

Mardi 6 mai 1986

La toxicité atmosphérique et  
notamment l'action des pluies acides

Monsieur BAZIRE, ingénieur général du Génie Rural des Eaux et Forêts, dirige l'inventaire forestier national et s'occupe en outre à titre personnel de la pollution atmosphérique à longue distance. A ce titre il est venu le mardi 6 mai nous parler de la toxicité atmosphérique et notamment de l'action des pluies acides.

L'ATMOSPHERE.-

L'atmosphère "normale" est composée d'oxygène, d'azote, de "gaz rares" (néon, zénon, argon ...), de gaz carbonique et d'eau sous forme de vapeur.

On peut définir la pollution atmosphérique par la présence dans l'atmosphère de substances qui ne s'y trouvent pas normalement. Selon cette définition, la pollution atmosphérique n'est pas obligatoirement liée aux activités humaines.

Les principaux polluants atmosphériques sont :

- le dioxyde de soufre ( $SO_2$ ). Les sources naturelles de  $SO_2$  sont presque toutes liées à l'activité volcanique.

Les émissions artificielles proviennent essentiellement des combustions : foyers domestiques et industriels ...

- les oxydes d'azote ( $NO_x$ ). Les émissions naturelles sont dues aux décharges électriques dans l'atmosphère ou aux activités microbiennes dans le sol.

Les émissions artificielles d'oxydes d'azote proviennent de toutes les combustions effectuées à l'air libre, l'azote atmosphérique étant alors oxydé à haute température. Ainsi, les foyers domestiques et industriels, les centrales thermiques, mais aussi tous les moteurs à explosion émettent des  $NO_x$ .\*

- les hydrocarbures gazeux sont très nombreux, des plus simples comme le méthane ou l'éthylène, produits en abondance par l'activité microbienne ou par les végétaux, jusqu'à des composés plus complexes : terpènes, phénols, etc ... émis par les végétaux.

Mais ici encore, ces émissions naturelles, importantes à l'échelle du globe, sont peu de chose dans les pays industrialisés,

---

\* x signifie ici 1, 2 ou 3 atomes d'oxygène.

face aux émissions liées à l'activité humaine qui puise dans les hydrocarbures liquides ou gazeux, une part importante de son énergie.

- les composés fluorés (voir conférence du Professeur Milhaud sur le fluor), extrêmement réactifs avec l'atmosphère ne sont jamais transportés loin de leur source et ne jouent pratiquement aucun rôle dans la pollution à longue distance.
- les oxydes de carbone (CO, CO<sub>2</sub>). Ils sont sans influence néfaste sur la végétation mais sont au contraire néfastes à l'homme (schéma 1).

Dans l'hémisphère nord, on peut considérer que l'homme est responsable de plus de 90% des polluants de l'atmosphère.

### LES PLUIES ACIDES.-

Les termes de "pluies acides" ont ravi les journalistes car ils font image ; mais il est préférable de parler de la "pollution atmosphérique" car, d'une part la pluie n'est pas le vecteur le plus chargé en substances polluantes et, d'autre part, les acides ne sont que l'un des agents nocifs aux écosystèmes forestiers ou aquatiques.

Ce terme de "pluies acides" a été inventé en 1872 par un chimiste de Manchester.

Depuis une trentaine d'années, les Canadiens et les Scandinaves ont observé une acidification croissante des eaux de leurs lacs \*; elle a entraîné une modification de leur flore et de leur faune et la raréfaction puis la disparition des poissons les plus recherchés (salmonidés).

Les études entreprises ont démontré le rôle certain des précipitations acides (pluie, neige) dans ce processus (ces pays sont recouverts pendant 6 mois par la neige).

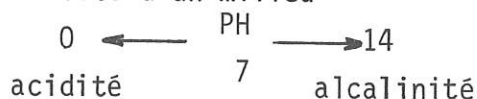
La neige est un merveilleux capteur de la pollution atmosphérique. Les cristaux de neige balayent la pollution de l'atmosphère, la retiennent. La neige s'accumule tout l'hiver. Au moment de sa fonte, en l'espace de 15 jours, une masse considérable d'eau acide envahit les lacs. C'est vers les années 1970 que l'on a reparlé des pluies acides.

Depuis une dizaine d'années, en Europe Centrale et notamment en Allemagne, ce sont sur les écosystèmes forestiers que l'on a observé un dépérissement des arbres, phénomène qui s'est fortement accentué depuis 1982 et surtout 1983.

Les dommages dus à la pollution de proximité sont connus depuis des décennies.

---

\* Le Ph est un repère sur une échelle logarithmique caractérisant l'acidité ou la basicité d'un milieu



# GENESE DES PLUIES ACIDES

OXYDANTS NATURELS/SELS/AMMONIAC

ATMOSPHERE SECHE ET HOMOGENE

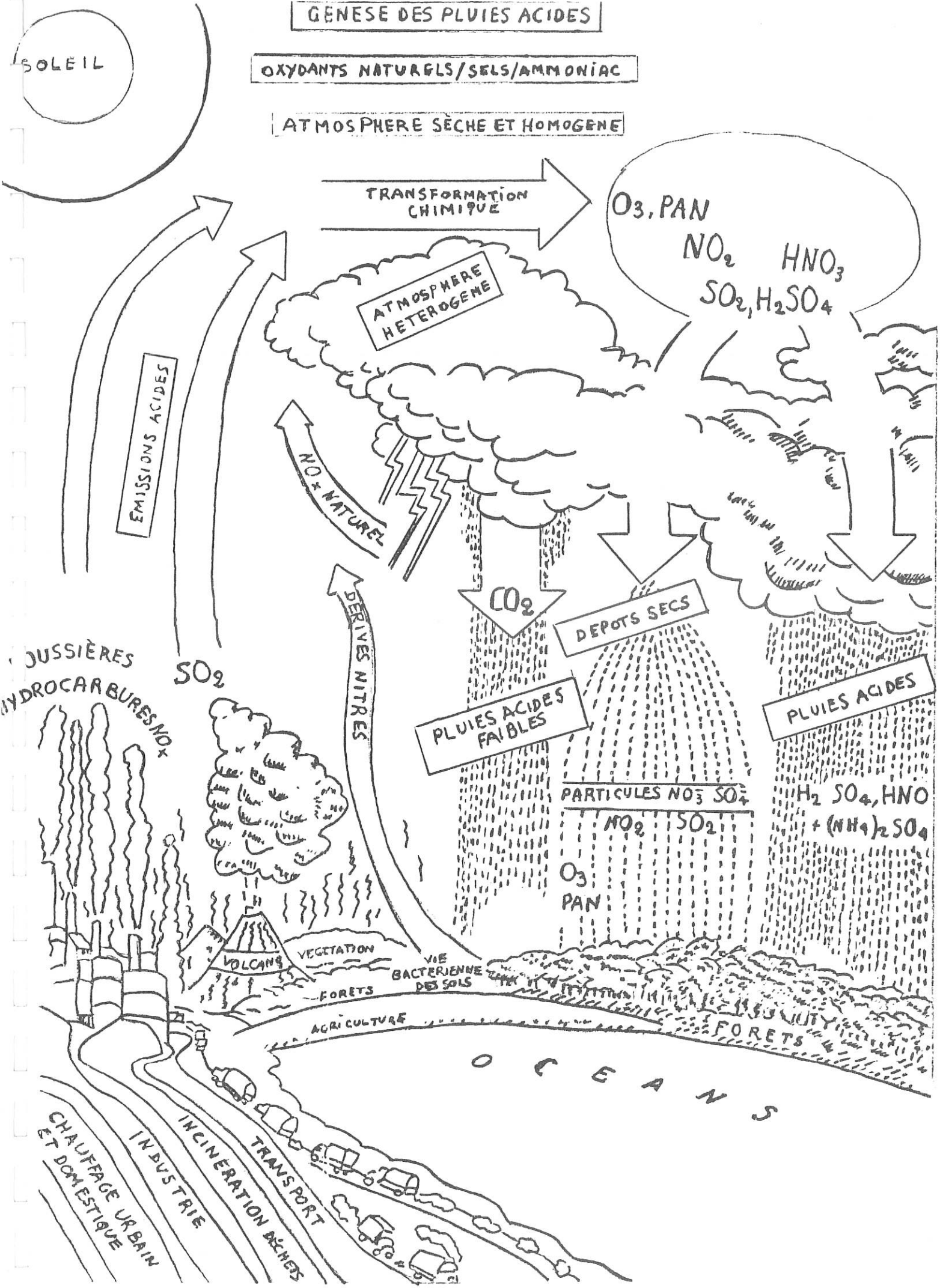


Schéma 1

Dès que l'on eut constaté les dommages et les nuisances que provoquaient les émissions dans leur voisinage, le premier réflexe a été de chercher à diluer cette pollution.

La dilution des effluents liquides dans une rivière ou dans la mer est chose courante ; ce n'est pas souhaitable quand cet effluent n'a pas subi d'épuration préalable ; cependant, nous avons affaire à des écosystèmes doués d'un pouvoir épurant, et au bout d'un certain temps (une certaine distance en rivière) cette auto-épuration a fonctionné. Il n'en est pas de même dans l'atmosphère. Non seulement la pollution n'est pas détruite, mais elle est envoyée ailleurs ; de plus les polluants participent à des réactions chimiques et sont plus ou moins profondément transformés : la pollution change de nature.

Les polluants cités plus haut peuvent être qualifiés de primaires. Leur transformation pendant leur transport dans l'atmosphère donne naissance à des polluants secondaires.

Les réactions chimiques sont nombreuses, complexes, parfois mal connues.

L'action du rayonnement solaire par exemple provoque une photolyse de l'ozone troposphérique qui réagit sur les molécules d'eau toujours présentes dans l'atmosphère, pour donner naissance aux radicaux oxydants OH ; ceux-ci très réactifs, se combinent avec le SO<sub>2</sub> et les oxydes d'azote en phase gazeuse pour donner respectivement des acides sulfurique et nitrique, des ions sulfate et nitrate.

Vers 1970, lorsque l'on a parlé des pluies acides de Scandinavie, en France, nous connaissions déjà depuis longtemps la pollution de proximité. Dans un rayon de 10 à 20 km des usines émettrices, il y avait des dommages sérieux au niveau de la végétation (région de Rouen, vallée de la Maurienne, etc ...). En Maurienne, après les travaux pour diminuer la pollution (il s'agit ici surtout de pollution fluorée), on s'aperçoit au bout de 5 ans que le rayon de destruction est devenu plus petit et qu'au delà, les forêts deviennent normales : l'écosystème réagit donc lentement.

Depuis 1983, le phénomène "pluies acides" dit de pollution atmosphérique à longue distance ou transfrontière a été observé en France.

La pollution de proximité est une pollution forte, concentrée. Elle provoque des nécroses visibles à l'oeil nu sur les végétaux. On en connaît les auteurs et l'on peut agir. C'est ce qui se fait dans les régions à haut risque.

La pollution transfrontière est à faible dose et on en ignore l'émissaire. Elle est quasi invisible car ne provoque pas de lésions visibles à l'oeil nu sur les végétaux.

Environ 36% de cette pollution vient de France.

Le reste vient des pays qui nous entourent.

## ACTION DES POLLUANTS ATMOSPHERIQUES SUR LES VEGETAUX.-

L'ozone et les photo-oxydants sont considérés comme les agents les plus actifs. Ils attaquent la cuticule cireuse des feuilles et provoquent les lésions internes des tissus foliaires. Or la cuticule normale est imperméable aux liquides et aux gaz ; la cuticule altérée va laisser sortir la vapeur d'eau et entrer des substances nocives, les acides notamment. L'arbre ne peut plus alors réguler l'intensité de sa transpiration. Il est menacé de sécheresse et sensible aux pluies acides et aux brouillards.

Le  $SO_2$  attaque également la cuticule, paralyse les stomates et empêche leur fermeture. L'action du  $SO_2$  sur les cellules végétales a été étudiée. On a démontré qu'elle stimule les réactions enzymatiques, accélère le métabolisme et se traduit par une sorte de sénescence prématurée de la cellule. On peut ainsi expliquer la chute anormale des aiguilles des conifères atteints par la pollution atmosphérique où le  $SO_2$  est toujours présent.

Les acides dont la pénétration est permise par les lésions de la cuticule provoquent la destruction de la chlorophylle avec le lessivage du magnésium et du potassium.

La diminution de l'activité de la photosynthèse chlorophyllienne a de graves répercussions dans le système racinaire. Dans leur très grande majorité, les racines des arbres forestiers forment avec certains champignons des associations à bénéfice réciproque, ou symbiose : les mycorhizes.

Le champignon reçoit de l'arbre les sucres que faute de chlorophylle, il ne peut synthétiser lui-même ; il facilite l'alimentation de l'arbre en eau, matières minérales en démultipliant dans des proportions considérables la surface absorbante des racelles, fournit certaines substances de croissance et assure en même temps une protection des racines de l'arbre contre divers agents pathogènes. Mais le champignon ne formera des mycorhizes avec l'arbre-hôte que s'il est attiré sur ses racines par la richesse en sucre de leurs tissus. On constate donc que si l'activité photosynthétique de l'arbre est diminuée, les racines appauvries en sucre n'attireront plus les symbiotes et, faute de mycorhizes, la nutrition en eau et minéraux se trouvera amoindrie.

Il peut ainsi s'amorcer une "spirale vicieuse" qui provoque le dépérissement de plus en plus accentué de l'arbre, voire sa mort. (schéma 2).

## SYMPTOMES DE DEPERISSEMENT OBSERVES SUR LES ARBRES FORESTIERS.- (schéma 3)

. chez les conifères :

- chute prématurée des aiguilles chez tous les conifères.
- chez le sapin, arrêt de la croissance axiale terminale alors que les branches latérales continuent à croître un certain temps ce qui

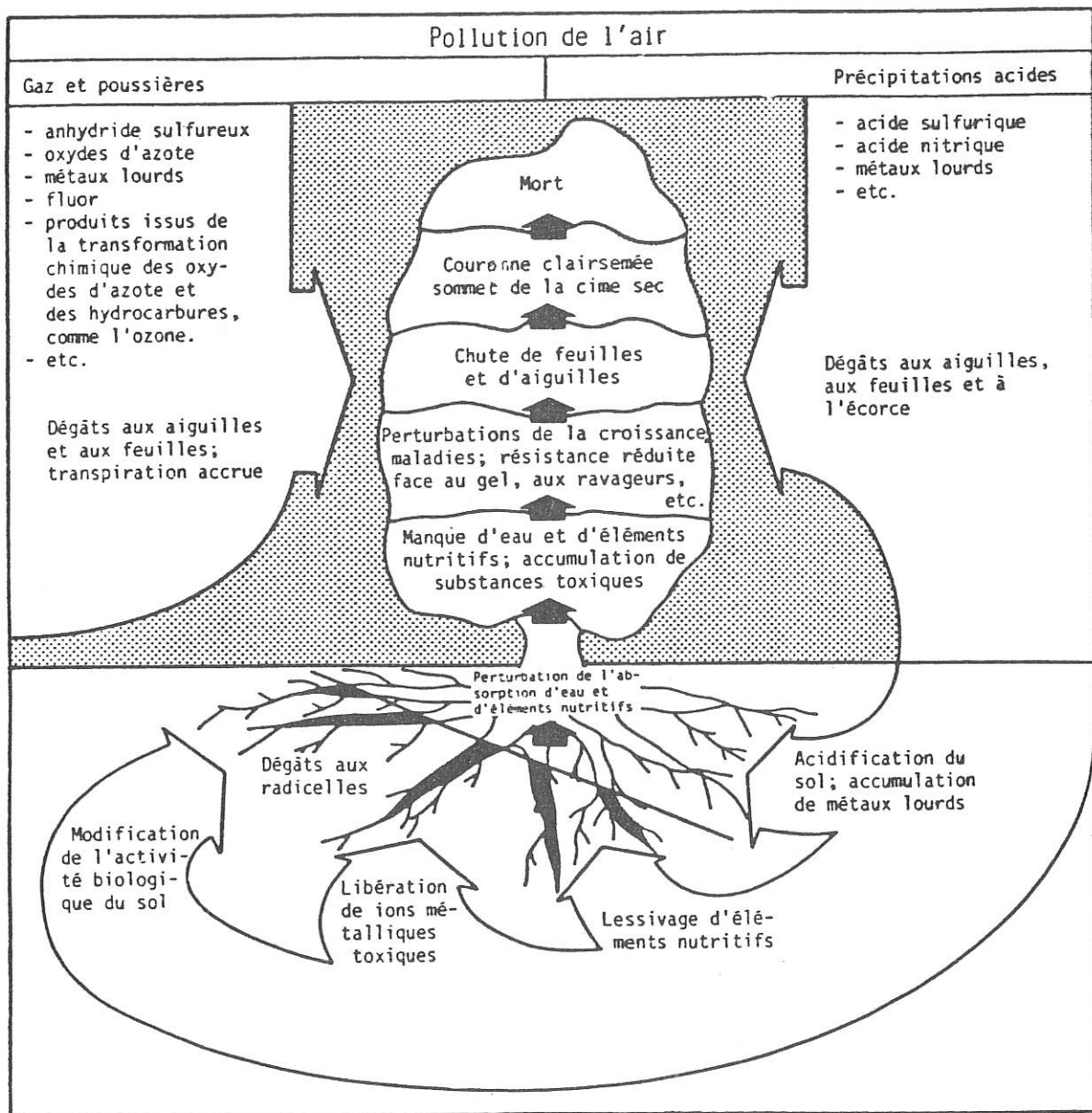


Schéma 2.- Comment agissent les polluants atmosphériques sur les arbres ?

Les polluants ont un triple effet :

- directement sur les aiguilles et les feuilles,
- par l'intermédiaire des précipitations acides sur les organes foliaires,
- par l'intermédiaire des précipitations acides sur le sol et les racines.

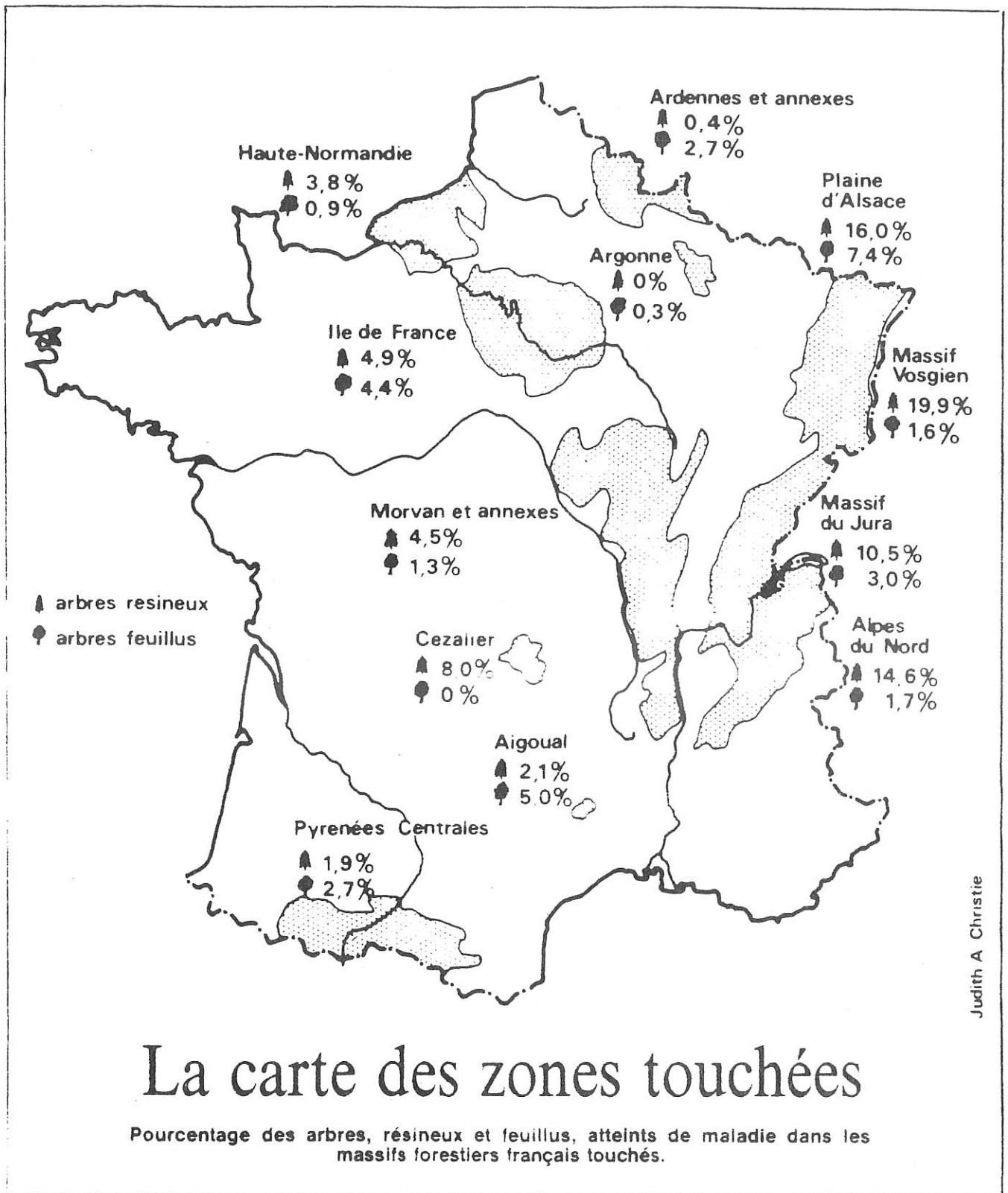


Schéma 3

→ transforme la cime aigüe ou arrondie en une cime plate : le sapin "fait la table".

- chez l'épicéa, peuvent apparaître sur la face supérieure des branches, des rameaux anormaux dits "de détresse".

- on observe le jaunissement de la partie supérieure des branches, surtout chez l'épicéa.

- une fructification abondante, désordonnée est souvent observée, mais les graines sont alors généralement stériles.

- les aiguilles nouvelles sont souvent plus courtes, parfois clairsemées.

- ces symptômes peuvent évoluer vers une perte accentuée des aiguilles pour aboutir à une cime plus ou moins totalement sèche, les aiguilles de l'année étant encore parfois les seules présentes. La mort de l'arbre est alors pratiquement inévitable (photo 4).

Photo 4.- Résineux atteints par les pluies acides dans le massif du Donon.

. chez les feuillus :

Les symptômes les plus fréquents sont la feuilaison tardive des feuilles de la cime aux bords relevés, parfois enroulées sur elles-mêmes, la chute précoce de feuilles encore vertes, dès juin par exemple, en l'absence de tout ravage d'un prédateur.

Seuls les rameaux courts sont produits sur les branches sans que celles-ci s'allongent. Les rameaux courts sont dépourvus de bourgeons latéraux et ne se déploient donc pas en largeur.

Chez les arbres, les effets de la pollution atmosphérique sont plus facilement visibles que sur les cultures agricoles.

On comprend facilement que les conifères qui conservent





leurs aiguilles toute l'année et pendant plusieurs années et dont la surface foliaire "développée" est supérieure à celle des feuillus, soient les meilleurs capteurs de la pollution atmosphère et ses premières victimes (de plus, arbres des régions fréquemment enneigées, ils conservent longtemps la neige, vecteur privilégié des polluants (cf. p. 2)).

Des études sérieuses et récentes, notamment les analyses foliaires, ont montré que l'ensemble des symptômes décrits ne peut être imputé au stress hydrique résultant d'une sécheresse prolongée ; les attaques de parasites ou de prédateurs sont hors de cause ; l'ampleur géographique du dépérissement, la diversité des essences atteintes, la localisation préférentielle des dommages à une certaine altitude qui coïncide avec la zone de brouillards, tous ces faits convergent pour impliquer "la pollution atmosphérique à longue distance".

Monsieur Bazire nous a projeté de nombreuses diapositives nous montrant des arbres sains et des arbres "atteints".

En conclusion Monsieur Bazire laisse planer un doute. Si le rôle de la pollution atmosphérique à longue distance n'est pas encore scientifiquement établi, il y a une très forte présomption pour l'incriminer dans le dépérissement actuellement constaté en République Fédérale d'Allemagne, dans les Vosges, le Jura, les Alpes, en Suisse, au Luxembourg, etc ...

Ce rôle est incontestable en Pologne, Tchécoslovaquie, Allemagne de l'Est, où des forêts entières sont ravagées, mais dans ce cas il s'agit de la pollution aigüe et localisée et non de la pollution subnécrotique à longue distance.

## ANNEXE

Question posée par un auditeur :

Dans une interview publiée par un journal allemand en 1985, le Professeur Frenzel, directeur de l'Institut de botanique de l'université de Stuttgart-Mohenheim (R.F.A.) a donné les résultats de ses recherches sur les origines de la maladie des forêts qui frappe l'Europe. Il a trouvé avec le Professeur Nienhaus des virus en forme de batonnets. Qu'en est-il ?

A la réunion de Karlsruhe où étaient présents tous les scientifiques concernés par le problème des pluies acides, le Professeur Frenzel a été beaucoup moins affirmatif. On lui reproche d'avoir alerté les médias alors qu'il n'avait fait aucune publication dans des revues scientifiques. En fait, il existe effectivement des virus appartenant à diverses "familles" sur les arbres dépérissants. L'extension des dommages actuels et la diversité des espèces forestières endommagées ne sont guère compatibles avec une cause virale agissant en premier lieu. Le virus peut contribuer à affaiblir l'arbre, mais ne paraît pas être la cause première des dommages.

Il est à peu près certain aussi que la pollution atmosphérique n'agit pas seule : les conditions climatiques notamment interviennent.