



Etude et cartographie de la pollution fluorée dans les massifs forestiers de la vallée de l'Arc (Maurienne - Savoie)

Jean-Pierre Garrec, Noël Passera, Jean Pisot

► To cite this version:

Jean-Pierre Garrec, Noël Passera, Jean Pisot. Etude et cartographie de la pollution fluorée dans les massifs forestiers de la vallée de l'Arc (Maurienne - Savoie). *Revue forestière française*, 1979, 31 (5), pp.381-400. <10.4267/2042/21296>. <hal-03396632>

HAL Id: hal-03396632

<https://hal.science/hal-03396632v1>

Submitted on 22 Oct 2021

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.



HAL Authorization

Cette rubrique est dirigée par

L. LANIER

Ingénieur en chef du G.R.E.F.

Professeur à l'Ecole nationale
du Génie rural, des Eaux et des Forêts

14, rue Girardet
54042 NANCY CEDEX

biologie et forêt

ÉTUDE ET CARTOGRAPHIE DE LA POLLUTION FLUORÉE DANS LES MASSIFS FORESTIERS DE LA VALLÉE DE L'ARC (MAURIENNE - SAVOIE)

J.-P. GARREC · N. PASSERA · J. PISOT

Dans la vallée de l'Arc, trois usines d'aluminium rejettent dans l'air des composés fluorés et constituent, de ce fait, la principale source de pollution à l'égard des massifs forestiers.

La production annuelle d'aluminium de ces trois usines se répartit de la façon suivante :

— Usine de Saint-Jean-de-Maurienne	71 000 tonnes
— Usine de La Saussaz (Saint-Michel-de-Maurienne)	12 000 tonnes
— Usine de La Praz	4 000 tonnes

En 1977, au cours de cette fabrication, les émissions de composés fluorés ont été les suivantes :

— Saint-Jean-de-Maurienne	420 tonnes de fluor par an
— Saint-Michel-de-Maurienne	90 tonnes de fluor par an
— La Praz	30 tonnes de fluor par an

Il faut signaler que dans cette vallée, l'usine de phosphore d'Epierre constitue également une source de pollution atmosphérique par le fluor. Les rejets de cette usine sont de l'ordre de 8 tonnes de fluor par an.

Afin de mettre en évidence l'impact de cette pollution sur les massifs forestiers et d'en tirer les conséquences écologiques, il était nécessaire de posséder une connaissance précise du taux d'accumulation du fluor dans les essences forestières et de l'étendue des zones polluées.

Par ailleurs, l'action du fluor, même à faible dose, se traduisant dans les peuplements résineux par une baisse de la production, il est apparu indispensable d'analyser et de chiffrer les chutes de production ainsi induites.

Le présent document :

- expose les deux méthodes d'étude utilisées
- présente leurs résultats
- et tente d'analyser les corrélations susceptibles d'exister entre eux.

ÉTUDE DES TENEURS EN FLUOR DANS LES ESSENCES FORESTIÈRES

MÉTHODE DE PRÉLÈVEMENT ET DE DOSAGE

Au niveau des végétaux, le fluor capté ne semble pas métabolisé et s'accumule apicalement dans les feuilles.

L'analyse des végétaux, et en particulier l'analyse foliaire, paraît — dans ces conditions — être une méthode particulièrement sûre pour diagnostiquer une pollution fluorée.

Parmi ces végétaux, les conifères se révèlent intéressants car, en conservant leurs aiguilles au cours de la saison hivernale (à l'exception du mélèze en Europe), et cela plusieurs années de suite, ils fournissent une indication intégrée du niveau de pollution de l'air.

Dans le but d'obtenir des données statistiques, nous avons été amenés à n'étudier qu'une espèce représentative de ces vallées.

Nous avons choisi l'épicéa (*Picea excelsa* Link.) car, compte tenu de ses exigences climatiques et édaphiques assez souples, c'est la seule essence résineuse partout présente dans la zone étudiée, ceci aussi bien à basse altitude qu'à la limite supérieure de la végétation forestière.

De plus, c'est l'essence ligneuse de loin la plus abondante en Maurienne (70 % environ en volume).

Les stations de prélèvements ont été choisies :

- d'une part, sur la carte en fonction des objectifs à étudier : alentours des sources de pollution, extension en aval, en amont, en altitude et dans les vallées latérales ;
- d'autre part, sur le terrain en fonction des contraintes naturelles.

Les échantillons ont été sélectionnés de façon à être les plus représentatifs de l'impact moyen de la pollution au lieu considéré. Les prélèvements de rameaux ont ainsi été faits de préférence sur des arbres dégagés ne présentant pas, ou peu, de signes de dépérissement, en excluant les trop jeunes, et toujours du côté dirigé vers la source de pollution.

Les prélèvements ont été effectués en juillet et en août 1977 et, dans la majorité des cas, les analyses portaient sur l'ensemble des aiguilles des cinq dernières années.

Parmi les différentes méthodes existantes de dosage du fluor dans les végétaux, la méthode d'analyse choisie consiste en une minéralisation — dans une fiole à oxygène de Schöniger — des tissus végétaux préalablement séchés et broyés. Elle est suivie d'un dosage du fluor recueilli dans une solution absorbante au moyen d'une électrode spécifique (Levaggi et al., 1971).

Remarque

L'analyse a porté sur l'ensemble des aiguilles de rameaux entiers, ce qui donne une bonne image de la « charge totale » en fluor des arbres atteints.

Par ailleurs, il convient de noter que chez l'épicéa les aiguilles restent en moyenne cinq ans et qu'il est assez difficile — dans la pratique — de séparer avec certitude les aiguilles correspondant aux différentes pousses annuelles.

Dans ces conditions, et compte tenu de la variation du niveau de pollution, il nous a paru intéressant, à partir de l'évolution de ce niveau de pollution de l'air et des mesures de fluor total effectuées en 1977 dans les épicéas, d'estimer à l'aide d'un simple calcul les concentrations en fluor existant dans les aiguilles de ces cinq années.

En moyenne, chaque pousse d'épicéa donne naissance — au bout d'un an — à trois nouvelles pousses. De ce fait, sur un rameau prélevé en 1977 possédant cinq années d'aiguilles :

0,8 % des aiguilles ont été exposées aux rejets de 1973 à 1977 (aiguilles de 1973)

2,5 % des aiguilles ont été exposées aux rejets de 1974 à 1977 (aiguilles de 1974)

7,4 % des aiguilles ont été exposées aux rejets de 1975 à 1977 (aiguilles de 1975)

22,3 % des aiguilles ont été exposées aux rejets de 1976 à 1977 (aiguilles de 1976)

66,9 % des aiguilles ont été exposées aux rejets de 1977 (aiguilles de 1977)

Mais, de 1973 à 1977, les rejets fluorés des usines de Maurienne, par suite de l'installation progressive de dispositifs de captation des fumées, ont évolué de la manière suivante (rejets exprimés en tonnes de fluor/an) :

Année	Saint-Jean	Saint-Michel	La Praz	Total Maurienne
1967 à 1973	1 000	180	90	1 270
1974	700	180	90	970
1975	420	180	90	690
1976	420	120	60	600
1977	420	90	30	540

Dans le cadre de cette estimation, nous pouvons admettre que le niveau de pollution de l'air est sensiblement proportionnel aux rejets de fluor des usines et que la quantité de fluor accumulée annuellement dans les aiguilles est proportionnelle au niveau de pollution de l'air.

En considérant que dans les aiguilles de x années, la quantité totale de fluor accumulée a une valeur proportionnelle au nombre de ces aiguilles multipliée par la somme des rejets de ces x années, nous pouvons déduire qu'au niveau d'un rameau d'épicéa prélevé en 1977 en Maurienne :

4 % du fluor total se trouve dans les aiguilles de 1973

8,1 % du fluor total se trouve dans les aiguilles de 1974

15,9 % du fluor total se trouve dans les aiguilles de 1975

29,8 % du fluor total se trouve dans les aiguilles de 1976

42,2 % du fluor total se trouve dans les aiguilles de 1977

Ces résultats montrent, qu'en 1977, près de 90 % du fluor accumulé dans les épicéas provient des émissions de fumées postérieures aux principaux travaux de captation effectués dans les usines appartenant à Aluminium Pechiney (émission moyenne : 610 tonnes/an).

MÉTHODE DE CARTOGRAPHIE

A partir des concentrations en fluor dans les épicéas d'un grand nombre de stations (170), nous avons tracé pour cette vallée les courbes d'iso-pollution ou « isopols » joignant les points de prélèvements ayant les mêmes taux de fluor.

L'établissement de ces courbes permet de mettre en évidence la répartition des zones polluées autour des sources d'émissions pendant l'été 1977.

Dans cette vallée, deux « isopols » ont été tracés autour des trois usines d'aluminium : « isopol » 30 μg F/g et « isopol » 80-100 μg F/g.

L'étendue maximum de la zone soumise aux fumées fluorées est fournie par l'« isopol » 30 μg F/g car il est généralement admis que dans un épicéa sain la teneur naturelle en fluor oscille entre 10 et 20 μg F/g dans les aiguilles (de Cormis 1967-1978, Bossavy 1970).

Les premières nécroses caractéristiques du fluor apparaissent dans les aiguilles aux environs de l'« isopol » 80-100 μg F/g.

CARTOGRAPHIE DE LA POLLUTION FLUORÉE EN MAURIENNE

La vallée de l'Arc (Maurienne) s'étend sur une centaine de kilomètres, à une altitude comprise entre 300 mètres (Aiguebelle) et 1 800 mètres (Bonneval-sur-Arc). Le long de cette vallée, trois parties peuvent se différencier de par leur orientation. En remontant la vallée, on distingue :

- une région basse d'Aiguebelle à Saint-Étienne-de-Cuines, orientée nord-sud
- une partie moyenne ou Moyenne Maurienne, allant de Saint-Étienne-de-Cuines à Modane et orientée nord-ouest - sud-est
- enfin, une partie haute, ou Haute Maurienne, en amont de Modane et orientée sud-ouest - nord-est.

A ces axes principaux, s'ajoutent plusieurs vallées latérales dont les quatre principales débouchent au niveau de Saint-Étienne-de-Cuines, de Saint-Jean et de Saint-Michel-de-Maurienne.

Cette vallée est étroite et les massifs montagneux qui la bordent sont généralement très escarpés (massif de la Vanoise au nord, massifs des Grandes Rousses et du Mont Thabor au sud) avec des altitudes qui oscillent entre 2 000 et 3 500 mètres.

En Moyenne Maurienne, le régime des vents a été étudié durant cinq années successives (1970 à 1974) à partir de relevés effectués trois fois par jour vers 8 h, 14 h et 20 h. Les résultats obtenus sont les suivants :

Vents nuls	Vents d'ouest	Vents d'est
53 %	34 %	13 %

Les vents nuls sont nettement plus fréquents à 8 h et à 20 h d'avril à septembre, alors que, d'octobre à mars, le régime des vents au cours de la journée est moins différencié. Les vents violents (≥ 10 m/s) sont la plupart du temps des vents d'est et soufflent principalement d'octobre à mars.

Nous constatons donc que dans cette vallée, comme dans la plupart des vallées alpines, les courants d'air diurnes sont ascendants et rapides, tandis que les courants nocturnes sont inverses et descendent plus lentement la vallée. Entre ces courants s'établissent à l'aube (8 h) et au crépuscule (20 h) de longues renverses relativement calmes.

EXTENSION DE LA POLLUTION FLUORÉE EN AMONT DE L'USINE D'ALUMINIUM DE SAINT-JEAN-DE-MAURIENNE

Le long de la vallée de l'Arc, la pollution fluorée de l'usine de Saint-Jean-de-Maurienne est relayée en amont par celles provenant des usines de Saint-Michel-de-Maurienne, ainsi que de La Praz.

Pour cette raison, et du fait des vents dominants qui remontent la vallée, l'extension maximale des émissions fluorées est plus importante en amont de l'usine qu'en aval. Dans l'axe de la vallée, la pollution cesse aux environs de Termignon (limite de l'« isopol » $30 \mu\text{g F/g}$) situé à 50 km de Saint-Jean-de-Maurienne. Par contre, l'« isopol » $80\text{-}100 \mu\text{g F/g}$ ne dépasse pas Bramans situé à 40 km de l'usine.

Dans cette portion de la vallée située en amont de Saint-Jean-de-Maurienne, les fumées fluorées peuvent atteindre, aussi bien sur le versant sud que nord, 2 000 à 2 400 m au-dessus des usines, alors que l'« isopol » $80\text{-}100 \mu\text{g F/g}$ culmine à 1 200-1 600 m.

A proximité immédiate des trois usines d'aluminium, la concentration en fluor dans les épicéas est de l'ordre de $400 \mu\text{g F/g}$ alors qu'au niveau de Modane, elle n'est que légèrement supérieure à $100 \mu\text{g F/g}$.

La pénétration des fumées fluorées dans les vallées latérales situées sur le versant nord de la vallée élargit notablement la nappe polluante au niveau de Saint-Jean et Saint-Michel-de-Maurienne. En effet, les fumées pénètrent largement vers le sol de la Croix-de-Fer le long de la vallée de l'Arvan qui conflue avec l'Arc au niveau de Saint-Jean-de-Maurienne. L'« isopol » $30 \mu\text{g F/g}$ pénètre d'une dizaine de kilomètres par rapport à la vallée de l'Arc entraînant la pollution jusqu'au niveau des stations de ski de la Toussuire et du Corbier. De même, ces fumées remontent vers les cols du Télégraphe et du Galibier, le long de la Valloirette qui se jette dans l'Arc à Saint-Michel-de-Maurienne. Dans cette vallée latérale, l'« isopol » $30 \mu\text{g F/g}$ pénètre également de 20 km jusqu'en amont de Valloire. A Valloire, l'on note $50 \mu\text{g F/g}$ dans les épicéas alors qu'au col du Télégraphe, les teneurs sont de $120 \mu\text{g F/g}$.

EXTENSION DE LA POLLUTION FLUORÉE EN AVANT DE L'USINE D'ALUMINIUM DE SAINT-JEAN-DE-MAURIENNE

En aval de cette usine, la seule autre source de pollution fluorée est constituée par l'usine de phosphore d'Epierre.

VALLÉE DE L'ARC - MAURIENNE
CARTE DE LA POLLUTION FLUORÉE DE LA VÉGÉTATION (1977)

établie à partir des concentrations en ion fluor
 dans les aiguilles d'*Épicéa* (*Picea excelsa* Link.)
 par le Centre d'Études nucléaires de Grenoble.

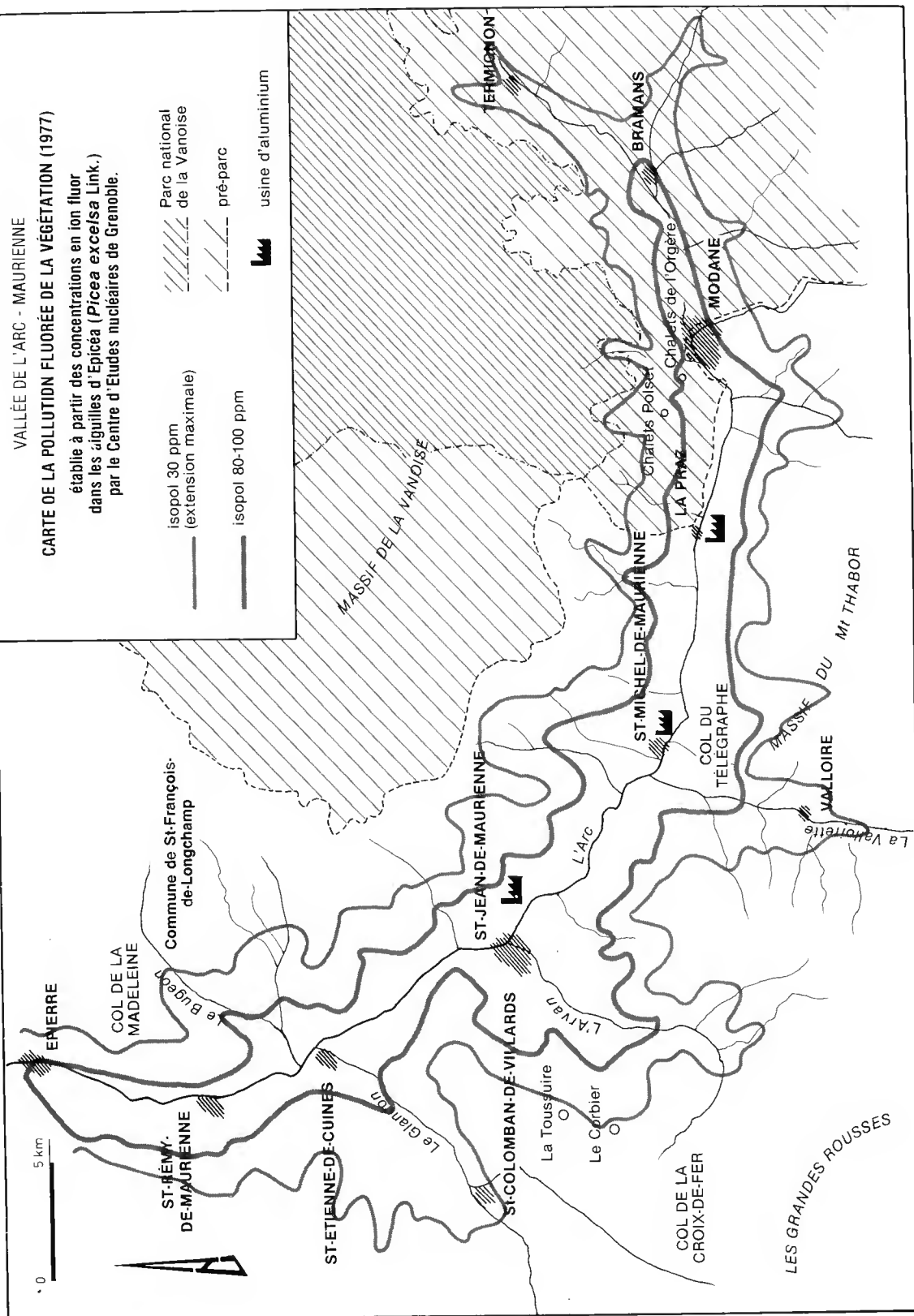
Parc national
 de la Vanoise

pré-parc

usine d'aluminium

isopol 30 ppm
 (extension maximale)

isopol 80-100 ppm



Du fait des conditions aérologiques existant dans cette vallée, l'extension maximale des fumées fluorées en aval de l'usine de Saint-Jean-de-Maurienne n'est que de 30 km jusqu'aux environs d'Aiguebelle. L'« isopol » 80-100 $\mu\text{g F/g}$ ne dépasse pas Epierre distant de 20 km de l'usine.

Dans cette portion de la vallée, la rive gauche est celle qui est la plus touchée par les émissions de l'usine. En effet, on note 300 $\mu\text{g F/g}$ dans les épicéas aux environs de Saint-Rémy-de-Maurienne et également 300 $\mu\text{g F/g}$ autour de Saint-Léger.

Au niveau de Saint-Etienne-de-Cuines, deux vallées latérales débouchent dans la vallée de l'Arc : vallée du Glandon vers le col du Glandon et vallée du Bugeon vers le col de la Madeleine.

La pénétration des fumées s'effectue surtout sur la rive gauche le long du Glandon et l'« isopol » 30 $\mu\text{g F/g}$ se situe au-dessus de Saint-Colomban-des-Villards à 10 km de l'axe de la vallée de l'Arc. Par contre, dans cette vallée latérale, la pénétration de l'« isopol » 80-100 $\mu\text{g F/g}$ n'est que de 4 km.

Sur la rive droite, la pénétration des fumées est beaucoup moins importante le long de la vallée du Bugeon. L'« isopol » 30 $\mu\text{g F/g}$ se rencontre au niveau de la commune de Saint-François-Longchamp à 6 km de l'axe de la vallée de l'Arc alors que la pénétration de l'« isopol » 80-100 $\mu\text{g F/g}$ ne dépasse pas 3 km.

SURFACE DES ZONES SOUMISES À LA POLLUTION FLUORÉE

Une mesure par planimétrie de l'étendue maximale de la zone atteinte par la pollution permet de l'évaluer à 530 km², soit 53 000 ha. Ces 53 000 ha représentent la zone à l'intérieur de laquelle la teneur en fluor des aiguilles d'épicéa est > 30 $\mu\text{g F/g}$. A l'intérieur de cette zone, 23 000 ha sont nettement touchés et les sujets présentent des nécroses bien identifiées (teneur en fluor \geq 80-100 $\mu\text{g F/g}$). Dans cette zone de 23 000 ha, l'action du fluor se traduit également par la présence plus ou moins importante d'individus dépérissants ou morts suivant la distance des sources d'émissions de produits fluorés. Notons que dans cette zone, des dommages ont été constatés sur environ 11 000 ha de forêts résineuses.

Remarque

Les surfaces indiquées correspondent aux surfaces planes sur la carte. Les surfaces réelles de la végétation au sol sont légèrement supérieures, car il faut faire intervenir un facteur de correction voisin de 1,17 dû aux pentes moyennes des versants de chaque vallée.

PARC NATIONAL DE LA VANOISE

Si les usines d'aluminium de Saint-Jean et de Saint-Michel-de-Maurienne se situent en dehors de la zone périphérique du Parc national de la Vanoise, par contre l'usine de la Praz se trouve juste en bordure de celle-ci.

De ce fait, sur les 53 000 ha soumis à la pollution fluorée en Maurienne, 9 500 ha sont situés dans la zone périphérique du Parc national de la Vanoise. Cela représente environ 7 % de la surface totale de la zone périphérique qui est de 143 700 ha.

Mais, il faut signaler avant tout, que le Parc national de la Vanoise lui-même est atteint par la pollution fluorée. En effet, dans la région des chalets de Polset et des chalets de l'Orgère situés au-dessus de Saint-André, la pénétration des fumées fluorées dans le Parc national de la Vanoise, quoique faible, est indéniable.

En effet, nous trouvons juste à la limite du Parc 67 μg F/g dans des épicéas situés sous les chalets de Polset, ainsi que 82 et 32 μg F/g dans les épicéas aux environs du refuge de l'Orgère.

ÉTUDE DES CHUTES DE PRODUCTION INDUITES DANS LES PEUPLEMENTS RÉSINEUX

OBJET DE L'ÉTUDE

La présente étude se propose d'analyser et de chiffrer les chutes de production induites sur les peuplements résineux en Maurienne par la pollution fluorée, ceci par comparaison entre la production des peuplements pendant les années 1967-1976 et une autre période décennale antérieure à 1958.

1958 est la date à partir de laquelle les dégâts dus au fluor sont devenus très sensibles par suite de l'augmentation très forte de la production d'aluminium des usines Péchiney.

EXPOSÉ GÉNÉRAL DE LA MÉTHODE UTILISÉE

Les auteurs qui ont précédemment étudié l'évolution de la production sous l'action d'une pollution atmosphérique ont, à notre connaissance, toujours procédé à l'estimation des pertes d'accroissement en volume des peuplements par extrapolation des résultats de mesures d'accroissement effectuées sur certains arbres pris comme échantillon (Pollanschütz, 1965) (Vins, 1962).

Ils ont ensuite comparé cette perte de production aux variations observées dans des zones de référence.

Or, pour que cette méthode puisse donner des résultats satisfaisants, il est indispensable que la sylviculture appliquée n'ait pas varié sensiblement dans le temps, sinon les variations d'accroissement mesurées ne traduiront en premier lieu que les variations du taux de prélèvement (effet d'éclaircie bien connu).

Or, lorsqu'il y a pollution atmosphérique d'une certaine intensité, il y a obligatoirement changement de sylviculture, ce changement étant d'autant plus net que la pollution est forte.

En zone très polluée, où les prélèvements sont anormalement élevés du fait de l'abondance des chablis, ces méthodes qui s'appuient sur l'analyse de l'accroissement individuel d'arbre donnent donc des chiffres de chute de production entachés systématiquement d'une erreur par défaut qui peut être extrêmement importante.

Pour mieux approcher la valeur réelle des chutes de production des forêts, il nous est donc apparu souhaitable d'adopter une autre méthode et de procéder à l'estimation directe de la production actuelle et passée des peuplements.

Cette méthode a l'avantage :

- d'éliminer les effets liés aux variations de volume sur pied,
- de permettre de faire un calcul d'erreur sur les résultats obtenus.

Méthode de travail adoptée - Mesure des chutes de production

Pour évaluer la production d'une forêt pendant une période déterminée, on procède habituellement :

- soit par comparaison d'inventaires,
- soit par la méthode des sondages à la tarière.

Chacune de ces méthodes exige une connaissance précise du volume de bois sur pied dans la forêt considérée au moment de l'évaluation de la production.

Ce volume est obtenu soit par un inventaire pied à pied de tous les arbres, soit par un inventaire statistique portant sur un certain nombre de placettes régulièrement réparties.

Chacune de ces méthodes exige un travail très important, soit pour 100 hectares de forêts de montagne :

- 50 à 70 journées de travail environ pour un inventaire en plein,
- 20 à 60 journées de travail environ pour un inventaire statistique.

Or, la pollution fluorée touche de manière sensible environ 11 000 hectares.

Dans ces conditions, compte tenu des moyens de service, il était impossible de procéder à un inventaire complet de toutes les forêts atteintes.

Par ailleurs, il convient de remarquer que tous les inventaires anciens ont été faits pied à pied, et que les résultats donnés par les deux méthodes d'évaluation de la production citées précédemment ne sont pas strictement comparables.

Dans ces conditions, pour avoir une valeur approchée de la chute de production, nous avons préféré appuyer notre étude sur un certain nombre de résultats ponctuels en extrapolant ceux-ci aux peuplements voisins.

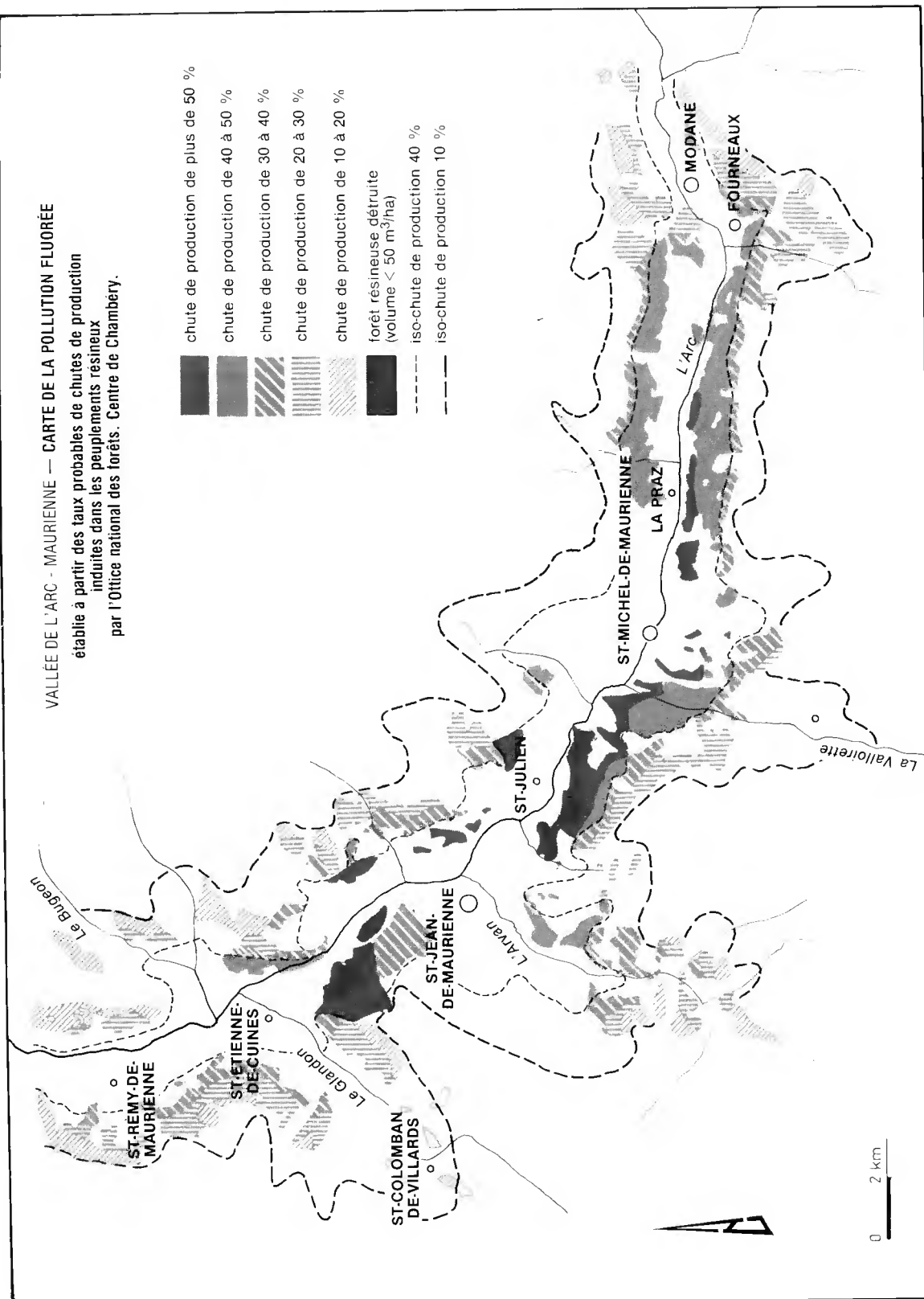
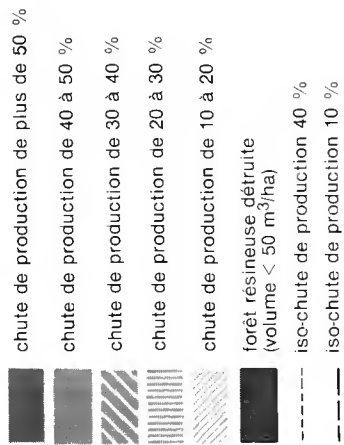
L'unité d'étude choisie a donc été la parcelle forestière.

Un échantillonnage de 30 parcelles, réparties dans 22 forêts communales différentes, a de ce fait été constitué, ceci de manière à donner des indications aussi complètes que possible sur la valeur des chutes de production en fonction de la situation des peuplements par rapport aux points d'émission des fumées fluorées et des variations écologiques. Ainsi :

- l'altitude moyenne des parcelles-échantillons varie de 660 à 1 930 m ;
- leur exposition du nord au sud,
- leur distance de Saint-Jean-de-Maurienne de 4 à 26 km en amont et jusqu'à 17 km en aval.

Pour chacune de ces parcelles choisies comme unité d'étude, nous disposons du résultat d'un inventaire complet pied par pied I₁ effectué à une date antérieure à 1958 (année N).

VALLÉE DE L'ARC - MAURIENNE — CARTE DE LA POLLUTION FLUORÉE
 établie à partir des taux probables de chutes de production
 induites dans les peuplements résineux
 par l'Office national des forêts. Centre de Chambéry.



Aussi, nous avons fait procéder dans chacune des parcelles retenues :

- à un inventaire complet pied par pied I_2 (année 1976),
- à la mesure, par sondages à la tarière sur un échantillon d'environ 300 arbres choisis au hasard dans la parcelle :
 - des accroissements en diamètre entre les années 1967-1976,
 - des accroissements en diamètre pendant les 10 années ayant immédiatement précédé l'inventaire I_1 .

A partir de ces mesures, et par la méthode de l'accroissement moyen par catégorie de diamètre, nous avons calculé la production courante de la parcelle au moment de chaque inventaire :

- inventaire automne 1976 et mesure des accroissements en diamètre dans la période 1967-1976, qui nous donne la production courante en 1976,
- inventaire automne année N et mesure des accroissements en diamètre dans la période (N-9) - N qui nous donne la production courante avant la pollution.

Il convient néanmoins de remarquer que si dans une forêt équilibrée soumise à une sylviculture normale on peut admettre que l'inventaire effectué l'année N donne une bonne image du peuplement producteur pendant la période (N-10, N) (ce qui est implicitement fait dans la méthode de l'accroissement moyen), cela n'est pas forcément vrai dans le cas d'une parcelle isolée.

En l'absence de coupe, l'inventaire effectué l'année N donne une valeur par excès du volume moyen sur pied pendant la période (N-10, N).

Il en est donc de même de la production.

Toutefois, cette erreur étant faible (5 % environ pour un taux d'accroissement de 1 % normal en Maurienne), systématique et dans le même sens, l'erreur due à ce facteur — au niveau de la perte de production — se compense à peu près et peut être négligée.

Par contre, s'il y a eu pendant l'une ou l'autre période une coupe importante exploitée, la part de production afférente à cette exploitation doit être prise en compte et calculée.

Ce calcul a donc systématiquement été effectué selon la méthode exposée dans un rapport interne de l'Office national des forêts (Pisot 1978).

Évaluation des chutes de production dues au fluor

Certains facteurs peuvent, toutefois, fausser l'interprétation des résultats ainsi obtenus.

Élimination des variations « normales » de production

- La chute de production mesurée englobe non seulement celle due au fluor, mais aussi celle pouvant avoir pour cause d'autres facteurs tels que :
 - modification du climat,
 - vieillissement des peuplements, etc.
- L'échantillon des arbres sur lesquels sont effectuées les mesures des accroissements, s'il est représentatif du peuplement de 1976, ne l'est pas aussi bien de celui existant dans la parcelle avant 1958.

Cela semble particulièrement vrai au niveau des petits diamètres (élimination progressive des arbres dominés).

Aussi, pour pallier ces inconvénients inhérents à la méthode, nous avons effectué la même étude dans deux parcelles témoins situées en Maurienne en dehors de la zone touchée par les émanations fluorées.

On peut admettre, dans ces conditions, que la chute de production relative induite par le fluor dans un peuplement donné est égale à celle mesurée dans ce type de peuplement, pondérée par celle mesurée dans les parcelles témoins.

En réalité, la moyenne des chutes de production mesurée dans les parcelles témoins choisies, situées en amont et en aval de la zone polluée, apparaît comme égale à zéro.

Ceci montre donc qu'aux erreurs de mesures près la méthode de travail choisie n'a pas — dans le cas présent — introduit d'erreurs systématiques importantes (5 à 7 % maximum).

Les peuplements étudiés étant traités théoriquement en futaie jardinée, ce résultat corrobore en fait un postulat généralement admis à savoir que la production est (du moins dans certaines limites) une constante quel que soit le volume des exploitations effectuées.

Autres motifs de variations de production — Analyse des cas particuliers

Il convient enfin de noter que le postulat rappelé et vérifié ci-dessus, s'il est admissible pour l'ensemble d'une forêt équilibrée ou pour un peuplement bien jardiné, l'est un peu moins au niveau d'une parcelle, notamment lorsqu'il s'agit de futaies incomplètes ou vieillissantes ou lorsqu'il y a eu des variations importantes du matériel sur pied.

Sur des durées aussi courtes que celles séparant les deux périodes comparées, ces facteurs n'entraînent en général que de faibles variations, négligeables dans le cadre de l'étude effectuée.

Toutefois, dans certains cas particuliers, des fluctuations brutales anormales et très importantes du matériel sur pied dues à des causes étrangères à la pollution sont susceptibles d'entraîner des variations de production non imputables au fluor.

Ces résultats sont donc, dans ces cas particuliers, à interpréter avec circonspection.

RÉSULTATS OBTENUS

Si l'on fait abstraction des cas particuliers mentionnés au paragraphe précédent, nous avons obtenu une série de chiffres bruts donnant directement la valeur de la chute de production induite par le fluor dans un certain nombre de peuplements.

Compte tenu du nombre important de postulats adoptés et de la mauvaise connaissance du degré de précision que nous avons dans la collecte des données (inventaire pied par pied en particulier, pour lequel nous sommes obligés d'admettre une erreur relative de 5 à 10 %), il est difficile d'effectuer un calcul d'erreur très précis sur les valeurs de chute de production ainsi obtenues.

Il apparaît, toutefois, que la limite supérieure de l'erreur absolue sur la chute de production exprimée en pourcentage de la production initiale, se situe au niveau de confiance de 95 % aux environs de 7 à 10 % et lui soit même inférieure puisqu'il existe une corrélation positive entre les erreurs des estimations d'avant 1958 et de 1976.

A partir des résultats ainsi obtenus, nous avons dressé une carte d'iso-chute de production des peuplements résineux en admettant le principe d'une variation linéaire de cette donnée en fonction, d'une part de la distance de la parcelle donnée de l'usine émettrice, et d'autre part de l'altitude.

Compte tenu :

- du relief quelquefois complexe de la vallée de la Maurienne,
- du nombre de mesures relativement faible réalisé, eu égard à la surface étudiée,
- de la complexité de toute expérience à caractère biologique,

il est évident que nous ne pouvions espérer obtenir qu'une image approchée du phénomène analysé.

C'est pourquoi, le travail cartographique de base a été réalisé au 1/100 000, échelle qui semble le mieux correspondre au degré d'approximation global de l'étude.

ANALYSE DES CORRÉLATIONS EXISTANTES ENTRE LES RÉSULTATS DES DEUX ÉTUDES PRÉCÉDENTES

Comparaison des cartes établies par les deux méthodes de travail exposées précédemment

La comparaison des cartes ainsi obtenues d'une part par le Centre d'études nucléaires de Grenoble en se basant sur la teneur en fluor mesurée dans les aiguilles d'épicéa, et d'autre part par les services de l'Office national des forêts en s'appuyant sur les chutes de production des peuplements résineux, met en évidence une similitude assez remarquable entre les deux documents.

L'analyse de ces deux cartes permet, par ailleurs, de distinguer trois zones :

- **Zone A** : à l'intérieur de laquelle la teneur en fluor des aiguilles d'épicéa est en moyenne supérieure à 110 ppm.

La chute de production mesurée dans les peuplements résineux y est toujours très forte et, dans l'ensemble des cas, supérieure à 40 %.

L'action du fluor s'y traduit également par des mortalités d'arbres provoquant en première phase des chutes de production très forte et, en seconde phase, la suppression progressive de l'état boisé.

- **Zone C** : à l'intérieur de laquelle la teneur en fluor des aiguilles d'épicéa est inférieure à 30 ppm.

Aucune action du fluor sur la croissance des résineux ne peut y être mise en évidence de manière significative.

- **Zone B** : comprise entre les deux zones précédentes.

Les teneurs en fluor mesurées dans les aiguilles d'épicéa varient de 30 à 110 ppm environ, les chutes de production des peuplements résineux entre 10 et 40 %.

Il apparaît donc qu'à l'intérieur de cette zone, à une faible variation en valeur absolue de la teneur en fluor des aiguilles, correspond une forte variation de la chute de production.

La comparaison des deux cartes semble par ailleurs montrer :

- qu'à l'exposition sud, les peuplements résineux sont plus sensibles au fluor que sur versant nord (voir zone d'Orelle),
- que la présence de feuillus augmente la résistance au fluor des résineux (voir résultat de la parcelle 0 sur les Chavannes).

Étude de la corrélation liant la chute de production des peuplements résineux et la teneur en fluor dans les aiguilles

Un certain nombre d'auteurs ont déjà tenté d'établir une relation entre la teneur en fluor des aiguilles de résineux et les chutes de production : Braun en 1974, Bunce en 1978, Décourt en 1977.

Pour notre part, la similitude existant entre les deux cartes ainsi établies, nous a incité à en faire autant.

Pour cela, dans chaque parcelle échantillon ayant fait l'objet d'une mesure de chute de production, nous avons fait analyser la teneur en fluor dans une ou deux branches d'épicéa.

Les résultats ainsi obtenus sont présentés dans le tableau 1 et le graphique n° 1, et ont été regroupés par zone dans les tableaux 2 et 3 après élimination des parcelles échantillons dans lesquelles des phénomènes extérieurs à la pollution fluorée sont venus fausser l'analyse du phénomène.

Graphique n° 1

Etude de la liaison : chute de production ligneuse et teneurs en fluor des aiguilles d'Épicéa.

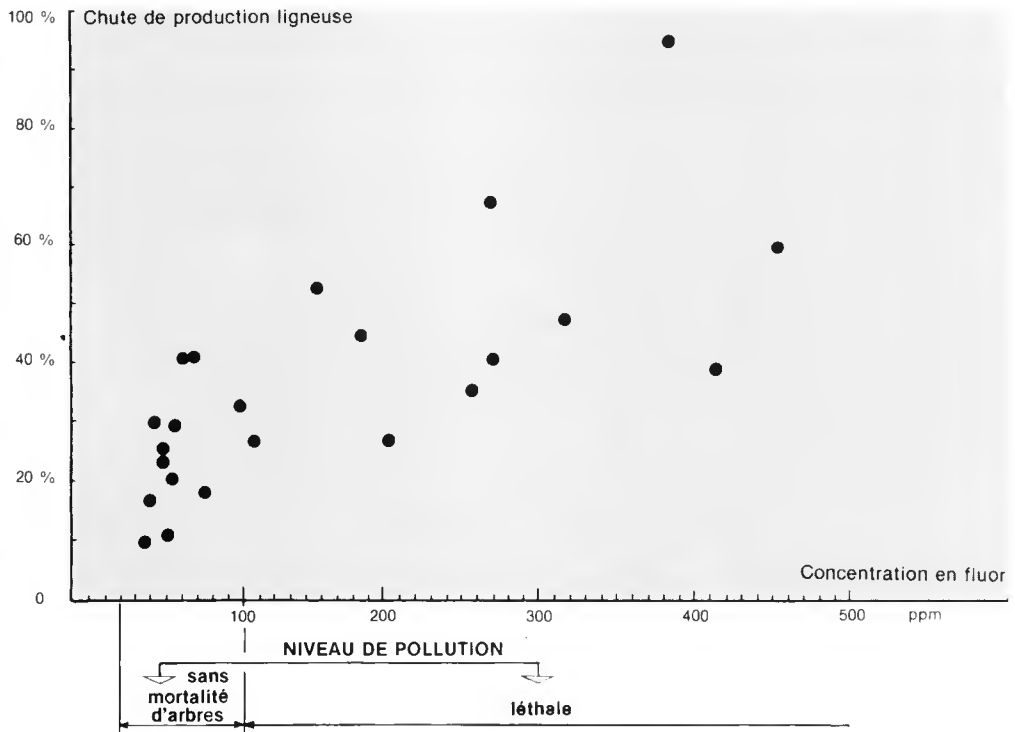


Tableau 1

POLLUTION FLUORÉE EN MAURIENNE
Chute de production induite dans les peuplements résineux.
Tableau récapitulatif des résultats.

Nom de la forêt N° de la station	N° de parcelle	Altitude moyenne de la parcelle	Altitude prélè- vement	Chute de pro- duction %	Teneur en fluor ppm	Observations
STATIONS TÉMOINS						
01 Saint-Georges-d'Hurtières	12	1 400		— 6		
02 Lanslevillard	13	1 760		6		
STATIONS ÉCHANTILLONS						
1 Saint-Rémy-de-Maurienne .	10	1 560	1 450	10	44	3 mesures entre 1 340 et 1 560 m
2 Saint-Rémy-de-Maurienne .	17	1 340	1 200	20	65	
3 Les Chavannes	0	820	850	— 5*	65	
4 Les Chavannes	G	1 190	1 200	23	59	2 mesures discordantes (31.103)
5 Saint-Etienne-de-Cuines .	P2	1 180	1 220	29	66	
6 Saint-Avre	J	670	670	40	270	
7 Montvernier indivis	H	1 240	1 220	5	67	
8 Sainte-Marie-de-Cuines ...	4	750		66	269	
9 Pontamafrey	11	660	660	94	384	
10 Hermillon	G	1 180	1 120	25	59	
11 Saint-Julien-Montdenis ...	5	1 370	1 370	17	49	
12 Albiez-le-Jeune	G	890	810	45	38	
13 Fontcouverte	T	1 020	1 050	33	48	
14 Albiez-le-Vieux	N	1 170	1 070	38**	62	2 mesures
15 Villargondran	L	1 050	1 050	44	187	
16 Montricher	19	1 310	1 310	52	156	
17 Valloire	S	1 620	1 620	32	106	
18 Valloire	F	1 360	1 360	26	116	
19 Saint-Michel	I	1 150	1 150	59	454	
20 Orelle	N1	1 840	1 840	41	74	
21 Orelle	E1	1 460	1 460	26	204	
22 Orelle	B1	1 110	1 110	46	316	
23 Orelle	N2	1 620	1 620	40	71	
24 Saint-André	N	1 790	1 790	38**	52	
25 Le Freney	16	1 370	1 370	38	424	
26 Fourneaux	F	1 390	1 390	35	258	
27 Modane	38	1 740	1 720	30**	46	
28 Modane	5	1 440	1 520	18	86	
29 Villarodin-Bourget	16 ₂	2 000	1 930	30	52	
30 Villarodin-Bourget	8 ₂	1 790	1 830	11	60	

* Ancienne forêt feuillue enrésinée. Le volume à l'hectare a fortement augmenté sans qu'il y ait pour autant concurrence entre les résineux.
Le résultat obtenu en ce qui concerne la production n'est donc pas significatif.

** Résultats de chute de production à prendre en compte avec circonspection car, dans ces parcelles, il y a eu une forte perte de matériel sur pied. Station 14 : — 34 %, Station 24 : — 33 %, Station 27 : — 34 %.

Le tableau relatif à la zone A (teneurs en fluor supérieures à 100-110 ppm) n'appelle pas de commentaires supplémentaires à ceux faits précédemment.

Il existe une corrélation positive entre les teneurs en fluor et la chute de production.

Il ne nous est pas apparu utile de rechercher plus précisément la nature de la fonction liant ces deux données, car à ce niveau d'intensité de pollution, c'est la mortalité des arbres qui conditionne la production de la forêt (et non plus la variation des accroissements).

Le tableau récapitulatif relatif à la zone B (tableau 3 : teneur en fluor comprise entre 30 et 110 ppm) montre qu'il semble exister une corrélation positive entre la chute de production et la teneur en fluor des aiguilles d'épicéa.

Celle-ci apparaît d'ailleurs nettement à grande échelle sur le terrain (voir cartes).

Si l'on admet en première hypothèse, et par mesure de simplification, que, dans l'intervalle 30-110 ppm, la relation liant ces deux paramètres est linéaire, le calcul fait apparaître une corrélation positive et nettement différente de zéro entre les deux données étudiées.

Compte tenu du petit nombre de mesures effectuées et de la grande dispersion des analyses de teneur en fluor, le coefficient de corrélation trouvé voisin de 0,5 est toutefois trop faible pour permettre, en l'état actuel des études, de donner de façon suffisamment fiable une indication précise sur la nature de la fonction liant ces deux données.

Malgré leur relative imprécision, ces résultats nous permettent toutefois d'espérer obtenir une vision beaucoup plus exacte de la réalité en affinant le travail déjà effectué par des études complémentaires menées selon la même méthode.

Pour ce faire, il conviendrait néanmoins de tenir compte des remarques suivantes :

- La précision obtenue au niveau du calcul proprement dit de la chute de production est bonne. Elle est, en majeure partie, fonction du soin apporté dans l'exécution de l'inventaire. Il semble vain d'espérer à ce niveau une amélioration.
- Le choix des parcelles-échantillons peut, par contre, être amélioré de manière à éliminer au maximum — avant tout travail sur le terrain — l'effet des facteurs extérieurs à la pollution susceptibles de modifier la production (trop fortes coupes, renversées, peuplements clairs ayant augmenté leur capital producteur, etc.).
- La variabilité des teneurs en fluor est très forte d'un individu à l'autre, voire d'une branche à l'autre.

LISTE DES STATIONS ABANDONNÉES DANS LES TABLEAUX 2 ET 3 CI-CONTRE

3 - Ancienne forêt feuillue en voie d'enrésinement.

Le volume à l'hectare a fortement augmenté, sans qu'il y ait pour autant concurrence entre les résineux. Le résultat obtenu au niveau de la chute de production n'est donc pas significatif.

7 - Résultats trop discordants au niveau de l'analyse de la teneur en fluor des aiguilles.

Le relief très complexe ne permet pas d'éliminer un des résultats.

Résultats trouvés : 31 et 103 ppm, c'est-à-dire aux deux limites du groupe 1.

12 - Parcelles situées à proximité d'une plâtrière : 0,600 km en ce qui concerne la station n° 12 (Albiez-le-Jeune).

La relation fluor-chaux est de nature à fausser les résultats, tant au niveau de la réaction des végétaux, que des analyses.

Tableau 2

POLLUTION FLUORÉE EN MAURIENNE**Etude de la relation « chute de production / teneur en fluor des aiguilles ».****Tableau récapitulatif des résultats de la zone A.****Pollution létale - Teneur en fluor > 110-120 ppm**

N° de station	Chute de production	Teneur en ppm
6	40	270
8	66	269
9	94	384
15	44	187
16	52	156
18	26*	116
19	59	454
21	26*	204
22	46	316
25	38	424
26	35	258
11 stations		
* Parcelle à forte proportion de sapin. Chute de production mesurée apparemment faible, compte tenu des conditions de pollution ambiante		

Tableau 3

POLLUTION FLUORÉE EN MAURIENNE**Etude de la relation « chute de production / teneur en fluor des aiguilles ».****Tableau récapitulatif des résultats de la zone B.****Pollution létale - Teneur en fluor < 90-110 ppm**

N° station	Chute de production	Teneur en ppm
1	10	44
2	20	65
4	23	59
5	29	66
10	25	59
11	17	49
17	32	106
20	41	74
23	40	71
28	18	86
29	30	52
30	11	60
12 points		
Points douteux*		
14	38	62
24	38	52
27	30	46
* Logiquement, pour pouvoir prendre en compte les points douteux, il faudrait réduire la variation du volume producteur à 25-26 % (taxation normale d'une coupe de jardinage) et rectifier d'autant les chutes de production mesurées, ce qui nous donnerait Point 14 : 38 — 9 = 29 Point 24 : 38 — 8 = 30 Point 27 : 30 — 9 = 21		

Dans ces conditions, il paraît indispensable — dans les parcelles-échantillons — de multiplier le nombre des prélèvements.

Cela permettrait d'obtenir une valeur moyenne beaucoup plus représentative du niveau de pollution existant sur l'ensemble de la parcelle et améliorerait très certainement nettement la précision globale de l'étude.

Il convient enfin de noter une imperfection supplémentaire de l'étude tenant au fait que les mesures de teneur en fluor effectuées dans les aiguilles d'épicéa correspondent à une émission moyenne en fluor de l'ordre de 600 tonnes/an, tandis que les chutes de production mesurées (période 1967-1976) correspondent à des émissions moyennes sur 10 ans de 1 100 tonnes selon détail ci-après :

- années 1967-1970 = 1 320 tonnes
- années 1971-1973 = 1 220 tonnes
- années 1974 = 970 tonnes
- années 1975-1976 = 600 tonnes

Tous les chiffres donnés précédemment ne doivent donc être extrapolés à une autre région qu'avec beaucoup de prudence.

CONCLUSION

En conclusion, les travaux exposés ci-dessus :

- Ont, en premier lieu, mis en évidence la très grande concordance entre les résultats des deux études sur la pollution fluorée présentées ci-dessus, études et cartes qui ont été réalisées par deux voies totalement différentes :
 - l'une par le Centre d'études nucléaires de Grenoble en se basant sur la teneur en fluor des végétaux forestiers,
 - l'autre par les services de l'Office national des forêts en s'appuyant sur une étude de chute de production effectuée sur un certain nombre de parcelles-échantillons.

Cette constatation augmente singulièrement, pour chacune d'elles, leur degré de fiabilité.

- Ont permis, pour la vallée de la Maurienne, et compte tenu des variations enregistrées ces dernières années dans l'importance des émissions fluorées, de dégager les faits suivants :
 - l'absence probable de tout effet du fluor sur la croissance des résineux tant que la teneur en fluor reste inférieure à 30 ppm ;
 - une très forte chute de production des peuplements résineux dès lors que la teneur en fluor dans les aiguilles dépasse 110 ppm : à partir de ce niveau, la pollution se traduit en général également par des phénomènes de mortalité d'arbres, ce phénomène étant plus précoce dans les massifs boisés exposés au sud que dans ceux exposés au nord ;

- une très forte variation de la production des peuplements résineux dès lors que la teneur en fluor dans les aiguilles d'épicéa passe de 30 à 110 ppm, ainsi que l'existence très probable, dans cet intervalle, de taux de pollution, d'une corrélation positive, liant la teneur en fluor des aiguilles d'épicéa à la chute de production des peuplements.
- Nous autorisent à espérer améliorer à brève échéance, notre connaissance de la fonction liant la chute de production des peuplements résineux à la teneur en fluor mesurée dans les aiguilles d'épicéa.

Une meilleure connaissance de cette relation devrait permettre :

- *d'avoir très rapidement et facilement une valeur approchée de la chute de production* dans un peuplement forestier soumis à la pollution fluorée. Les analyses foliaires peuvent, en effet, être aisément multipliées, ce qui n'est pas le cas des études de chute de production qui nécessitent un comptage complet des peuplements.
- *d'effectuer des études prospectives sur l'impact forestier de certains programmes de travaux de captation de fumées fluorées.*

En effet, en un lieu donné, il existe une relation entre les variations de tonnage de fluor émis et les teneurs moyennes en fluor mesurées dans les végétaux.

Une meilleure connaissance de la fonction liant la production végétale à la teneur en fluor mesurée dans ces végétaux, devrait donc permettre d'émettre un certain nombre d'hypothèses objectives sur l'impact prévisible des réductions de rejets de fumées fluorées programmés.

- *en s'appuyant sur des données quantifiables, de tenter de définir une sylviculture aussi bien adaptée que possible au niveau de pollution atmosphérique ambiant.*

Jean-Pierre GARREC	Noël PASSERA
Chargé de Recherche C.N.R.S.	Stagiaire C.E.A.
C.E.A. - CENTRE D'ETUDES NUCLEAIRES DE GRENOBLE	
Département de recherche fondamentale Laboratoire de Biologie végétale	
85 X 38041 GRENOBLE CEDEX	

Jean PISOT
Ingénieur du G.R.E.F.
OFFICE NATIONAL DES FORÊTS
Centre de Chambéry-Est
Zone industrielle de l'Albanne 73490 LA RAVOIRE

BIBLIOGRAPHIE

- BOSSAVY (J.). — Les polluants atmosphériques : leurs effets sur la végétation. *Revue forestière française*, vol. 22, n° 5, 1970, pp. 533-543.
- BRAUN (G.). — Growth reaction of spruce and fluoride content in foliage within the contamination area of a brick factory. Presented at Conference on Air Pollution and Forestry, oct. 15-18, 1974, Mariankse Lazne, C.S.S.R., 1974, pp. 145-166.
- BUNCE (H.W.F.). — Fluoride emissions and forest growth near Kitimat, B.C. CANADA. Presented at the 71 st Annual Meeting of the Air Pollution Control Association, Houston Texas (U.S.A.), june 25-30, 1978, pp. 1-14.
- CORMIS (L. de). — Rapports d'activité annuels - Station d'étude de la pollution atmosphérique d'Avignon-Montfavet (I.N.R.A.) 1967 à 1978.
- DECOURT (N.). — Premier inventaire des effets de la pollution atmosphérique sur le massif forestier de Roumare. *Revue forestière française*, vol. 29, n° 6, 1977, pp. 435-447.
- LEVAGGI (D.A.), OYUNG (W.) and FELDSTEIN (M.). — Microdetermination of fluoride in vegetation by oxygen bomb combustion and fluoride ion electrode analysis. *Journal of the air pollution control association*, vol. 21, n° 5, 1971, pp. 277-279.
- PISOT (J.). — Etude des chutes de production induites dans les peuplements résineux des forêts communales de Maurienne par la pollution fluorée. Chambéry-est, Office national des forêts, 1978 (Rapport interne).
- POLLANSCHÜTZ (J.). — Methodik der Rauchschadensfeststellung, wie sie gegenwärtig von der forstlichen Bundesversuchsanstalt Angewandt wird. *Mitteilungen, Forstliche Bundes Versuchsanstalt, Mariabrunn*, 1965.
- VINS (B.). — Die Auswertung jahrringchronologischer Untersuchungen in rauchgeschädigten Fichten Wäldern des Erzgebirges. *Ann. Sci. Univ. Techn. Dresde*, vol. 11, Cahier 3, 1962, pp. 579-580.