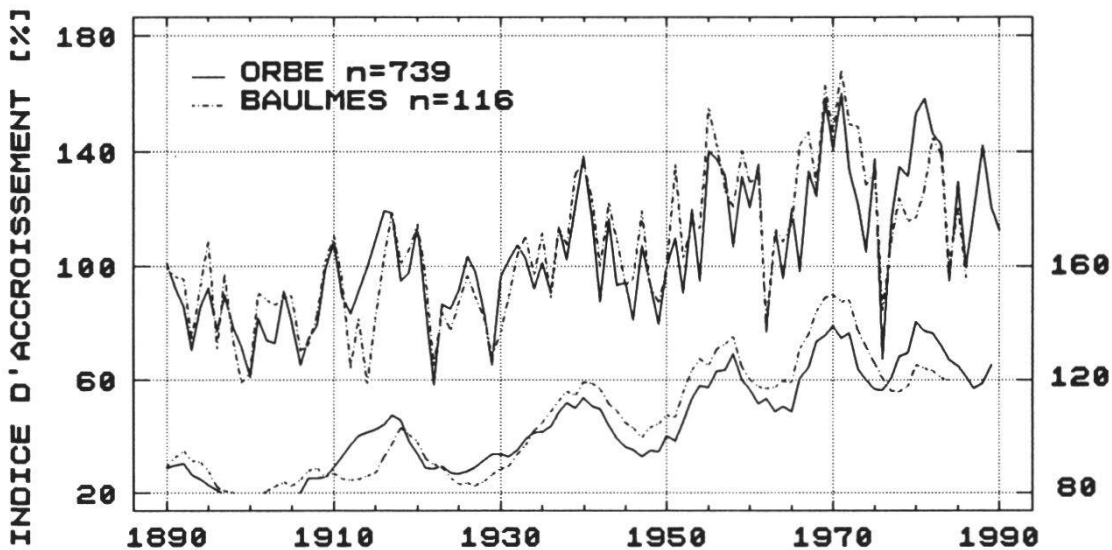


Figure 5.—Evolution de la largeur du cerne au cours du siècle pour 739 épicéas de la région d'Orbe et pour 116 épicéas de la région de Baulmes et Ste-Croix. Chaque courbe est affranchie de l'effet de l'âge cambial par indexation avec la courbe de vieillissement «avant 1956» (voir fig. 4). Les variations à court, moyen et long termes des courbes des deux régions sont très semblables. Les deux courbes du bas (échelle de droite) sont identiques à celles du haut (échelle de gauche), mais sont lissées à l'aide de moyennes mobiles pour faire ressortir leurs tendances à moyen et long termes (adapté de HARTMANN et SCHNEIDER 1990).

présentait dans la première moitié du siècle (fig. 4, courbe du bas). A noter que si l'on effectuait l'indexation à l'aide d'une courbe de vieillissement formée des cernes de tout le siècle, on obtiendrait la même tendance à long terme, quoiqu'un peu moins marquée.

Le premier élément qui se dégage des courbes de la figure 5 est une alternance à moyen terme de périodes de bonne croissance avec des périodes moins favorables. L'influence climatique est déterminante quant à l'apparition de ces phases; on remarque par exemple la crise centrée sur 1976, ainsi que celle de la fin des années 1940. L'intensité de la crise récente est comparable à celle des précédentes.

Le deuxième élément qu'on retiendra est une hausse marquée du niveau d'accroissement depuis le début du siècle, suivie d'une stagnation durant les vingt dernières années environ. L'augmentation de la largeur du cerne que l'on note depuis le commencement du siècle est d'autant plus frappante qu'une légère baisse n'aurait en soi rien d'anormal. En effet, les vieux arbres sur lesquels nous mesurons aujourd'hui l'accroissement du début du siècle faisaient en principe partie des plus vigoureux de l'époque, les plus faibles ayant pour leur part progressivement disparu des peuplements par sélection naturelle et exploitation. En revanche, l'accroissement actuel est mesuré en partie sur des arbres relativement faibles appelés à être éliminés à l'avenir. Ce point souligne qu'à elle seule, l'analyse rétrospective des cernes d'arbres contemporains ne peut évidemment fournir d'indications sur l'accroissement des arbres disparus des peuplements actuels.

Les travaux du même type réalisés ces dernières années en Europe centrale concluent en général aussi à une hausse ou à un maintien de la productivité moyenne au niveau de l'arbre (ex: BECKER 1989, BERT et BECKER 1990, BRÄKER 1990, KONTIC *et al.* 1990). Des baisses d'accroissement ne sont constatées qu'exceptionnellement (ex: JOOS 1991).

Pour expliquer la hausse de l'accroissement en diamètre que nous observons au cours du XX^e siècle, nous pouvons a priori formuler trois hypothèses. La première est liée au fait que la sylviculture actuelle tend à favoriser dès le jeune âge les arbres d'avenir et à stimuler ainsi leur accroissement. Nous reviendrons sur cette question aux § 5.2-5.3. La seconde hypothèse est celle d'un possible effet d'engrais joué par les immissions (azote et CO₂). Nous y reviendrons également au § 5.3. La troisième hypothèse est d'ordre climatique et son examen fait l'objet de ce qui suit.

En première analyse, on constate que pour la région étudiée le climat n'a pas subi de modification globale importante au cours du XX^e siècle. En effet, entre la période 1901-55 et la période 1956-89, la hausse moyenne de la température à Neuchâtel n'est que de 0.17 °C pour l'année complète et de 0.04 °C pour les mois de mars à octobre. Entre les mêmes périodes, la baisse moyenne des précipitations à Valeyres-sous-Rances est de l'ordre de respectivement 3% et 6%.

L'étude détaillée du rôle du climat sur l'évolution de l'épaisseur moyenne du cerne des épicéas de la région d'Orbe a été faite à l'aide de régressions linéaires multiples. Malgré ses limites, cette méthode permet sous certaines conditions de répondre au type de question auquel nous sommes confrontés ici.

Il s'avère qu'aucun des modèles construits pour l'ensemble de la période 1912-89 n'a permis d'expliquer de façon biologiquement plausible l'évolution de l'épaisseur du cerne à long terme. Il en va de même pour les modèles calculés sur la période 1912-55 et extrapolés pour les années 1956-89. Autrement dit, le climat ne semble pas être responsable de la forte augmentation de la largeur du cerne que l'on observe au cours du XX^e siècle.

Forts de cela, nous avons extrait de notre courbe de cernes (fig. 5, trait plein) cette information non climatique en admettant une pente constante, qui est de +0.55% par an. Libérée de sa tendance à long terme, la courbe ne comporte donc plus que des variations à court et à moyen terme (fig. 6, trait plein), qu'un modèle climatique simple nous permet d'expliquer (fig. 6, pointillé). Calculé pour la période 1912-89, notre modèle comporte 7 variables indépendantes hautement significatives (tab. 2) et permet d'expliquer 67% de la variance de la courbe.

Tableau 2.—Equation du modèle climatique expliquant les variations à court et à moyen terme de l'épaisseur du cerne de 739 épicéas de la région d'Orbe, après élimination de la tendance à long terme (fig. 6). Les précipitations sont des valeurs mensuelles en [1/10mm]; la température est une moyenne périodique en [1/10°C]; l'indice d'accroissement est en [%]. Les variables (n) concernent l'année courante, les variables (n-1) l'année précédente.

$$I = -213.5 + 8.2*\ln(P1) + 26.5*\ln(P2) + 10.1*\ln(P3) + 0.07*T - 0.15*AT + 8.0*\ln(AP) + 0.24*AI$$

où var. dépendante: I = Indice d'accroissement (n), libéré de sa tendance à long terme

var. indépendantes: P1 = Précipitations de mars à mi-mai (n)

P2 = Précipitations de mi-mai à juin (n)

P3 = Précipitations de juillet (n)

T = Température de mars à mi-mai (n)

AT = Température de mi-juin à août (n-1)

AP = Précipitations de septembre à novembre (n-1)

AI = Indice d'accroissement (n-1), libéré de sa tendance à long terme

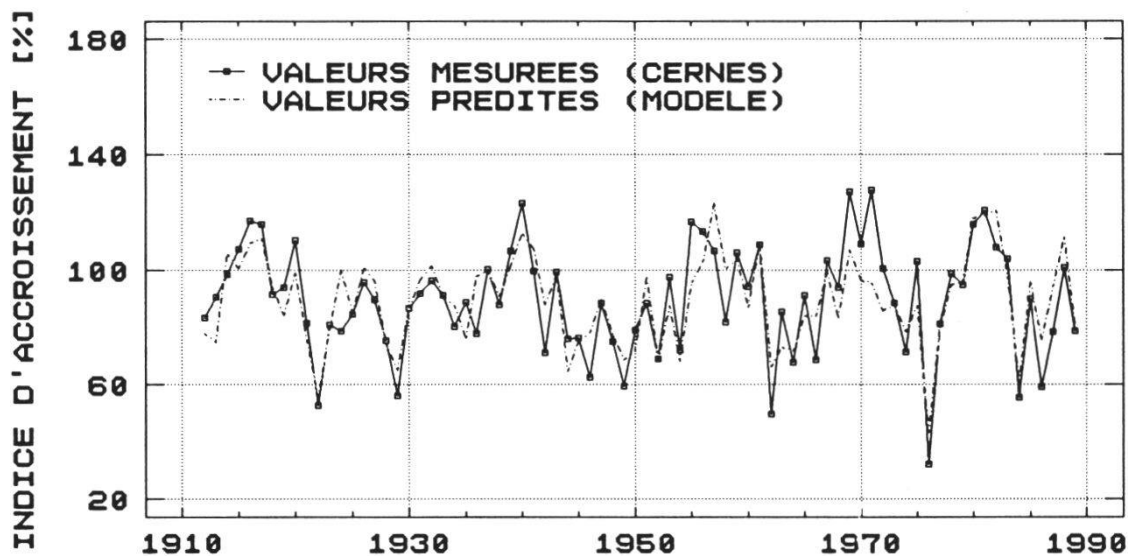


Figure 6.—Evolution de la largeur du cerne au cours du siècle pour 739 épicéas de la région d'Orbe, après suppression de la tendance à long terme (trait plein). Valeurs prédites à l'aide du modèle climatique du tableau 2 (pointillé). Ce modèle montre que les variations du cerne à court et à moyen terme peuvent être expliquées de façon satisfaisante par les variations climatiques.

Il ressort qu'une température printanière élevée (T), et plus encore des précipitations abondantes au printemps et en été (P1-2-3) stimulent l'accroissement en diamètre. Lorsque l'automne de l'année précédente est suffisamment humide (AP), la constitution de réserves semble favorisée, ce qui se traduit par la formation d'un cerne large. Par contre, un été précédent trop chaud (AT) influence négativement l'accroissement. La variable cerne de l'année précédente (AI) traduit pour sa part une certaine autocorrélation, à savoir que si le cerne n-1 est respectivement large ou étroit, le cerne n tendra à l'être aussi; elle exprime le fait qu'un événement climatique marqué, par exemple la sécheresse de 1976, peut avoir un effet durant plusieurs années. A noter que de façon générale, les précipitations semblent fréquemment constituer le facteur limitant dans la région étudiée (Orbe).

Nous avons vu que dans notre cas on peut vraisemblablement exclure l'hypothèse climatique pour expliquer la hausse d'accroissement observée au cours du XX^e siècle. Une étude effectuée à Zurich (KONTIC *et al.* 1990) et une autre en Forêt noire (BECKER *et al.* 1990) parviennent à la même conclusion. En revanche, pour le sapin dans les Vosges, BECKER (1989) explique entièrement la forte hausse de l'épaisseur du cerne jusque vers les années 1940, suivie d'une légère baisse, par un modèle climatique.

5.2 *Accroissement du massif forestier*

L'estimation de la production des forêts à l'aide de tables de production, comme cela se fait dans le canton de Vaud (§ 4.1), n'est évidemment praticable que tant que l'accroissement réel est assez proche de celui du modèle des tables. Les propos alarmistes du début des années 1980 ayant fait craindre une baisse importante de l'accroissement, nous avons entrepris d'étudier celui-ci de façon précise au niveau du massif forestier. De manière plus générale, l'accroissement du collectif est un indicateur de la vitalité extrêmement précieux, complémentaire de l'accroissement par arbre discuté au § 5.1, et pouvant présenter une évolution entièrement différente. En effet, les arbres s'influencent mutuellement, la forêt dans sa dynamique ne saurait être considérée comme une simple somme d'individus.

La production annuelle d'un massif forestier s'exprime habituellement en volume ou en surface terrière⁴ par hectare [$m^3/ha/an$ ou $m^2/ha/an$]. L'accroissement actuel du massif est constitué par l'ensemble des accroissements individuels des arbres sur pied; pour déterminer son accroissement antérieur, il y a lieu de tenir compte également des arbres qui ont disparu lors d'exploitations passées.

Les résultats présentés à la figure 7 s'appuient sur 9 parcelles d'observations d'épicéas du Plateau et du pied du Jura vaudois. Les analyses de cernes se basent sur des carottes de sondage prélevées à 1,3 m du sol et sur des mesures de diamètre effectuées à la même hauteur. L'accroissement des arbres exploités est reconstitué à l'aide des souches.

En fonction de l'objectif principal de notre étude, l'utilisation des tables de production comme référence s'impose bien évidemment. Par ailleurs, comme

⁴Pour un arbre, l'accroissement annuel en surface terrière est la surface de son cerne à 1.3 m du sol.

le relève SPELSBERG (1987), celles-ci présentent l'avantage de refléter les conditions moyennes de vitalité à l'époque de leur établissement, soit dans la première moitié de notre siècle pour le cas des tables suisses. Autrement dit, leurs valeurs prennent en compte une proportion naturelle (inconnue) d'arbres ayant une couronne plus ou moins transparente (voir § 5.1.2). Les tables de production présentent en revanche l'inconvénient d'être globales et de ne pas tenir compte des particularités locales.

La figure 7 montre que les massifs boisés étudiés ne présentent pas actuellement un accroissement inférieur à celui de la table, non plus qu'une baisse de l'accroissement relatif au cours des dernières décennies. Et si ce dernier n'est pas en hausse durant les 30 dernières années, l'accroissement de 7 des 9 parcelles d'observations dépasse néanmoins significativement celui du modèle de la table.

La sylviculture pratiquée dans les forêts étudiées est un peu différente de celle qui a prévalu dans les parcelles qui ont servi à l'établissement des tables suisses. Toutefois, à l'inverse de l'accroissement par arbre (§ 5.1.3),

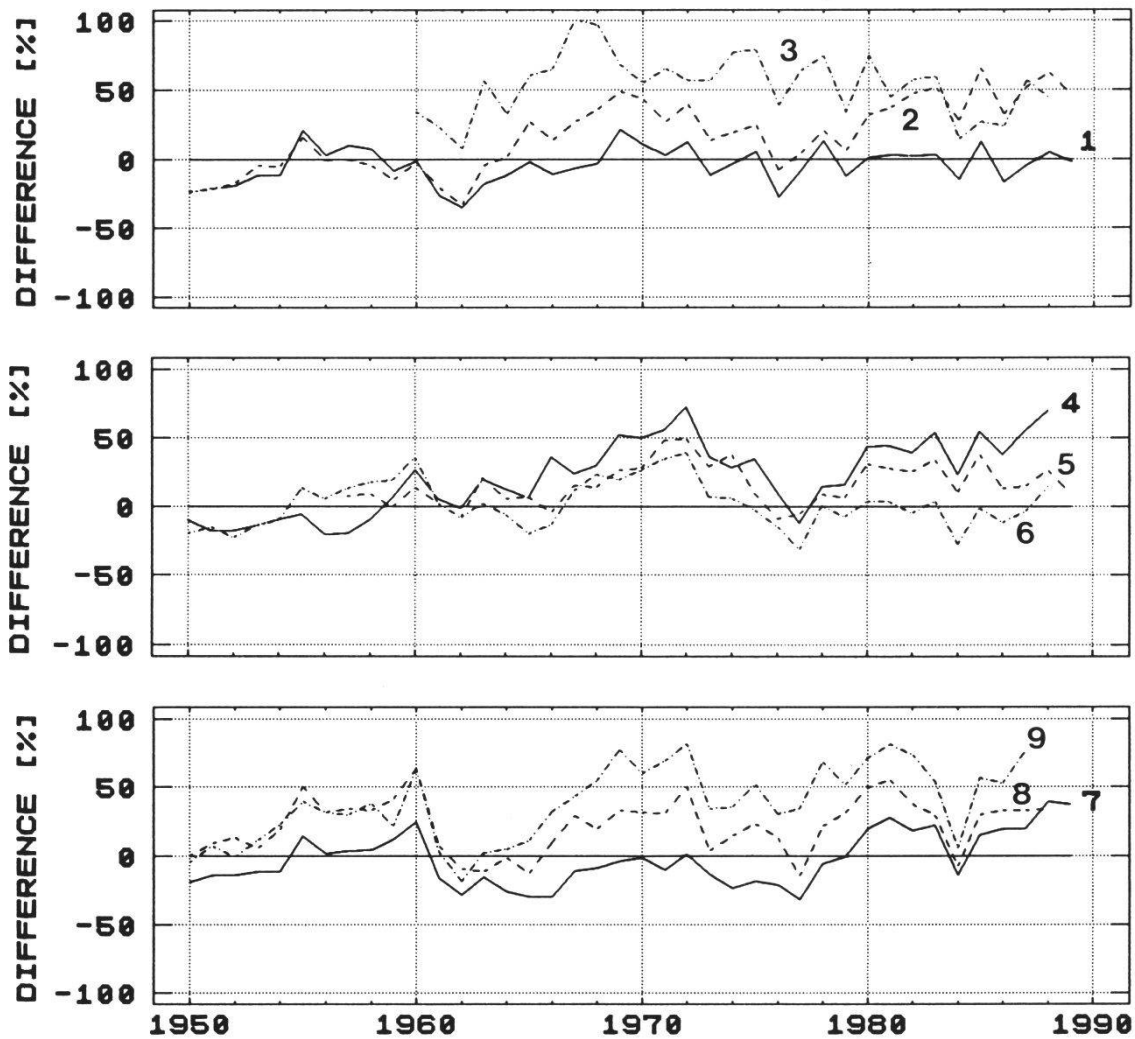


Figure 7.—Accroissement annuel en surface terrière de 9 parcelles d'observations d'épicéas du Plateau et du pied du Jura vaudois. Différence entre l'accroissement observé et l'accroissement de référence (table de production), en pourcents de ce dernier. Exemple: Pour la parcelle 8 (Lutry) en 1980, l'accroissement représente 1.5 fois celui de la table de production (soit +50%). 1 = Avenches, 2 = Villarzel, 3 = Pampigny, 4 = Corcelles-le-Jorat, 5 = Thierrens, 6 = St-Cierges, 7 = St-Oyens, 8 = Lutry, 9 = Riex.

l'accroissement par unité de surface est relativement indépendant du traitement sylvicole (BACHMANN 1990, JOHNSTON *et al.* 1967, KNUCHEL 1950, etc.). On sait en effet qu'une éclaircie provoque en quelque sorte une concentration de l'accroissement sur les arbres restant sur pied. L'éclaircie stimule donc la croissance au niveau de l'individu. En revanche, on estime en général qu'au niveau du massif, ce gain d'accroissement est compensé par la diminution du nombre d'arbres à l'hectare provoquée par l'éclaircie. En l'état actuel de nos connaissances, nous pensons donc que le traitement sylvicole ne peut expliquer tout au plus qu'une partie des fortes déviations positives que nous observons dans 7 parcelles sur 9.

Par comparaison aux tables, SCHNEIDER (1991) conclut également à un maintien du niveau de production du massif, voire une légère hausse, dans le cas d'une étude sur l'épicéa du Plateau soleurois. Avec une référence du même type, la majorité des auteurs allemands observent eux aussi un maintien ou une hausse de la production (ex: KENK 1986 et 1990, PRETZSCH 1986, SPIECKER 1987), mais quelques études font également état d'une baisse (ex: ATHARI et KRAMER 1985).

5.3. DISCUSSION ET CONCLUSION

Nos analyses démontrent que tant au niveau de l'arbre que du massif boisé, on n'observe pas les baisses d'accroissement que l'on pouvait redouter. Ce résultat est confirmé par plusieurs travaux réalisés ces dernières années en Suisse et dans les pays voisins. Il n'est pas rare que l'accroissement soit même en hausse par rapport aux références du passé.

Ce constat a priori réjouissant permet-il d'être véritablement rassuré quant à l'état de l'écosystème forestier ? Ce n'est pas certain, car comme le relève SCHÖPFER (1987), un écart positif par rapport à la norme peut représenter un signe de déséquilibre au même titre qu'une baisse de l'accroissement.

Revenons aux résultats des travaux vaudois. La forte augmentation de l'accroissement que nous observons au niveau de l'arbre ne paraît pas être provoquée par une évolution du climat (§ 5.1.3). Une modification progressive de la sylviculture pourrait par contre avoir joué un rôle non négligeable dans ce cas (§ 5.1.3). Au niveau du massif, la productivité plus élevée qu'attendu ne semble en revanche pas pouvoir s'expliquer par une différence de traitement sylvicole seulement (§ 5.2).

L'hypothèse de l'effet d'engrais des immissions (CO_2 et surtout azote émis sous forme de NO_x et NH_3) reste pour sa part plausible par rapport à toutes nos données, aussi bien par arbre que par hectare. Mentionnée de plus en plus souvent comme explication possible des hausses d'accroissement observées (ex: BECKER *et al.* 1990, FRANZ 1983, HARTMANN et SCHNEIDER 1990, KENK 1990), cette action stimulatrice des polluants atmosphériques demeure difficile à démontrer en pratique et fait actuellement l'objet de diverses recherches.

Quant aux immissions elles-mêmes, il est avéré qu'elles sont quantitativement importantes. Selon HOSTETTLER (1991), la concentration de CO_2 dans l'atmosphère a augmenté d'environ 25% depuis le début de l'industrialisation. Et d'après diverses sources citées par STADELMANN (1992), ce sont quelques 20-80 [kg/ha] d'azote atmosphérique qui se déposent annuellement dans la forêt suisse, c'est-à-dire environ le double des quantités

de 1950. Le fait que KENK (1990) et PRETZSCH (1986) constatent des hausses de l'accroissement surtout sur des stations pauvres, où cet élément est un facteur limitant, semble accréditer la thèse de l'influence de l'azote.

En guise de conclusion, observons qu'à l'image des naturalistes qui cherchaient au siècle passé à élucider le processus de l'accroissement en diamètre, nous essayons aujourd'hui de comprendre ce qui se passe dans un écosystème complexe aux interactions multiples. Comme eux, nous n'avons pas trouvé de réponse définitive et ne sommes pas à l'abri d'une erreur d'interprétation ou même d'observation. D'autres explications, qui nous échappent peut-être, ne sauraient en effet être exclues. Les relevés toujours plus nombreux et plus complets effectués en Europe et en Amérique du Nord, ainsi que le développement de techniques d'analyse nouvelles, apporteront sans doute des réponses plus précises à l'avenir.

6. BIBLIOGRAPHIE

- ATHARI S., 1983. Zuwachsvergleich von Fichten mit unterschiedlich starken Schadsymptomen. *Allg. Forstz.* 38.26/27: 653-655.
- ATHARI S., KRAMER H., 1985. Ergebnisse von Wachstums- und Strukturanalysen in erkrankten Fichtenbeständen. *Schr. forstl. Fak. Univ. Göttingen u. Nieders. VersAnst.* 82: 1-96.
- BEAUVERIE J., 1905. Le bois, Encyclopédie industrielle. Gauthier-Villars, imprimeur-libraire, Paris. 724 p.
- BACHMANN P., 1990. Vorlesung Waldwachstum. Dép. pour la recherche sur la forêt et le bois de l'EPF-Zurich.
- BECKER M., 1989. The role of climate on present and past vitality of silver fir forests in the Vosges mountains of northeastern France. *Can. J. of Forest Research* 19.9: 1110-1117.
- BECKER M., BRÄKER O.U., KENK G., SCHNEIDER O., SCHWEINGRUBER F.H., 1990. Kronenzustand und Wachstum von Waldbäumen im Dreiländereck Deutschland-Frankreich-Schweiz in den letzten Jahrzehnten. *Allg. Forstz.* 45.11: 263-274.
- BERT G.D., BECKER H.M., 1990. Vitalité actuelle et passée du sapin (*Abies alba* Mill.) dans le Jura. Etude dendroécologique. *Ann. Sc. Forest.* 47.5: 395-412.
- BOSSHARD H.H., 1974a. Holzkunde I. Mikroskopie und Makroskopie des Holzes. Birkhäuser Verlag, Basel, Stuttgart. 224 p.
- BOSSHARD H.H., 1974b. Holzkunde II. Zur Physik und Chemie des Holzes. Birkhäuser Verlag, Basel, Stuttgart. 312 p.
- BRÄKER O.U., 1981. Der Alterstrend bei Jahrringdichten und Jahrringbreiten von Nadelhölzern und sein Ausgleich. *Mitt. forstl. BundesVersAnst. Wien* 142.1: 75-102.
- BRÄKER O.U., 1987. Analyses des cernes annuels. Dans: Rapport Sanasilva sur les dégâts aux forêts 1987. Office fédéral des forêts et de la protection du paysage, Berne, Institut fédéral de recherches forestières, Birmensdorf. p 21-24.
- BRÄKER O.U., 1990. Ergebnisse zum Baumwachstum aufgrund von Jahrringanalysen an Bohrkernen aus der Sanasilva-Waldschadeninventur 1984. Dans: Sanasilva-Tagungsber., Waldwachstum und Waldschäden, Tagung an der ETH-Zürich vom 14. Juni 1989. p 32-40.
- CANDOLLE DE A.-P., 1827. Organographie végétale, ou description raisonnée des organes des plantes. Tome I. Librairie Chez Deterville, Paris.
- CHAVANNES E., 1842 L'accroissement des arbres en diamètre. Dans: Compte rendu de la séance du 2.2.1842. *Bulletin des séances de la société vaudoise des sciences naturelles* 1.1: 13-20.

- COMBE S., 1964. L'aménagement forestier des forêts publiques vaudoises au cours du 19e siècle et jusqu'en 1906. Rapport interne du Service des forêts et de la faune, Lausanne, non publié. 9 p.
- EICHKORN Th., 1985. Wachstumsanalysen an Fichten in Südwestdeutschland-vorläufige Ergebnisse. *DVFFA, Sektion Ertragskunde, Tagungsber. 1985*: 10/1-10/15.
- FAVRE E., 1948. L'aménagement forestier en Suisse. *J. for. suisse* 99.11: 561-576.
- FRANZ F., 1983. Auswirkungen der Walderkrankungen auf Struktur und Wuchsleistung von Fichtenbeständen. *Forstw. Cbl.* 102.3: 186-200.
- FRITTS H.C., 1976. Tree rings and climate. Academic Press, London, New York, San Francisco. 567 p.
- HARTIG R., 1869: Das Aussetzen der Jahrringe bei unterdrückten Stämmen. *Zeitschrift für Forst- u. Jagdwesen* 1: 471-476.
- HARTIG T., 1853. Über die Entwicklung des Jahrringes der Holzpflanzen. *Bot. Ztg.* 11: 553-579.
- HARTMANN Ph., SCHNEIDER O., 1990. Etudes régionales sur l'accroissement de l'arbre et du peuplement. Dans: Sanasilva-Tagungsber., Waldwachstum und Waldschäden, Tagung an der ETH-Zürich vom 14. Juni 1989. p 46-50.
- HARTMANN Ph., SCHNEIDER O., PETTER D.A., SCHLAEPFER R., 1987. Etude des relations, chez l'épicéa, entre la largeur du cerne et l'état sanitaire de la cime. *J. for. suisse* 138.11: 923-943.
- HOSTETTLER M., 1991. Anthropogen verursachte globale Klimaveränderungen und Schweizer Wald. *J. for. suisse* 142, 11: 915-923.
- JOHNSTON D.R., GRAYSON A.J., BRADLEY R.T., 1967. Forest planning. Faber & Faber Ltd, London. 541 p.
- JOOS K., 1991. Jahrringanalyse in den Beobachtungsflächen des NFP14+: Davos, Alptal und Lägeren. Dans: Kolloquium Dendrochronologie in der Schweiz, 4. März 1991, WSL, Birmensdorf.
- JUSSIEU DE A., 1874. Botanique. Cours élémentaire d'histoire naturelle. 10^e édition. G. Masson et Garnier Frères, Paris. 561 p.
- KENK G., 1983. Zuwachsuntersuchungen in geschädigten Tannenbeständen in Baden-Württemberg. *Allg. Forstz.* 38: 650-652.
- KENK G., 1986: Wachstumsanalysen im Zusammenhang mit den gegenwärtigen Waldschäden: Ergebnisse und Folgerungen für Nadelbaumbestände in Baden-Württemberg. *DVFFA, Sektion Ertragskunde, Tagungsber. 1986*: 10/1-10/14.
- KENK G., 1990. Erkenntnisgewinn in Bezug auf das Waldwachstum in der BRD am Beispiel von Untersuchungen in Baden-Württemberg. Dans: Sanasilva-Tagungsber., Waldwachstum und Waldschäden, Tagung an der ETH-Zürich vom 14. Juni 1989. p. 11-23.
- KNUCHEL H., 1950. Planung und Kontrolle im Forstbetrieb. Verlag H.R. Sauerländer & Co, Aarau. 346 p.
- KONTIC R., BRÄKER O.U., NIZON V., MÜLLER R., 1990. Jahrringanalytische Untersuchungen im Sihlwald. *Schweiz. Z. Forstwes.* 141.1: 55-76.
- LEIPOLD A., 1990. Rauchschäden bereits um 1700 dokumentiert. *Allg. Forstz.* 45.49: 1316.
- NULTSCH W., 1977. Allgemeine Botanik. 6. Auflage. Georg Thieme Verlag, Stuttgart. 438 p.
- POLLANSCHÜTZ J., 1962. Rauchschadensfeststellung unter besonderer Berücksichtigung von Bohrkernanalysen. *Allg. Forstz.* 73: Beilage zur Folge 7/8.
- PRETZSCH H., 1986. Rahmenbedingungen zur Formulierung von «Referenz-Zuwachskurven» für Kiefernbestände in der Oberpfalz. *DVFFA, Sektion Ertragskunde, Tagungsber. 1986*: 5/1-5/20.
- ROBERT J.-F., 1972. L'avènement de la sylviculture. Dans: Les artisans de la prospérité, Encyclopédie illustrée du Pays de Vaud, Vol. 3. Editions 24 Heures, Lausanne: 89-96.

- ROBERT J.-F., 1978. La forêt et les hommes. Dans: Nos forêts un monde à découvrir. 2e édition. Office du livre SA, Fribourg: 11-32.
- SALOMON de M. 1837. Traité de l'aménagement des forêts, enseigné à l'Ecole royale forestière. Tomes I-II. Almanach du Commerce Paris, Thinus et Baret Mulhouse, G. Grimblot Nancy.
- SANIO R., 1873: Anatomie der gemeinen Kiefer (*Pinus sylvestris* L.). *Jb. wiss. Bot.* 9: 50-126.
- SCHAEFFER T.C., HEDGCOCK G.G., 1955. Injury to northern forest trees by sulfur dioxide from smelters. *Tech. Bull., U.S. Dep. Agric., For. Service, no. 1117.*
- SCHNEIDER O., 1985. Etude des relations, chez l'épicéa, entre la largeur du cerne, l'état sanitaire de la cime et les grandeurs climatiques, à l'aide de méthodes simples. Travail de diplôme EPFZ, non publié.
- SCHNEIDER O., 1990. Influence des dégâts aux forêts sur la production de bois en Suisse. Rapport final du projet n° 20-5329.87 du Fonds national suisse de la recherche scientifique, Zurich. 11 p.
- SCHNEIDER O., 1991. De l'accroissement de l'arbre à celui du peuplement. Dans: Kolloquium Dendrochronologie in der Schweiz, 4. März 1991, WSL, Birmensdorf.
- SCHÖPFER W., 1987. Zur Problematik eines grossräumigen Zuwachsrückgangs in erkrankten Fichten- und Tannenbeständen Südwestdeutschlands. *Forst- u. Holzwirt* 42.18: 487-493.
- SCHWEINGRUBER F.H., 1983. Der Jahrring: Standort, Methodik, Zeit und Klima in der Dendrochronologie. Verl. Paul Haupt, Bern, Stuttgart. 234 p.
- SEIFERT M., 1991. Ergebnisse der dendrochronologischen Untersuchungen in der neolithischen Siedlung LU/Egolzwil 3 (1985-1988). Dans: Kolloquium Dendrochronologie in der Schweiz, 4. März 1991, WSL, Birmensdorf.
- SPELSBERG G., 1987. Überlegungen zur Beurteilung des Zuwachses in geschädigten Fichtenbeständen. *DVFFA, Sektion Ertragskunde, Tagungsber. 1987: 9/1-9/20.*
- SPIECKER H., 1987. Düngung, Niederschlag und der jährliche Volumenzuwachs einiger Fichtenbestände Südwestdeutschlands. Ergebnisse einer neuen Methode der Zuwachsermittlung. *Allg. Forst- u. J.-Ztg.* 158.4: 70-76.
- STADELMANN F.X., 1992. Mögliche Wirkungen von Stickstoff aus landwirtschaftlicher Sicht. Dans: Forum für Wissen 1992, Waldschadenforschung in der Schweiz: Stand der Kenntnisse. p. 113-126.
- STRATMANN J., 1985. Einige Ergebnisse aus Jahrringuntersuchungen an Fichten aus immissionsgeschädigten Beständen des Westharzes. *DVFFA, Sektion Ertragskunde, Tagungsber. 1985: 14/1-14/11.*

Manuscrit reçu le 3 juin 1992

