

Zeitschrift:	Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss forestry journal = Journal forestier suisse
Herausgeber:	Schweizerischer Forstverein
Band:	138 (1987)
Heft:	11
Artikel:	Étude des relations, chez l'épicéa, entre la largeur du cerne et l'état sanitaire de la cime
Autor:	Hartmann, Philippe / Schneider, Olivier / Petter, David Albert
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-766072

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 15.01.2026

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

Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen

Journal forestier suisse

138. Jahrgang

November 1987

Nummer 11

Etude des relations, chez l'épicéa, entre la largeur du cerne et l'état sanitaire de la cime

Par *Philippe Hartmann**, *Olivier Schneider**, *David Albert Petter***, *Rodolphe Schlaepfer**

Oxf.: 561.24:532:174.7 Picea

(* Chaire d'aménagement des forêts de l'Institut pour la recherche sur la forêt et le bois,
EPFZ, CH-8092 Zurich)

(** Inspecteur des forêts, arrondissement 9, CH-1350 Orbe)

1. Introduction

Depuis l'apparition du phénomène de déprérissement de la forêt, on cherche à définir des critères objectifs permettant de juger de la vitalité des arbres, afin d'analyser de façon réaliste la situation actuelle, son évolution et ses conséquences.

Si l'état sanitaire des cimes est le symptôme le plus communément retenu, notamment parce que l'observation en est aisée, il semble toutefois qu'en raison de sa signification physiologique ainsi que de ses implications directes sur la sylviculture et l'aménagement, la mesure de l'accroissement est mieux à même d'apporter une contribution à l'étude du phénomène.

C'est dans cette optique que l'arrondissement forestier 9 du canton de Vaud (Orbe) a entrepris dès 1983 des analyses de cernes sur des épicéas abattus dans le cadre du programme normal des coupes.

Comme la mesure de la largeur des cernes demande beaucoup plus de temps que la seule observation du degré de transparence de la cime, son utilisation sera forcément plus limitée. Il est dès lors intéressant d'étudier la relation entre ces deux critères. Une fois cette relation définie et quantifiée, il serait possible, sous certaines conditions, de tirer des conclusions en matière de gestion et d'économie sur la seule base d'inventaires de l'état de la cime.

A noter que nous parlerons ici de degré de transparence plutôt que de perte d'aiguilles pour qualifier l'état de santé. C'est en effet ce terme qui recouvre de la manière la plus précise ce qui a effectivement été observé lors de la description des cimes, la perte effective d'aiguilles restant une grandeur difficile à mesurer.

Bien que les analyses effectuées aient eu une plus grande envergure, le présent article se limitera à montrer:

1. comment la méthode adoptée permet un prélèvement du matériel de base par les gens de terrain à des coûts très faibles,
2. quelles méthodes d'analyse peuvent être utilisées,
3. quelles relations existent dans la région étudiée, pour les épicéas de position sociale dominante, entre le degré de transparence du houppier et l'accroissement radial.

2. Revue bibliographique

Dans le développement de l'utilisation des analyses de cernes en tant qu'indicateur de la vitalité de l'arbre et base pour des études de production, il faut distinguer deux phases principales.

Dans un premier temps, en Allemagne surtout, différents travaux ont étudié ce qui a été désigné par le terme de «klassische Rauchschäden», c'est-à-dire les dégâts imputables à une pollution atmosphérique locale importante, dont la source est connue.

Dans ce cadre, il a pu être établi, en recourant à la comparaison des arbres de la zone polluée avec des arbres témoins, que des concentrations élevées de produits toxiques dans l'air provoquent des baisses d'accroissement, tant chez l'épicéa (*Vins 1962, Pollanschütz 1962, 1966 et 1971, Athari 1980*) que chez d'autres essences (ex: *Kienast 1982*).

Dans un deuxième temps, en relation avec le phénomène actuel plus général du déclin des forêts, plusieurs études ont été entreprises.

Elles ont amené des résultats moins univoques, nécessitant une interprétation plus nuancée. Le problème posé ici a requis un nouveau développement de méthodes d'analyse pour mettre en évidence les modifications anormales d'accroissement. En effet, il n'est plus possible dans ce cas de délimiter une zone polluée et une zone témoin non polluée. De même, le développement précis des immissions au cours du temps est inconnu.

Toutes les méthodes utilisées ont recours à la comparaison de l'accroissement supposé perturbé avec un accroissement de référence non perturbé. Leur diversification rend cependant la comparaison directe des résultats problématique, car elles ne permettent souvent pas d'apporter des réponses aux mêmes questions. Pour l'interprétation, il est ainsi nécessaire de savoir si l'étude porte sur des moyennes d'individus choisis ou au contraire sur des collectifs (peuplements) et, ce qui est essentiel, comment est défini l'accroissement de référence. Il faut également tenir compte de l'essence, ainsi que des propriétés de la station et des peuplements. Le choix de la référence est crucial et détermine largement les résultats, comme l'a montré *Spelsberg (1987)*.

On peut distinguer cinq moyens principaux permettant d'obtenir un accroissement de référence:

- la table de production
- l'arbre de référence selon Abetz
- l'estimateur multivarié (ex: modèle climatique)
- une période de référence
- un ensemble d'arbres dont le houppier est sain.

Alors que la table de production permet une analyse de l'accroissement au niveau du peuplement, les quatre autres possibilités servent principalement à des études au niveau de l'arbre, respectivement du groupe d'arbres.

Plusieurs auteurs ont constaté des déviations importantes et durables de la tendance générale de l'accroissement du peuplement par rapport à celle de la table de production, durant les 2–3 dernières décennies.

Ces déviations sont selon les objets étudiés, tantôt positives (*Kenk 1986, Pretzsch 1986*) et pourraient être dues à un apport en azote et une augmentation du gaz carbonique de l'atmosphère (*Franz 1983, Kenk 1986*), tantôt négatives (*Athari et Kramer 1985 dans Röhle 1986*).

Considérant que dans certaines phases l'accroissement s'écarte totalement de la tendance générale du vieillissement normal, déviant ainsi des modèles connus, *Pretzsch (1986)* est d'avis qu'il n'est pas possible d'estimer des pertes d'accroissement sur la base des tables de production. En effet, ces dernières sont globales et ne tiennent pas compte des particularités locales (*Röhle 1986*), ce qui rend problématique leur utilisation comme référence (*Athari et Kenneweg 1983 dans Sterba 1986*). Dans un autre cas, *Spelsberg (1987)* estime en revanche que l'utilisation de la table de production comme référence peut se justifier tout en impliquant des réserves au niveau de l'interprétation.

L'arbre de référence selon *Abetz (1985)* est une combinaison du modèle de la table de production avec l'accroissement idéalisé d'un arbre de place. On peut le définir comme étant une table de production au niveau de l'arbre. Si son application est encore relativement limitée, il semble que le modèle créé permette de décrire de façon satisfaisante l'évolution normale de l'accroissement d'un arbre de place comme l'ont montré *Thren (1985)* pour le pin et *Gerecke (1985)* pour le sapin. Au niveau de l'interprétation, il faut tenir compte de l'idéalisation et de la généralisation qui sont à la base de la construction du modèle.

L'estimateur multivarié a l'avantage de permettre une étude plus fine des modifications de l'accroissement, par exemple en fonction de facteurs météorologiques (études dendroclimatologiques). Sa particularité, par rapport aux deux modèles précédents, est d'être calculé sur la base du collectif d'arbres étudié. Il est donc adapté aux caractéristiques de l'échantillon analysé.

Sur une période de référence, on calcule un modèle exprimant la largeur du cerne en fonction de différentes variables explicatives. Puis le modèle ainsi ajusté sert à calculer l'accroissement de référence pour la période considérée comme soumise à l'effet de la pollution. Quand on prend comme variables explicatives des données météorologiques, on peut, en comparant l'accroissement

réel au modèle, étudier les divergences après élimination d'une grande partie de l'influence du climat.

Pour le sapin et le hêtre, *Eckstein et al.* (1983) et (1984) ont obtenu des différences entre l'accroissement réel et calculé qui semblent en partie attribuables à la pollution. Pour l'épicéa, *Schneider* (1985) a montré que pour les trois dernières décennies l'accroissement réel des arbres au houppier malade était nettement inférieur à celui que le modèle climatique laissait prévoir. Par contre, l'accroissement des arbres sains lui est même supérieur.

La méthode basée sur la comparaison avec une période de référence met en relation l'accroissement actuel des arbres sains et malades avec leur accroissement au cours d'une période non influencée.

Cette technique, utilisée par *Kramer* (1986a), permet de quantifier une baisse d'accroissement des arbres malades sans avoir recours à la comparaison directe avec les arbres sains. Selon la question posée, ceci peut constituer un avantage puisque l'accroissement actuel de ces derniers est peut-être également influencé par la pollution ambiante. *Spelsberg* (1987) quant à lui montre une faiblesse de la méthode: en choisissant deux périodes de référence différentes, il obtient pour les mêmes arbres tantôt une baisse, tantôt une augmentation d'accroissement au cours des 10 dernières années.

Les auteurs qui ont comparé les cernes des arbres possédant un houppier malade à ceux des arbres dont le houppier est sain, ont obtenu des résultats concordants pour le sapin, mais parfois divergents pour l'épicéa.

— Sapin:

Dans le cas du sapin, *Kenk* (1983), *Moosmayer* (1984), *Kenk* (1986), *Schöpfer* (1986), *Kontic et al.* (1986) ainsi que *Schmid-Haas et al.* (1986) relèvent sur l'ensemble de bonnes relations entre le degré de transparence de la cime et l'accroissement en diamètre. Les baisses d'accroissement constatées sur les arbres aux cimes transparentes remontent généralement à 20–30 ans en arrière. Pour chaque arbre pris séparément, d'importantes différences sont toutefois constatées.

— Épicéa:

Dans le cas de l'épicéa, *Athari* (1983), *Kenk et al.* (1984), *Neumann* (1985), *Schneider* (1985), *Hartmann* (1986) et *Schöpfer* (1986) constatent également une nette baisse de l'accroissement avec l'augmentation de la transparence actuelle des cimes. Pour les cinq premiers auteurs cités, cette baisse a débuté voici 25–40 ans. *Schöpfer* (1986) n'étudie que la période 1979–1983.

Franz (1983) et *Moosmayer* (1984) constatent également une baisse à partir de 1970–1975, mais celle-ci n'est pas significative.

Frühwald et al. (1984), ainsi que *Röhle* (1985 et 1986) ont étudié plusieurs peuplements sur diverses stations. Pour certains les baisses datent de 10–30 ans et sont significatives, pour d'autres elles sont insignifiantes.

Eichkorn (1985) ne trouve de relation entre l'aspect du houppier et la largeur du cerne que pour les deux dernières années (1983–1984). Dans la plupart

des cas, Kenk (1986) n'obtient des différences significatives qu'à partir de degrés de transparence de la cime de 30—50% et cela pour les deux dernières années seulement (1984—1985). Il explique cela par la forte influence de la météorologie sur la densité des aiguilles chez l'épicéa.

L'étude Kontic *et al.* (1986), analysant la fréquence des réductions abruptes de l'accroissement, ne démontre quant à elle qu'une légère augmentation des réductions pour la classe de transparence 21—60% et une augmentation nette seulement pour la classe >60%. Remarquons qu'ici seules les réductions abruptes d'accroissement sont décelées, alors qu'une baisse anormale mais lente n'apparaît pas avec cette méthode.

Soulignons que la plupart des auteurs cités, de même que Schweingruber *et al.* (1983), remarquent qu'au-delà de certaines relations globales, la variabilité individuelle demeure considérable. Mentionnons à ce propos les travaux de Kramer (1986a et b) qui ont mis en évidence d'étroites relations entre le pourcentage de perte foliaire et l'accroissement en volume par m² de surface latérale de la cime (manteau). Il semblerait donc qu'en tenant compte d'autres paramètres de la cime que du seul degré de transparence, une partie de la variabilité constatée pourrait être expliquée.

Relevons encore deux études qui, se basant sur les inventaires de placettes permanentes, montrent une relation nette entre l'accroissement en diamètre, respectivement en surface terrière, et le degré de transparence de la cime tant chez le sapin (Schlaepfer 1986) que chez l'épicéa (Murri et Schlaepfer 1987). D'autres paramètres étudiés, notamment le diamètre de la couronne, influencent également cet accroissement.

Une analyse globale des différentes études citées dans cette revue bibliographique montre la complexité du problème et la prudence indispensable pour comparer et interpréter les résultats.

3. Méthodes

3.1 Le matériel de base

Le matériel de base a été récolté en 1984 et 1985. Il est constitué par des rondelles prélevées, à raison d'une par arbre, sur des épicéas *dominants* choisis dans les coupes normales sur l'ensemble de l'arrondissement forestier d'Orbe, du pied du Jura jusqu'à la première crête. L'état sanitaire des houppiers (degré de transparence) est préalablement décrit en se référant aux photos-étalons de Sanasilva.

L'échantillonnage n'est ni aléatoire ni systématique, mais orienté en fonction de l'objectif principal qui est d'étudier la relation entre le cerne et l'état sanitaire de la cime.

Par rapport à la buchille de carottage, la rondelle présente des avantages qui ont été considérés comme décisifs dans notre cas:

- la mesure est toujours possible depuis le cambium jusqu'au canal médullaire, ce qui permet de déterminer l'âge cambial, lequel influe sur le vieillissement physiologique (voir § 3.2),
- le fait de pouvoir choisir les chemins ou rayons de mesure permet d'éviter les particularités de croissance (excentricité, branche) influençant la largeur du cerne,
- les faux cernes et les cernes manquant sur une partie du pourtour sont aisément repérables.

Contrairement à la pratique courante, la rondelle n'est pas prélevée à 1,3 m mais à l'endroit du premier éboutage de la grume, à savoir pour la plupart des cas dans la zone inférieure de la cime, ceci pour des raisons économiques et biologiques. D'une part le tronc n'est pas déprécié par une découpe dans sa partie la plus précieuse, d'autre part les pertes de cernes y sont moins fréquentes que dans le bas de la tige (Athari 1980). En outre, il n'y a pas l'influence de l'emplacement des racines.

Bien plus qu'en s'en tenant à une hauteur fixe de prélèvement, le choix de la région inférieure du houppier garantit une certaine unité biologique quant à la formation du cerne. La variation de la position de la rondelle à l'intérieur du houppier représente néanmoins un facteur d'hétérogénéité dont l'influence est difficile à évaluer, sachant que l'accroissement radial ainsi que ses modifications ne sont pas constants le long de la tige (*Topcuoglu* 1940 et Athari 1980).

Après datation et synchronisation de deux rayons de mesure pour chaque rondelle à l'aide des signatures¹ désormais connues pour la région et l'essence étudiées, la largeur des cernes est mesurée au centième de millimètre sur une chaîne de mesure électronique². La synchronisation des deux rayons est ensuite vérifiée statistiquement. Pour chaque rondelle, la moyenne des rayons constitue la courbe individuelle des largeurs de cernes. La synchronisation de cette dernière avec une courbe moyenne de référence est effectuée visuellement.

A noter que pour chaque rondelle, les 5 premiers cernes, qui représentent dans notre cas la période d'accroissement juvénile, ne sont pas pris en compte en raison de leur effet perturbateur sur les courbes moyennes.

¹ Année ou suite d'années avec un accroissement caractéristique.

² Pour une étude limitée, l'usage d'une simple loupe avec échelle de mesure est tout à fait suffisant.

3.2 Les courbes des largeurs de cernes

En fonction du but, qui est d'étudier l'effet de la transparence de la cime sur l'accroissement radial, nous avons choisi comme accroissement de référence celui des arbres dont le houppier est sain.

Pour effectuer la comparaison entre les arbres aux houppiers sain et malade, en ne considérant que le seul effet de la transparence de la cime à l'exclusion des autres facteurs influençant l'accroissement, la méthode classique décrite par Pollanschütz (1966 et 1971) pourrait être appliquée. En effet, elle rend comparable, par l'indexation individuelle, des arbres de peuplements différents en éliminant les influences de l'âge, du climat et de l'indice de fertilité pour l'accroissement radial³. Mais plusieurs éléments ont finalement conduit à ne pas l'employer ici:

- dans notre cas, il est difficile d'exprimer la tendance générale des courbes individuelles par une fonction de vieillissement physiologique,
- le moment du début de la modification d'accroissement est rarement net et varie beaucoup entre les courbes; ceci oblige à définir individuellement et souvent subjectivement la fin de la période d'ajustement, autrement dit le début de la période d'extrapolation; pour l'étude d'un peuplement soumis brutalement à une immission importante, le problème se poserait beaucoup moins; c'est d'ailleurs pour ce type d'analyse que la méthode est la plus adaptée,
- les périodes d'ajustement ($\geq 30-40$ ans) et d'extrapolation ($\leq 10-15$ ans) préconisées par Pollanschütz (1971) sont trop longues, respectivement trop courtes pour beaucoup de nos rondelles.

En fonction de ces remarques, nous avons donc opté pour une comparaison des différents états sanitaires à l'aide de courbes moyennes basées sur des courbes individuelles non indexées, mais corrigées selon la méthode décrite ci-après.

La comparaison est faite de deux façons, d'abord avec les courbes en valeurs absolues qui donnent une indication des tendances et ensuite avec les courbes en valeurs relatives qui permettent de quantifier l'ampleur des différences d'accroissement.

³ L'indice de fertilité pour l'accroissement radial est utilisé ici pour désigner la part du niveau d'accroissement qui est indépendante de l'âge. Il est influencé principalement par la fertilité de la station, la sylviculture et la génétique. Pour pouvoir comparer l'indice de fertilité pour l'accroissement radial de deux courbes, il faut que leurs âges soient identiques.

Par niveau d'accroissement radial, on entend la largeur moyenne des cernes, calculée pour une période de production donnée (ex: 1925 – 1970). Il dépend de l'âge, de l'indice de fertilité pour l'accroissement radial, ainsi que des influences externes perturbatrices telles que la pollution.

Du point de vue du climat, de l'âge, de la sylviculture et de la station, les courbes des trois états sanitaires (sain, maladif, malade) sont théoriquement comparables puisque les rondelles qui les forment sont issues des mêmes peuplements. Il arrive toutefois que sur certaines coupes l'on ne puisse prélever par exemple que des rondelles d'arbres sains. Pour cette raison, les deux facteurs âge et indice de fertilité pour l'accroissement radial, lesquels pourraient influencer de manière différente le niveau d'accroissement des trois groupes d'arbres, doivent être examinés.

Le premier, l'âge, s'est avéré être le plus important dans notre cas.

Avec le vieillissement du cambium, la largeur du cerne diminue selon une courbe exponentielle négative.

La courbe du vieillissement physiologique (*figure 1*) est formée à l'aide des 107 rondelles provenant d'arbres décrits comme sains. La courbe brisée est celle des valeurs brutes, la courbe continue est celle des valeurs idéalisées avec une fonction exponentielle négative du type:

$$y_t = a \cdot e^{-bt} + c$$

où y_t : largeur idéalisée du cerne
 t : âge depuis le canal médullaire

La supériorité du niveau d'accroissement d'une courbe ou partie de courbe moyenne par rapport à une autre pourrait donc être due au seul fait que la première est composée de rondelles en moyenne plus jeunes que la seconde, sur la période durant laquelle la différence d'accroissement se manifeste. En cas de différences d'âge, une correction s'impose donc.

largeur de cerne [1/100 mm]

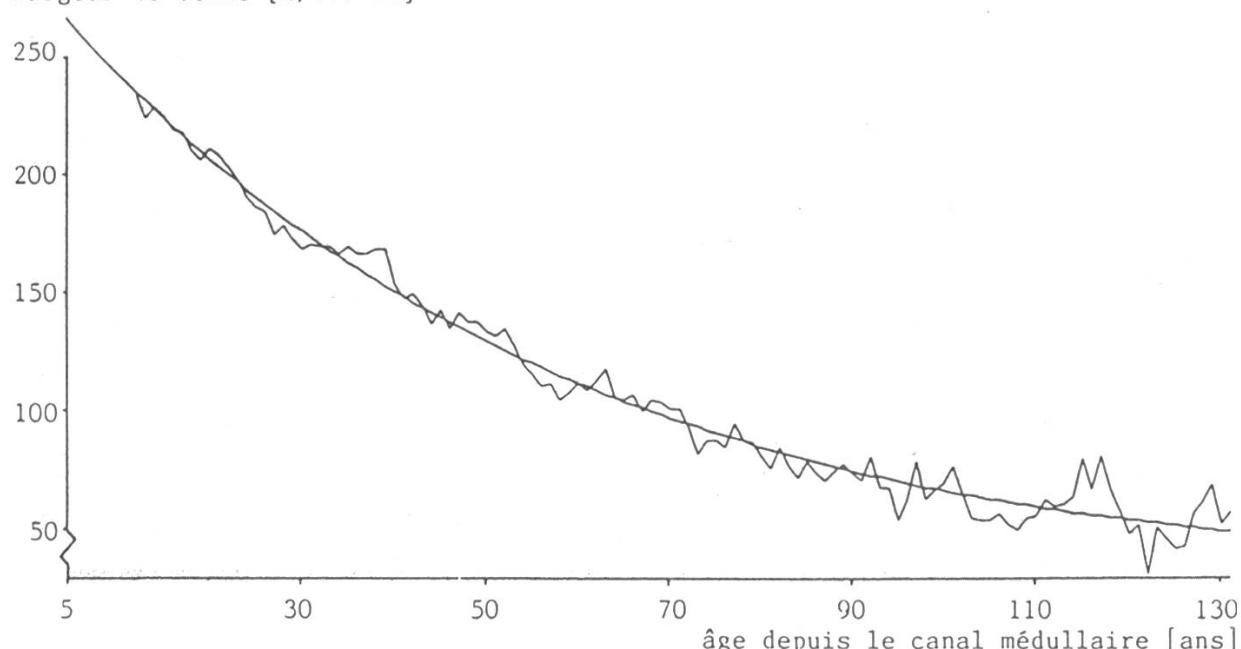


Figure 1. Courbe du vieillissement physiologique.

Pour chaque année de production, nous considérons l'âge moyen des rondelles composant chaque courbe. Ces âges moyens permettent d'entrer dans la courbe idéalisée du vieillissement physiologique (*figure 1*). Nous déterminons alors annuellement les différences d'accroissement, provoquées par les différences d'âge, des courbes des arbres maladifs et malades (courbes M1 et M2) par rapport à celle des arbres sains (courbe S). Ensuite, la largeur moyenne annuelle du cerne des arbres atteints (maladifs ou malades) est corrigée de cette différence, ce qui nous donne les courbes M1* et M2* (voir formule 1 en annexe).

Comme toutes les tentatives de correction de l'âge, la technique décrite se base sur une idéalisation puisque l'on utilise des âges moyens et une courbe de vieillissement physiologique moyenne. Avec un nombre de rondelles plus important, il serait probablement avantageux de travailler avec plusieurs courbes physiologiques, en fonction de l'indice de fertilité ou de l'altitude de la station par exemple.

Reste le deuxième facteur mentionné, l'indice de fertilité pour l'accroissement radial.

Une fois les courbes corrigées pour l'âge, deux cas peuvent se présenter.

Dans le premier cas, il y a une période 1 où les niveaux d'accroissement des courbes corrigées pour l'âge des différents états sanitaires sont comparables. Les indices de fertilité pour l'accroissement radial sont donc semblables.

Pour autant que les différentes courbes moyennes soient déjà formées d'un nombre suffisant de courbes individuelles durant cette période 1, on peut postuler que les niveaux d'accroissement durant une période 2 seront également semblables. Si la réalité montre le contraire, on conclura que c'est le degré de transparence de la cime qui en est la cause.

Dans cette hypothèse, pour estimer les modifications d'accroissement des arbres de cime claire durant la période 2, il suffit de former deux courbes constituées des rapports entre les courbes M1* et M2* et la courbe S (voir formule 2a en annexe). Il s'agit donc de courbes relatives corrigées pour l'âge. Pour la période 2, ceci permet d'obtenir la différence entre l'accroissement attendu, soit celui des arbres sains, et l'accroissement réel corrigé pour l'âge des arbres atteints (voir formule 2b en annexe). Pour ce calcul, on fera débuter la période 2 avec l'année de production à partir de laquelle les courbes M1* et M2* sont définitivement inférieures à S. Cette année n'est pas forcément identique pour M1* et M2*.

Toujours dans le cas d'accroissements comparables en période 1, notons qu'il serait également possible que durant la période 2 des jeunes rondelles d'indices de fertilité pour l'accroissement radial exceptionnels viennent compléter S par exemple. Cela entraînerait artificiellement une baisse d'accroissement de M1* et M2* par rapport à S, laquelle n'est pas liée à l'état sanitaire de la cime. Pour ce cas, une correction du type de celle effectuée pour l'âge serait envisageable, mais après examen de nos courbes nous l'avons jugée superflue. En

effet, les rondelles qui viennent compléter les courbes moyennes durant la période 2 proviennent de plusieurs peuplements, avec des indices de fertilité pour l'accroissement radial qui se compensent. L'influence de ces rondelles est en outre limitée, puisque leur proportion est faible avec la méthode de récolte adoptée (voir *figure 3a*).

Dans le deuxième cas, les courbes S et M1*/M2* n'ont pas, durant la période 1, le même niveau d'accroissement. Cela signifie qu'il y a entre les courbes une différence d'indice de fertilité pour l'accroissement radial.

L'accroissement attendu des courbes M1* et M2* sur la période 2 peut être obtenu par la pondération de la courbe S avec le rapport entre le cerne moyen de M1*, respectivement M2*, et le cerne moyen de S, sur la période 1 (voir formule 3 en annexe). Cette opération n'a de sens que si les courbes moyennes de cette période se basent sur un nombre suffisamment représentatif de rondelles et qu'on est en présence d'une différence relativement importante.

Dans notre étude, l'échantillon présente les caractéristiques du premier cas, ce qui correspond à ce que nous recherchions avec notre système de récolte du matériel de base.

3.3 Le cerne correspondant à l'année de la description de la cime

L'état sanitaire de la cime n'est connu que pour la dernière année de production, ce qui fait qu'une relation directe avec la largeur du cerne ne peut être établie que pour cette année-là. Par conséquent, l'étude du dernier cerne mérite une attention particulière, ceci d'autant plus que l'on sait qu'une perte d'aiguilles peut survenir brutalement, notamment pour des raisons climatiques (Pollanschütz 1985). En outre, chez l'épicéa Eichkorn (1985) n'a trouvé de relation entre la largeur du cerne et l'état sanitaire de la cime que pour les deux dernières années. Selon cet auteur, cela peut s'expliquer par la variation rapide de l'état de santé chez cette essence.

Nous étudierons la relation entre la largeur du dernier cerne produit et la transparence de la cime simplement à l'aide d'une régression linéaire, soit avec la valeur absolue de la largeur du cerne, soit avec une largeur corrigée relative.

Cette dernière est utilisée lorsque les valeurs absolues ne sont pas réellement comparables, en raison de différences d'âge et d'indice de fertilité pour l'accroissement radial. Pour chaque rondelle, on corrige la largeur du dernier cerne en la reportant à un âge de 50 ans, à l'aide de la fonction de vieillissement physiologique (*figure 1*). Cette largeur de cerne corrigée pour l'âge est alors divisée par la largeur du cerne moyen des 15 premières années de la rondelle, ce qui permet de supprimer l'influence de l'indice de fertilité pour l'accroissement radial. Cette double correction autorise une étude sans biais important de la relation avec la transparence de la cime.

4. Résultats

Les résultats qui suivent sont basés sur un total de 206 rondelles provenant de 42 coupes ou peuplements différents.

4.1 Les courbes des largeurs de cernes

4.1.1 Evaluation globale

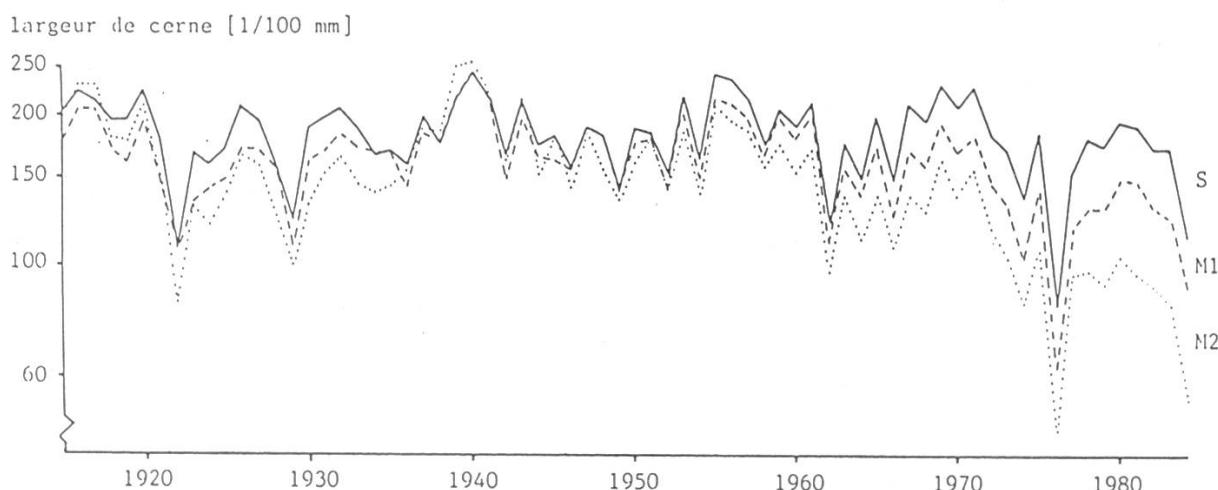


Fig 2. Courbes moyennes par état sanitaire.

Figure 2a. Courbes moyennes S (sain), M1 (maladif), M2 (malade) des largeurs de cernes, en valeur absolue.

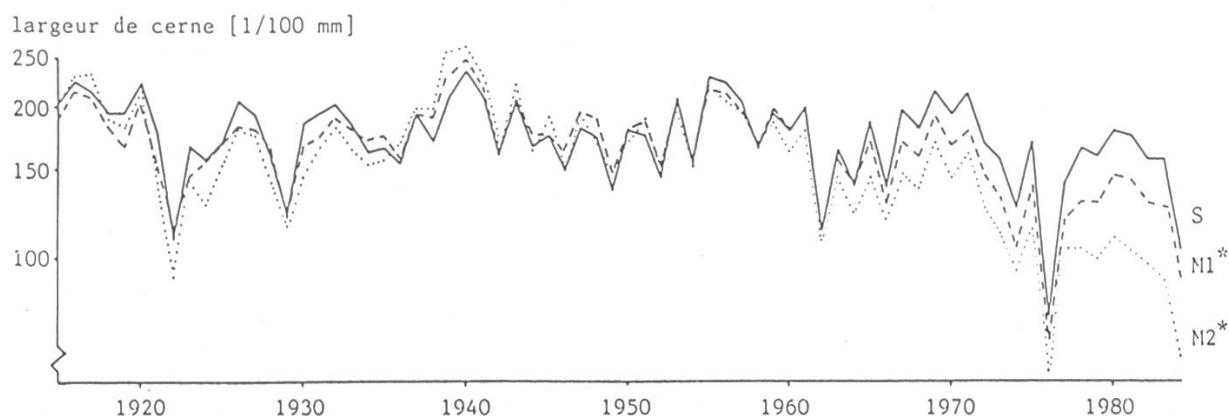


Figure 2b. Courbes moyennes corrigées pour l'âge S (sain), M1* (maladif), M2* (malade) des largeurs de cernes, en valeur absolue.

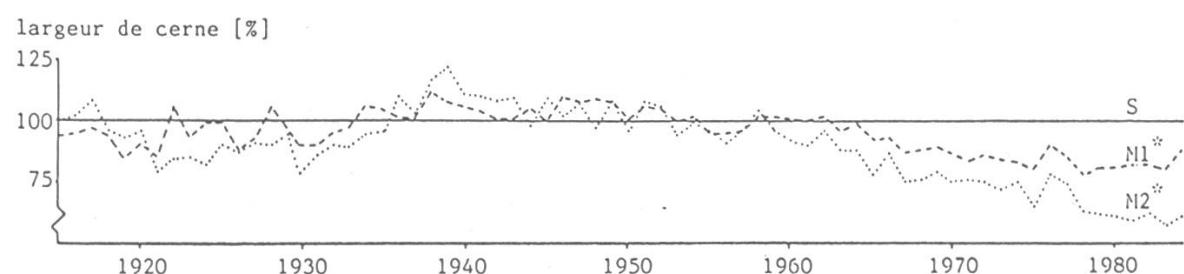


Figure 2c. Courbes moyennes corrigées pour l'âge S (sain), M1* (maladif), M2* (malade) des largeurs de cernes, en valeur relative.

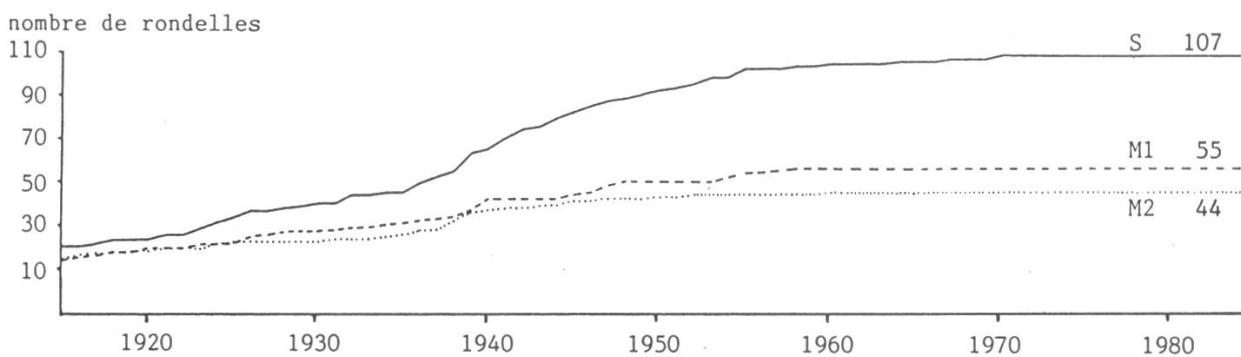


Figure 3a. Nombre de rondelles composant les courbes moyennes par état sanitaire.

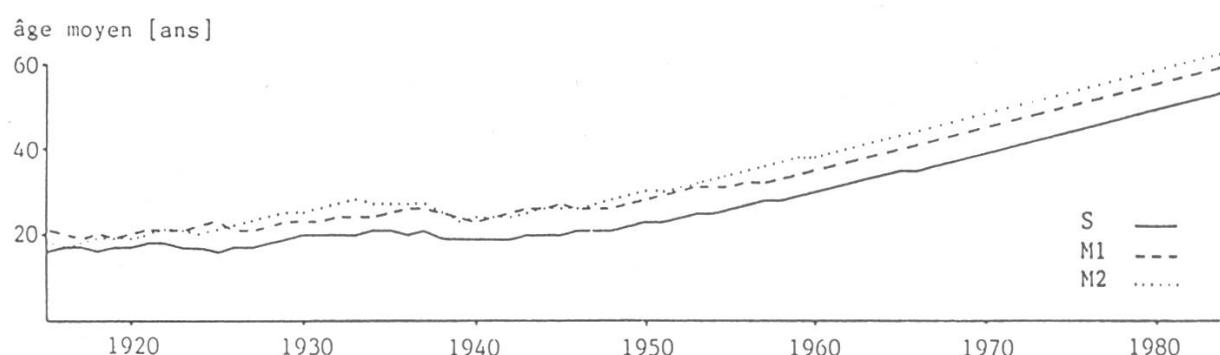


Figure 3b. Age moyen des rondelles composant les courbes moyennes par état sanitaire.

A la figure 2 sont représentées les courbes des trois états sanitaires pour le total des 206 rondelles.

Les états sanitaires sont définis comme suit:

S	sain	degré de transparence de la cime:	0 – 10%
M1	maladif	degré de transparence de la cime:	15 – 25%
M2	malade	degré de transparence de la cime:	30 – 70%

Le premier graphique (2a) comprend les courbes des valeurs absolues (S, M1, M2), le second (2b) ces mêmes courbes mais corrigées pour l'âge (S, M1*, M2*). Par rapport à M1 et M2, M1* et M2* sont légèrement rehaussées, puisque l'âge moyen des rondelles les composant est plus élevé que celui de S (figure 3b). La différence est de l'ordre de 10% de la largeur du cerne, ce qui justifie la correction de l'âge.

L'examen des courbes en valeurs absolues corrigées pour l'âge (figure 2b) révèle ce qui suit.

- Avant 1940, les courbes M1*, M2* et S se croisent à plusieurs reprises, mais sur l'ensemble de la période 1915 – 1940 M1* et M2* sont en moyenne inférieures à S. On n'y attachera toutefois pas trop d'importance en raison du nombre encore relativement limité de rondelles pour cette période (figure 3a).

- Entre 1940 et 1958 environ, les courbes des trois états sanitaires ont un comportement et un niveau très semblables. Toutes sont bien étayées et la grande majorité des 206 rondelles est déjà présente dans les courbes (*figure 3a*).
- A partir de la fin des années 1950, la courbe des arbres malades (M2*) se détache de plus en plus de la courbe des arbres sains (S) et de celle des arbres maladifs (M1*). Dès le milieu des années 1960, les rondelles étudiées permettent de montrer une différence significative entre les largeurs des cernes annuels de M2* et ceux de S (test t de Student, $P=95\%$). Depuis le milieu des années 1960, M1* se détache progressivement et définitivement de S. A partir du début des années 1970, le matériel de cette étude suffit à mettre en évidence une différence significative entre les largeurs des cernes annuels de S et ceux de M1*. Entre les largeurs des cernes annuels de M1* et ceux de M2*, la différence est aussi significative.

Le troisième graphique de la figure (2c) représente les courbes relatives corrigées pour l'âge. Entre 1940 et 1958, M2* oscille autour de 100%. De même pour M1* entre 1940 et 1962. Tendanciellement, ces deux courbes dépassent même légèrement S, puisque la moyenne sur la période considérée est dans les deux cas de 102%. Ensuite, les baisses d'accroissement des arbres maladifs et malades par rapport aux sains se manifestent de plus en plus clairement. Dans les dernières années, la largeur des cernes des arbres maladifs n'atteint plus que 80%, celle des malades plus que 60% de celle des sains.

En 1963, M1* passe définitivement sous la droite horizontale (100%). Sur l'ensemble de la période 1963–1984, l'accroissement radial des arbres maladifs fut de 14% inférieur à celui des arbres sains. Chez les arbres malades, cette diminution se monte à 27% pour la période 1959–1984. A noter que sans la correction pour les différences d'âge, ces diminutions d'accroissement se seraient élevées à 21%, respectivement 38%.

Les baisses constatées sont importantes, surtout si l'on songe qu'elles se rapportent à la région de la cime. En se basant notamment sur les travaux d'Athari (1980) et de Schweingruber *et al.* (1983), on peut en effet penser que plus bas le long de la tige, les diminutions seraient encore plus fortes.

Dans cet article, nous n'entrerons pas en considération sur un changement possible de l'accroissement des arbres sains eux-mêmes, résultant d'une influence extérieure.

Finalement, au niveau d'une analyse de détail, l'examen des courbes de chaque arbre a mis en évidence la grande variabilité individuelle, souvent décrite dans la littérature (voir chap. 2), de la relation entre l'état sanitaire de la cime et l'accroissement radial. Toutes les observations faites ci-dessus sur le phénomène de la baisse d'accroissement lui-même, mais surtout sur le moment de son apparition et sur son intensité, sont donc valables pour la moyenne mais pas transposables à l'individu.

4.1.2 Evaluation stratifiée

Nous avons pensé qu'une partie des divergences observées entre les diverses publications citées pouvait provenir de différences de station. Une stratification selon les facteurs stationnels altitude, indice de fertilité et réservoir hydrique du sol n'a cependant pas encore permis de mettre en évidence clairement des différences dans la relation cerne/état sanitaire de la cime, liées à la station. Le nombre trop restreint de rondelles n'y est probablement pas étranger.

Quelques constatations peuvent tout de même être faites. Sur toutes les stations, les arbres malades présentent une diminution d'accroissement marquée et une différence significative avec les arbres sains. Aujourd'hui, la baisse des malades est toujours plus importante que celle des maladifs, mais sur les mauvaises stations (altitude élevée, indice de fertilité et réservoir hydrique faibles) ça n'est le cas que depuis quelques années. Sur ces stations, il semble que la baisse des malades (surtout par rapport à celle des maladifs) soit plus récente, mais aussi plus brutale que sur les autres.

4.2 Largeur du cerne correspondant à l'année de description de la cime

Les résultats présentés ici concernent le sous-ensemble des 102 arbres abattus en 1985 (dernier cerne produit en 1985).

La variabilité individuelle est frappante, mais la diminution de la largeur du cerne avec l'augmentation du degré de transparence du houppier est tout de même assez nette. Le coefficient de corrélation r entre les deux grandeurs considérées est largement significatif au niveau de confiance de 95% ($r = -0,48$).

Sur la *figure 4*, on voit clairement que la largeur des cernes provenant d'altitude haute est plus petite que celle des cernes provenant d'altitude basse. La cause est double, puisque les rondelles d'arbres ayant poussé en altitude élevée sont plus âgées et d'indice de fertilité pour l'accroissement radial plus faible. Le recours à une correction de l'indice de fertilité pour l'accroissement radial est donc dû à la structure particulière du sous-ensemble de 102 arbres. Comme pour les degrés de transparence de cime élevés on a surtout affaire à des rondelles issues d'altitude élevée, la droite de régression obtenue coupe l'abscisse déjà à 60%. La nécessité de l'étude à l'aide des valeurs corrigées relatives apparaît clairement.

On constate sur la *figure 5* que la correction effectuée a apporté le résultat attendu, puisque les cernes provenant d'altitude élevée n'ont plus des valeurs particulièrement basses. Le coefficient de corrélation diminue un peu ($r = -0,41$), mais reste significatif.

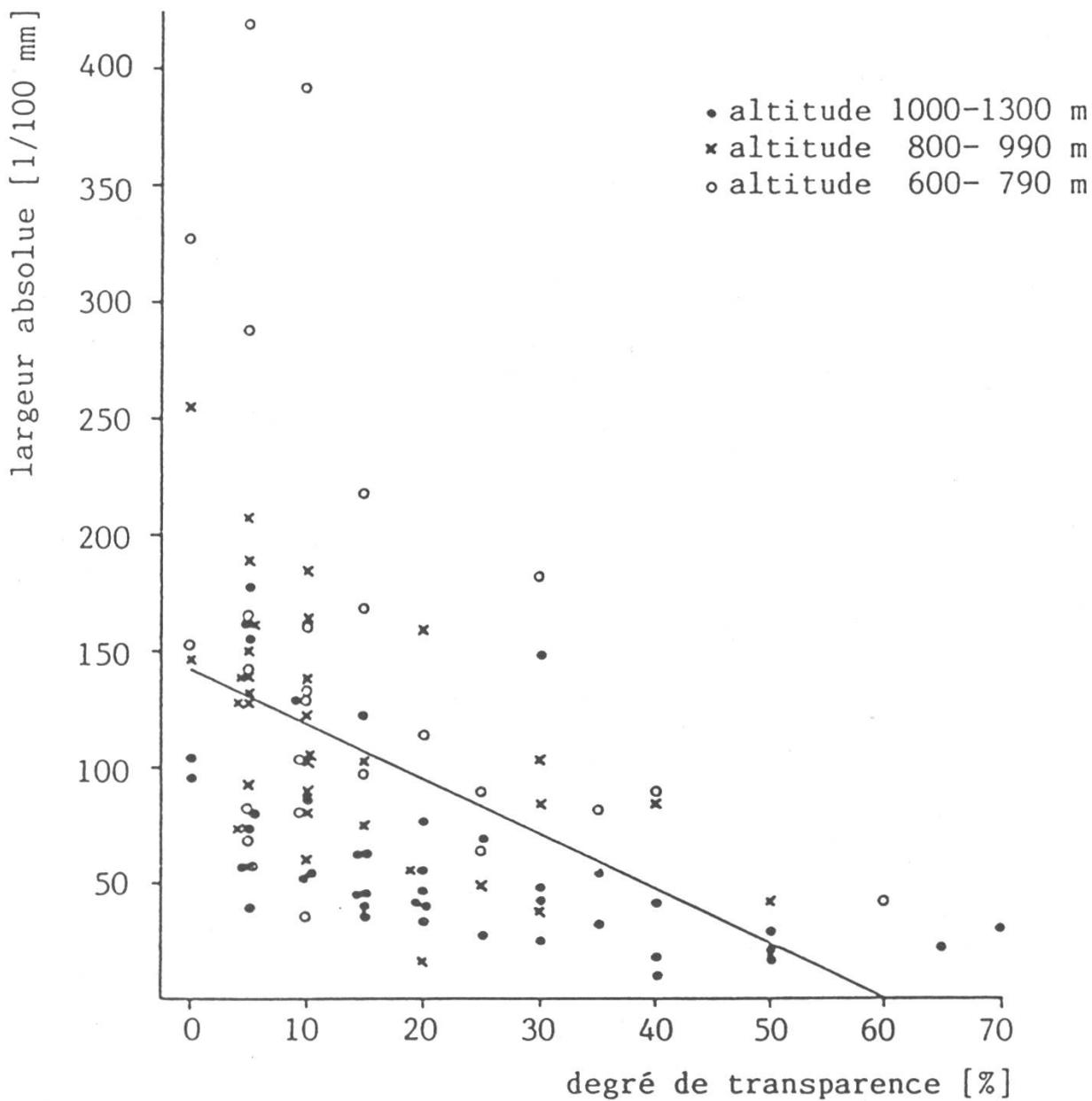


Figure 4. Relation entre le degré de transparence de la cime et la valeur absolue de la largeur du cerne de 1985.

5. Interprétation

Globalement, les épicéas qui font partie des classes maladif et malade ont un accroissement radial qui diminue depuis la fin des années 1950 déjà. Du point de vue de l'accroissement, la séparation en trois catégories sur la base de la taxation du houppier (sain, maladif, malade) paraît se justifier, puisque leur trois courbes moyennes se distinguent clairement. Ces résultats concordent avec certaines études. La comparaison avec les résultats d'autres travaux nous montre que les généralisations ne sont toutefois pas de mise (voir chap. 2). Les résultats obtenus ici sont valables pour la région et l'objet étudiés, c'est-à-dire des rondelles d'épicéas dominants, prélevées à l'endroit de la première découpe. L'extrapolation à d'autres objets n'est pas permise sans un examen soigneux des conditions de comparabilité.

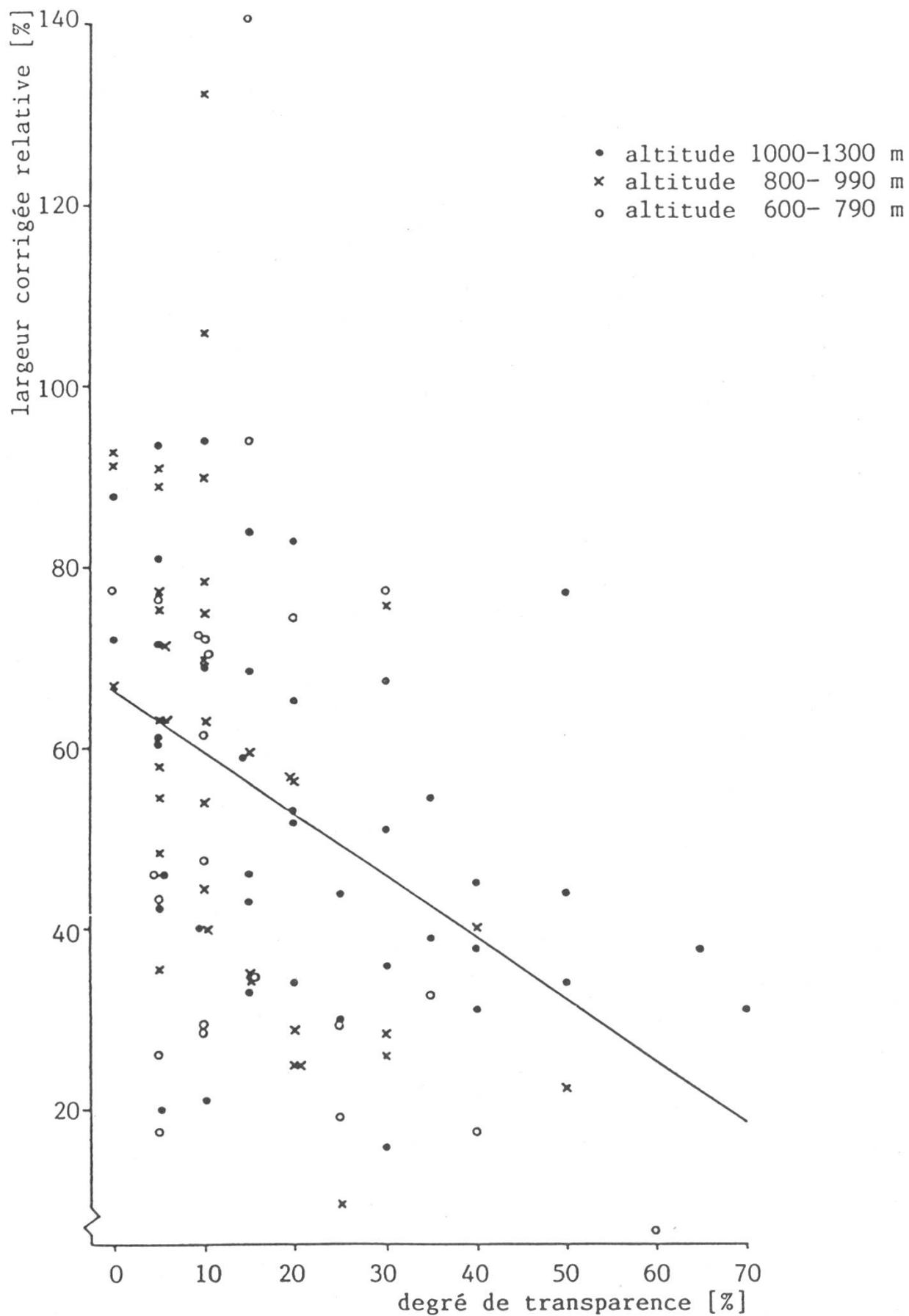


Figure 5. Relation entre le degré de transparence de la cime et la largeur corrigée relative du cerne de 1985.

Dans le cadre de la problématique du dépérissement des forêts, on peut faire les constatations qui suivent.

Une baisse de l'accroissement sous l'influence de substances polluantes a été établie à plusieurs reprises par le passé. Or nous savons que le taux de pollution a énormément progressé au cours des dernières décennies. Parallèlement, nous constatons que par rapport à des arbres dont le houppier est dense, les arbres possédant une cime plus transparente présentent une baisse d'accroissement notable depuis 2–3 décennies. Malgré la concordance possible entre ces deux constatations, un lien de cause à effet ne peut être démontré. Pour cela, le calcul de l'accroissement actuel de l'ensemble du collectif, tenant compte de la répartition des états sanitaires, ainsi que la connaissance de l'évolution de cette répartition dans le passé (en incluant l'état sanitaire des exploitations), constituerait les premières bases nécessaires.

6. Conclusion et perspectives

Concrètement, les résultats présentés ont démontré que les épicéas dominants ayant actuellement une cime transparente présentent globalement une perturbation de l'accroissement radial d'origine naturelle ou autre. Elle apparaît entre la fin des années 1950 et le milieu des années 1960.

Sur le plan de la physiologie de l'arbre, il peut paraître futile d'accorder tant d'importance à une question dont la réponse semble évidente dès le départ. Mais cette interrogation a pris une autre dimension dans le contexte du dépérissement, ce d'autant plus que tous les travaux n'ont pas obtenu des relations identiques. Ici, l'existence d'un lien net entre degré de transparence du houppier et accroissement radial est incontestable.

Cette constatation a une portée pratique, car la connaissance des liens entre l'aspect extérieur (cime) et intérieur (cerne) de l'arbre est importante pour le sylviculteur et l'aménagiste. Elle l'est d'une part pour le martelage et d'autre part pour l'interprétation des inventaires des dégâts aux forêts, basés sur le degré de transparence du houppier.

Ajouté aux résultats d'autres recherches dans le domaine, on peut également considérer le fruit de cette étude comme une base de travail: en démontrant la relation entre la largeur du cerne et la transparence actuelle de la cime, nos résultats attestent que ce critère donne effectivement un renseignement sur la vitalité de l'arbre. En décrivant à l'avenir l'évolution de la répartition des états sanitaires, on aura alors la possibilité d'examiner le lien entre un ou plusieurs facteurs perturbateurs (ex: climat, pollution) et baisse d'accroissement.

En matière d'étude de production à l'aide d'analyses de cernes, il faudra porter une attention soutenue au nécessaire développement de méthodes d'analyse et d'interprétation, car on est encore loin d'avoir épousé ce domaine d'investigation.

Zusammenfassung

Untersuchung über die Zusammenhänge bei Fichte zwischen Jahrringbreite und Gesundheitszustand der Krone

Im Zusammenhang mit den neuartigen Waldschäden hat die Jahrringanalyse in den letzten Jahren stark an Bedeutung gewonnen. Die Ergebnisse der verschiedenen Untersuchungen sind oft nicht direkt vergleichbar, da einerseits die Zielsetzung, andererseits die Analysemethoden unterschiedlich sind. Anhand einer Literaturstudie wird ein Überblick über die bisher durchgeführten Arbeiten gegeben (Kap. 2).

Ziel der vorliegenden Untersuchung ist die Erfassung der Beziehung zwischen dem Gesundheitszustand (beurteilt nach dem Kronendurchsichtigkeitsgrad) und dem Radialzuwachs von Einzelbäumen (bzw. Baumgruppe) für die Baumart Fichte. Sogar was die Grundfrage anbelangt, das heisst die Frage, ob überhaupt ein solcher Zusammenhang existiert, sind die Ergebnisse der bisherigen Untersuchungen nur relativ einheitlich. Von Fall zu Fall stark verschieden sind der Zeitpunkt sowie der Kronendurchsichtigkeitsgrad, ab welchem diese Relation nachweisbar ist. Unterschiedlich sind auch die gemachten Interpretationen.

Die für die vorliegende Studie analysierten Stammscheiben stammen ausschliesslich von Bäumen, die im Zuge der normalen Nutzungen gefällt wurden. Die Stammscheiben wurden jeweils am Ende des Nutzholzabschnittes (in der Regel im unteren Kronenbereich) entnommen. Die ungewöhnliche Methode der Materialaneignung wurde im Forstkreis 9, Orbe VD, entwickelt und ist dank des geringen finanziellen und materiellen Aufwandes für die Praxis besonders geeignet. Für die Datenanalyse werden Methoden zur Untersuchung der Beziehung zwischen Radialzuwachs und Gesundheitszustand vorgeschlagen, die an den Eigenarten der Grunddaten angepasst sind. Dabei werden andere für den Zuwachs wichtige Einflussfaktoren wie Witterung, Alter, Standortsbonität und Waldbau berücksichtigt.

Untersucht wurden 206 herrschende Fichten der Region Orbe. Für die Zuwachsanalyse wurden die Bäume aufgrund ihres 1984/85 beurteilten Kronendurchsichtigkeitsgrades in drei Klassen eingeteilt (0–10%, 15–25%, 30–70%). Die Untersuchung zeigte folgende Ergebnisse: der mittlere Radialzuwachs der Klasse 30–70% Kronendurchsichtigkeit liegt seit Ende der 50er Jahre, derjenige der Klasse 15–25% seit Mitte der 60er Jahre, zunehmend unterhalb des erwarteten Zuwachsverlaufs. Die Differenzen sind als gross zu beurteilen (in der Klasse 30–70% Kronendurchsichtigkeit rund –40% für die letzten sieben Jahre), dies um so mehr, als Stammscheiben aus der Kronenregion analysiert wurden, in der die Zuwachsveränderungen vermutlich geringer sind als im unteren Stammteil.

Im Zusammenhang mit dem Waldsterben ist jedoch wichtig festzuhalten, dass solche Ergebnisse allein keine Schlüsse bezüglich der Entwicklung des Waldzustandes sowie einer kausalen Beziehung zwischen vorhandener Luftverschmutzung und Zuwachsverminderungen zulassen. Unentbehrlich wäre dazu unter anderem die Berechnung des Bestandeszuwachses und die Kenntnis der aktuellen sowie der früheren Zusammensetzung des Waldes mit Bäumen unterschiedlichen Kronendurchsichtigkeitsgrades.

Bibliographie

- Abetz, P., 1985: Ein Vorschlag zur Durchführung von Wachstumsanalysen im Rahmen der Ursachenforschung von Waldschäden in Südwestdeutschland. Allg. Forst.- u. Jagdzeitschrift 156: 177–187.
- Athari, S., 1980: Untersuchung über die Zuwachsentwicklung rauchgeschädigter Fichtenbestände. Dissertation Göttingen.
- Athari, S., 1983: Zuwachsvergleich von Fichten mit unterschiedlich starken Schadsymptomen. Allg. Forstzeitschrift 38: 653–655.
- Eckstein, D., Aniol, R. W., Bauch, J., 1983: Dendroklimatologische Untersuchungen zum Tannensterben. Eur. J. For. Path. 13: 279–288.
- Eckstein, D., Richter, K., Aniol, R. W., Quiehl, F., 1984: Dendroklimatologische Untersuchungen zum Buchensterben im südwestlichen Vogelsberg. Forstw. Cbl. 103: 274–289.
- Eichkorn, Th., 1985: Wachstumsanalysen an Fichten in Südwestdeutschland (vorläufige Ergebnisse). DVFFA, Sektion Ertragskunde, Ber. über die Tagung 22.–24. April 1985: 10/1–10/15.
- Franz, F., 1983: Auswirkungen der Walderkrankungen auf Struktur und Wuchsleistung von Fichtenbeständen. Forstw. Cbl. 102: 186–200.
- Frühwald, A., Bauch, J., Götsche-Kühn, H., 1984: Holzeigenschaften von Fichten aus Waldschadensgebieten. Untersuchungen an frisch gefälltem Holz. Holz als Roh- u. Werkstoff 42: 441–449.
- Gerecke, K.-L., 1985: Zur Problematik des «Normalwachstums» vorherrschender Tannen. DVFFA, Sektion Ertragskunde, Ber. über die Tagung 22.–24. April 1985; 9/1–9/11.
- Hartmann, Ph., 1986: Etude des relations, chez l'épicéa, entre la largeur du cerne, l'état sanitaire de la cime, les grandeurs climatiques et la station. Travail de diplôme EPFZ, non publié.
- Kenk, G., 1983: Zuwachsuntersuchungen in geschädigten Tannenbeständen in Baden-Württemberg. Allg. Forstzeitschrift 38: 650–652.
- Kenk, G., 1986: Wachstumsanalysen im Zusammenhang mit den gegenwärtigen Waldschäden: Ergebnisse und Folgerungen für Nadelbaumbestände in Baden-Württemberg. DVFFA, Sektion Ertragskunde, Ber. über die Tagung 12.–14. Mai 1986: 10/1–10/14.
- Kenk, G., Unfried, P., Evers, F. H., Hildebrand E. E., 1984: Düngung zur Minderung der neuartigen Waldschäden – Auswertung eines alten Düngungsversuchs zu Fichte im Buntsandstein-Odenwald. Forstw. Cbl. 103: 307–320.
- Kienast, F., 1982: Jahrringanalytische Untersuchungen in immissionsgefährdeten Waldschadengebieten des Walliser Rhonetales. Geographica Helvetica 37, 3: 143–148.
- Kontic, R., Niederer, M., Nippel, C.-A., Winkler-Seifert, A., 1986: Jahrringanalysen an Nadelbäumen zur Darstellung und Interpretation von Waldschäden (Wallis, Schweiz). Eidg. Anst. forstl. Versuchsw. Birmensdorf, Ber. 283.
- Kramer, H., 1986a: Beziehungen zwischen Kronenschadbild und Volumenzuwachs bei erkrankten Fichten. Allg. Forst- u. Jagdzeitschrift 157, 2: 22–27.
- Kramer, H., 1986b: Dégâts dans les couronnes et accroissements dans les peuplements forestiers ré-sineux frappés par le récent «dépérissement des forêts». Rev. forest. franç. 2: 124–133.
- Moosmayer, H.-U., 1984: Erkenntnisse über die Walderkrankung – dargestellt an Projekten der Forstlichen Versuchs- u. Forschungsanstalt Baden-Württemberg. Forstw. Cbl. 103: 1–16.
- Murri, M., Schlaepfer, R., 1987: Zusammenhänge von Kroneneigenschaften und Durchmesser-/bzw. Grundflächenzuwachs von Fichte auf zwei Gebirgsstandorten. A paraître.
- Neumann, M., 1985: Diagnoseprofile: Erfassung der Waldzustandsveränderungen und begleitende Untersuchungen. Ber. d. Forschungsinitiative gegen das Waldsterben, BuMin f. Wiss. u. Forsch., Wien: 51–60.
- Pollanschütz, J., 1962: Rauchschadenfeststellung unter besonderer Berücksichtigung von Bohrkernanalysen. Allg. Forstzeitung 73: Beilage zur Folge 7/8.
- Pollanschütz, J., 1966: Verfahren zur objektiven «Abschätzung» (Messung) verminderter Zuwachtleistung von Einzelbäumen und Beständen. Mitt. der forstl. Bundes-Versuchsanstalt Mariabrunn 73: 129–191.
- Pollanschütz, J., 1971: Die ertragskundlichen Messmethoden zur Erkennung und Beurteilung von forstlichen Rauchschäden. Mitt. der forstl. Bundes-Versuchsanstalt Wien 92: 153–206.
- Pollanschütz, J., 1985: Zur Frage Nadelverluste und Kronenverlichtung bei Fichte. Allg. Forstzeitung 96: 110–114.

- Pretzsch, H., 1986: Rahmenbedingungen zur Formulierung von «Referenz-Zuwachskurven» für Kiefernbestände in der Oberpfalz. DVFFA, Sektion Ertragskunde, Ber. über die Tagung 12.–14. Mai 1986: 5/1–5/20.
- Röhle, H., 1985: Ertragskundliche Aspekte der Walderkrankungen. Forstw. Cbl. 104: 225–242.
- Röhle, H., 1986: Walderkrankung und Zuwachsverhalten – dargestellt am Beispiel charakteristischer Fichten-Schadbestände in ausgewählten bayerischen Untersuchungsgebieten. DVFFA, Sektion Ertragskunde, Ber. über die Tagung 12.–14. Mai 1986: 11/1–11/16.
- Schlaepfer, R., 1986: Relationship between diameter growth and crown parameters, in particular foliage loss, of *Picea abies* and *Abies alba*: results of a pilot study in Switzerland. Dans: Crown and Canopy Structure in Relation to Productivity, 1986, Ed. by T. Fujimori and D. Whitehead, pp. 70–92, Forestry and Forest Products Research Institut, Ibaraki, Japan.
- Schmid-Haas, P., Masumy, S. A., Niederer, M., Schweingruber, F. H., 1986: Zuwachs- und Kronenanalysen an geschwächten Tannen. Schweiz. Zeitschr. f. Forstw. 137, 10: 811–832.
- 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.
- Schöpfer, W., 1986: Zusammenhang zwischen Wuchsraum und Zuwachs in erkrankten Fichten- und Tannen-Beständen. Forst- u. Holzwirt 41, 12: 315–319.
- Schweingruber, F. H., Kontic, R., Winkler-Seifert, A., 1983: Eine jahrringanalytische Studie zum Nadelbaumsterben in der Schweiz. Eidg. Anst. forstl. Versuchsw. Birmensdorf, Ber. 253.
- Spelsberg, G., 1987: Überlegungen zur Beurteilung des Zuwachses in geschädigten Fichtenbeständen. DVFFA, Sektion Ertragskunde, Ber. über die Tagung 1.–3. Juni 1987. A paraître.
- Sterba, H., 1986: Methoden der Zuwachsuntersuchungen im Zusammenhang mit dem «Waldsterben». Eine Literaturstudie. Forstl. Umschau 29, 2: 85–93.
- Thren, M., 1985: Erste Ergebnisse von Wachstumsanalysen an vorherrschenden und herrschenden Kiefern in Südwest-Deutschland. Allg. Forst.- u. Jagdzeitschrift 156, 11: 215–224.
- Topcuoglu, A., 1940: Die Verteilung des Zuwachses auf die Schaftlänge der Bäume. Tharandter forstl. Jahrb. 91: 485–554.
- Vins, B., 1962: Die Auswertung jahrringchronologischer Untersuchungen in rauchgeschädigten Fichtenwäldern des Erzgebirges. Wissenschaftl. Zeitschrift der Techn. Universität Dresden 11: 579–580.

Annexe

- t : année de production
 S : courbe moyenne des largeurs de cernes des arbres aux houppiers sains
 M : courbe moyenne des largeurs de cernes des arbres aux houppiers maladifs ($M1$) et malades ($M2$)
 M^* : courbe moyenne des largeurs de cernes, corrigées pour l'âge, des arbres aux houppiers maladifs ($M1^*$) et malades ($M2^*$)

Formule 1

- \bar{As}_t, \bar{Am}_t [années] : âge annuel moyen des rondelles composant la courbe S , respectivement $M1$ ou $M2$
 \bar{Cs}_t, \bar{Cm}_t [1/100mm] : largeur annuelle en valeur absolue des cernes de la courbe S , respectivement $M1$ ou $M2$
 $\bar{\Delta}_t$ [1/100mm] : entre \bar{Cs}_t et \bar{Cm}_t , différence annuelle de largeur de cerne due à la différence annuelle d'âge $\bar{As}_t - \bar{Am}_t$

$$\bar{\Delta}_t = a \cdot e^{-b \cdot \bar{As}_t} - a \cdot e^{-b \cdot \bar{Am}_t}$$

 \bar{Cm}_t^* [1/100mm] : largeur annuelle, corrigée pour l'âge, en valeur absolue des cernes de la courbe $M1^*$ ou $M2^*$

$$\bar{Cm}_t^* = \bar{Cm}_t + \bar{\Delta}_t$$

 a, b [] : coefficients

Formule 2

- a) \bar{CR}_t^* [%] : largeur annuelle, corrigée pour l'âge, en valeur relative des cernes de la courbe $M1^*$ ou $M2^*$ par rapport à S

$$\bar{CR}_t^* = \frac{\bar{Cm}_t^*}{\bar{Cs}_t} \cdot 100$$

 b) $\bar{P}_{t2;t3}^*$ [%] : sur la période 2 ($t_2; t_3$), différence entre l'accroissement radial attendu (S) et l'accroissement réel, corrigé pour l'âge, des arbres aux houppiers maladifs ($M1^*$) ou malades ($M2^*$)

$$\bar{P}_{t2;t3}^* = 100 - \frac{\sum_{t_2}^{t_3} \bar{Cm}_t^*}{\sum_{t_2}^{t_3} \bar{Cs}_t} \cdot 100$$

Formule 3

- \bar{Cs}, \bar{Cm}^* [1/100mm] : sur la période 1 ($t_1; t_2$), largeur moyenne du cerne annuel de la courbe S , respectivement $M1^*$ ou $M2^*$

$$\bar{Cs} = \frac{\sum_{t_1}^{t_2} \bar{Cs}_t}{n} \quad \bar{Cm}^* = \frac{\sum_{t_1}^{t_2} \bar{Cm}_t^*}{n}$$

n [années] : longueur de la période 1 $n = t_2 - t_1 + 1$

\bar{CR}_t^* [%] : largeur annuelle, corrigée pour l'âge, en valeur relative des cernes de la courbe $M1^*$ ou $M2^*$ par rapport à leur valeur attendue ($\bar{Cs} \cdot \bar{Cm}^* / \bar{Cs}$)

$$\bar{CR}_t^* = \frac{\bar{Cm}_t^*}{\bar{Cs}_t} \frac{\bar{Cs}}{\bar{Cm}^*} \cdot 100$$