

# La pollution, un risque à long terme pour nos forêts

Informations fournies par : Beat ACHERMANN, section Etudes de base, division Protection de l'air, Richard VOLZ, secteur Conservation des forêts, Direction fédérale des forêts, OFEFP.

***Dans les forêts suisses, les seuils critiques de polluants sont fréquemment dépassés, en particulier pour l'ozone, les substances acidifiantes et l'azote.***

Bilan intermédiaire après quinze années de recherches : les forêts suisses ne vont pas déprimer à grande échelle dans un avenir prévisible. Mais elles présentent des signes de stress, causés notamment par des polluants atmosphériques. A long terme, les effets de cette pollution posent des problèmes au niveau du sol, car les processus chimiques déclenchés sont difficiles à corriger.

« Dans le domaine des sciences naturelles, on n'a malheureusement pas assez attiré l'attention de l'opinion publique et du monde politique sur le fait que la science, par définition, ne peut offrir qu'une connaissance incomplète ; face à des problèmes aussi complexes, il sera toujours difficile d'apporter des preuves sur les questions de causalité. » Cette phrase, tirée d'une publication du Conseil suisse de la science, touche au cœur du problème de la communication dans ce domaine : un écosystème aussi complexe que la

forêt et le mécanisme de ses réactions ne se laisseront jamais réduire à de simples rapports. Chaque réponse apportée par la science soulève de nouvelles questions.

On le voit bien avec les inventaires forestiers. Le programme Sanasilva procède à un relevé de l'état des houppiers sur une sélection représentative de placettes. Depuis le premier inventaire de 1985, la proportion d'arbres présentant une défoliation supérieure à 25 % a plus que doublé (voir figure 1). Pourtant, le taux de mortalité des arbres n'a pas augmenté ; il est resté stable à environ 0,4 % par année - un niveau qu'on ne considère pas comme exceptionnel.

Des classes de défoliation ont été définies dans le but de pouvoir dégager des tendances à long terme. Mais la défoliation donne-t-elle des indications pertinentes sur l'état d'un arbre ? La densité du feuillage ou de aiguilles d'un arbre varie naturellement en fonction de ses conditions

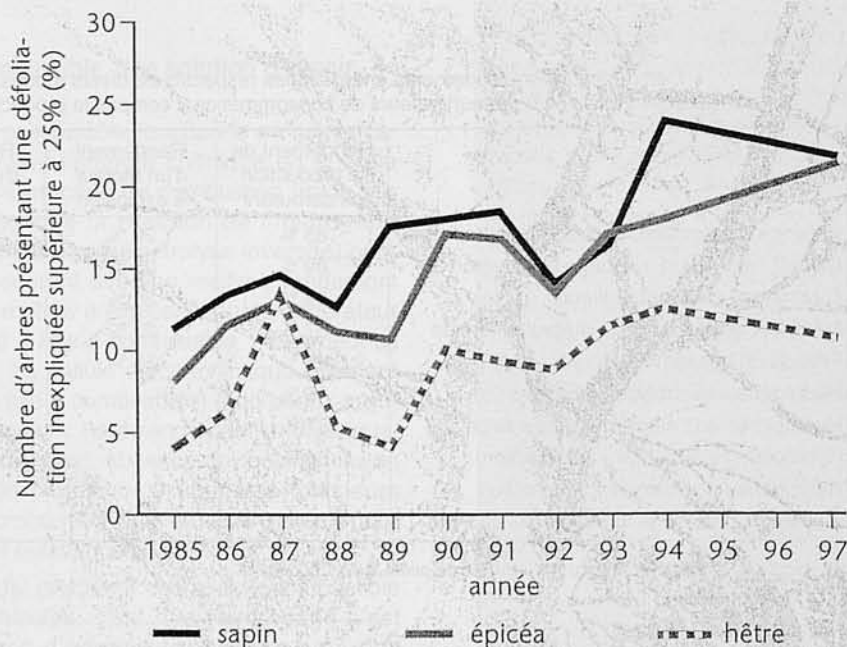


Fig. 1.

Evolution entre 1985 et 1997 de la proportion d'épicéas, de sapins blancs et de hêtres des forêts suisses présentant une défoliation supérieure à 25 % (pour les années 1995 et 1996, il n'existe pas de chiffres représentatifs) - Source : rapport Sanasilva 1997, p. 22.

de vie. La science ne dispose pas de suffisamment d'informations pour définir ce qui est *normal* et ce qui ne l'est pas. Il n'existe aucun fondement scientifique permettant d'affirmer d'une manière générale qu'au-delà d'un seuil de défoliation de 25 % un arbre serait « endommagé » et qu'en deçà, il serait « sain ».

### La défoliation, un signe de stress ?

D'après certains indices, la défoliation des houppiers pourrait être un signe de *stress*. Ce dernier étant défini comme un « écart exceptionnel par rapport aux conditions de vie optimales ». Ainsi, plus un arbre est défolié, plus la probabilité qu'il meure l'année suivante est élevée. Cette relation est en grande partie indépendante de la position sociale et de l'essence. Les arbres fortement défoliés disposent d'une masse réduite de feuillage ou d'aiguilles pour assimiler le gaz carbonique, ce qui se traduit par un ralentissement de la croissance.

Les causes de la défoliation sont encore plus difficiles à déterminer que le rapport entre ce phénomène et la vitalité d'un arbre. Plusieurs facteurs, naturels ou liés à la civilisation, peuvent agir conjointement au niveau de la forêt : le vieillissement des arbres, les périodes de sécheresse, la tempête « Vivian » de février 1990, les changements climatiques. La décennie 1986-1995 fut de loin la période la plus chaude et la plus sèche qu'a connue la Suisse depuis 500 ans. Les stations météorologiques suisses font apparaître un réchauffement supérieur à la moyenne mondiale.

### L'ozone, un coupable démasqué

A quel point les *polluants atmosphériques* sont-ils responsables de cette défoliation croissante ? On est incapable de l'évaluer pour l'instant. Mais on sait qu'ils constituent un facteur de stress pour les arbres. Depuis le début de l'inventaire Sanasilva, les immissions de composés soufrés et azotés posant des problèmes ont diminué en Suisse. En revanche, les concentrations d'ozone au sol n'ont pas notablement changé. Et des expériences en laboratoire ont prouvé que ce gaz agressif est nocif pour les arbres. Il pénètre dans les feuilles et les aiguilles, s'attaque aux enzymes ainsi qu'aux membranes à l'intérieur des feuilles, il entrave la photosynthèse et la transpiration.

Dans les régions touchées du Tessin, les feuilles du *cerisier tardif*, une essence sensible à l'ozone, présentent régulièrement des dommages. Lors d'une étude réalisée en 1995 et 1996, on a pu établir un lien entre l'ozone et les dégâts constatés sur des arbres croissant en milieu naturel, en conditions contrôlées. Les symptômes typiques dus à l'ozone ont également

été observés dans d'autres régions suisses, sur de nombreuses espèces d'arbres, d'arbustes et de plantes herbacées.

### Une indigestion d'azote

Les substances polluantes contenues dans l'air peuvent se déposer et s'accumuler pendant des années dans le sol, entraînant ainsi une acidification de ce dernier et un lessivage des substances nutritives. C'est pourquoi les discussions récentes consacrées aux dégâts aux forêts ont surtout porté sur le sol.

En raison de leur action nutritive et acidifiante, les *dépôts d'azote* jouent un rôle particulièrement important. L'azote est une substance nutritive essentielle pour les plantes. Apporté par l'air, il accélère en principe la croissance des arbres. Cependant, à long terme, il peut entraîner un déséquilibre nutritif dans le sol, qui se répercute sur les arbres.

L'institut de biologie appliquée de Schönenbuch (BL) a réalisé une expérience sur de jeunes hêtres. Celle-ci a montré qu'une augmentation des apports azotés accélérerait la croissance des parties aériennes - tronc, branches et feuilles - mais pas celle des racines : les arbres étaient plus grands, mais moins bien implantés. Par conséquent, ils étaient plus sensibles à la sécheresse. Si ces résultats se révèlent transposables à des arbres plus âgés, on peut craindre que les dépôts d'azote diminuent à long terme la résistance des forêts aux intempéries et à la sécheresse.

### Acidification du sol

Jusqu'au milieu des années quatre-vingts, les *dépôts de polluants acides* ou ayant un effet acidifiant - composés azotés, soufrés et chlorés - ont augmenté en Suisse ; cela fait peu de temps qu'ils sont en recul. Certains sols disposent d'une bonne capacité tampon, qui leur permet de neutraliser pendant plusieurs siècles des apports de cette importance. Mais en de nombreux endroits, cette capacité est limitée. Les processus d'acidification peuvent facilement être mis en évidence au niveau de l'eau contenue dans les pores du sol. Ils sont mesurés grâce au rapport entre les cations basiques (Bc) nutritifs (calcium, magnésium, potassium) et l'aluminium qui a un effet toxique sur les arbres : le rapport Bc/Al. Lorsque les valeurs Bc/Al sont inférieures à 1, la croissance de nombreuses plantes est perturbée.

Depuis dix ans, on analyse la solution du sol d'une châtaigneraie à Copera (TI). Sur cette période, le rapport Bc/Al à 60 cm de profondeur a continuellement diminué, et se trouve à présent très proche de la valeur critique (voir figure 2). Moyennant quelques restrictions, ce constat peut

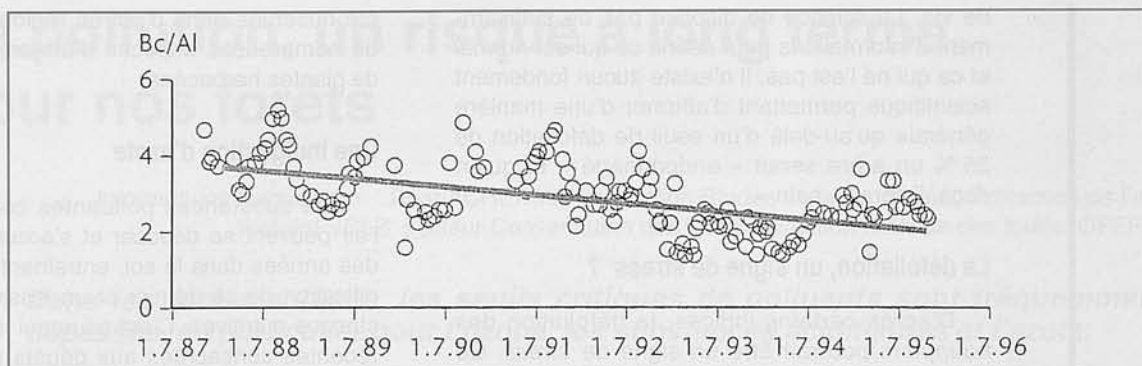


Fig. 2.

Acidification d'un sol au Tessin entre 1987 et 1995. A 60 cm, le rapport entre le calcium, magnésium, potassium et l'aluminium (Bc/Al) dans le sol de Copera a continuellement diminué. Pour les arbres, la valeur critique se situe à 1. - Source : rapport Sanasilva 1997, p. 49.

être reporté à d'autres sols sur des granites ou du gneiss.

L'acidification se fait surtout ressentir au niveau des couches profondes du sol. Par conséquent, les racines risquent de se développer seulement en surface, sans pénétrer en profondeur.

Dans certaines conditions, le lessivage des cations basiques du sol résultant des dépôts acidifiants est irréversible. Seuls l'effritement des roches ou un apport extérieur permettent de réintroduire dans le cycle les substances nutritives perdues. Lorsque les roches du sol sont friables, celui-ci peut rapidement se régénérer ; si ce n'est pas le cas, le préjudice peut se faire ressentir pendant plusieurs décennies, voire plusieurs siècles.

### Seuils critiques : Critical Loads et Critical Levels

A la fin des années quatre-vingts, dans le cadre de la Convention de Genève sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue dis-

tance de la Commission économique pour l'Europe des Nations Unies (CEE-ONU), on a décidé de réduire dans la mesure du possible les émissions jusqu'à un niveau de pollution qui ne soit plus dommageable à long terme pour l'homme, les plantes et les écosystèmes. Les valeurs limites de ce modèle, orienté sur les effets, sont exprimées par des seuils critiques de concentration (niveau critique, Critical Level) et d'apports (charge critique, Critical Load) de substances polluantes. A cet effet, des seuils critiques ont été fixés pour divers polluants et écosystèmes. Ils définissent les dépôts, les concentrations ou les doses qui, en l'état actuel des connaissances, peuvent être supportés sans dommage (voir encadré « *Seuils critiques de pollution* »).

Des niveaux critiques destinés à protéger la végétation ont déjà été établis pour le dioxyde de soufre, les oxydes d'azote, l'ammoniac et l'ozone. Les niveaux critiques de l'ozone sont présentés dans le *tableau 1*. Ils tiennent compte aussi bien des dommages directs – comme la formation de

Tableau 1.  
Dose critique (Critical Level) de l'ozone (CEE/ONU 1996)

| Gaz polluant | Récepteur                                 | Période considérée                                                                                                                                                   | Dose critique                     |
|--------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| Ozone        | Plantes cultivées et écosystèmes naturels | Heures d'ensoleillement <sup>1</sup> durant les trois mois de plus forte croissance (mai-juillet)                                                                    | AOT40 <sup>2</sup> = 3 000 ppb.h  |
|              | Plantes cultivées                         | Heures d'ensoleillement <sup>1</sup> pendant cinq jours successifs (déficit de saturation de la pression de vapeur <sup>3</sup> > 1,5 kPa, moyenne 9 h 30 - 16 h 30) | AOT40 <sup>2</sup> = 500 ppb.h    |
|              | Plantes cultivées                         | Heures d'ensoleillement <sup>1</sup> pendant cinq jours successifs (déficit de saturation de la pression de vapeur <sup>3</sup> < 1,5 kPa, moyenne 9 h 30 - 16 h 30) | AOT40 <sup>2</sup> = 200 ppb.h    |
|              | Essences forestières                      | Heures d'ensoleillement <sup>1</sup> pendant les six mois où la sensibilité du récepteur est la plus élevée (évent. avril-septembre)                                 | AOT40 <sup>2</sup> = 10 000 ppb.h |

1. Rayonnement global supérieur à 50 W/m<sup>2</sup>.

2. AOT40 = Accumulated Exposure Over a Threshold of 40 ppb : somme des dépassements de la moyenne horaire d'ozone de 40 ppb pendant la période de végétation.

3. Le déficit de saturation de la pression de vapeur est une mesure de la sécheresse de l'air.

Source : rapport Sanasilva 1997, p. 53 (extrait).

nécroses foliaires – que des atteintes chroniques telles qu'une diminution de la croissance.

La dose critique d'ozone pour les cultures agricoles et les forêts est dépassée pratiquement partout en Suisse. C'est au sud des Alpes que l'on enregistre les valeurs maximales (voir figure 3).

En ce qui concerne les charges critiques, différentes méthodes ont été établies pour déterminer les dépôts acides et azotés dans les sols. Dans les cas des dépôts acides, la procédure se base sur le *bilan de la masse* : les apports à long terme de l'ensemble des substances acidifiantes de toutes provenances sont confrontés à la capacité du système concerné à neutraliser les acides. En Suisse, les charges critiques de dépôts acides ont été calculées jusqu'à présent pour les sols forestiers et les lacs alpins. A la fin des années 80, les apports dépassaient la valeur critique sur près de 60 % des stations forestières (voir figure 4). Aujourd'hui, ces dépassements

devraient être un peu plus faibles, car les émissions, en particulier de dioxyde de soufre, ont reculé à l'échelle européenne.

Le bilan de la masse est également utilisé pour établir les charges critiques des dépôts azotés. L'objectif est d'éviter à long terme une accumulation excessive et un trop fort lessivage d'azote dans un écosystème donné. Une autre possibilité de définir les seuils consiste à se baser sur la *méthode empirique*. Celle-ci se fonde sur l'analyse, dans différents types d'écosystèmes proches de l'état naturel, de l'incidence des dépôts azotés sur la biocénose (voir tableau 2).

Les dépôts azotés dépassent actuellement les différentes charges critiques (Critical Loads) sur environ 90 % de la surface boisée de Suisse. Ceci représente également un risque à long terme pour les forêts.

(Environnement 3/98)

Tableau 2.  
Seuils critiques (Critical Loads) de dépôts azotés, d'après les directives pour la cartographie européenne (CEE/ONU 1996) - méthode empirique.

| Type de récepteur                                                                       | Seuils critiques (kg d'azote par ha et par année) | Indicateurs d'un dépassement                                                                                                                                 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Essences résineuses sur sols acides à faible taux de nitrification <sup>1</sup>         | 10-15                                             | Déséquilibre en substances nutritives                                                                                                                        |
| Essences résineuses sur sols acides avec un taux de nitrification moyen à taux élevé    | 20-30                                             | Déséquilibre en substances nutritives                                                                                                                        |
| Essences feuillues                                                                      | 15-20                                             | Déséquilibre en substances nutritives, augmentation du rapport pousses/racines                                                                               |
| Forêts (exploitées) de résineux, sur sols acides                                        | 7-20                                              | Modifications de la flore du sol et des mycorhizes, accroissement du lessivage de l'azote                                                                    |
| Forêts (exploitées) de feuillus, sur sols acides                                        | 10-20                                             | Modification de la flore du sol et des mycorhizes                                                                                                            |
| Forêts sur sols calcaires                                                               | 15-20                                             | Modifications de la flore du sol                                                                                                                             |
| Forêts (non exploitées) sur sols acides                                                 | 7-15                                              | Modifications de la flore du sol et lessivage de l'azote                                                                                                     |
| Bruyères alpines                                                                        | 5-15                                              | Diminution des lichens, des mousses et des petits arbustes à feuillage persistant                                                                            |
| Pelouses sèches (mi-sèches) riches en espèces, sur calcaire                             | 15-35                                             | Augmentation de la minéralisation <sup>5</sup> , enrichissement et lessivage d'azote, augmentation des hautes herbes, diminution de la diversité des espèces |
| Prairies naturelles riches en espèces, sur sol neutre                                   | 20-30                                             | Augmentation des hautes herbes, diminution de la diversité des espèces                                                                                       |
| Prairies naturelles et près de l'étage montagnard à (sub)alpin                          | 10-15                                             | Augmentation des hautes herbes, diminution de la diversité des espèces                                                                                       |
| Bas-marais (mésotrophe) <sup>2</sup>                                                    | 20-35                                             | Augmentation des hautes herbes, diminution de la diversité des espèces                                                                                       |
| Hauts-marais (ombrotrophe) <sup>3</sup>                                                 | 5-10                                              | Diminution des espèces typiques de mousses, augmentation des hautes herbes, enrichissement en azote                                                          |
| Rives oligotrophes <sup>4</sup> peu profondes de lacs et d'étangs (végétation immergée) | 5-10                                              | Diminution des espèces amphibies de bordures aquatiques <sup>6</sup>                                                                                         |

1. taux de nitrification = taux de transformation de l'ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) en nitrates (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) par les micro-organismes du sol.

2. mésotrophe = à teneur moyenne en substances nutritives.

3. ombrotrophe = extrêmement pauvre en substances nutritives.

4. oligotrophe = pauvre en substances nutritives.

5. minéralisation = transformation microbienne de substances organiques en produits finis inorganiques tels que l'eau, le gaz carbonique ou l'ammonium.

6. espèces amphibies de bordures aquatiques = espèces végétales rares apparaissant dans la végétation immergée. Source : rapport Sanasilva 1997, p. 56.

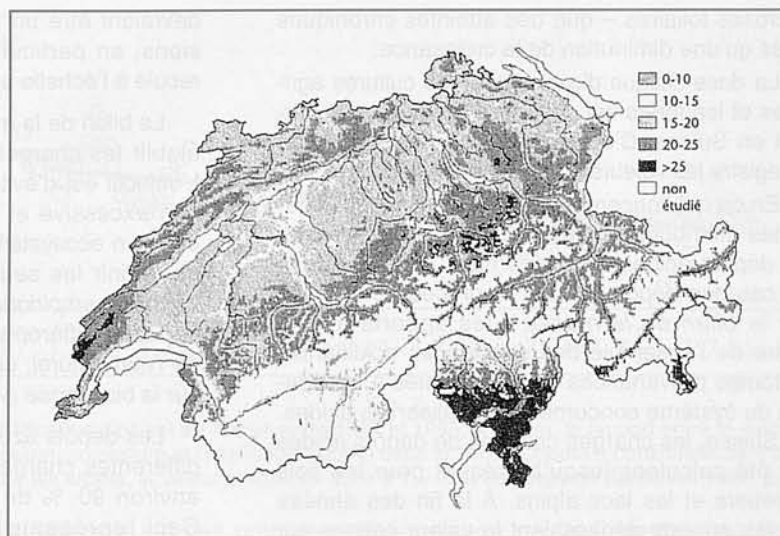


Fig. 3.  
Doses d'ozone en Suisse en 1994, calculées selon l'index AOT40  
(avril à septembre). La dose critique d'ozone pour la forêt est de 10 ppm.h.  
Cette valeur est dépassée pratiquement partout en Suisse.  
Source : rapport Sanasilva 1997, p. 54.

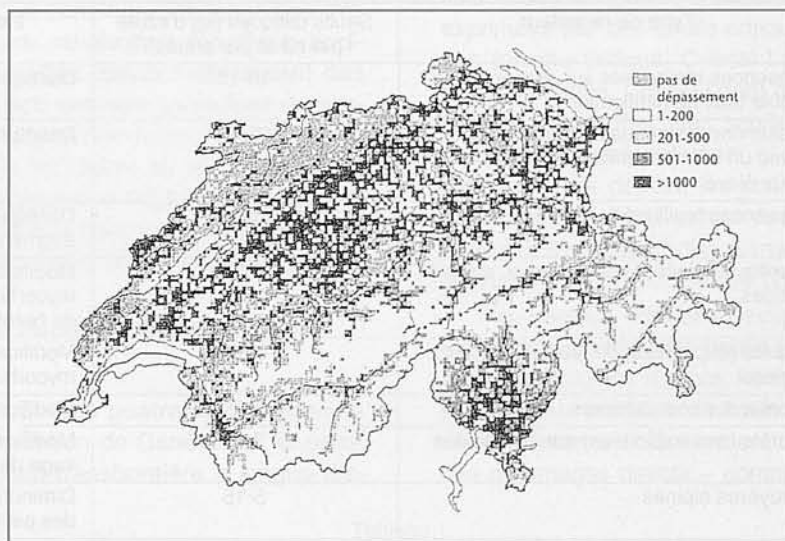


Fig. 4.  
Dépassement des charges critiques de dépôts atmosphériques acides pour les  
sols forestiers en Suisse, période 1986-1990. Unité : eq/ha.année.  
Source : rapport Sanasilva 1997, p. 54.

### Jusqu'où la pollution va-t-elle trop loin ?

**Critical Level** (niveaux critiques) : concentrations de polluants dans l'atmosphère au-dessus desquelles, selon les connaissances actuelles, il peut y avoir des effets nocifs directs pour des récepteurs comme les êtres humains, les plantes, les écosystèmes ou les matériaux.

**Critical Load** (charge critique) : estimation quantitative de l'exposition à un ou plusieurs polluants au-dessous de laquelle, selon les connaissances actuelles, il n'y a pas d'effets nocifs appréciables pour des éléments sensibles déterminés de l'environnement. Les charges critiques sont exprimées en dépôt par unité de surface.

Source : d'après CEE-ONU 1996.