HAL
open science

# Pollution fluorée et croissance radiale des conifères en Maurienne (Savoie, France)

L Tessier, F Serre-Bachet, Joel Guiot, C Goeury

## To cite this version:

L Tessier, F Serre-Bachet, Joel Guiot, C Goeury. Pollution fluorée et croissance radiale des conifères en Maurienne (Savoie, France). Annales des sciences forestières, 1990, 47 (4), pp.309-323. hal-00882709

**HAL Id: hal-00882709**

**https://hal.science/hal-00882709v1**

Submitted on 11 May 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

*Ann Sci For* (1990) 47, 309-323
© Elsevier/INRA


**Article original**

# Pollution fluorée et croissance radiale des conifères en Maurienne (Savoie, France)

L Tessier*, F Serre-Bachet, J Guiot
avec la collaboration technique de C Goeury

*URA CNRS D 1152, faculté des sciences et techniques St-Jérôme, laboratoire de botanique historique et palynologie, 13397 Marseille Cedex 13, France*

(Reçu le 28 mars 1989; accepté le 24 juillet 1989)

**Résumé** – La recherche de l'impact de la pollution fluorée sur la croissance en diamètre des résineux de la Maurienne (vallée de l'Arc), est menée sur 27 populations des 4 espèces principales [*Picea abies* (L) Karst, *Pinus silvestris* L, *Abies alba* Mill, *Larix decidua* Mill] échantillonnées en fonction de l'éloignement des sources de pollution, l'exposition et l'altitude. L'étude porte exclusivement sur les variations de l'épaisseur des cernes du bois sur la période 1900-1983 partagée en 2 chronoséquences (1900-1941 et 1942-1983), la première période, de moindre pollution, étant prise comme période de référence. Les différentes chronologies maîtresses de cernes obtenues à partir de 10 arbres (3 carottes par arbre), pour chaque population, sont d'abord comparées sur quelques paramètres statistiques (moyenne et écart type, coefficient d'autocorrélation, sensibilité moyenne) et les courbes de variation de l'épaisseur des cernes. Ensuite, à partir d'une modélisation ARMA de la croissance et du calcul des relations cerne climat sur la période de référence, une croissance théorique est calculée sur l'ensemble de la période 1900-1983. Pour chaque population, le décalage de la courbe des épaisseurs de cernes mesurées par rapport à la courbe des épaisseurs théoriques, lorsqu'il correspond à un déficit, est attribué à la pollution. Ainsi l'indifférence au facteur pollution du mélèze est rapportée au caractère caducifolié de l'essence et au jeu des phénomènes de concurrence. Pour presque toutes les populations des autres espèces, la croissance observée est significativement inférieure au potentiel calculé. Il faut donc admettre, à ce stade de l'analyse, que l'impact des effluents fluorés se fait ressentir sur l'ensemble de la vallée, l'éloignement des sources n'expliquant pas l'apparente indifférence de certaines populations.

***Picea abies* / *Pinus silvestris* / *Abies alba* / *Larix decidua* / croissance radiale / dendroécologie / pollution / fluor / Alpes**

* Correspondance et tirés à part

**Summary – Fluoride pollution and radial growth of conifers in Maurienne (Savoy, France).** *A study was made on the impact of fluoride pollution (fig 2) on the radial growth of conifers in Maurienne (Arc Valley, fig 1) on the basis of 27 populations of the main species [*Picea abies *(L) Karst,* Pinus silvestris *L,* Abies alba *Mill,* Larix decidua *Mill]. The trees were sampled, taking into account exposure, altitude and their distance from the pollution sources (tables I and II). The study is exclusively concerned with ring-width variations over the period 1900-1983, divided into 2 chronosequences (1900-1941 and 1942-1983). The first period, during which pollution was less was taken as a reference period. Master tree-ring chronologies, derived from 10 trees (3 cores per tree) in each population, were built. Mean and standard deviation, autocorrelation coefficient, mean sensitivity (table III) and the variation curves of ring-width are used to compare these chronologies (fig 5). Over the reference period, time series models were fitted to the annual ring-widths and the ring-width to climate relationships were established. On these bases, theoretical growth was calculated for the entire period 1900-1983. For each population, the deviation of the measured ring-width curve from the predicted one, when corresponding to a deficit, is ascribed to pollution (figs 4 and 5, table IV). Thus, the non sensitivity of larch to pollution is explained both by the deciduous nature of the tree and by the action of concurrence phenomena. In almost all the other species populations, the actual growth is significantly lower than that forecast and, considering that the insensitivity of some populations cannot be correlated with their distance from the pollution sources, one must presume that fluoride pollution affects the whole valley.*

***Picea abies* / *Pinus silvestris* / *Abies alba* / *Larix decidua* / radial growth / dendroecology / pollution / fluoride / Alps**

## INTRODUCTION

Dans la vallée de l'Arc-Maurienne en Savoie, la pollution fluorée liée à l'industrie de l'aluminium remonte à la fin du siècle dernier. Liée à l'activité des 3 plus importantes usines de la vallée (fig 1), l'augmentation de la production d'aluminium et le niveau des rejets fluorés ont évolué parallèlement sur la période qui va de 1900 à 1965. Le maximum des rejets se situe dans les années 60. À partir des années 65, l'installation de dispositifs filtrant les effluents a conduit à un désaccouplement important du niveau des rejets et de la production (fig 2).

Les hauts niveaux de pollution atteints dans la vallée, surtout à partir de 1958, se sont inévitablement répercutés sur la végétation et plus particulièrement sur les forêts par des chablis importants. D'après Bossavy (1970), l'évolution en volume de ces chablis, des années 30 aux années 70, est directement liée à l'augmentation de la production d'aluminium. Une corrélation positive entre la chute de production des peuplements résineux et la teneur en fluor des aiguilles a aussi été montrée par Garrec *et al* (1979).

A l'occasion d'un appel d'offre du ministère de l'Environnement, nous avons recherché, sur les peuplements forestiers de la vallée, les moyens de mettre en évidence les effets, mêmes ténus, de la pollution fluorée sur la croissance en diamètre des arbres apparemment épargnés par la pollution.

Les cernes annuels des arbres peuvent être considérés comme des enregistrements susceptibles de retracer, entre autres actions, celle, éventuelle des effluents fluorés. Mais, compte tenu du rôle que jouent aussi sur la croissance radiale des facteurs intrinsèques comme l'âge, des facteurs naturels de l'environnement comme l'altitude, l'exposition et surtout le climat, des facteurs anthropiques comme les traitements syl-

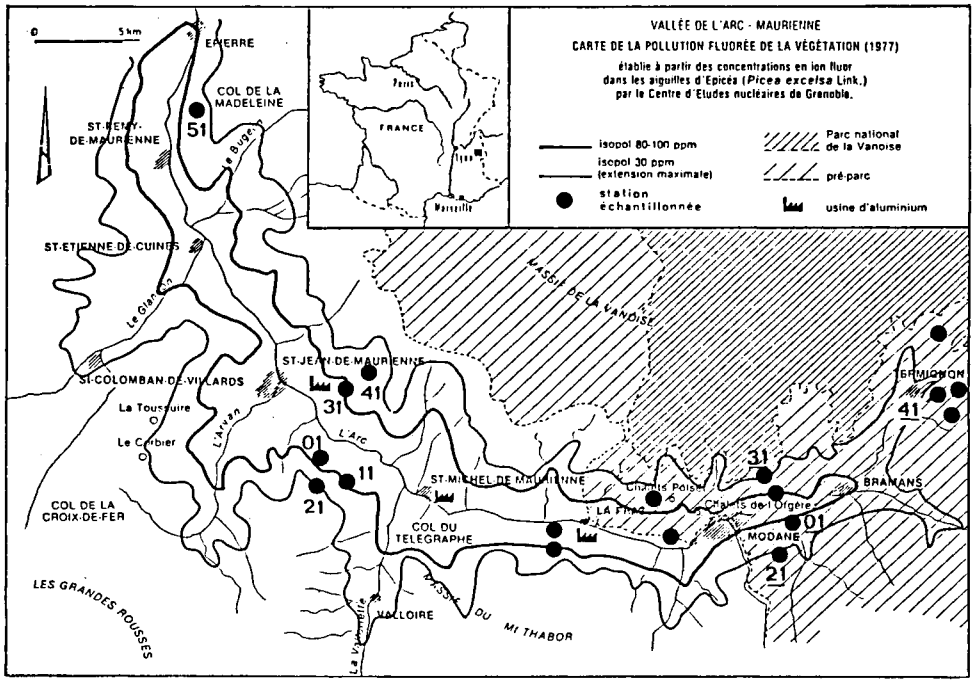



**Fig 1.** Carte de la pollution fluorée de la végétation dans la vallée de l'Arc-Maurienne (d'après Garrec *et al*, 1979). Localisation géographique des sites de production d'aluminium et des sites où ont été prélevées les différentes populations d'arbres étudiées. Les nombres soulignés correspondent aux sites 74, les autres aux sites 73

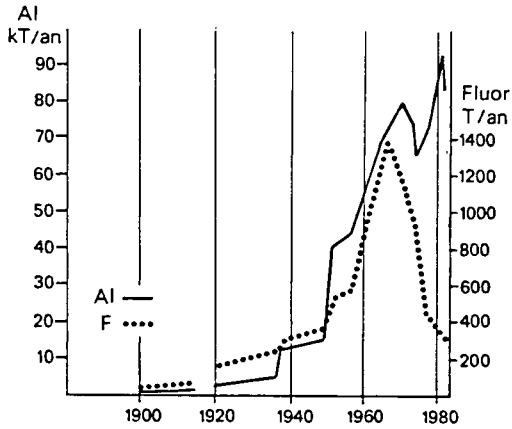



**Fig 2.** Évolution concomitante de la production d'aluminium (Al) et des émissions d'effluents flurorés (F) pour l'usine de St-Jean de Maurienne de 1900 à 1980 (Aluminium Pechiney, communication écrite, 1988). Maximum des rejets dans les années 60. Après l'installation de dispositifs filtrants, la production record d'Aluminium de la fin des années 70 correspond à des rejets de fluor comparables à ceux des années 40.

vicoles et, en particulier, l'élimination des chablis, ou encore la situation des peuplements par rapport aux sources de pollution, l'interprétation de ces enregistrements est complexe. Les techniques utilisées en dendrochronologie et/ou dendroclimatologie pour l'analyse de l'épaisseur des cernes ont été mises en œuvre. Grâce aux méthodes de traitement des données numériques (épaisseur des cernes et paramètres climatiques), nous avons tenté de gérer la complexité des données fournies par l'enregistreur arbre. La situation des peuplements forestiers par rapport aux sources de pollution a déterminé l'échantillonnage.

## MÉTHODOLOGIE

### *Protocole d'échantillonnage*

On s'est attaché à réaliser un échantillonnage aussi exhaustif que possible, tant au niveau des espèces qu'à celui des biotopes (Schweingruber, 1987). Les 4 espèces résineuses les plus fréquentes sur l'ensemble de la vallée, soit *Pinus silvestris* (L), *Picea abies* (L) Karst, *Abies alba* (Mill), *Larix decidua* (Mill), ont donc fait l'objet de prélèvements; 52 populations au total, réparties dans 18 stations, ont été échantillonnées. Les résultats obtenus sur 27 d'entre elles, réparties dans 10 stations, sont présentés ici, afin de donner un aperçu de la démarche adoptée et de discuter ses résultats en fonction de l'espèce.

Le choix et la répartition des stations tient compte de la zonation en secteurs de plus ou moins grande pollution proposée par Garrec *et al* (1979) sur la base de la concentration en fluor des aiguilles d'épicéa (fig 1). Sur 70 km de vallée environ, l'échantillonnage a été effectué selon 5 transects nord-sud, plus ou moins proches des sources d'émission de fluor. Sur chacun des transects, les stations se situent de part et d'autre de la vallée selon 2 à 3 niveaux altitudinaux (tableau I).

Dans chaque station, au minimum 10 arbres de chaque espèce présente ont été sondés, à raison de 3 carottes par arbre. Seuls des arbres vivants, apparemment sains et do-

**Tableau I.** Quelques caractéristiques topographiques et écologiques des stations étudiées. E = épicéa, P = pin sylvestre, S = sapin, M = mélèze c = pin cembro (en minuscule: espèce non utilisée dans le présent exposé).

| *Site* | *Espèces présentes* | *Altitude, pente, exposition* | *Substrat* | *Végétation* |
|---|---|---|---|---|
| 73 01 | P, S, M | 1 100 m, 40%, N | Moraines et éboulis | Forêt claire P et M dominants |
| 11 | E, P, S, M | 1 400 m, 45%, E | Moraines et éboulis | Forêt dense P dominant |
| 21 | E, S, M | 1 650 m, 15%, N | Flysch gréseux et éboulis | Forêt dense E dominant |
| 31 | E, P, S, M | 1 500 m, 40%, S | Moraines | Forêt dense E dominant |
| 41 | E, p, S, | 1 400 m, 45%, N-W | Moraines sur calcaire | Forêt dense E dominant |
| 51 | E, s | 1 800 m, 55%, W | Granites gneissiques | Forêt très dense E dominant |
| 74 01 | E, P, S, M | 1 500 m, 25%, N | Schistes lustrés | Forêt dense S dominant |
| 21 | E, c S, M | 1 800 m, 15%, N-NW | Schistes lustrés | Forêt dense M dominant |
| 31 | e, P, | 1 800 m, 45%, S | Quartzites et éboulis | Forêt claire P dominant |
| 41 | e, P, s, m | 1 600 m, 30%, N-NW | Schistes lustrés | Forêt dense S dominant |

minants ont été choisis. Quelques indications sur les populations analysées et leur biotope sont regroupées dans le tableau I.

La vallée de l'Arc-Maurienne possède des particularités climatiques et microclimatiques qui ont été bien mises en évidence par Bartoli (1966) et Martin et Peltier (1986). Il n'a malheureusement pas été possible de les prendre en compte car les relevés météorologiques des postes de la vallée ne couvrent que les 30 dernières années. Le facteur climatique a donc été considéré au niveau régional, en faisant appel aux données de Bourg d'Oisans, pour les précipitations, et de Lyon, pour les températures. Dans chacune de ces stations les relevés disponibles remontent à 1884 et sont relativement bien corrélés à ceux de la vallée sur la période commune.

**Tableau II.** Ages moyens et extrêmes des arbres analysés.

| *Site* | *Épicéa* | *Pin sylvestre* | *Sapin* | *Mélèze* |
|---|---|---|---|---|
| 73 01 | | 125 < 145 < 160 | 90 < 110 < 180 | 120 < 150 < 195 |
| 11 | 80 < 120 < 150 | 115 < 125 < 150 | 90 < 120 < 160 | 80 < 135 < 160 |
| 21 | 130 < 150 < 200 | | 125 < 155 < 205 | 113 < 155 < 230 |
| 31 | 165 < 180 < 190 | 90 < 140 < 180 | 130 < 160 < 190 | 150 < 185 < 205 |
| 41 | 90 < 100 < 130 | | 80 < 115 < 130 | |
| 51 | 65 < 90 < 125 | | | |
| 74 01 | 140 < 195 < 265 | 110 < 160 < 260 | 115 < 155 < 200 | 140 < 190 < 250 |
| 21 | 75 < 140 < 165 | | 80 < 120 < 170 | 175 < 210 < 280 |
| 31 | 70 < 100 < 135 | 75 < 90 < 100 | | |
| 41 | | | 100 < 190 < 250 | |

## *Traitement des données*

Pour chaque population, une série chronologique moyenne d'épaisseur de cernes, appelée aussi chronologie de synthèse (fig 3), a été construite à partir des chronologies élémentaires correspondant à chacune des carottes prélevées (fig 3). Toutes les chronologies moyennes obtenues couvrent largement la période 1900-1983 (tableau II). A quelques exceptions près (populations 73-41, 73-51, 74-21 d'épicéa et 74-31 de pin sylvestre), cette période correspond aux phases de croissance adulte et de vieillesse définies par Bräker (1981).

La période 1900-1983 a ensuite été partagée en 2 séquences d'égale durée, la première (1900-1941) étant prise comme période de référence, au cours de laquelle on peut considérer que le niveau très bas de pollution n'a eu qu'un effet minimal sur la production ligneuse annuelle (période «non polluée»), la seconde (1942-1983) correspondant à la période marquée par un maximum de pollution (fig 2), au cours de laquelle la production ligneuse peut avoir été affectée significativement (période «polluée»). L'étude comparée des 27 chronologies obtenues, divisées en 2 séquences temporelles, a fait appel à 3 types d'analyse:

– la première est une caractérisation des seules séries de cernes au moyen de quelques paramètres statistiques couramment utilisés en dendroclimatologie (Fritts, 1976; Munaut, 1979);

– la deuxième est une comparaison des courbes de variation de l'épaisseur brute des cernes correspondant à chacune des séries moyennes;

– la troisième enfin, résumée dans la figure 3, repose sur une modélisation de la croissance annuelle qui prend en compte les 2 facteurs intrinsèque et extrinsèque majeurs de la croissance que sont la tendance d'âge et le climat.

On peut distinguer trois étapes dans ce dernier type d'analyse (fig 3).

### Première étape

Chaque série moyenne de cernes est d'abord modélisée par un processus de type ARMA (*Auto-Regressive Moving-Average Process*) développé par Box et Jenkins (1970)

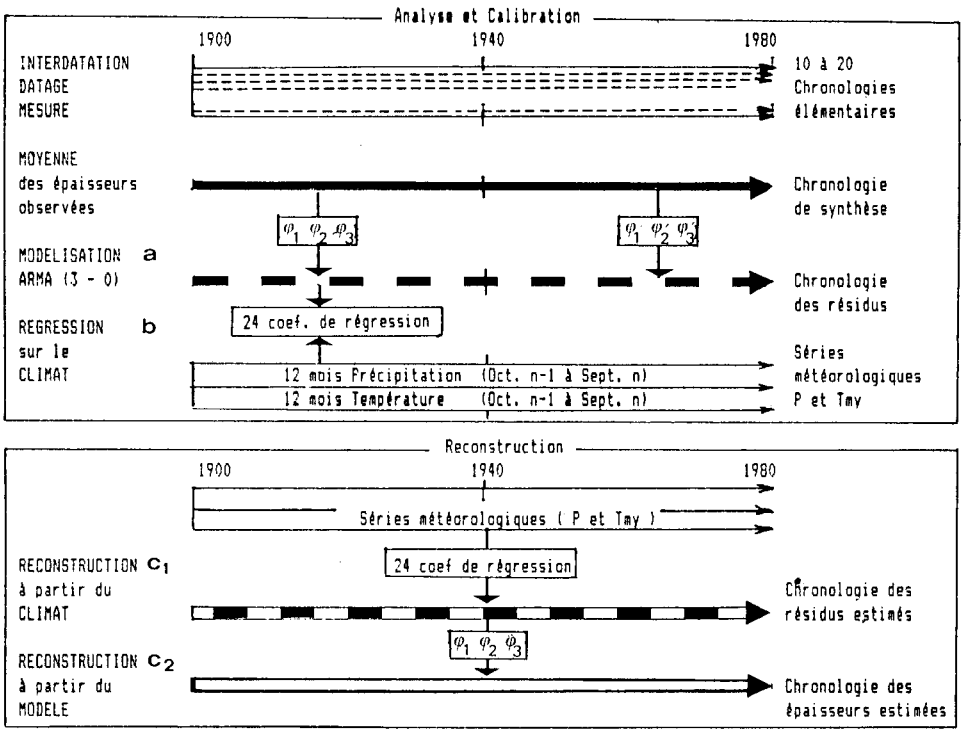



**Fig 3.** Organigramme du traitement des séries chronologiques de cernes utilisé pour mettre en évidence les variations de la croissance radiale annuelle attribuables à la pollution.

et adapté à l'analyse des séries temporelles que constituent les cernes par Guiot *et al* (1982) et Guiot (1984, 1986). Chacune des 2 périodes, «polluée» et «non polluée» dont il a été question plus haut, est traitée séparément. Un modèle simple autorégressif 3 – 0 suffit, pour les 2 périodes et dans tous les cas, à expliquer la presque totalité de la variance liée à l'autocorrélation des cernes. L'épaisseur du cerne au temps *t est donc* toujours exprimée sous la forme:

$C_t = \varphi_1 C_{t-1} + \varphi_2 C_{t-2} + \varphi_3 C_{t-3} + a_t$

les 3 premiers termes, liés à l'autocorrélation des cernes, expriment le degré d'inertie de la réponse des arbres aux facteurs externes; le quatrième ($a_t$) aléatoire, lié à l'année où se construit le cerne (Tessier, 1984, 1987; Serre-Bachet et Tessier, 1989), exprime la réponse des arbres aux facteurs externes et en particulier au climat.

Dans des conditions «normales», hors pollution, (période 1900-1941), l'inertie des arbres aux facteurs externes (exprimée par les coefficients $\varphi_1$, $\varphi_2$, $\varphi_3$) est, au moins partiellement, attribuée à la géométrie du cerne (Lück *et al*, 1970) et au potentiel biologique de l'arbre dans son biotope, lui même directement lié à l'âge. La composante climatique n'est évidemment pas exclue; son intervention aléatoire au temps *t* est exprimée par la série des résidus $a_t$ découlant du modèle précédent.

Dans des conditions «anormales», avec pollution, (période 1942-1983), l'inertie des arbres aux facteurs externes (exprimée par les coefficients $\varphi'_1$, $\varphi'_2$, $\varphi'_3$) peut être considérée comme modifiée par les perturbations vraisemblablement induites par la pollution: stockage du fluor dans les aiguilles (Bossavy, 1970; Garrec *et al*, 1976, 1979) et modification progressive de la biologie de l'arbre. Par voie de conséquence l'intervention aléatoire du climat au temps *t* (exprimée par les résidus $a_t$ est également modifiée.

## Deuxième étape

La relation cerne-climat est ensuite cherchée, de la même façon, séparément, sur chacune des 2 périodes «non polluée» et «polluée» par le calcul d'une fonction de réponse (Fritts, 1976; Guiot, 1982, Serre-Bachet et Tessier, 1989) qui met en jeu les 24 régresseurs ou variables explicatives que sont les totaux pluviométriques mensuels et les températures moyennes d'octobre de l'année qui précède la construction du cerne à septembre de l'année contemporaine de cette construction. La période choisie tient compte de la mise en place estivale du cerne en altitude. La variable dépendante est la série des résidus fournie, pour chacune des 2 périodes, par la modélisation ARMA réalisée à la première étape. Le calcul donne donc, pour chaque période, une série de 24 coefficients de régression, différents d'une période à l'autre puisque, malgré une action du climat que l'on peut considérer comme stable au cours des 2 périodes prises en compte, les résidus $a_t$ de la deuxième période expriment une relation de «l'enregistreur arbre» à ce climat, perturbée par la pollution.

## Troisième étape

L'étape ultime consiste à comparer, sur l'ensemble de la période 1900-1983, la série brute des épaisseurs de cernes mesurées avec une série d'épaisseurs estimées de cernes, reconstruite sur la base des coefficients calculés, tant au niveau de la fonction de réponse qu'à celui de la modélisation ARMA, pour la seule période «non polluée», 1900-1941, dite aussi période de calibration. Dans un premier temps en effet, l'application aux séries météorologiques complètes (1900-1980) des 24 coefficients de régression obtenus à la 2e étape pour la période «non polluée» fournit une série complète de résidus estimés auxquels on applique, dans un deuxième temps les coefficients $\varphi_1$ $\varphi_2$ $\varphi_3$ calculés à la première étape pour la période «non polluée» également.

La juxtaposition des 2 séries d'épaisseurs (valeurs mesurées et valeurs estimées) met en évidence la dérive éventuelle de la série réelle par rapport à la série théorique. Cette dérive, sur la période polluée 1942-1983, peut être attribuée au facteur pollution susceptible d'avoir agi sur «l'enregistreur arbre» en déplaçant les seuils d'intervention des facteurs climatiques limitants. Pour chaque population, 2 courbes sont ainsi proposées et comparées (fig 4). Les séries réelles (mesurées) n'ont volontairement pas été standardisées parce que constituées à partir d'individus relativement homogènes du point de vue de l'âge et de la variation interannuelle.

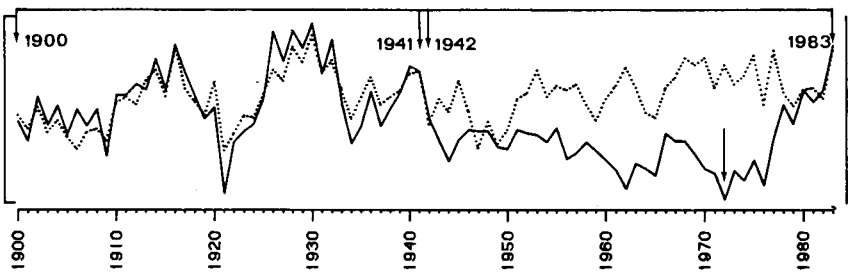



**Fig 4.** Courbes de variation des valeurs observées (trait continu) de l'épaisseur des cernes et des valeurs estimées (pointillé), pour l'une des 27 populations étudiées (*Pinus silvestris* 73-01). Sur la période 1942-1983, la partie comprise entre les 2 courbes correspond au déficit d'accroissement annuel attribuable à la pollution.

# RÉSULTATS

### *Caractérisation statistique des séries d'épaisseurs de cernes*

La caractérisation des séries brutes d'épaisseurs de cernes est fournie par le tableau III qui regroupe, pour chacune des populations analysées, sur les 2 séquences successives 1900-1941 et 1942-1983, les valeurs des paramètres statistiques utilisés: moyenne des épaisseurs et son écart type, coef-

**Tableau III.** Caractérisation statistique des différentes chronologies maîtresses représentatives des différentes populations sur chacune des 2 périodes 1900-1941 et 1942-1983 distinguées. Moyenne de l'épaisseur des cernes (*M*) et écart type (*s*), coefficient d'autocorrélation d'ordre 1 ($R_1$) sensibilité moyenne ($S_M$). Le coefficient d'autocorrélation est significatif au seuil 95% pour les valeurs supérieures à 0,30. Les moyennes de la deuxième période significativement différentes au seuil 95% des moyennes de la première période sont composées en italique.

| *Station* | *Période* | *Épicéa* | | | | *Pin sylvestre* | | | | *Sapin* | | | | *Mélèze* | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 73 01 | 1900 1941 | | | | | 99 | 31 | 0,55 | 0,28 | 97 | 26 | 0,54 | 0,22 | 76 | 33 | 0,69 | 0,31 |
| | 1942 1983 | | | | | *60* | 24 | 0,62 | 0,27 | *119* | 29 | 0,44 | 0,16 | *141* | 52 | 0,63 | 0,25 |
| 73 11 | 1900 1941 | 118 | 20 | 0,27 | 0,17 | 89 | 25 | 0,62 | 0,22 | 128 | 20 | 0,10 | 0,17 | 49 | 15 | 0,53 | 0,25 |
| | 1942 1983 | *74* | 29 | 0,72 | 0,27 | *62* | 14 | 0,42 | 0,18 | *93* | 19 | 0,37 | 0,19 | *35* | 11 | 0,22 | 0,35 |
| 73 21 | 1900 1941 | 159 | 26 | 0,36 | 0,15 | | | | | 164 | 35 | 0,75 | 0,11 | 102 | 23 | 0,56 | 0,18 |
| | 1942 1983 | *128* | 40 | 0,78 | 0,14 | | | | | *190* | 34 | 0,66 | 0,11 | *113* | 29 | 0,52 | 0,21 |
| 73 31 | 1900 1941 | 79 | 23 | 0,41 | 0,27 | 102 | 27 | 0,55 | 0,20 | 87 | 19 | 0,13 | 0,23 | 46 | 13 | 0,66 | 0,19 |
| | 1942 1983 | 81 | 30 | 0,41 | 0,32 | *55* | 13 | 0,48 | 0,19 | *74* | 23 | 0,47 | 0,23 | *54* | 23 | 0,72 | 0,23 |
| 73 41 | 1900 1941 | 125 | 34 | 0,63 | 0,19 | | | | | 241 | 40 | 0,23 | 0,17 | | | | |
| | 1942 1983 | *96* | 19 | 0,25 | 0,26 | | | | | *160* | 32 | 0,30 | 0,18 | | | | |
| 73 51 | 1900 1941 | 208 | 39 | 0,72 | 0,08 | | | | | | | | | | | | |
| | 1942 1983 | *161* | 31 | 0,51 | 0,15 | | | | | | | | | | | | |
| 74 01 | 1900 1941 | 115 | 21 | 0,62 | 0,14 | 89 | 18 | 0,60 | 0,14 | 155 | 21 | 0,26 | 0,13 | 125 | 30 | 0,64 | 0,15 |
| | 1942 1983 | *123* | 22 | 0,34 | 0,16 | *77* | 16 | 0,60 | 0,15 | *121* | 22 | 0,24 | 0,16 | 134 | 31 | 0,27 | 0,21 |
| 74 21 | 1900 1941 | 111 | 25 | 0,52 | 0,16 | | | | | 160 | 28 | 0,61 | 0,12 | 74 | 23 | 0,68 | 0,20 |
| | 1942 1983 | *100* | 15 | 0,13 | 0,15 | | | | | *210* | 32 | 0,58 | 0,11 | 78 | 20 | 0,28 | 0,20 |
| 74 31 | 1900 1941 | 228 | 58 | 0,62 | 0,16 | 287 | 75 | 0,83 | 0,10 | | | | | | | | |
| | 1942 1983 | *130* | 26 | 0,34 | 0,18 | *118* | 25 | 0,51 | 0,16 | | | | | | | | |
| 74 41 | 1900 1941 | | | | | | | | | 148 | 15 | 0,76 | 0,11 | | | | |
| | 1942 1983 | | | | | | | | | *113* | 14 | 0,08 | 0,13 | | | | |
| Paramètres | | *M* | *s* | $R_1$ | $S_M$ | *M* | *s* | $R_1$ | $S_M$ | *M* | *s* | $R_1$ | $S_M$ | *M* | *s* | $R_1$ | $S_M$ |

ficient d'autocorrélation d'ordre 1, sensibilité moyenne.

## Moyenne des épaisseurs

L'épaisseur est normalement une fonction décroissante de l'âge des arbres (Fritts, 1976; Bräker, 1981). Il n'est donc pas surprenant que, dans la majorité des cas, l'épaisseur moyenne du cerne de la période 1942-1983 soit significativement inférieure à celle de la période 1900-1941. Dans aucune station, le pin sylvestre n'échappe à cette règle. En revanche, dans 2 stations (73-31 et 74-01) pour l'épicéa et dans 3 (73-01, 73-21 et 74-21) pour le sapin, la croissance reste stationnaire ou croît significativement sur la période postérieure à 1940. Le comportement du mélèze apparaît tout à fait singulier au regard des autres espèces. En effet, dans une seule des 6 stations où on le trouve (73-11), ce dernier est affecté par une diminution sensible de l'épaisseur des cernes sur la période 1940-1980 alors que, dans toutes les autres, sur cette même période, l'épaisseur des cernes est en augmentation significative (73-01, 73-21, 73-31) ou stable (74-01, 74-21).

## Autocorrélation d'ordre 1

Ce coefficient mesure la rémanence des effets de divers facteurs de l'année

*n*-1 sur la croissance de l'année *n* (on parle ainsi d'effet de persistance dans les séries) (Fritts, 1976). Quelle que soit la population et la période considérées, il fournit, à quelques exceptions près, des valeurs toujours significatives. Les valeurs obtenues sur les 2 périodes consécutives peuvent, selon les populations, varier très fortement: 0,76 et 0,08 pour la population de sapin de la station 74-41 par exemple. Le comportement des différentes populations vis-à-vis de ce paramètre n'apparaît pas très cohérent. Tout au plus peut on remarquer que sa valeur, pour la période 1942-1983, est, à 4 exceptions près, soit égale (11 cas sur 27), soit inférieure (12 cas sur 27) à celle de la période 1900-1941.

**Sensibilité moyenne**

Ce coefficient mesure, sur une période donnée, le degré moyen de variation interannuelle de l'épaisseur des cernes. Ses valeurs, supérieures à 0,20 (Serre-Bachet, 1987b), peuvent être considérées comme élevées. Sur les 2 périodes considérées, le coefficient de sensibilité moyenne peut varier fortement. La période 1942-1983 est caractérisée par des valeurs généralement plus élevées que celles de la période antérieure. Ce schéma s'applique bien à l'épicéa et au mélèze. Le sapin et le pin sylvestre sont plutôt caractérisés par des valeurs stables entre les 2 périodes.

***Courbes de variation des épaisseurs moyennes***

La plupart des 27 chronologies moyennes analysées dépassent largement la période 1900-1983 (tableau II); la période couverte va en effet de 265 ans (1719-1983) pour la plus longue, à 100 ans (1884-1983) pour la plus courte. Compte tenu de ces durées, la tendance d'âge n'apparaît clairement, sur la période 1900-1983 analysée, seule représentée dans la figure 5, que sur les courbes relatives aux populations les plus jeunes: épicéa dans les stations 73-51 et 74-31 et surtout pin sylvestre dans la station 74-31.

Les courbes des épaisseurs mesurées sont synchrones au regard des fluctuations interannuelles mais il n'en est pas de même au regard des fluctuations de basse fréquence: à côté des courbes bien marquées par la décroissance progressive de l'épaisseur des cernes, certaines ont un profil inverse, la plupart présentent un profil de type polynômial, d'autres enfin, sont dépourvues de toute tendance. Le seul caractère commun à la presque totalité des séries est la nette reprise de la croissance qui apparaît à partir de 1972, année à cerne mince pour toutes les populations.

***Comparaison des accroissements observés aux accroissements estimés***

La figure 5 rassemble les résultats obtenus sur les 27 populations analysées à ce jour en application de la procédure décrite plus haut et dans les figures 3 et 4.

Sur la période de calibration, c'est-à-dire la période «non polluée» (1900-1941), les courbes respectives des valeurs observées et des valeurs estimées sont, dans presque tous les cas, superposées; les valeurs estimées s'écartent faiblement de part et d'autre de la valeur observée. Seules, font largement exception les populations jeunes pour lesquelles apparaît une forte tendance décroissante liée à l'âge (épicéa dans les stations 73-51 et 74-31, pin

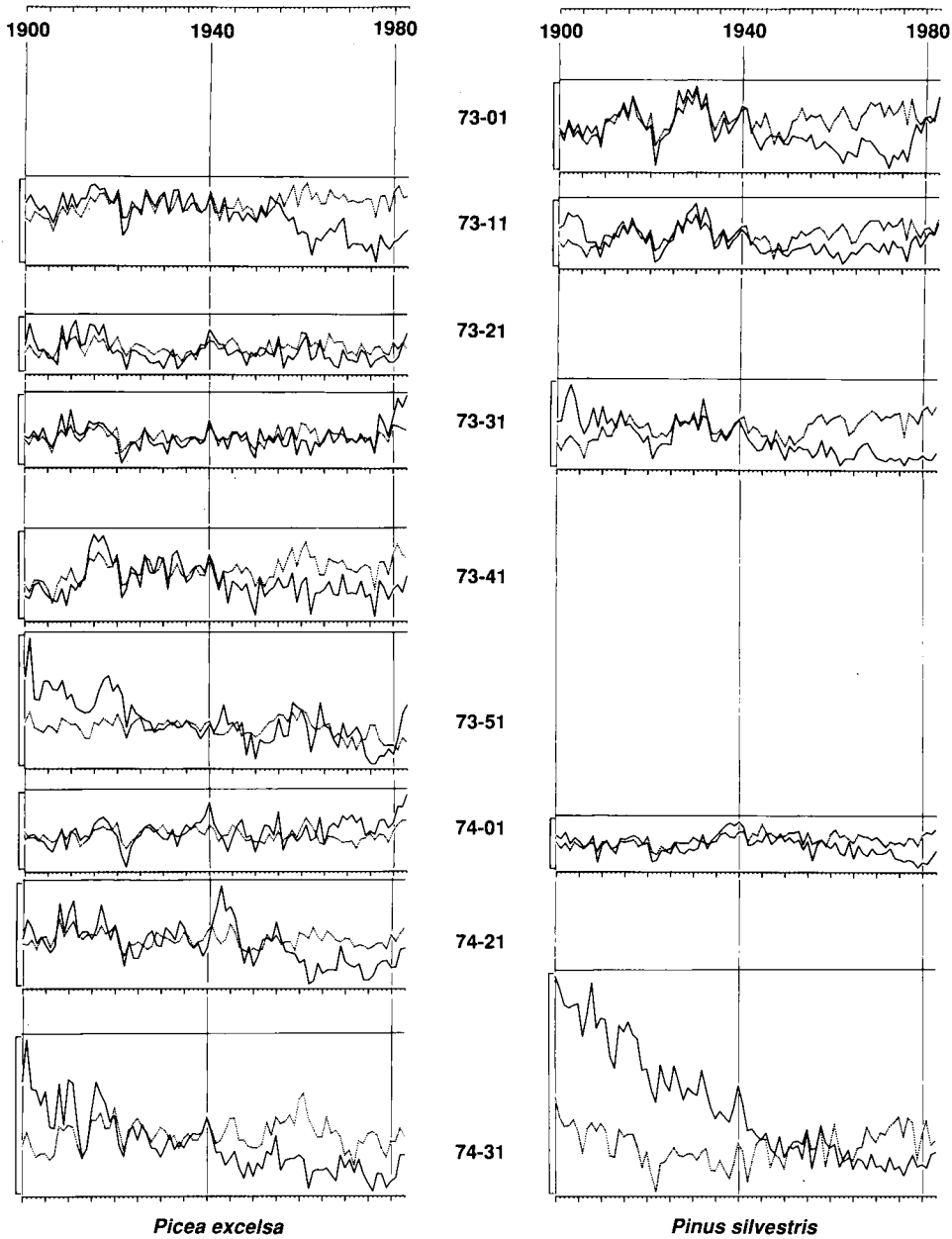
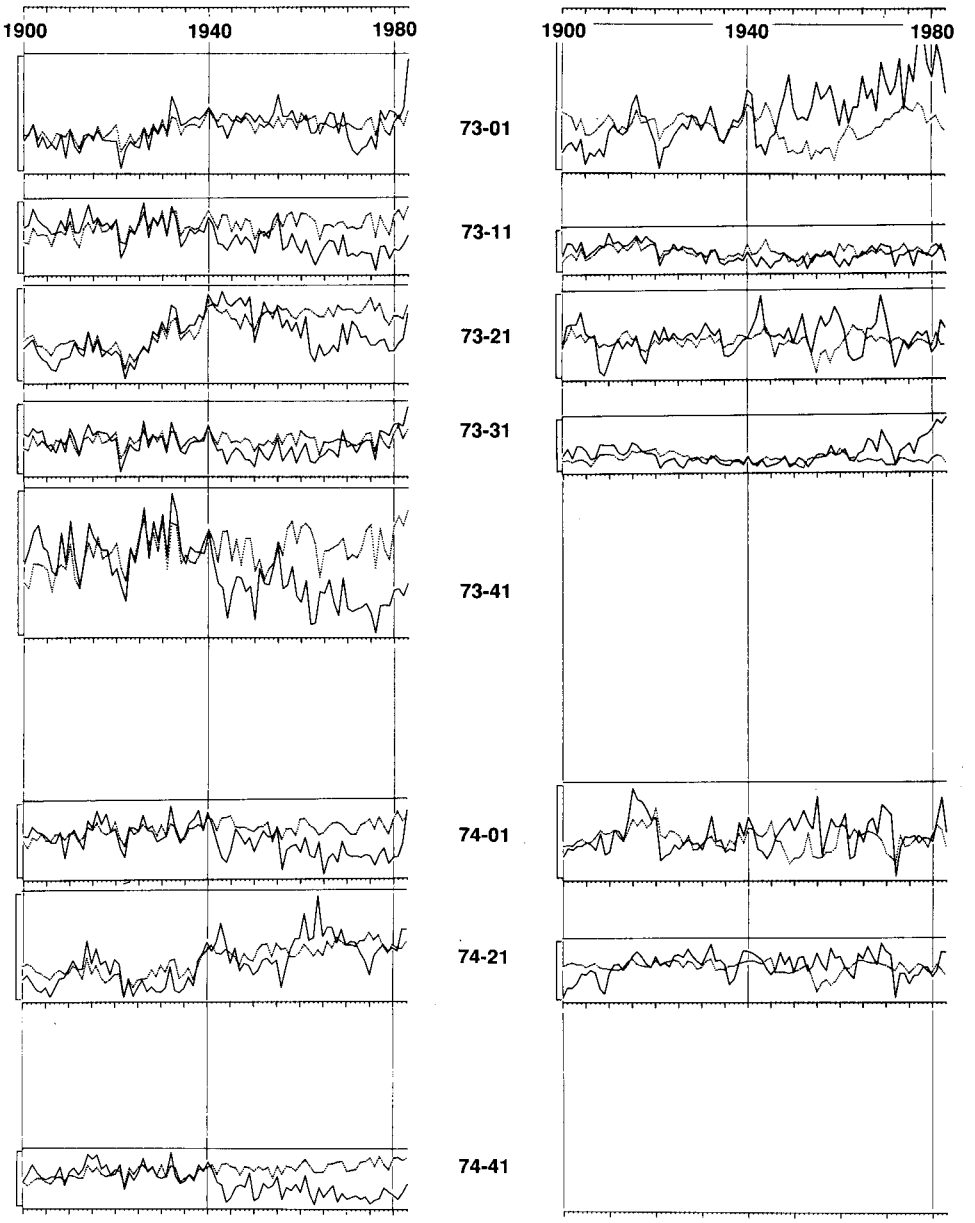



**Fig 5.** Pour l'ensemble des populations, comparaison entre valeurs mesurées (trait continu) de l'épaisseur des cernes et valeurs estimées (pointillé). Sur la période 1942-1983, lorsque la valeur estimée est supérieure à la valeur réelle, la zone comprise entre les deux courbes correspond au déficit d'accroissement annuel attribuable à la pollution.




*Abies alba* *Larix decidua*

sylvestre dans la station 74-31). Dans ce cas, les valeurs reconstruites sont très sous-estimées par rapport aux valeurs observées. Le tableau des écarts entre moyenne des valeurs estimées et moyenne des valeurs observées résume bien ces résultats (tableau IV).

Sur la période récente «polluée» (1942-1983), valeurs observées et estimées sont le plus souvent discor-

**Tableau IV.** Différence entre valeurs moyennes des épaisseurs estimées et valeurs moyennes mesurées sur chacune des 2 périodes envisagées, pour l'ensemble des populations. Les valeurs significativement différentes au seuil 95% sont repérées par une astérisque.

| *Station* | *Épicéa* | | *Pin sylvestre* | | *Sapin* | | *Mélèze* | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | *1900-41* | *1942-83* | *1900-41* | *1942-83* | *1900-41* | *1942-83* | *1900-41* | *1942-83* |
| 73-01 | | | 0 | 43* | 5 | –1 | 15* | –60* |
| 73-11 | –8 | 48* | –4 | 27* | –4 | 40* | –3 | 8 |
| 73-21 | –4 | 23* | | | 5 | 26* | 0 | –15* |
| 73-31 | 0 | 0 | –8 | 52* | –1 | 14* | –1 | –16* |
| 73-41 | 2 | 42* | | | –11* | 88* | | |
| 73-51 | –33* | 5 | | | | | | |
| 74-01 | 0 | –12* | –1 | 22* | –2 | 41* | 1 | –18* |
| 74-21 | 0 | 13* | | | 8 | 0 | 3 | –9 |
| 74-31 | –29* | 71* | –157* | 17* | | | | |
| 74-41 | | | | | –4 | 46* | | |

dantes. Dans une majorité de cas, les valeurs estimées sont nettement supérieures aux valeurs observées. L'ensemble des populations de mélèze fait exception avec même une nette tendance à la sous-estimation (tableau IV).

La comparaison des résultats obtenus pour les différentes populations d'une même espèce met en évidence certaines singularités, sans qu'il soit possible de les rattacher au caractère plus ou moins exposé aux effluents fluorés des stations correspondantes (fig 1). Certaines stations, *a priori* très exposées (73-01 ou 73-31 par ex) sont caractérisées par des valeurs estimées très proches des valeurs observées pour le sapin (73-01) et pour l'épicéa (73-31). Inversement, d'autres stations, apparemment à l'abri des effluents fluorés (74-41 par ex), sont caractérisées, pour le sapin, par des valeurs estimées très supérieures aux valeurs observées. (tableau IV).

## DISCUSSION, CONCLUSION

La difficulté est grande d'isoler le facteur pollution des autres facteurs susceptibles d'intervenir sur la croissance radiale annuelle des arbres; la plupart des études menées sur ce sujet, par des approches souvent très différentes, aboutissent à ce constat (Fritts et Swetnam, 1986; Cook, 1987, 1988; Eckstein, 1987; Levy et Becker, 1987; Schweingruber, 1987; Johnson *et al*, 1988; Kienast, 1982, Ord *et al*, 1988; Taylor, 1988; Van Deusen, 1988).

Cette difficulté tient au fait que les cernes sont la conséquence des effets sur la croissance de multiples influences que Taylor (1988) classe schématiquement en 3 catégories;

– l'âge, regroupant des facteurs internes propres à chaque individu;

– la compétition, ensemble de facteurs externes, qui agissent aussi au niveau individuel;

– l'environnement qui regroupe des facteurs agissant sur l'ensemble des individus d'un site donné.

La pollution relève directement de cette dernière catégorie tout en intervenant sur l'ensemble. Par ses effets cumulés, elle agit effectivement dans le temps et modifie vraisemblablement le jeux des facteurs internes qui déterminent la vitesse de croissance de cha-

que individu. Par l'élimination de certains arbres, plus directement sensibles à ses effets, elle entraîne une modification des équilibres liés à la compétition, modification qui peut être, en outre, amplifiée par les interventions de gestion forestière, l'élimination des chablis par exemple. Enfin, elle peut modifier la sensibilité à d'autres facteurs de l'environnement tels que les facteurs climatiques.

Dans l'analyse des arbres de la Maurienne soumis à une pollution fluorée, la comparaison, pour 2 périodes, non polluée et polluée, des valeurs des paramètres statistiques classiques de la dendroclimatologie, ne permet pas de tirer des conclusions d'ordre général, même avec un échantillonnage minutieux des populations et des espèces.

L'examen des courbes des épaisseurs mesurées ne permet pas non plus de lier avec certitude une diminution des épaisseurs de cernes à une augmentation du niveau de pollution. Le seul indice qui puisse être retenu, *a contrario*, est l'augmentation de l'épaisseur qui affecte toutes les séries à partir de 1972 et coïncide avec la chute du niveau des émissions de fluor dans la vallée (fig 2). La diversité du profil des courbes, d'une espèce à l'autre dans une même station ou d'une station à l'autre pour une même espèce, souligne le rôle majeur que jouent la variabilité intra et interspécifique et les conditions stationnelles (Schweingruber, 1987; Z'Graggen, 1987; Tessier, 1989).

Parmi les analyses dendroclimatologiques appliquées aux phénomènes de pollution, la méthode que nous avons mise en œuvre présente l'avantage de tenir à la fois compte de l'important facteur de l'environnement que constitue le climat et du facteur âge, éventuellement soumis au facteur pollution, en prenant pour période de calibration d'une croissance théorique, une chronoséquence antérieure aux phénomènes de pollution, ou tout au moins, antérieure au paroxysme de cette dernière. Le problème des influences de la compétition reste évidemment entier. L'écart entre la courbe des épaisseurs mesurées et la courbe des épaisseurs estimées dont il vient d'être question semble bien être un indicateur de l'importance des effets de la pollution. L'état actuel de nos connaissances et quelques vérifications sur des populations d'autres régions, non polluées, nous confortent dans cette opinion.

Le mélèze (fig 5b), bien que soumis, dans un même site, aux mêmes doses de polluants que les espèces concurrentes, n'est apparemment pas affecté par les émissions fluorées. Ce comportement singulier apparaît clairement dans toutes les stations, à l'exception d'une seule (73-11). Le caractère caducifolié de l'espèce n'est sans doute pas étranger à cette apparente insensibilité, les effluents fluorés ne pouvant, en effet, agir sur le feuillage que sur une période limitée (juin-septembre), ce qui n'est pas le cas pour les 3 autres espèces dont le feuillage persiste plusieurs années (5-12 ans) et subit les assauts d'une forte pollution due aux conditions climatiques hivernales. Peut-être aussi faut-il nuancer cette interprétation en ajoutant que, dans la mesure où certains arbres d'autres essences, plus affectés par le fluor, ont pu être éliminés, l'absence de compétition favorise la croissance du mélèze et cache ainsi les effets de la pollution.

La comparaison entre elles des 3 autres espèces ne distingue ni le comportement singulier de l'une d'elles ni un quelconque gradient de modification

de la croissance en fonction du degré de pollution. Quatre populations sur 21, (épicéa des stations 73-31 et 74-01 et sapin des stations 73-01 et 74-21) ne traduisent aucun effet de la pollution, sans qu'il soit possible de rattacher cela à leur éloignement des sources, puisque 2 d'entre elles (73-01 et 73-31) sont très proches de l'usine de St-Jean de Maurienne alors que les 2 autres (74-21 et 74-01) en sont éloignées. Sur ces mêmes stations, en outre, les espèces associées à l'épicéa ou au sapin ont une croissance réelle très inférieure au potentiel calculé.

À ce stade de l'analyse, et pour ces 3 espèces, il faut donc admettre que l'influence des effluents fluorés se fait ressentir sur pratiquement la totalité des populations de la vallée, quel que soit leur éloignement des sources de pollution, sans que l'on puisse expliquer, pour l'instant, l'apparente indifférence aléatoire au facteur pollution de certaines d'entre elles. Le traitement en cours de 25 autres populations du même secteur permettra peut être de préciser ces conclusions encore partielles.

Prenant en compte à la fois la variabilité spatiale et temporelle, l'étude que nous venons de présenter permet de situer les problèmes de pollution au niveau de la dynamique de l'écosystème forestier, largement commandée par le jeu des phénomènes de concurrence, eux-mêmes sous la dépendance de la diversité spécifique et génétique. Les séquences de cernes des arbres, véritables archives de l'histoire des écosystèmes forestiers (Tessier, 1989), fournissent, entre autre, des informations à la fois sur l'action plus ou moins insidieuse des phénomènes de pollution sur la forêt et sur les possibilités de restauration du milieu forestier liées aux capacités de résistance aux pollutions des individus et des espèces.

## REMERCIEMENTS

Cette étude a fait l'objet du projet de recherche (PA 83-2112) du ministère de l'Environnement (SRETIE). Les auteurs remercient M Pellet pour la traduction du résumé en anglais.

## RÉFÉRENCES

Bartoli C (1966) Études écologiques sur les associations forestières de la Haute Maurienne. *Ann Sci for* 23, 433-749

Bossavy J (1970) Les polluants atmosphériques, leurs effets sur la végétation. *Rev For Fr* 22, 533-534

Box GEP, Jenkins GM (1976) *Time series analysis. Forecasting and control.* Holden Day San Francisco, 575 p

Bräker OU (1981) Der Allerstrend bei Jahrringdichten und Jahrringbreiten von Nadelhölzern und sein Ausgleich. *Mitt Forstl Bundes-Versuchstanst Wien* 142, 75-102

Cook ER (1987) The use and limitations of dendrochronology in studying effects of air pollution in forests. *In: Effects of acid deposition on forest, wetlands and agricultural ecosystem* ; Proc NATO Adv Res 1985, May 12-17. Toronto, Springer - Verlag. 277-290

Cook ER (1988) A tree-ring analysis of red spruce in the Southern Appalachian mountains. *In: Analysis of Great Smoky Mountain Red Spruce Tree Ring Data* (C Van Deusen, ed) 6-20

Eckstein D (1987) Dendrochronology applied to the investigation of tree decline. *In: Dendrocronologia e moria del bosco in Europa*, Atti del Conv Verona-Pescantina 10 octobre 1986. 13-20

Fritts HC (1976) *Tree-rings and climate.* Academic Press, Londres, 576 pp

Fritts HC, Swetnam TH (1986) *Dendroecology. A tool for evaluating variations in past and present environments.* Tree-Ring Res Univ A, 61 pp

Garrec JP, Plebin R, Bossavy J (1976) Comportement du sapin (*Abies alba* Mill) durant plusieurs cycles de végétation dans le cas d'une pollution fluorée. *Rev For Fr* 28, 95-105

Garrec J, Passera N, Pisot J (1979) Étude et cartographie de la pollution fluorée dans les massifs forestiers de la vallée

de l'Arc-Maurienne (Savoie). *Rev For Fr*, 31, 381-389

Guiot J (1982) Some new mathematical procedures in dendroclimatology, with examples from Switzerland and Morocco. *Tree-Ring Bull*, 42, 33-48

Guiot J (1984) Deux méthodes d'utilisation de l'épaisseur des cernes ligneux pour la reconstitution de paramètres climatiques anciens, l'exemple de leur application dans le domaine alpin. *Palaeogeogr Palaeoclimatol, Palaeoecol* 45, 347-368

Guiot (1986) ARMA techniques for modelling tree-ring response to climate and for reconstructing variations of paleoclimates. *Ecol Model*, 33, 149-171

Guiot J, Tessier L, Serre-Bachet F (1982) Application de la modélisation ARMA en dendroclimatologie. *CR Acad Sci Paris*, 294, ser 3, 133-136

Johnson AH, Cook ER, Siccama TG (1988) Climate and red spruce growth and decline in the Northern Appalachians. *Proc Natl Acad Sci USA*, Applied Biology, 85, 5369-5373

Kienast F (1982) Jahrringanalytische Untersuchungen in Immissionsgefäherdeten Waldschadengebieten des Walliser Rhonetales. *Geogr Helv*, 3, 143-148

Lévy G, Becker M (1987) Le dépérissement du sapin dans les Vosges: le rôle primordial de déficits d'alimentation en eau. *Ann Sci For*, 44, 403-416

Lück HB, Serre F, Vidal B, Ans B (1970) A propos d'un modèle de la croissance en épaisseur des arbres. *CR Acad Sci Paris*, 270, 1996-1999

Martin S, Peltier JP (1986) Séquences de jours secs consécutifs en Maurienne (Alpes françaises). *Trav Sci Parc Nation Vanoise*, 15, 9-30

Munaut A (1979) La Dendrochronologie. *Bull Assoc Fr Étude Quaternaire*, 58-59, 65-74

Ord JK, Derr JA (1988) Utilizing times series models and spatial analysis of forecast residuals for tree-ring analysis of red spruce. *In: Analysis of Great Smoky Mountain Red Spruce Tree Ring Data* (PC Van Deusen, ed) 21-39

Serre-Bachet F (1987a) La pollution fluorée et la croissance annuelle des arbres. *Dendrochronologia e moria del bosco in europa*. Atti del Convegno tenuto a Verona-Pescantina 10 octobre 1986. 33-45

Serre-Bachet F (1987b) Dendrochrono-climatology at Marseille, France. Proc Task-Force Meeting on Methodology of dendrochronology: East/West approaches, 2-6 juin 1986, Cracovie. (L Kairiukstis, Z Berdnardz, E Feliksik, eds), 177-186

Serre-Bachet F, Tessier L (1989) Response functions for ecological study. *In: Methods of Tree Ring Analysis: Applications in the Environmental Sciences* (E Cook, L Kairiukstis, eds). Kluwer Academic Publ, 247-258

Serre-Bachet F, Tessier L, Guiot J, Pons A (1987) Étude de la limite de sensibilité du pin-sylvestre et de l'épicéa aux polluants atmosphériques de la vallée de la Maurienne et des environs de l'Argentière en Haute-Durance. Rapport final du Projet de recherche SRETIE (PA 83-2112), 22 pp

Schweingruber FH (1987) *Potentials and limitations of dendrochronology in pollution research*. Proce Int Symp Ecological Aspects of Tree-Ring Analysis (GC Jacoby Jr, JW Hornbeck, eds) In $CO_2$, April 1987, 344-352.

Taylor R A J (1988) A fractal approach to analysis of tree-ring increments. *In*: Analysis of Great Smoky Mountain Red Spruce Tree Ring Data (PC Van Deusen, ed) 40-56

Tessier L (1984) Dendroclimatologie et écologie de *Pinus silvestris* L et *Quercus pubescens* Willd dans le Sud-Est de la France. Thèse de doctorat d'état, université d'Aix-Marseille III, 275 p

Tessier L (1987) Dendroclimatological approach to the ecology of *Quercus pubescens* Willds and *Pinus silvestris* L in the French Mediterranean area (Methodological aspects). Proc Int Symp Ecological Aspects of Tree-Ring Analysis. In $CO_2$, April 1987, 599-610

Tessier L (1989) Spatio temporal analysis of climate tree rings relationships, *New Phytol*, 111, 517-529

Van Deusen PC (1988) Red spruce tree ring analysis using a kalman filter. *In: Analysis of Great Smoky Mountain Red Spruce Tree-Ring Data* (PC Van Deusen, ed) 57-67

Z'Graggen S (1987) Dendrocronologia e morio del bosco nella regione alpina. *In: Dendrocronologia e moria del Bosco in Europa*. Atti Conv Verona-Pescantina 10 octobre 1986. 21-31