

# LE DÉPÉRISSEMENT DES FORÊTS DANS LE MASSIF VOSGIEN : RELATIONS POSSIBLES AVEC LA POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE

Le dépérissement des forêts, particulièrement des peuplements de Sapin et d'Epicéa, après avoir frappé l'Allemagne, se manifeste depuis quelque temps dans les Vosges. Les causes n'en sont pas encore clairement établies et semblent complexes. Cet article n'a donc pas d'autre ambition que de faire objectivement le point de la situation et de faire connaître les hypothèses envisagées.

## HISTORIQUE

Au début des années soixante-dix, des mortalités anormales commencèrent à être constatées sur le Sapin en Allemagne, et notamment en Bavière. Les inquiétudes ne furent pas d'abord trop vives car, au cours des deux derniers siècles, les sapinières avaient déjà été atteintes par des dépérissements plus ou moins intenses, suivis de retours à un état de santé normal. Cependant, on s'aperçut rapidement qu'il s'agissait d'un phénomène plus grave que les précédents ; par exemple, dans la région de Kronach en Bavière, 50 % des sapins moururent entre 1972 et 1976. En même temps, les dégâts s'étendirent à l'Epicéa ainsi qu'au Pin sylvestre et au Hêtre.

**M. BONNEAU  
C. FRICKER**

---

**regards  
sur la santé  
de nos  
forêts**

Le fait remarquable dans ces dépérissements est qu'ils intéressaient toutes les régions du pays et qu'il s'agissait donc d'un phénomène différent des atteintes classiquement constatées au voisinage des grosses agglomérations industrielles, comme en Tchécoslovaquie ou au sud de la Pologne par exemple.

La Suisse se trouva également atteinte en 1982. En France, où aucun dégât n'avait été signalé jusqu'à la même année (sauf des atteintes localisées en Maurienne, en Basse-Seine et dans la région de Saint-Avold), des symptômes comparables à ceux constatés en Allemagne furent notés dans les Vosges alsaciennes au printemps 1983, puis du côté lorrain. Les forestiers alsaciens étaient d'ailleurs allés se documenter auprès de leurs collègues du Bade-Würtemberg.

Des pertes de vitalité ont été également enregistrées dans l'Est des U.S.A., mais, semble-t-il, avec des symptômes quelque peu différents de ceux qui sont observés en Europe.

Paradoxalement, dans les Pays Scandinaves où une forte acidité des pluies est dénoncée depuis plus de dix ans, et où beaucoup de lacs, ainsi qu'au Canada, sont tellement acides que la vie y a pratiquement disparu, les dégâts constatés sur les peuplements forestiers, ne se sont pas manifestés plus tôt, ni plus forts. Ceci montre qu'il n'est pas correct de confondre « pluies acides » et dépérissement des forêts ; le problème, comme on le verra ci-après, est plus complexe.

## SYMPTÔMES

Deux symptômes macroscopiques, perte de feuilles et colorations anormales du feuillage, sont visibles sur toutes les essences. D'autres signes de dépérissement sont plus difficilement observables.

### Perte de feuilles

Elle se traduit par un éclaircissement général des couronnes qui deviennent « transparentes ». Ce phénomène présente des aspects variables avec l'espèce.

Chez le Sapin, c'est surtout la partie médiane de la cime qui perd ses aiguilles, sensiblement le deuxième quart à partir du sommet. Chez les vieux sapins, la perte du feuillage est pratiquement totale à ce niveau, tandis que la tête et la moitié inférieure de l'arbre restent plus fournies. Chez les arbres plus jeunes ou moins atteints, seules les aiguilles des pousses anciennes tombent, les pousses les plus récentes restent feuillées. Mais le nombre d'années d'aiguilles présentes sur l'arbre, qui est normalement d'une dizaine, peut être réduit à quatre ou à cinq. Parfois la défoliation prend une autre allure, se localisant à la périphérie de la couronne : les extrémités des branches perdent totalement leurs feuilles et donnent une bonne mesure de la réduction d'ampleur de la cime.

En revanche, certaines branches basses se trouvent parfois revigorées et on assiste alors à un assez classique phénomène de descente de cime. Cette défoliation s'accompagne souvent d'une formation prématurée de la « table » (ou « nid de cigogne ») qui caractérise normalement les arbres séniles mais peut se observer aussi sur des sapins encore jeunes (40 à 50 ans) dans les zones où sévit le dépérissement.

Chez l'Épicéa, les pertes d'aiguilles affectent surtout la partie basale des rameaux de second ordre, partant des branches principales, qui ne restent feuillés qu'à leur extrémité, de sorte que les « draperies » bien fournies de l'Épicéa lorsqu'il est vigoureux, sont, chez les épicéas malades, d'abord plus tombantes, puis plus ou moins dénudées, laissant nettement apparaître les axes nus des rameaux. La défoliation dans l'ensemble de la cime est répartie à peu près comme chez le Sapin. Les rameaux secondaires sont aussi, fréquemment, sans ramification ; les bourgeons existent mais ne se sont pas développés. Chez les deux espèces, la défoliation s'accompagne parfois du développement, sur la partie supérieure des branches, de jeunes rameaux, nommés « pousses de détresse ».



**Sapinière très dépérisante : extrémités des branches totalement défeuillées, rétrécissement manifeste des cimes ; certains Sapins sont morts. Basses Vosges.**

*Photos M. BONNEAU.*



**Groupe d'Épicéas nettement dépérisants : comme pour les Sapins ci-dessus, le rétrécissement de la cime est manifeste. Au même endroit, le Sapin reste vigoureux. Vosges moyennes.**

Chez le Pin sylvestre, la défoliation est plutôt répartie sur l'ensemble de la cime. Il n'y a qu'une ou deux années d'aiguilles au lieu de quatre ou cinq ; les rameaux se présentent comme dénudés avec un plumet terminal plus ou moins fourni.

Chez le Hêtre, le manque de feuillage correspond à une réduction de la taille des feuilles et à un nombre moindre de feuilles. Les pousses terminales ne présentent que des ramifications courtes (forme en fouet) et la partie supérieure de la couronne n'occupe ainsi qu'incomplètement l'espace. Chez d'autres feuillus, comme le Frêne, les ramifications peuvent être totalement absentes et les pousses terminales ne présentent qu'un bouquet de feuilles à leur extrémité.

Pour plus de détails, on pourra consulter l'ouvrage : « Avant que la forêt ne meure » (Schütt et al., 1983).

### Colorations anormales du feuillage

Chez certains épicéas, sapins, pins sylvestres, les aiguilles de plus d'un an jaunissent rapidement, au début de l'été, dès que la nouvelle pousse qui, elle, a une couleur normale, est développée. Ce jaunissement affecte surtout la pointe des aiguilles. Globalement les branches apparaissent comme bicolores, avec la partie intérieure (aiguilles anciennes) jaune d'or et la périphérie verte. Cet aspect est le même que celui de la carence magnésienne classique.

Il peut arriver que le jaunissement de l'aiguille, au lieu d'être localisé à la moitié distale, s'étende à toute l'aiguille qui peut finalement virer entièrement au rouge ; le symptôme est le même que celui d'une carence potassique, ou potassique et magnésienne. Il ne doit pas être confondu avec le rougissement complet des aiguilles de la partie intérieure de la frondaison, apparu en Forêt-Noire au cours de 1983, visible aussi dans certaines stations des Vosges en 1984 et qui est vraisemblablement dû à des attaques fongiques, notamment de *Lophodermium* (Rehfuess et Rodenkirchen, 1984). Il ne faut pas confondre non plus le jaunissement caractéristique du dépérissement nouveau avec les chloroses qui peuvent se manifester en sol carbonaté : le feuillage alors est plutôt vert-jaune que franchement jaune, et le contraste entre aiguilles de l'année et aiguilles plus anciennes est beaucoup moins marqué.

Sur le Hêtre, le jaunissement existe également et peut revêtir deux formes : une forme internervaire affectant soit l'ensemble de la feuille, soit la périphérie, la partie jaune étant alors parfois séparée de la partie verte par une zone de ponctuations brun-violet ; un jaunissement localisé à un losange limité par l'extrémité de la feuille et deux nervures symétriques, et couvrant environ un tiers de la surface de la feuille. Seul le premier des deux symptômes correspond au dépérissement, le second étant dû à l'attaque de la nervure principale par un Rhynchite (Hüttl, communication personnelle). Lorsque le dépérissement est plus poussé, la zone jaunie brunit et se nécrose. Le Sycomore est affecté de symptômes voisins de ceux décrits ci-dessus pour le Hêtre.

On peut aussi remarquer, sur le Hêtre et le Sycomore, ainsi que sur certaines plantes non ligneuses (Ronce, Ortie), surtout sur les feuilles d'ombre, des blanchissements, situés plutôt vers le centre de la feuille et qui se présentent sous la forme d'un assemblage de petites surfaces polygonales. Ils s'observent aussi sur les aiguilles de Sapin et d'Epicéa, sur la partie supérieure desquelles ils forment de fines mouchetures.

Ces symptômes s'observent aussi bien sur les jeunes que les adultes. Le jaunissement affecte surtout les individus bien éclairés (lisières, régénérations après l'enlèvement des semenciers), alors que les semis encore sous le couvert restent verts.

Le jaunissement et la défoliation peuvent ou non coexister ; certains arbres ont perdu beaucoup d'aiguilles mais sont restés verts, alors que d'autres, surtout chez l'Epicéa, peuvent être très jaunes tout en conservant presque tout leur feuillage. Il n'est pas sûr non plus que les arbres défoliés soient

des arbres naguère affectés de jaunissement et ayant perdu leurs aiguilles jaunes. Enfin, dans un peuplement, des arbres jaunes peuvent côtoyer des individus de couleur normale. Jusqu'à maintenant, le jaunissement est plus fréquent sur Epicéa que sur Sapin.

### **Autres symptômes**

Les symptômes ci-dessus, facilement observables, sont généralement accompagnés d'autres phénomènes que seul un examen particulier peut permettre de déceler : réduction de la croissance, réduction de l'appareil racinaire, surtout des radicelles, déficience de la mycorhization, pourriture des racines remontant jusque dans le tronc et provoquant l'existence de « noyaux d'humidité » où se développent souvent des bactéries.

Beaucoup de travaux ont été consacrés à l'examen des modifications éventuelles de croissance liées au dépérissement. Aussi bien aux Etats-Unis qu'en Allemagne, on a effectivement mis en évidence que les arbres présentant aujourd'hui des dommages visibles avaient depuis trente ans des cernes annuels plus étroits que les arbres qui ne présentent pas de symptômes de dépérissement. Les désordres seraient donc anciens, et ce qu'on constate aujourd'hui serait l'émergence d'un phénomène incipient et ancien remontant aux premières années de l'après-guerre (Evers et al., 1979).

Ces observations sont corroborées en France par quelques études rapides effectuées par l'Inventaire forestier national : la baisse d'accroissement du Sapin et de l'Epicéa au second tour d'inventaire, par rapport au premier, serait générale pour les départements des Vosges et de Meurthe-et-Moselle, mais atteindrait également d'autres départements où aucun dommage visible n'est signalé actuellement. Cela peut-il faire craindre que cette baisse d'accroissement soit le prélude à une généralisation du dépérissement ?

## **ÉTENDUE ET LOCALISATION DES DÉGÂTS EN FRANCE**

### **Vosges**

L'étendue des dégâts a pu être chiffrée grâce à la création, en 1983 et 1984, de placettes équidistantes de 1 km sur 9 transects est-ouest constituant un « réseau bleu » et échelonnés de 16 en 16 km du nord au sud des Vosges. Dans chacune d'elles 24 arbres numérotés, représentant un échantillon permanent, sont observés deux fois par an, en juin et en novembre pour les résineux, en juin et août pour les feuillus, et reçoivent une note de 1 à 5 correspondant à l'importance du manque d'aiguilles par rapport à un état normal :

note 1 :	manque de	0 à 9 %	des aiguilles
2 :	“	10 à 19 %	“
3 :	“	20 à 59 %	“
4 :	“	60 à 99 %	“
5 :	arbre mort		

D'après les résultats des observations de l'automne 1984, portant sur 1 888 sapins (110 placettes), 925 épicéas (63 placettes), 558 pins sylvestres (50 placettes), 26 % des sapins, 17 % des épicéas et 20 % des pins sylvestres sont notés 3 ou plus. Pour l'ensemble du massif, la perte de vitalité est probablement un peu plus élevée. En effet, en dehors des transects, il existe quelques secteurs où le dépérissement semble plus grave que pour la moyenne du massif. Dans ces secteurs ont été installées des « placettes rouges », pour lesquelles le nombre d'arbres notés au moins 3 atteignait 34 % pour le Sapin et 22 % pour l'Epicéa, en juin 1984.

Comme certains transects n'ont été établis qu'en juin 1984, c'est seulement sur un peu plus de la moitié des placettes actuellement en observation qu'on peut étudier l'évolution des dommages entre



▶ **Hêtre dépérissant : pousses allongées faiblement ramifiées ; défoliation précoce (la photo a été prise mi-septembre). Basses Vosges.**

▶ **Jaunissement typique sur Hêtre. Vosges.**

◀ **Sapinière moyennement dépérissante : extrémité des branches partiellement défeuillées et décolorées. Basses Vosges.**

▼ **Epicéa dont les aiguilles de plus de un an sont typiquement jaunes. Hautes Vosges.**





Photos M. BONNEAU.

l'automne 1983 et l'automne 1984. Le pourcentage d'arbres notés 3 et plus est stable pour le Sapin (26 %) et passe de 13 à 17 % pour l'Epicéa. Pour le Pin sylvestre, le pourcentage d'arbres dont la note dépasse 3 est de 20 %. Il faut cependant considérer que l'été très sec 1983 a pu provoqué une défoliation relative plus forte sur cette espèce, qui n'a normalement que 4 années d'aiguilles, que sur le Sapin ou l'Epicéa.

Un « indice de dépérissement » calculé pour l'ensemble des arbres de chaque placette (moyenne pondérée des « poids » attribués aux différentes notes) donne 16 % de placettes sérieusement atteintes pour le Sapin (réseau bleu), 10 % pour l'Epicéa et 18 % pour le Pin sylvestre.

En résumé le Sapin est, à l'heure actuelle, plus atteint que le Pin sylvestre et l'Epicéa, mais l'état sanitaire de ce dernier semble se détériorer plus rapidement. Il faut aussi tenir compte, dans la comparaison des espèces, que les sapinières observées sont souvent très âgées et qu'une forte perte d'aiguilles peut n'être qu'une manifestation de sénilité.

Les régions les plus touchées sont la région du col du Donon, les cols d'Urbeis, du Bonhomme, la région d'Aubure, le versant de la rive droite de la Fecht au-dessus de Munster (flanc ouest du Petit-Ballon), la forêt des Crêtes de Mortagne près du col du Haut-Jacques (sud-ouest de Saint-Dié), les pentes est du Grand-Ballon, les flancs de la vallée de la Thur.

Le jaunissement des feuillages qui, jusqu'au printemps 1984, n'était pas très fréquent s'est brusquement étendu en juillet 1984 et peut maintenant s'observer sur Epicéa, Sapin, Hêtre et Sycomore dans de très nombreuses forêts des Vosges : forêt de Mortagne, région de Munster, col du Bonhomme, environs du Grand-Valtin, col du Donon, col de Bramont, région de Vagney, de Remiremont, de Corcieux.

Pratiquement, chaque fois que l'on observe le jaunissement, les ponctuations blanches sont aussi visibles sur quelques arbres.

D'après les observations de juin 1984 en Alsace, le pourcentage d'arbres notés 3 (20 à 59 % de manque d'aiguilles) est le suivant dans les différents centres de l'Office national des Forêts :

Wissembourg .....	22 %	Sélestat .....	10 %
Haguenau .....	7 %	Ribeauvillé .....	19 %
Saverne .....	9 %	Colmar .....	12 %
Schirmeck .....	26 %	Guebwiller .....	22 %

Un premier dépouillement sommaire de l'état d'une centaine de placettes de Sapin, indépendantes du réseau bleu, ne fait pas apparaître de liaison entre le manque d'aiguilles et les conditions de topographie et de fertilité des stations, sauf une faible corrélation positive avec l'altitude dans les Vosges alsaciennes, et une corrélation négative entre défoliation et altitude de la crête sur le versant lorrain (Becker, communication personnelle).

Cependant, lorsqu'on parcourt le massif, il semble bien que les zones les plus fortement atteintes correspondent le plus souvent à des stations d'altitude relativement élevée : crêtes, cols, sommets. Ce rapport avec le relief comporte pourtant des exceptions ; il existe des peuplements de Sapin fortement touchés aussi à basse altitude, à la limite de la sapinière. Généralement les peuplements de vallée ou de bas de versant ont une vigueur normale.

Enfin, au moins en ce qui concerne les zones les plus fortement touchées, la géologie semble exercer une influence non négligeable : les peuplements sur grès sont plus fortement touchés que les autres ; les rhyolites de la région du Donon, les granites pauvres (granites de Kagenfels, du Brézouard) portent souvent des peuplements nettement atteints.

A l'automne 1984 on a l'impression, dans les Vosges, que les forts jaunissements et les défoliations intenses se distribuent en fonction de facteurs écologiques (altitude élevée ou roches mères pauvres), tandis que les défoliations d'intensité faible ou moyenne sont plus uniformément réparties dans le massif.



### Autres régions

En juin 1984, l'enquête vosgienne a été étendue au Jura où rien d'inquiétant ne fut signalé au début de l'année, sauf dans le Jura alsacien au nord, où 20 % des arbres environ étaient notés 3 et plus. Mais, à la fin de 1984, la situation semble s'être aggravée dans d'autres régions du massif. Un réseau plus dense de placettes d'observation est envisagé.

Une enquête, lancée par la division « Protection de la Nature » du C.E.M.A.G.R.E.F. en dehors du Jura et des Vosges, n'a pas permis de localiser d'autres dégâts.

Les dommages semblent donc pour le moment assez bien circonscrits au Nord-Est de la France, mais l'évolution rapide du phénomène en 1984 ne permet pas de considérer cette appréciation de la situation comme définitive.

La surface de peuplements nettement atteints était estimée, en juin 1984, dans les Vosges, à 30 000 hectares de sapinières et 8 000 hectares de pessières.

### HYPOTHÈSES SUR LES CAUSES DU DÉPÉRISSEMENT

Elles ont été formulées, essentiellement en Allemagne, où l'étude du phénomène est activement menée depuis plusieurs années déjà. On doit insister sur le fait que l'explication des phénomènes constatés reste pour le moment assez hypothétique et que, si l'on parle le plus souvent de « pluies acides » ou de « pollution atmosphérique », il n'existe pas toujours de preuve formelle que ces phénomènes soient déterminants. D'autres causes peuvent être avancées, notamment un arrière-effet de fortes sécheresses. Pour chaque explication, on peut avancer des arguments ou des observations « pour » et « contre » ; aucune hypothèse ne résiste complètement à toutes les critiques. Le plus probable est d'ailleurs qu'on se trouve en présence d'interactions entre divers facteurs, anthropiques (pollution) ou écologiques.

#### La pollution atmosphérique

- *Effets directs des polluants*

L'expression classique « pluies acides » doit être évitée car elle ne correspond qu'à un aspect de la réalité.

L'eau de pluie contient des anions d'acides forts ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{--}$ ,  $\text{Cl}^-$ ), plus ou moins équilibrés par des cations ( $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ), ou par le proton  $\text{H}^+$ . Ces anions proviennent, après diverses transformations, de l'eau de mer transférée à l'atmosphère, ou de gaz libérés soit par des phénomènes naturels (volcans, vie biologique des sols ou des océans), soit par la combustion des sources d'énergie surtout fossiles, notamment en ce qui concerne  $\text{SO}_4^{--}$  et  $\text{NO}_3^-$ . Dans l'ensemble des pays industrialisés de l'hémisphère Nord, les émissions anthropiques atteignent un niveau tel que ces anions l'emportent généralement, dans l'eau de pluie, sur les cations ; celle-ci contient par conséquent des quantités importantes de protons. Alors que l'eau de pluie en équilibre uniquement avec le  $\text{CO}_2$  atmosphérique, et ne contenant par conséquent que l'anion  $\text{CO}_3\text{H}^-$ , a un pH de 5,5 environ, il n'est pas rare que les pluies recueillies dans les contrées industrialisées aient un pH de 4,5, voire plus bas.

Ce phénomène n'est pas récent. Il a commencé avec l'ère industrielle, voici donc plus d'un siècle, mais ce qui est nouveau, c'est la généralisation de l'acidité des pluies. Pendant longtemps, cette pollution a été limitée aux zones proches des centres industriels ; mais depuis une trentaine d'années, afin de réduire les atteintes à la santé humaine dans ces zones, on a rehaussé les cheminées des

usines et des centrales électriques afin de permettre aux polluants de se diluer dans l'air sur de plus grandes distances. On assiste donc maintenant à une pollution moindre, mais généralisée, appelée pollution à longue distance ou « pollution transfrontières ». Certains phénomènes météorologiques provoquent d'ailleurs une retombée préférentielle de ces acides sur certaines régions.

Les anions  $\text{NO}_3^-$  et  $\text{SO}_4^{--}$  ne sont pas libérés sous cette forme par les combustions, mais sous forme d'oxydes d'azote (NO surtout) et d'anhydride sulfureux  $\text{SO}_2$ . Il est émis ainsi chaque année en France 2,5 millions de tonnes de  $\text{SO}_2$  et 1,3 million de tonnes d'oxydes d'azote. Dans l'ensemble de l'hémisphère Nord, l'émission anthropogénique de  $\text{SO}_2$  atteint près de 200 millions de tonnes par an, à l'échelle mondiale 228 millions de tonnes, contre une émission de 328 millions de tonnes par les phénomènes naturels (Nguyen et Servant, 1984). Par des processus incomplètement connus, sous l'influence de l'oxygène de l'air, de molécules organiques, des radiations solaires, ils s'oxydent en donnant des composés azotés plus oxydés, désignés globalement par  $\text{NO}_x$  (dont  $\text{NO}_2$ ), et  $\text{SO}_3$ , qui, au contact de radicaux  $\text{OH}^-$  ou de l'humidité atmosphérique, engendrent les acides  $\text{HNO}_3$  et  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Mais ces phénomènes sont progressifs et fonction des conditions atmosphériques. En l'absence de pluie ou de nuages, l'air peut contenir  $\text{SO}_2$  ou  $\text{NO}_x$  sur de longues distances. Ces corps peuvent agir directement sous forme gazeuse, se piégeant à la surface des végétaux (dépôts secs), ou se transformer plus ou moins complètement en acides dans de fines gouttelettes d'eau (aérosols) ou dans les brouillards, et se déposer sur les surfaces foliaires. Leur contact avec les feuilles est ainsi très intime et c'est probablement sous cette forme que leur action est la plus nocive, car leur concentration dans les aérosols ou dans les films d'eau déposés sur les feuilles par les brouillards est bien plus forte que dans l'eau de pluie. Il ne semble pas rare que les brouillards aient un pH de 2,5 ou même de 2,3 (acide de concentration N/200 à N/300). De plus, cette acidité doit encore augmenter quand les gouttelettes s'évaporent sous l'action du soleil, alors que, généralement, l'acidité des pluies décroît au cours des averses et que les feuilles, d'abord touchées par une pluie acide, se trouvent ensuite lavées par une eau moins chargée en protons.

Enfin, sous l'influence de certaines molécules d'hydrocarbures et des radiations ultraviolettes, les oxydes d'azote peuvent oxyder l'oxygène de l'air en ozone  $\text{O}_3$ , plus ou moins instable et capable de réoxyder lui-même des oxydes d'azote. De même peut se former le nitrate de peroxyacétyl, fortement oxydant (Lehringer, 1984), et même de l'eau oxygénée  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Enfin un combiné de dioxyde de soufre et d'oxyde d'azote, l'acide nitrosulfureux, pourrait se former et avoir une action toxique par temps humide et frais (Freier et Beetj).

Il est également certain que l'air transporte des molécules d'hydrocarbures plus ou moins toxiques.

On voit donc que les agressions auxquelles sont soumis les feuillages sont complexes et variées : si les pluies acides *stricto sensu* peuvent être très nuisibles à la vie biologique dans les lacs, elles ne le sont sans doute que faiblement vis-à-vis des feuillages. Il en va tout autrement des dépôts secs et des brouillards, beaucoup plus acides et qui possèdent en outre un fort pouvoir oxydant.

A cause de l'intervention des radiations solaires dans leur genèse, les oxydes d'azote, l'ozone, le nitrate de peroxyacétyl sont désignés sous le terme d'ensemble de **photooxydants**.

L'action directe de ces substances acides et oxydantes revêtirait, en gros, deux aspects :

— Agissant au niveau des stomates, elles pourraient perturber la régulation stomatique. Mais les choses ne sont pas simples ; des expérimentations en conditions contrôlées ont montré par exemple que, suivant les végétaux et les concentrations,  $\text{SO}_2$  agit, soit en inhibant, soit en exagérant la fermeture des stomates, d'où des effets variés sur la transpiration et la photosynthèse, les modifications de cette dernière réagissant sur la rhizogénèse et la mycorhization et donc, à nouveau sur l'économie de l'eau. Lorsque deux substances agissent ensemble, leurs actions peuvent, suivant les circonstances et les concentrations, être synergiques (effet polluant augmenté) ou antagonistes.

— L'action oxydante des polluants conduit à une destruction partielle de la cuticule des feuilles, mais aussi, après pénétration dans le tissu chlorophyllien par les stomates ou la cuticule endommagée,

à la destruction des parois cellulaires, puis à celle des thylacoïdes (éléments internes des chloroplastes). L'activité physiologique, et notamment la photosynthèse, se trouvent diminuées (Lehringer, 1984). La voie est aussi préparée pour la pénétration des acides qui peuvent échanger leurs protons avec des éléments nutritifs, notamment le calcium des membranes cellulaires, le magnésium et le potassium, le zinc, le manganèse des vacuoles. Ces éléments essentiels se trouvent ainsi évacués vers l'extérieur de la feuille. Si le flux de sève ne les remplace pas suffisamment vite et complètement, il se crée ainsi dans les cellules un véritable déséquilibre chimique qui pourrait conduire au développement de symptômes de carence (jaunissements correspondant à la carence magnésienne ou potassique), et surtout à la destruction des chloroplastes par déséquilibre ionique, surtout dans les feuillages fortement éclairés. La photodestruction de la chlorophylle est un phénomène qui a été évoqué il y a longtemps déjà par Laatsch (1967) chez des arbres en situation de carences nutritives et de fort éclaircissement (régions méditerranéennes, zones d'altitude élevée).

● *Effets indirects des polluants*

Il s'agit ici de l'effet par l'intermédiaire du sol, et cette fois c'est bien l'acidité qui jouerait, mais davantage l'acidité totale reçue par le sol (quantité de protons par hectare) que la concentration dans l'eau de pluie. Cependant l'expression « pluies acides » reste impropre car les acides déposés sur les feuillages et à la surface du sol par les aérosols, les brouillards et les dépôts secs sont sources d'acidité supplémentaire par rapport à celle de la pluie proprement dite.

Les ions  $H^+$  qui pénètrent dans le sol sont neutralisés par les cations (Ca, K, Mg) que contient ce dernier, en premier lieu par le calcium et le magnésium des calcaires si le sol est carbonaté. Si le sol est décarbonaté, ce sont les cations à l'état échangeable qui neutralisent les ions  $H^+$  : le complexe absorbant se désature progressivement, le sol devient de plus en plus acide, le prélèvement des éléments nutritifs K, Ca, Mg devient plus difficile. A partir d'une certaine acidité, au-dessous de pH 4,5 environ, les ions alcalins et alcalinoterreux ne suffisent plus à compenser l'acidité due aux protons ; les hydroxydes d'aluminium et les réseaux cristallins des argiles sont attaqués, et il y a alors libération d' $Al^{+++}$  et  $Mn^{++}$ . C'est la phase « tampon-aluminium » (Ulrich, 1984). Ces deux ions, l'aluminium en particulier, peuvent à partir d'une certaine concentration devenir toxiques, soit directement pour les racines, soit pour la microflore rhizosphérique. L'aluminium est à l'origine d'une difficulté d'alimentation des plantes en phosphate et engendrerait des malformations des jeunes racines et de leurs tissus conducteurs. Cette toxicité aluminique a été mise en évidence à diverses reprises, dans les sols tropicaux surtout, mais aussi en milieu tempéré, sur le Pin maritime par exemple (Juste, 1966) ou le Pin sylvestre (Krolikowski et Ciok, 1967), mais à des teneurs relativement élevées (50 mg par litre de solution). Toutefois, récemment, Tischner et al., (1983) ont trouvé un effet néfaste de doses plus faibles (15 mg/litre) sur de très jeunes semis d'Epicéa élevés en solution nutritive.

**Causes écologiques ou biotiques**

La sécheresse de 1976, et peut-être des sécheresses antérieures (1959), ont probablement, dans certains sols au moins, provoqué un grave déséquilibre physiologique chez différentes espèces. Le dépérissement du Chêne pédonculé en forêt de Tronçais en est un exemple qui nous enseigne aussi que les effets peuvent n'apparaître que plusieurs années après la cause. Il y a d'ailleurs des analogies entre les symptômes observés sur le Chêne et ceux qui ont été notés en Allemagne sur le Sapin au début des années soixante-dix, et plus récemment sur le Hêtre dans le canton de Bâle : nécroses et pourritures de racines, envahissement par l'Armillaire agissant en parasite secondaire.

On peut imaginer que les tissus racinaires se trouvent lésés par le manque d'eau ou par effet mécanique provoqué par le retrait du sol, et que ces lésions constituent des portes d'entrée pour des parasites en même temps qu'elles rendent plus difficiles l'alimentation en eau et en éléments nutritifs ; dès lors, l'arbre réagit insuffisamment contre les parasites et un processus régressif, progressivement accéléré, peut s'enclencher, surtout si les conditions climatiques ou édaphiques locales sont difficiles.

Certains auteurs ont aussi évoqué d'autres accidents écologiques : gels, coups de vent, qui seraient également la cause première de lésions tissulaires.

Enfin, on met parfois en cause, sans aucune vraisemblance, des effets de la sylviculture : monocultures résineuses, éclaircies insuffisantes, etc.

Jusqu'à présent, il n'a été découvert aucun parasite primaire susceptible de provoquer le dépérissement actuel. Des bactéries existent dans les zones pourries des racines ou les « noyaux humides » du tronc, l'Armillaire devient franchement parasite sur certains arbres, mais on considère que ce sont des conséquences et non des causes du dépérissement. Il faudrait d'ailleurs que le parasite nouveau éventuellement incriminé rende compte de la grande diversité des essences atteintes. Cependant, des travaux allemands ont été entrepris, et continuent, sur ce thème, en incluant des investigations sur l'intervention éventuelle de virus, de mycoplasmes, ou de nématodes.

### Arguments pour ou contre les hypothèses avancées

Si l'idée d'une influence de la pollution atmosphérique est généralement émise, cela a été, au début, basé davantage sur des considérations indirectes que sur des preuves expérimentales rigoureuses. En premier lieu les symptômes, notamment les pertes d'aiguilles, sont semblables à ceux qu'on observe dans des zones manifestement très polluées sous le vent direct de certaines grosses concentrations industrielles. Le phénomène du dépérissement semble avoir débuté en Europe centrale et avoir gagné progressivement vers l'ouest, atteignant la Bavière, puis le Bade-Würtemberg et la Suisse, puis les Vosges. Or, c'est aussi le sens d'un gradient décroissant des retombées de  $\text{SO}_2$  d'origine anthropogénique (5 g de S par  $\text{m}^2$  et par an sur l'Allemagne de l'Est, l'Ouest de la Pologne, le Nord de la Tchécoslovaquie, 3 g sur la frontière Nord de la France et le Sud de l'Allemagne Fédérale, 2 g sur le Bassin Parisien, l'Est de la France, l'Ouest de la Suisse et l'Italie du Nord) (figure 1, Masnière et al., 1984).

Expérimentalement Th. Keller (1983), en soumettant de jeunes épicéas à une pollution soufrée, puis à un lessivage par l'eau, a reproduit la perte de magnésium observée sur les peuplements dépérissants en conditions naturelles.

Plus récemment, en Forêt-Noire, sur une ligne recoupant d'ouest en est ce massif, on a trouvé, par des mesures périodiques de  $\text{SO}_2$ , un parallélisme entre la concentration moyenne de ce gaz dans l'air et l'intensité des dégâts observés (Moosmayer, 1984 a).

Des mesures précises effectuées en Bavière du Nord par l'Université de Bayreuth (Prof. Zech, communication personnelle) ont montré que la cuticule des arbres malades est réellement plus mince que celle des arbres sains (cause ou conséquence ?), et que les arbres malades ne réduisent pas leur transpiration à midi, au contraire des sains, mais la réduisent le soir (effet de l'ozone plus abondant en milieu de journée ?). Des résultats analogues ont été obtenus à Bâle (Flückiger et Flückiger-Keller, 1984).

Des analyses foliaires effectuées en Suisse suivant un quadrillage systématique de 1 km  $\times$  1 km (2 arbres par point étudié) ont montré une bonne superposition entre les cartes des teneurs des aiguilles de Sapin et d'Epicéa en soufre, chlore et fluor, et celle des pertes d'aiguilles (Bucher et al., 1984). Par contre, en Forêt-Noire, on n'a pas trouvé de relations entre ces trois polluants et le dépérissement qui semble plutôt lié à de faibles teneurs des aiguilles en calcium, magnésium, et secondairement, en zinc (Zöttl et Mies, 1983 b). Cela veut-il dire que les observations suisses sont plus en relation avec une pollution par des sites industriels locaux et les résultats allemands avec la pollution transfrontière plus diffuse ?

En Allemagne, dans certaines stations de la Forêt-Noire, les dégâts sont très nets bien que la pollution de l'air par le dioxyde de soufre soit faible : 15 microgrammes/ $\text{m}^3$  en moyenne (Zöttl, communication personnelle), ce qui est inférieur aux seuils de toxicité de  $\text{SO}_2$  retenus par l'I.U.F.R.O. (50 microgram-

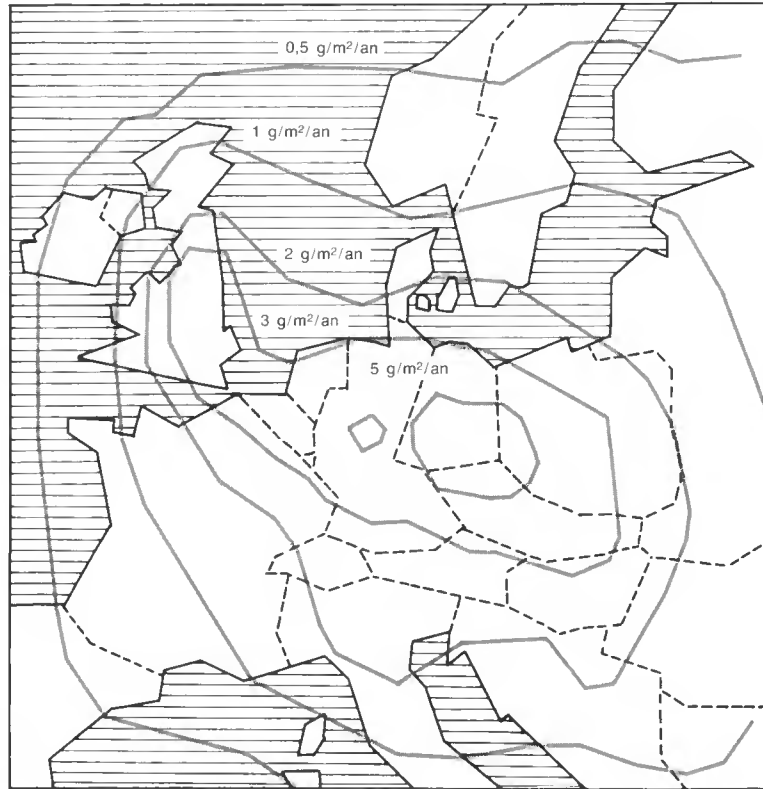


Figure 1 : DÉPÔT SEC DE SOUFRE D'ORIGINE ANTHROPIQUE POUR L'ANNÉE 1980 EN EUROPE.

mes/m<sup>3</sup> en station normale et 25 microgrammes en moyenne annuelle, pour les stations écologiquement difficiles). Les dégâts constatés sont aussi forts qu'en Bavière du Nord où la teneur moyenne de l'air en SO<sub>2</sub> atteint 70 microgrammes/m<sup>3</sup>. S'agit-il alors en Forêt-Noire d'autres polluants (NO<sub>x</sub>, O<sub>3</sub>) ? Ces questions restent actuellement sans réponse. Ces remarques suggèrent fortement en tout cas que, si la pollution atmosphérique joue un rôle, les polluants sont divers d'un endroit à l'autre et sans doute d'un moment à l'autre. On sait que certaines pointes journalières peuvent atteindre 10 fois la valeur moyenne : dans de nombreuses stations de mesures allemandes, il existe des pics de SO<sub>2</sub> dépassant largement les pointes tolérables selon les normes de l'I.U.F.R.O. : 50 et 100 microgrammes suivant la fertilité des stations, en moyenne journalière (Rehfuess, 1983).

D'après Rehfuess (1983 b), la fréquence plus grande des dégâts à des altitudes relativement élevées suggère une action particulière de l'ozone qui s'accumule la nuit au-dessus des niveaux d'inversion de la température qui empêchent les polluants réducteurs, qui pourraient détruire l'ozone, de remonter des vallées.

Ainsi les stations d'altitude connaîtraient, la nuit et en début de journée, de fortes concentrations de O<sub>3</sub>, particulièrement au cours d'étés chauds et lumineux tels que 1976 et 1983. En Bavière, on a noté des teneurs moyennes horaires de l'air en ozone de 200 à 360 microgrammes/m<sup>3</sup> pendant l'été 1982 pour une moyenne annuelle de 20 microgrammes (Rehfuess, 1983 b). Nos collègues allemands considèrent maintenant comme certain, sur la base de résultats expérimentaux obtenus aux Etats-Unis, que les taches blanches sont spécifiques des dégâts d'ozone (forte intensité et courte durée), et que les jaunissements correspondent également à un effet de ce gaz, mais agissant plus longtemps à concentration plus faible (Hüttl, communication personnelle). Flückiger et Flückiger-Keller ont déjà affirmé au début de 1984 la correspondance entre taches blanches et dégâts d'ozone sur

le Sycomore et le Hêtre. Un rôle direct des photooxydants dans les jaunissements et blanchiments est donc très probable à l'heure actuelle ; il n'est pas en contradiction avec l'effet d'années sèches et ensoleillées puisque de telles conditions climatiques sont favorables à la production de  $O_3$  à partir de  $NO_2$ .

En France on ne dispose, en zone forestière, ou même rurale, que de très peu de renseignements sur la composition de l'air. Les données sont presque nulles dans les Vosges, mais les quelques résultats connus (M<sup>me</sup> Livertoux, communication personnelle) ne montrent qu'une très faible charge de l'air en  $SO_2$ . Par contre il existe, pour l'ensemble du pays, un réseau de mesures de la composition des pluies. Les résultats des dix dernières années (Hennequin et al., 1984) montrent clairement que les pluies sont plus acides à l'est qu'à l'ouest. Ainsi 70 % des pluies ont un pH de 4,5 à 5,7 à Rostrenen, en Bretagne, contre 4 à 4,9 à Phalsbourg.

Cependant, l'examen des résultats de 1977 à 1983 ne montre pas de tendance à l'augmentation de l'acidité globale ; par contre, la contribution des nitrates à cette acidité semble augmenter, tandis que celle des sulfates diminue. Ceci va dans le sens indiqué plus haut : la responsabilité des dégâts incomberait davantage aux photooxydants qu'aux émissions soufrées qui, elles, tendent à diminuer (stagnation de l'activité industrielle, meilleure épuration des combustibles et des fumées, proportion croissante de l'électricité d'origine nucléaire). L'augmentation de la circulation automobile pourrait être en partie responsable de cet accroissement de la pollution par les oxydes d'azote.

L'hypothèse d'une toxicité de l'aluminium du sol n'a à l'heure actuelle que peu de partisans. Elle est rejetée par bon nombre de chercheurs allemands et américains sur la base de plusieurs arguments : la répartition des dégâts n'a jamais pu être mise en corrélation avec la teneur du sol en aluminium échangeable (en Forêt-Noire, il y a parfois même coïncidence entre des sols riches en cet élément et des peuplements très productifs) ; la nutrition phosphatée des peuplements malades reste généralement bonne, ce qui est en contradiction avec une toxicité aluminique (Zöttl, 1984). Cette hypothèse ne peut pas toutefois être totalement rejetée car le pH de certains sols a atteint des valeurs très basses.

En faveur de causes écologiques naturelles, on notera que la sécheresse de 1976 s'est probablement fait sentir davantage sur les crêtes et les sommets où les sols sont plus superficiels, plus caillouteux et ont donc de moins bonnes réserves en eau et où l'on observe actuellement le maximum de dommages. L'observation d'épicéas très atteints dans des stations habituellement très humides ne contredit pas cette explication.

Mais, contre cette hypothèse, on doit faire remarquer que sur les résineux des Vosges, contrairement à ce qui s'est passé pour les chênes du Centre de la France, on a vu en 1977 des mortalités nettes qui ne se sont pas renouvelées l'année suivante (Saillet, communication personnelle). Cependant, c'est au cours de l'été 1983, chaud et sec, que certains peuplements ont jauni et c'est dès l'année suivante que ce jaunissement s'est largement répandu.

Contre un effet prépondérant de la sécheresse de 1976, on doit faire remarquer que les forestiers allemands considéraient la situation comme grave dès 1975 (Moosmayer, 1984 b) ; en Bavière du Nord, dans la région de Kronach, 50 % des sapins sont morts entre 1972 et 1976. Dans les Vosges, il existe des sapinières très dépérissantes sur des sols profonds à texture équilibrée (près du col du Donon par exemple).

Il est intéressant de remarquer également que les jaunissements n'apparaissent pas au hasard : ils sont fréquents au-dessus de 800 m même sur des sols riches (sur granite des crêtes), mais apparaissent surtout, à des altitudes inférieures, dans des zones qui étaient déjà connues, avant que le dépérissement ne se manifeste, pour leur faible fertilité magnésienne : des essais de l'A.F.O.C.E.L. avaient mis en évidence, dès la fin des années soixante, des carences magnésiennes au col du Donon ; la nutrition en magnésium du Sapin sur grès intermédiaire (Crêtes de Mortagne) avait déjà été signalée comme insuffisante par Vallée (1967). En Forêt-Noire également, les jaunissements les plus typiques coïncident avec les granites les plus pauvres (Zöttl et Mies, 1983 a).

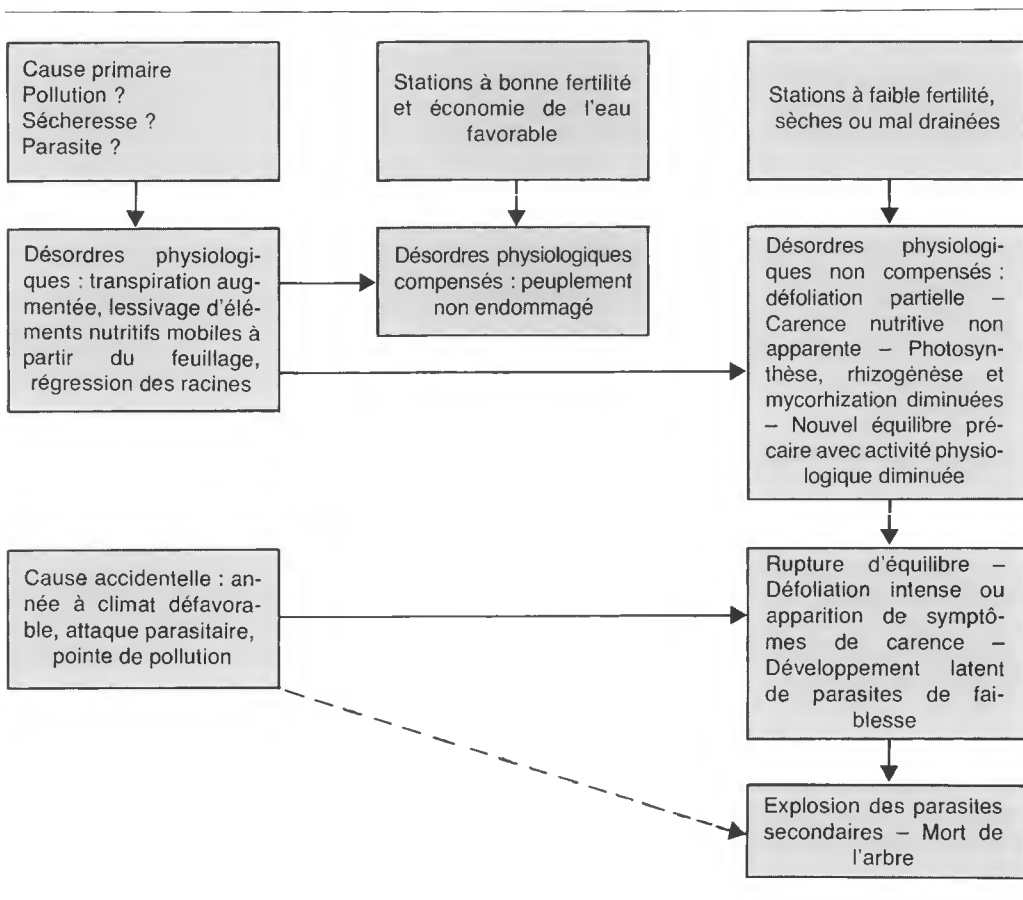
## Le dépérissement des forêts dans le Massif vosgien : relations possibles avec la pollution atmosphérique

Il est donc vraisemblable que les deux grandes catégories de facteurs entrent en jeu pour provoquer le dépérissement et que, à l'intérieur de chacun de ces groupes, ce sont, suivant les endroits, des polluants divers et des facteurs écologiques différents qui agissent à des degrés divers, donnant des symptômes variés.

En ce qui concerne les jaunissements, l'hypothèse des dégâts d'ozone semble à retenir. Ce polluant diminuerait la photosynthèse, et favoriserait le lessivage des éléments les plus mobiles : magnésium, manganèse, zinc, potassium. Ainsi se créerait sur les sols insuffisamment riches pour que ce lessivage soit compensé par l'absorption racinaire, une situation de subcarence affaiblissant progressivement l'arbre. Dans les cas les plus graves, sur les sols les plus pauvres, cette carence serait suffisamment prononcée pour s'exprimer par des symptômes extérieurs de décoloration, différents suivant l'élément concerné. Il semble d'ailleurs prouvé expérimentalement que les végétaux mal nourris sont plus sensibles aux dégâts d'ozone. En somme, une pollution par  $O_3$  serait généralisée à l'heure actuelle et jouerait comme un révélateur de zones peu fertiles.

Il est moins probable que l'ozone soit responsable de pertes d'aiguilles sans jaunissement préalable. Mais un cheminement du même type peut être possible.

On peut imaginer, d'une manière générale, le schéma ci-après ; il montre que l'hypothèse de dégâts par pollution atmosphérique d'une part et, d'autre part, l'observation de relations entre dommages et causes écologiques permanentes ou temporaires ne sont pas incompatibles.



## REMÈDES POSSIBLES

Devant la menace de dépérissement qui pèse sur de grandes surfaces forestières, les responsables de leur gestion se sentent assez démunis. Ils estiment indispensable, d'abord, de s'attaquer aux causes en obtenant une réduction rapide et significative des sources polluantes. Sinon ils craignent de perdre rapidement la maîtrise de la situation. Le temps de latence avant renversement de la situation risque de toute façon d'être relativement long.

Les pollutions affaiblissent les réactions de défense biotique des arbres face aux situations de stress, et il convient donc par ailleurs d'augmenter si possible leur résistance aux facteurs contraires. La marge d'action sylvicole paraît étroite, mais des preuves existent d'une liaison serrée entre le dépérissement et certaines caractéristiques édaphiques défavorables. Les arbres bien alimentés résistent mieux aux facteurs adverses comme la pollution ou les conditions climatiques difficiles.

### Dépollution

Les mesures à prendre pour réduire les émissions polluantes, parmi lesquels  $\text{SO}_2^-$ ,  $\text{NO}_x$ , l'ozone, les hydrocarbures se situent au tout premier plan, sont connues des spécialistes et des pouvoirs publics. Il s'agit d'abord de mesures préventives, ensuite de mesures curatives.

Les émissions de dioxyde de soufre, en provenance surtout des centrales thermiques et de l'industrie, sont dans la plupart des régions, ou stables, ou en légère diminution ; par contre, celles des autres polluants ont augmenté au cours des dernières années presque partout dans des proportions considérables. Suivant les auteurs, 50 à 80 % des oxydes d'azote et environ 75 % des hydrocarbures proviennent de la circulation routière. Les remèdes sont connus : réduction de la circulation des véhicules à moteur thermique avec amélioration des transports en commun, abaissement des vitesses maxima, réalisation de meilleures conditions de carburation, traitement des gaz d'échappement (par exemple échappements à catalyseurs, ce qui suppose l'utilisation d'essence sans plomb tétraéthyle).

Ces mesures à prendre par les hommes politiques sont impopulaires et il n'est pas sûr que les consommateurs, même s'ils sont conscients des menaces graves qui pèsent sur la forêt, soient disposés à renoncer partiellement aux facilités de déplacement en voiture et aux grandes vitesses, ou à payer un surcoût à l'achat d'une voiture neuve de près de 4 000 F pour un système de dépollution à catalyseurs.

Le Conseil fédéral suisse a estimé que le dépérissement des forêts pouvait être lié à la pollution atmosphérique et, en conséquence, a décidé d'abaisser, à partir de janvier 1985 et pour une période d'essai de 3 ans, la vitesse maxima de 100 à 80 km/h sur route et de 130 à 120 km/h sur autoroute. Le Gouvernement allemand impose de même à partir de janvier 1989 aux producteurs d'automobiles un système catalytique de dépollution des gaz d'échappement. Il envisage également d'abaisser dans les prochains temps les vitesses maxima sur route et autoroute. La Commission des Communautés européennes propose (et la majorité des gouvernements est d'accord) de réaliser pour 1989 un abaissement des émissions par les automobiles des hydrocarbures imbrûlés et des oxydes d'azote de 64 % par rapport au niveau de 1970 (1989 : tous les nouveaux types ; 1991 : tous les véhicules neufs), les normes autorisées étant définies par véhicule et par kilomètre, donc indépendantes de la cylindrée.

Les méthodes pour réduire les émissions de  $\text{SO}_2$  par un meilleur raffinage des fuels domestiques (moins de 0,15 % S) ou l'adjonction de filtres à gaz aux chaudières des centrales thermiques et des grandes usines sont connues, et souvent déjà utilisées. Là où cela n'est pas encore le cas, il faut espérer que des solutions puissent rapidement être trouvées, qui soient acceptables du point de vue économique et écologique. Les gaz peuvent par exemple être débarrassés par un procédé électro-



## **Le dépérissement des forêts dans le Massif vosgien : relations possibles avec la pollution atmosphérique**

statique des particules solides, puis refroidis, humidifiés à la vapeur et envoyés dans un réacteur où les oxydes sont ionisés, transformés en acide et, dans certains cas par addition d'ammoniac, en nitrate ou en sulfate d'ammonium.

D'après H.P. Burkhard (1984), la dépollution des gaz d'échappement augmenterait le coût d'utilisation annuel d'une voiture de 350 à 700 F, et celle du fuel domestique ferait croître le coût annuel du chauffage de 75 à 115 F par tonne pour une diminution du taux de soufre de 0,30 à 0,15 %.

### **Résistance des arbres**

On admet généralement que, pour être efficaces, les mesures de dépollution devront être prises au niveau international et qu'elles ne pourront de toute façon pas avoir un effet immédiat. En attendant une diminution significative des teneurs atmosphériques en substances toxiques, le forestier peut envisager de renforcer la résistance des arbres vis-à-vis des facteurs de stress comme la pollution atmosphérique, la sécheresse, le gel et les parasites en améliorant leur alimentation cationique.

Baule et Fricker (1968) donnent déjà des exemples de l'action favorable d'une alimentation équilibrée sur la résistance des arbres à la pollution atmosphérique, à la sécheresse, au gel, aux maladies et aux parasites.

H.W. Zöttl et E. Mies de la Faculté forestière de Fribourg (1983 b) ont noté que les épicéas sur sols bien pourvus en bases étaient en mesure de compenser une pollution relativement faible ; celle-ci n'affaiblissait les arbres et ne les faisait dépérir que dans les stations les plus pauvres. Par contre, lorsque la pollution était très importante, les épicéas n'étaient plus en mesure de résister aux produits toxiques, même sur sols bien pourvus en cations.

La pollution atmosphérique a une influence directe défavorable, d'abord sur la teneur en calcium des sols et sur l'absorption d'autres éléments minéraux par les racines, ensuite sur les feuilles et les aiguilles dont le fonctionnement physiologique est dérégulé ; à un niveau élevé, elle peut en effet détériorer la cuticule et la structure des cellules du parenchyme, provoquer ainsi un lessivage des électrolytes et une perturbation de la photosynthèse et de l'économie de l'eau. Pour K.E. Rehfuess (1983 a), cette détérioration peut également être un effet indirect dû à une moindre résistance au gel. Dans les stations où la composition et la profondeur du sol permettent aux arbres de remplacer les électrolytes perdus, les dommages restent en général limités ; par contre en sol pauvre, particulièrement en Mg, K, Ca, la « maladie » peut se développer de façon particulièrement brutale.

Des signes de carence apparaissent qui peuvent varier d'une station à l'autre, en fonction de l'élément jouant le rôle de facteur limitant. D'après les études disponibles, il s'agit très souvent du magnésium (Mg), accompagné quelquefois du potassium (K), du zinc (Zn), du manganèse (Mn)...

Magnésium et potassium, présents dans les plantes en quantité importante, sont très mobiles et jouent un rôle important en physiologie végétale. Ils interviennent directement dans la photosynthèse, activent de nombreux processus enzymatiques et sont responsables au premier chef du maintien du potentiel osmotique faible des cellules radiculaires, permettant ainsi une bonne absorption de l'eau du sol (Blanchet et al., 1962). On sait que l'ouverture des stomates et la photosynthèse dépendent de la turgescence des cellules de garde, qui est sous la dépendance du transport spécifique de K des cellules voisines vers elles. Par ailleurs, une concentration élevée en K des cellules du mésophylle foliaire diminue leur potentiel hydrique et ralentit la perte d'eau par évaporation (Zech et al., 1971).

Le Dr Klein de l'Université de Munich a trouvé que les épicéas résistaient davantage à la sécheresse lorsque la teneur en K des aiguilles d'un an était proche de l'optimum au début de la période sèche. Il considère que la pollution a moins de prise sur de tels arbres, essentiellement parce que leur économie de l'eau est moins perturbée.

Des essais anciens et récents montrent concrètement que l'apport de Mg et de K a un effet sur la résistance des arbres aux facteurs de pollution. Nous en donnerons deux exemples. A Lutterberg, près de Göppingen, les parcelles d'épicéas d'une soixantaine d'années ayant reçu entre 1962 et 1965, en plus d'une fumure NP (azote et phosphore), deux ou quatre apports de 6 q/ha de Patentkali <sup>(1)</sup> sont très nettement moins touchées que les parcelles NP (Baule, 1984).

Pour enrayer la mortalité importante des sapins, les forestiers de Kronach en Bavière pratiquent depuis plusieurs années la fertilisation individuelle des sapins adultes restants, fortement touchés par une pollution à base de dioxyde de soufre (Zech, 1983). Ils ont réussi à les revitaliser et à les sauver du dépérissement, en apportant pendant trois années successives 10 à 15 kg de Patentkali <sup>(1)</sup> par arbre. L'analyse foliaire montre une absorption accrue de Mg (0,15 % contre 0,02 %), de K (0,58 % contre 0,25 %), de Mn (598 ppm contre 216) et de Zn (28 contre 15 ppm).

En Allemagne Fédérale, où l'on considère qu'un tiers des arbres forestiers sont « malades », les forestiers fertilisent cette année quelque 100 000 hectares pour les protéger contre le dépérissement. Dans des essais en très grandes parcelles, ils testent, selon les stations et les déficiences reconnues, l'action séparée ou conjointe des trois principaux éléments en cause : Ca, Mg et K sur la résistance d'arbres peu touchés, ainsi que sur celle de peuplements déjà sensiblement affaiblis surtout lorsqu'ils sont au stade de la régénération. Ils excluent de ces traitements les surfaces les plus dégradées, à peuplements clairsemés, pour lesquelles le dépérissement semble irréversible.

En ce qui concerne l'apport d'amendements calcaires, il faut noter qu'il accélère la minéralisation de l'humus et peut dans le cas de doses trop importantes, supérieures à 3 t/ha de carbonate, favoriser les pertes d'azote vers les nappes.

Pour les autres éléments, les produits solubles apparaissent dans les premiers essais plus efficaces à court et moyen terme. Il faudra néanmoins suivre de près les résultats des essais comparatifs de formes (produits), pour en particulier savoir si l'action du magnésium soluble ne pourrait pas être prolongée dans le temps par des apports de substances moins rapidement disponibles tels que les calcaires magnésiens.

L'épandage d'engrais ou d'amendement en forêt est effectué généralement par des engins 4 × 4 équipés d'une trémie et d'une soufflerie permettant la projection du produit pulvérulent sur une trentaine de mètres en sol à peu près plat.

L'intérêt économique d'un tel traitement peut dans certains cas être discutable. Nous pensons aux forêts les moins productives dont l'exploitation devrait probablement rester extensive, avec le risque il est vrai, de voir maladie et parasitisme s'y développer en profitant de la misère physiologique des arbres.

## CONCLUSIONS

Les études effectuées au cours des dernières années dans différents pays ont mis en évidence des relations étroites, très certainement de cause à effet, entre la pollution atmosphérique et le dépérissement de grandes surfaces forestières. Les facteurs polluants varient selon les endroits et les saisons, et leur mode d'action isolé ou conjugué peut revêtir différentes formes, en rapport avec des facteurs édaphiques, climatiques et même biotiques défavorables.

(1) Il s'agit d'un sulfate double, naturel du potassium et du magnésium, titrant 30 % K<sub>2</sub>O et 10 % MgO.



**Essai de fertilisation de Lutterberg.**

En haut, aspect du peuplement témoin : épicéas de 80 ans ayant subi de fortes pertes d'aiguilles.

En bas, à gauche, peuplement d'épicéas de 78 ans ayant reçu il y a 20 ans une fertilisation N + P.

En bas, à droite, peuplement du même âge qui a reçu une fertilisation NPK Mg.

*Photos H. BAULE*

L'ampleur des dégâts sur certains sites vosgiens et sur des stations voisines au point de vue écologique de la Forêt-Noire nous pousse à être extrêmement vigilants face à un phénomène très complexe qui ouvre à la recherche un champ très vaste. Il est nécessaire de ne pas se contenter de conclusions quelque peu hâtives et d'accumuler dans les prochains temps le maximum de données relatives au processus de dépérissement : mesures du niveau des polluants, minéraux et organiques, dans un aussi grand nombre de sites que possible, études de sols et mises en places d'essais de fertilisation en grandes parcelles, surveillance sévère de nombreuses parcelles-témoins, études en milieu contrôlé de l'action des principaux polluants et de leurs interactions entre eux et avec les radiations U.V. surtout au niveau physiologique et biochimique, analyse des autres facteurs climatiques pouvant favoriser une élévation du niveau des polluants.

Un programme de recherches intitulé « DEFORPA » se met en place actuellement en France. Le ministère de l'Environnement en est le maître d'œuvre, mais de nombreux organismes doivent y participer : Office national des Forêts, Inventaire forestier national, Direction des Forêts, Recherche agronomique, Météorologie nationale, Centre national de la Recherche scientifique, Universités, Institut de Recherches de Chimie appliquée, C.E.A., Association pour la Surveillance de la Pollution atmosphérique en Alsace, Laboratoire de la pollution du département des Pyrénées-Atlantiques,... Il est impossible d'en donner les détails en quelques lignes. On peut cependant préciser qu'il doit embrasser les grands domaines de préoccupation évoqués plus haut : observation des symptômes (évolution et extension géographique) au sol et par télédétection ; phénomènes au niveau du sol (aluminium dans les solutions du sol, perte de cations sous l'influence de l'acidité, incidence sur le niveau de nutrition minérale, essais de correction par fertilisation) ; transport, modifications physico-chimiques en cours de transport et dépôts des polluants en liaison avec les événements météorologiques ; mesure à faible pas de temps (30 minutes) de la teneur de l'air en polluants ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{O}_3$ , oxydes d'azote) et de la composition moyenne hebdomadaire ou bihebdomadaire des pluies dans quelques stations des Vosges ; expérimentation de l'effet de doses déterminées et bien contrôlées de polluants ou de mélange de polluants sous forme de gaz ou d'aérosols ; investigations physiologiques et biochimiques détaillées sur de jeunes arbres élevés en conditions de pollution contrôlée.

On doit remarquer que les véritables « preuves » seront difficiles à apporter car on ne peut expérimenter que sur des arbres de petite taille, donc jeunes, alors que les observations de terrain montrent qu'ils sont moins sensibles. Il est par ailleurs difficile de reproduire expérimentalement les contraintes écologiques ou climatiques qui interagissent avec les polluants ; enfin, toute expérimentation, avec des doses élevées de polluants pendant des temps courts risque de provoquer des réactions symptomatologiques et physiologiques différentes de celles qui se produisent réellement dans la nature.

Un des points urgents est d'acquérir des données, qui manquent presque totalement à l'heure actuelle, sur le niveau de la pollution atmosphérique dans les Vosges.

Dès à présent, il est urgent, car « la forêt d'ordinaire si patiente ne peut plus attendre », que soient réduites à la source toutes les formes de pollution. Ce ne sera pas facile. En attendant les premiers effets de ces mesures qui risquent de n'apparaître qu'après de nombreuses années, il est hautement souhaitable de sauver le plus possible de forêts légèrement atteintes, d'augmenter leur vitalité et leur productivité en améliorant site après site leurs conditions de nutrition, en tenant compte des résultats des expérimentations et des contingences économiques.

M. BONNEAU

Station de Recherches sur les Sols forestiers et la fertilisation  
CENTRE NATIONAL DE RECHERCHES FORESTIÈRES (I.N.R.A.)  
CHAMPENOUX 54280 SEICHAMPS

C. FRICKER

Société Commerciale des  
Potasses et de l'Azote  
(S.C.P.A.)  
2, place du Général-de-Gaulle  
68053 MULHOUSE

## BIBLIOGRAPHIE

- BAULE (H.). — Forstpflanzenernährung und Walderkrankungen. — *Arbeitstechnisches Merkheft der Waldarbeit*, n° 48, 1984.
- BAULE (H.), FRICKER (C.). — La fertilisation des arbres forestiers. — München : B.L. Verlag, 1968.
- BLANCHET (R.), STUDER (R.), CHAUMONT (C.). — Quelques aspects des interactions entre l'alimentation potassique et l'alimentation hydrique des plantes. — *Annales Agronomiques*, vol. 13, n° 2, 1962, pp. 93-110.
- BOUVAREL (P.). — Dépérissement des forêts attribué à la pollution atmosphérique. Placettes permanentes de l'O.N.F. dans les Vosges. Analyse sommaire des notations de juin 1984. — *Rapport à diffusion limitée*. — Nancy : I.N.R.A., 1984.
- BUCHER (J.B.), KAUFMANN (E.), LANDOLT (W.). — Waldschäden in der Schweiz 1983 (I. Teil). Interpretation der Sanasilva. — Umfrage und der Fichtennadelanalysen aus der Sicht des forstlichen Immissionschutzes. — *Journal Forestier Suisse*, vol. 135, n° 4, 1984, pp. 271-287.
- BURKHARD (W.). — Besteht ein Zusammenhang zwischen künstlicher Radioaktivität und Waldsterben. — *Journal Forestier Suisse*, vol. 135, n° 4, 1984, pp.329-338.9
- EVERS (F.H.), KONING (E.), LIPPHARDT (M.), MULHAUSER (G.), STUMMER (G.), BERWIRG (W.). — Zwischenbericht der Arbeitsgruppe der Forstlichen Versuchs-und Forschungsanstalt (FVA) Baden-Württemberg. — *Allgemeine Forstzeitschrift*, n° 21, 1979, pp. 565-568.
- FLÜCKIGER (W.), FLÜCKIGER-KELLER (H.). — Untersuchungen über Waldschäden in der Nordwestschweiz. — *Journal Forestier Suisse*, vol. 135, n° 5, 1984, pp. 389-444.
- FREIER (B.K.), BEETZ (F.). — « Eine neue Waldsterben Hypothese ». — *Holz-Centralblatt*, vol. 111, n° 49-50, 1984, p. 727.
- HENNEQUIN (C.), HERVOUÉ (C.), BRUN (C.), CÉNAC (N.), CHEYMOL (D.), ZEPHORIS (M.). — La surveillance des retombées atmosphériques. — In « *Livre blanc sur les pluies acides. Première approche scientifique du problème en France* ». — Secrétariat d'Etat à l'Environnement et à la Qualité de la Vie, 1984.
- JUSTE (C.). — Contribution à l'étude de la dynamique de l'aluminium dans les sols acides du Sud-Ouest atlantique. Application à leur mise en valeur, deuxième partie. — *Annales Agronomiques*, vol. 17, n° 3, 1966, pp. 252-341.
- KELLER (Th.). — Ökophysiologische Folgen niedriger aber langdauernder SO<sub>2</sub>. — Konzentrationen für Waldbaugarten. — GSF-Bericht A3/83 München, 1983.
- KROLIKOWSKI (C.), CIOK (B.). — L'aluminium échangeable freine la croissance et le développement des semis de Pin sylvestre. — XIV<sup>e</sup> Congrès I.U.F.R.O., Munich, vol. 11, 1967, pp. 270-281.
- LAATSCH (W.). — Beziehungen zwischen Standortfaktoren, Ernährungszustand und der Wuchsleistung von Waldbeständen. — 1967.
- LEHRINGER (S.). — Entstehung und Wirkungsweise von photochemischen Oxidantien. — *Allgemeine Forstzeitung*, 1984, pp. 860-862.
- MASNIÈRE (P.), COLIN (J.L.), PINART (J.), VIE LE SAGE (R.). — Les processus de sédimentation. La mesure des dépôts secs et humides. — In « *Livre blanc sur les pluies acides. Première approche scientifique du problème en France* ». — Secrétariat d'Etat à l'Environnement et à la Qualité de la Vie, 1984.
- MIES (E.), ZÖTTL (H.W.). — Zeitliche Änderung der Chlorophyll- und Elementgehalt in den Nadeln eines gelbchlorotischen Fichtenbeständen. — *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, vol. 103, n° 1, 1984, pp. 1-16.
- MOOSMAYER (H.U.). — a) Erkenntnisse über die Walderkrankung. Dargestellt an Projekten der forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg. — *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, vol. 103, n° 1, 1984, pp. 1-16.
- MOOSMAYER (H.U.). — b) Conférence prononcée au Centenaire de l'Ecole Forestière des Barres. — Paris, 1984.
- NGUYEN (B.C.), SERVANT (J.). — Sources naturelles et sources anthropogéniques des polluants à l'origine de l'acidification des pluies. — In : « *Livre blanc sur les pluies acides. Première approche scientifique du problème en France* ». — Secrétariat d'Etat à l'Environnement et à la Qualité de la Vie, 1984.
- REHFUESS (K.E.). — a) Über die Fichtenerkrankungen in den Hochlagen des Bayerischen Waldes. — Forstliches Seminar ÖDB, Heft 5, 1983.
- REHFUESS (K.E.). — b) Walderkrankungen und Immissionen. Eine Zwischenbilanz. — *Allgemeine Forstzeitschrift*, n° 24, 1983, pp. 601-610.
- REHFUESS (K.E.), RODENKIRCHEN (H.). — Über die Nadelröte. Erkrankung der Fichte in Süddeutschland. — *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, vol. 103, n° 4/5, 1984, pp. 248-262.
- SAILLET (B.). — L'état sanitaire des forêts domaniales et communales d'Alsace en 1983-1984. — *Rapport à diffusion limitée*. — Strasbourg : Office national des Forêts, 1984.
- SCHÜTT (P.), KOCH (W.), BLASCHKE (H.), LANG (K.J.), SCHUCK (H.J.), SUMMERER (H.). — Avant que forêt ne meure. — Neuchâtel, Paris : Delachaux et Niestlé, 1983.

- TISCHNER (R.), KAISER (U.), HÜTTERMANN (A.). — Untersuchungen zum Einfluss von Aluminium Ionen auf das Wachstum von Fichtenkeimlingen in Abhängigkeit vom pH-Wert. — *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, vol. 102, n° 6, 1983.
- ULRICH (B.). — Ion cycle and forest ecosystem stability. State and change of forest Ecosystems. Indicators in current research/G.I. AGREN ed. swedish University of Agricultural Sciences, Department Ecology and Environmental Research. — *Report* n° 13, 1984, pp. 207-233.
- VALLÉE (G.). — Nouvelle contribution à l'étude du rôle de manganèse dans la régénération de la sapinière vosgienne. — Thèse Faculté des Sciences, Université Nancy I, 1967, 145 p.
- ZECH (W.), KOCH (W.), FRANZ (F.). — Nettoassimilation und Transpiration von Kiefern zweigen in Abhängigkeit von Kaliumversorgung und Lichtintensität. *Kalibriefe Fachgebiet 6*, 1 Folge, 1971.
- ZECH (W.). — Kann Magnesium immissionsgeschädigte Tannen retten ? — *Allgemeine Forstzeitschrift*, 5 mars 1983.
- ZÖTTL (H.W.), MIES (E.). — a) Die Fichtenerkrankung in Hochlagen des Südschwarzwaldes. — *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, vol. 154, n° 6-7, 1983, pp. 110-114.
- ZÖTTL (H.W.), MIES (E.). — b) Nährelementversorgung und Schadstoffbelastung von Fichtenökosystemen in Südschwarzwald unter Immissionseinfluss. — *Mitteilungen Dtsch. Bodenkundl. Gesellschaft*, 1983.
- ZÖTTL (H.W.). — Zur Frage der toxischen Wirkung von Aluminium auf Pflanzen. — *Allgemeine Forstzeitschrift*, vol. 38, n° 8, 1983, pp. 206-208.