

LA POLLUTION DES FORETS MÉDITERRANÉENNES

exemple de pollution locale par les embruns et de pollution globale par l'ozone*

par Jean-Pierre GARREC **

La pollution atmosphérique d'une région ou d'un pays évolue avec son développement économique. Généralement on constate qu'au cours de cette évolution, les pollutions atmosphériques sont constituées dans un premier temps de polluants primaires très concentrés, entraînant presque exclusivement une pollution au niveau local. Par la suite ces pollutions sont majoritairement constituées de polluants secondaires, généralement moins concentrés, mais plus largement répartis et entraînant une pollution au niveau régional, voir global (1).

Autour du bassin méditerranéen, la variété des développements économiques rencontrés entraîne, que si de nombreuses régions sont encore

confrontées à de fortes pollutions locales, l'existence de pollutions à l'échelle régionale ou globale devient de plus en plus évidente.

Parmi toutes ces pollutions locales encore rencontrées autour de nombreuses villes ou de zones industrielles (pollution SO₂ provenant de centrales thermiques, de complexes sidérurgiques, des industries pétrochimiques, de pollution par HF (Acide fluorhydrique) provenant de l'industrie de l'aluminium, de la fabrication des engrains phosphatés), une pollution atmosphérique est typique des rivages méditerranéens, à savoir la pollution par les embruns marins pollués. En effet, dans de nombreux sites côtiers, les embruns contiennent une forte proportion de tensioactifs et d'hydrocarbures en relation avec la pollution du milieu marin. Par la suite ces embruns vont aller se déposer sur la végétation littorale (2).

Parallèlement à tous ces problèmes de pollutions locales, les régions méditerranéennes et leurs forêts sont maintenant confrontées à une forte pollution globale par l'ozone. L'ozone est

un polluant atmosphérique essentiellement d'origine automobile, formé à partir des hydrocarbures et des oxydes d'azote des gaz d'échappement, sous les effets du rayonnement solaire et de la chaleur (3).

Les régions méditerranéennes, de par leurs conditions climatiques favorables (chaleur et fort ensoleillement) sont des aires à haut risque de pollution par l'ozone. De fait, dans ces régions, l'ozone est devenu le polluant atmosphérique le plus répandu, particulièrement aux environs des zones fortement urbanisées et industrialisées (4).

D'une manière générale, les forêts méditerranéennes soumises à ces pollutions atmosphériques, si elles n'ont pas souvent un véritable rôle économique, ont par contre en beaucoup d'endroits un rôle écologique essentiel pour lutter contre l'érosion, pour maintenir les dunes, etc....

* Conférence présentée au Colloque "Sanidad forestal en los bosques mediterráneos y templados" UIMP - Valencia, 23-27 octobre 1995, Espagne

** INRA-Centre de recherches forestières de Nancy,
Laboratoire pollution atmosphérique
54280 Champenoux

POLLUTIONS LOCALES PAR LES EMBRUNS POLLUÉS

En France, dès les années 50 des nécroses foliaires et des commencements de déperissements d'arbres ont été observés sur le littoral méditerranéen dans la région marseillaise. Ce déperissement atteignait indifféremment diverses espèces d'arbres, y compris les halo-résistantes, quel que soit leur stade de croissance (on a ainsi dénombré parmi les individus touchés des arbres de 150 à 200 ans ayant eu jusque là une croissance normale).

Dans les années suivantes, le mal s'est considérablement aggravé pour aboutir, vers 1966-1968, à un arrêt quasi total de la croissance qui a entraîné la mort lente d'un certain nombre d'entre eux. Il s'est également étendu géographiquement, et depuis 1975 il a régulièrement progressé, pour atteindre aujourd'hui la rade d'Hyères et l'île de Port-Cros pourtant relativement éloignées des sources de pollution classiques que sont les grands centres industrielos-portuaires (5) (6).

Des atteintes sont aujourd'hui visibles le long des rivages de l'Hérault, de l'Aude, des Pyrénées Orientales à l'Ouest, du Var et des Alpes Maritimes à l'Est (Cf. Fig. 1).

Ce déperissement se caractérise par

une localisation précise des dommages tant au niveau des individus dans un groupe d'arbres, que de l'arbre lui-même et du feuillage : sont atteints d'abord les arbres de première ligne ne disposant d'aucune protection face aux vents marins ; de même, ce sont les feuilles extérieures, directement tourrées vers la mer qui sont d'abord détruites, avant celles situées plus près du tronc et davantage protégées.

Chez les feuillus, les symptômes du déperissement se manifestent d'abord par une modification de la pigmentation suivie d'une nécrose des marges des feuilles ; la nécrose s'étend ensuite au reste du limbe : les feuilles se dessèchent, tombent précocement et les rameaux meurent progressivement.

Chez les résineux la pointe des aiguilles jaunit puis se nécrose. Les vieilles aiguilles tombent prématûrement, les bourgeons terminaux séchent puis tombent à leur tour. La perte du feuillage étant irréversible, la croissance de l'arbre est compromise et la mort peut intervenir.

D'une manière générale se sont les pins à aiguilles persistantes qui sont les plus sensibles au déperissement, sauf au printemps où se sont les feuillus.

Ce type de déperissement n'est pas uniformément observé tout au long de la côte méditerranéenne : les endroits les plus touchés sont les départements aux côtes peu accidentées (Hérault, Aude, Pyrénées Orientales), aux baies largement ouvertes (Alpes-Maritimes). Alors que dans les Bouches-du-Rhône la région S-SW de Marseille est très atteinte, dans le Var où la côte est plus accidentée on ne signale de cas graves que dans la rade et les îles d'Hyères (Port-Cros et Porquerolles) (7).

Après avoir éliminé les maladies parasitaires, l'étude des nécroses foliaires, de leur orientation et de leur localisation a permis de lier ce phénomène de déperissement aux effets des embruns qui transportent depuis une période relativement récente un ou plusieurs composants phytotoxiques.

L'influence des embruns pollués est accentuée par les vents violents, la proximité de la mer (distance maximale de l'ordre d'un km) et les faibles précipitations.

L'analyse des embruns pollués révèle en effet, à côté de la présence normale de chlorure de sodium (3%) de chlorure de magnésium (0,4 %), de sulfate de magnésium (0,16 %), de sulfate de calcium (0,12 %), d'iodure, de carbonate et de bromure en ce qui concerne les produits minéraux, la présence de fuel et de détergents pour ce qui concerne les produits organiques.

Ces substances polluantes sont apportées en mer par le trafic maritime (pour le fuel) et les rejets des eaux usées d'origines industrielles ou ménagères peu ou pas traitées (pour les détergents).

Les concentrations de détergents et de produits pétroliers sont plus importantes dans les embruns que dans l'eau de mer parce que ces substances sont localisées principalement à l'interface air-mer génératrice des embruns. On observe ainsi, en utilisant la teneur en chlorures des embruns comme référence, une élévation de la concentration dépassant couramment un facteur 100 par rapport à l'eau de mer. Les concentrations réelles au niveau des embruns sont encore accrues par l'évaporation subie au cours de leur transport par le vent.

Cette responsabilité des embruns pollués par les détergents et les produits pétroliers dans le déperissement

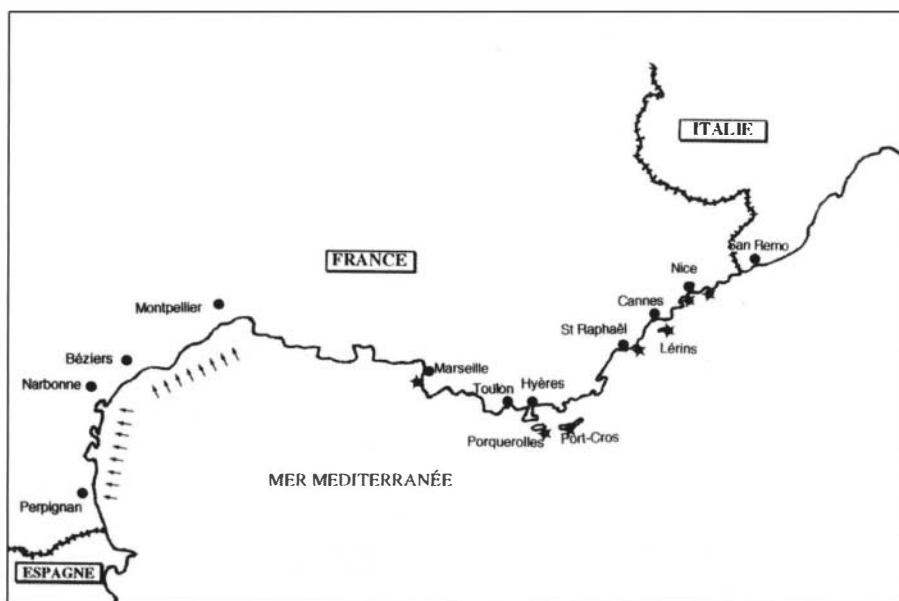


Fig. 1 : Localisation des zones de déperissement de la végétation littorale

- flèches : zones où le déperissement est assez général
- ★ sites précis où des atteintes très nettes sont observées

des arbres a été clairement établie dès 1978, grâce à des expériences de simulation en laboratoire. Ces expériences de reproduction des symptômes du dépérissement montrent l'existence d'une synergie d'action des différents polluants, l'association fuel-détergent étant la plus agressive (5) (8).

Il a alors été émis l'hypothèse que les tensioactifs (composés actifs des détergents) agiraient sur la perméabilité de surface des feuilles en altérant les structures cuticulaires (dégradation des cires épicuticulaires), et en solubilisant la partie lipidique des membranes (plasmalemmiques, plastidiales, vacuolaires). Le chlorure de sodium et les substances phytotoxiques pourraient alors pénétrer les tissus de la plante et agir à leur tour. C'est l'accumulation du NaCl dans les feuilles qui serait la principale responsable des nécroses et des dépérissements observés, mais on ne peut négliger un effet phytotoxique parallèle des tensioactifs et des hydrocarbures.

Il est important de souligner que les dépérissements de ce type affectent pratiquement toutes les espèces végétales :

- sur le littoral méditerranéen les végétaux les plus sensibles sont le Pin maritime (*Pinus pinaster*), le pin d'Alep (*P. halepensis*), le platane (*Platanus acerifolia*), le laurier sauce (*Laurus nobilis*), le troène (*Ligustrum vulgare*), le chêne vert (*Quercus ilex*), *Erica arborea*, *Juniperus communis*, *Arbutus unedo*, *Cupressus sempervirens*.

Quand les symptômes de dépérissement sont devenus de plus en plus évidents le long des côtes méditerranéennes une première phase d'étude a été commandée par le Parc national de Port-Cros (1984-1987). L'objectif était la connaissance exacte de l'étendue du phénomène sur la végétation littorale de l'île et de la rade d'Hyères, sa quantification et la collecte d'informations nécessaires à la découverte de l'origine géographique de cette pollution.

Un programme de recherche plus élaboré a ensuite été financé par le Ministère de l'environnement et le G.I.S. "Posidonie" de 1987 à 1990 : des campagnes d'observation et de mesures ont été effectuées dans les baies de Giens et sur l'île de

Porquerolles afin de déterminer avec précision les caractéristiques physiques, chimiques et microbiologiques des embruns pollués et de comprendre les processus d'accumulation des polluants dans la micro couche de la surface de la mer (9).

Parallèlement un suivi de l'état de la végétation côtière a été mis en place.

Récemment, pour élucider les mécanismes exacts de la phytotoxicité des tensioactifs polluants vis-à-vis des surfaces foliaires et des cuticules un nouveau programme de recherche a été lancé en 1992 par le Laboratoire pollution atmosphérique de l'I.N.R.A. de Nancy, le Laboratoire de botanique de Besançon et le Laboratoire de microbiologie d'Aix-Marseille III.

A partir des résultats des premières expériences de simulation au moyen d'aérosols enrichis en surfactants, hydrocarbures et NaCl (10), qui reproduisaient bien les lésions macroscopiques et microscopiques des feuilles observées sur le terrain (apparition de zones chlorotiques et de zones nécrotiques, dégradation des cires épicuticulaires, aggrégation des cires substomatiques) nous avons proposé l'hypothèse que certaines des molécules tensioactives étaient capables de modifier la biosynthèse des cires cuticulaires dans les feuilles. Ceci conduirait à la modification de la composition chimique des cires et indirectement à l'altération de leurs structures en surface.

De plus comme ces cires constituent dans les cuticules la principale "résistance" au passage de l'eau, leur altération doit entraîner des modifications de l'état hydrique des feuilles.

A partir de prélèvements d'aiguilles de pins d'Alep (*Pinus halepensis*) témoins (classe 0), et de pins d'Alep plus ou moins soumis à des embruns marins pollués le long des côtes méditerranéennes françaises (classe 1 : arbres sans perturbations et nécroses visibles sur les aiguilles, classe 2 : arbres présentant des nécroses et des chutes d'aiguilles), les recherches ont montré que pour les cires, si les embruns pollués ne semblaient pas modifier leur quantité d'alcanes, par contre ils entraînaient une augmentation de 10-nonacosanol, du 19-norabeta 8,11,13 triène et également de leur quantité totale.

Parallèlement l'étude du statut

hydrique des aiguilles de pins d'Alep plus ou moins dépérissants a bien montré que la présence d'embruns pollués entraînait une baisse significative de leur teneur en eau (11). Les aiguilles polluées seraient donc moins aptes à limiter leurs pertes d'eau comparativement aux saines.

Ces effets des embruns marins pollués sur les forêts du littoral méditerranéen ne s'observent pas uniquement en France mais également en Italie, où ils sont d'ailleurs actuellement beaucoup plus préoccupants.

Comme en France les études sur les dommages à la végétation côtière ont débuté vers la moitié des années 60, particulièrement au niveau du Parc de San Rossore, près de l'embouchure de l'Arno (région de Pise) (12) (13) (14).

En Italie les dépérissements de pinèdes (*P. pinea* et *P. pinaster*) s'observent dans de nombreuses zones de la côte Tyrrhénienne. Les dégâts peuvent être légers, quantitativement et qualitativement (San Vincenzo, Piombino (Livorno), Castelfusano (Roma)), ou graves avec des morts d'individus (San Rossore (Pisa), Versilia (Lucca)).

Le long des côtes de Toscane, des dépérissements sont aussi observables au niveau des chênesverts (*Quercus ilex*) touchés par les embruns pollués.

Comme en France, les études italiennes sur le terrain ou en laboratoire ont confirmé le rôle des tensioactifs comme la cause principale de la détérioration des arbres, en synergie avec le sel marin des embruns (8) (15).

En plus de ces deux pays, des dépérissements des arbres côtiers dus aux embruns marins pollués sont signalés en Espagne dans la région de Barcelone.

On suspecte également que certains des dépérissements d'arbres du littoral repérés sur les côtes Algériennes, ainsi que sur les côtes Tunisiennes (région du Cap Bon) pourraient être liés à la présence d'embruns pollués dans ces zones. Il apparaît que de nombreuses études restent encore à effectuer pour déterminer l'origine exacte des dépérissements observés dans plusieurs régions du pourtour méditerranéen.

Cependant il est aujourd'hui indéniable que les causes du dépérissement des arbres dans beaucoup d'endroits de la façade maritime méditerranéenne

sont d'origine anthropique : le développement du trafic maritime et les fortes activités industrielles dans les grandes agglomérations portuaires ont engendré une pollution du milieu marin qui, véhiculé par les embruns, contamine ensuite les végétaux terrestres.

Les moyens d'action pour combattre ce phénomène sont à l'heure actuelle toujours limités. Ils passent avant tout par la diminution du niveau de la pollution marine, qui reste liée dans ce cas au développement de systèmes d'épuration plus efficaces vis-à-vis des détergents, et à l'arrêt des rejets d'hydrocarbures par les navires.

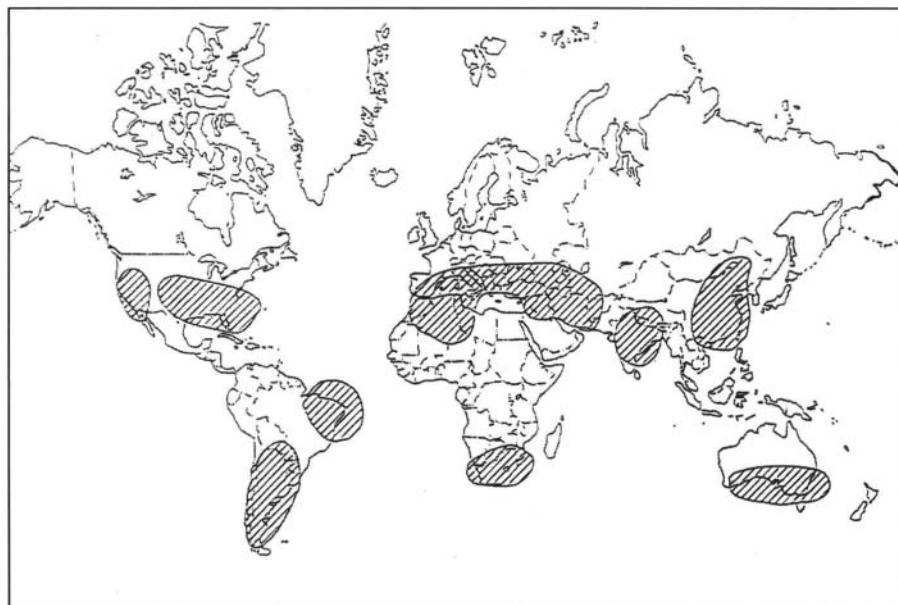


Fig. 2 : Régions à haut risque de pollution photochimique
D'après Hidy et Mueller

POLLUTION GLOBALE PAR L'OZONE

L'ozone et la végétation dans les régions méditerranéennes

Si l'on sait depuis longtemps que les régions du bassin méditerranéen, de par leur climat chaud et ensoleillé, sont des zones à haut risque de pollution photochimique comparativement aux régions de l'Europe Centrale (Cf. Fig. 2), par contre à l'inverse de ces régions, les recherches sur la phytotoxicité de l'ozone y sont encore peu développées (4) (16).

Cela pourrait provenir du fait que jusqu'à récemment, l'on ne possédait que peu d'informations sur les niveaux d'ozone dans ces régions. Un large effort est réalisé actuellement pour rattraper ce retard.

Les mesures plus ou moins systématiques des concentrations en ozone dans l'atmosphère ont débuté relativement tard dans les régions méditerranéennes, et on s'est rapidement rendu compte que beaucoup de sites étaient soumis à de forts niveaux de pollution.

En dehors d'un certain nombre de mesures historiques réalisées au début du siècle, Guderian (17) a indiqué d'une manière non exhaustive comme dates des premières mesures de l'ozone dans l'air :

- Pour la France : Nice et Martigues en 1972, Fos-Berre en 1985
- Pour l'Italie : Rome en 1974, Ravenne en 1978

- Pour la Yougoslavie : Zagreb en 1975, Split en 1979

- Pour la Grèce : Athènes en 1982

- Pour Israël : Jérusalem et Tel-Aviv en 1985

(Pour l'Algérie, les premières mesures à Alger ont été faites en 1991).

Il faut remarquer que ces mesures concernent dans la majorité des cas des sites urbains.

Guderian a indiqué parallèlement que dans ces régions, les premières utilisations du tabac BEL W3 comme bio-indicateur de la présence d'ozone ont débuté en Israël en 1973 et en Italie en 1984 (elles ont débuté en Espagne en 1990).

Depuis ces dates, toutes les mesures montrent une très nette augmentation continue des concentrations d'ozone, et elles mettent bien en évidence que maintenant autour du bassin méditerranéen, l'ozone est le principal problème au niveau de la pollution de l'air.

A partir des mesures réalisées en zones rurales, on a pu mettre en évidence que dans le sud de l'Europe depuis le début du siècle, les niveaux d'ozone ont été multipliés par un facteur de 2 à 3 (4).

Ces augmentations d'ozone sont directement reliées dans ces régions à l'augmentation de leur population et à sa concentration dans de grandes cités (Madrid, Barcelone, Milan, Turin,

Rome, Athènes, Marseille, Nice etc...), à la progression rapide de leurs activités industrielles et au développement des transports routiers. Tous ces facteurs, en conjonction avec les caractéristiques du climat méditerranéen, sont particulièrement favorables à l'apparition de forts niveaux d'ozone à partir des précurseurs présents dans l'air.

Biologiquement, le climat méditerranéen est avant tout une question de rythme pluviométrique : la pluviosité est concentrée sur la partie froide de l'année, alors que l'été, saison la plus chaude, est sec. En relation avec ces traits, toute la vie végétale est dominée par la sécheresse estivale.

Vis-à-vis de cette sécheresse, le type de stratégie de survie adopté par les plantes conditionnera leur réponse aux polluants atmosphériques présents dans l'air. Une des stratégies mise en place par les plantes durant la période estivale et les heures chaudes de la journée, consiste à contrôler leur ouverture stomatique pour limiter la transpiration.

Pour ces végétaux, cette stratégie va limiter l'impact de l'ozone, dont les plus forts niveaux sont aussi observés durant l'été.

Cependant dans ces régions, des concentrations d'ozone supérieures aux limites de phytotoxicité sont fréquemment mesurées, avec des impacts visibles sur un certain nombre de plantes cultivées ou non. Des réduc-

tions de la production agricole attribuables à l'ozone sont à présent signalées en Grèce, en Italie et en Espagne et estimées être de l'ordre de 10 à 20 % (18).

Rappelons que la directive 92/72 de la CEE, fixe le seuil de protection de la végétation pour l'ozone à 65 µg/m³ (valeur moyenne sur 24h) et à 200 µg/m³ (valeur sur 1 heure) une fois par mois.

Les forêts

Les effets de l'ozone sur les forêts méditerranéennes commencent juste à être étudiés. Mais en Grèce, Italie, Espagne, Israël, France, on peut déjà observer sur les aiguilles de certains résineux des dégradations des cires épicuticulaires et des marbrures chlorotiques caractéristiques de l'impact de l'ozone.

Toutefois sur beaucoup d'arbres, les effets de l'ozone sont difficiles à mettre en évidence *in situ* (sénescence précoce, taches chlorotiques non spécifiques), et souvent l'on constate uniquement des baisses de productivité sans nécroses visibles. On estime qu'actuellement, les pertes de production pour les arbres seraient de l'ordre de 5 à 10 % en moyenne.

Historiquement c'est entre 1980 et 1990, à l'époque où les forêts de l'Europe septentrionale étaient concernées par des phénomènes de dépérissement largement médiatisés, que des problèmes plus ou moins similaires ont été repérés au niveau des forêts méditerranéennes et signalés par plusieurs auteurs.

Ces perturbations ont été observées en Italie sur le pin parasol (*Pinus pinea*), le pin maritime (*Pinus pinaster*), le pin d'Alep (*Pinus halepensis*) et le chêne vert (*Quercus ilex*) particulièrement en Toscane, en Grèce sur le pin d'Alep en plaine et sur le sapin de Céphalonie (*Abies cephalonica*) en altitude aux environs d'Athènes, en Espagne sur le pin d'Alep dans la région du delta de l'Ebre, et en Israël sur le pin d'Alep et le pin parasol (19) (20) (21).

A partir des années 1990, il est devenu de plus en plus évident que l'ozone était le principal facteur affectant la vitalité des arbres, et que les problèmes du pin d'Alep méritaient une attention particulière (22) (23).

Le pin d'Alep est une essence en pleine expansion actuellement sur le pourtour occidental de la Méditerranée, du fait d'une part de son caractère d'essence pionnière aux exigences écologiques très modestes, et du fait d'autre part de son utilisation à très grande échelle comme essence de reboisement des zones arides. En particulier ce pin d'une rusticité à grande épreuve, supportant la sécheresse, les sols superficiels, les sols calcaires, est fortement installé le long du littoral.

Suite aux signes inquiétants de dépérissement qui sont apparus sur ce pin à partir des années 80, un programme européen de recherche regroupant différentes équipes de Grèce, d'Espagne, de France et de Grande Bretagne a été mis en place en 1991, afin de déterminer grâce à des expériences en champ et en conditions contrôlées, quels sont les effets de l'ozone associé à d'autres facteurs naturels climatiques (sécheresse, forte intensité lumineuse) sur la physiologie du pin d'Alep.

Pour prolonger ces études, un deuxième programme européen de recherche vient d'être proposé en 1996, regroupant des équipes françaises, italiennes, espagnoles et grecques pour étudier *in situ* le fonctionnement écophysiolologique du pin d'Alep dans des sites caractéristiques au niveau du climat de pollution par l'ozone.

Les observations récentes indiquent que maintenant autour du bassin méditerranéen, aussi bien les forêts de plaine (pin d'Alep) que les forêts d'altitude (sapin de Céphalonie) sont touchées par l'ozone.

En France, des jaunissements de pin Cembro dans le Massif du Mercantour, viennent d'être détectés.

Le jaunissement du Pin Cembro dans le Massif du Mercantour *

Aux alentours des années 90, dans le Massif du Mercantour et plus précisément dans le vallon de Mollières, situé en zone centrale du Parc national du Mercantour, sous la ligne de crêtes dont les contours coïncident avec la frontière italienne (Cf. Fig. 3), un jaunissement accentué des aiguilles du pin Cembro ou Arolle est signalé (24) (25). Ce jaunissement pouvait entraî-

ner une chute prématuée des aiguilles sur certains arbres.

Il faut rappeler que le pin Cembro (*Pinus cembra*), forme des peuplements peu denses, caractéristiques de la limite supérieure des forêts alpines, et on le trouve surtout à des altitudes échelonnées entre 1800 et 2500 m. En vallée de Mollières, l'Arolle pousse associé au sapin et à l'épicéa.

Les premières études sur ces pins Cembro malades ont montré que le jaunissement des aiguilles pouvait provenir de carences minérales, particulièrement en potassium.

Si des facteurs prédisposants locaux, comme la pauvreté des sols et leur grande sécheresse durant la période estivale peuvent perturber la nutrition minérale du pin Cembro, il apparaît maintenant de plus en plus clairement que le jaunissement des aiguilles peut être lié par surcroît à la présence de fortes concentrations d'ozone dans l'atmosphère.

L'ozone en altérant, en particulier, la perméabilité des membranes cellulaires, facilite le lessivage par la pluie des ions contenus dans les aiguilles.

La présence d'ozone dans cette région n'a rien d'étonnant, car la situation particulière du Parc national du Mercantour au sommet d'une barrière montagneuse entre les grands centres urbains de Nice pour le versant français, et de Cuneo-Turin pour le versant italien, est propice à l'accumulation de ce polluant dans l'atmosphère.

L'existence de fortes concentrations d'ozone a été confirmée au cours de l'été 1994 suite à la mise en place, avec la collaboration du réseau Qualitair 06 de Nice, d'un analyseur d'ozone au Col d'Adrechas-Mercantour, situé à 1500 m d'altitude non loin du Vallon de Mollières.

Les mesures ont mis en évidence l'influence des masses d'air polluées amenées de la région niçoise par les brises faibles du sud. Sur ce site d'altitude, les moyennes journalières d'ozone sont toujours plus élevées que sur le littoral, suite en particulier à la persistance d'un fort niveau nocturne de pollution. Les maxima horaires,

* Ce paragraphe est développé dans les pages qui suivent, dans l'article de Laurence Dalstein *et al* "La santé de la forêt d'Arolle du Mercantour" p.89 à 96

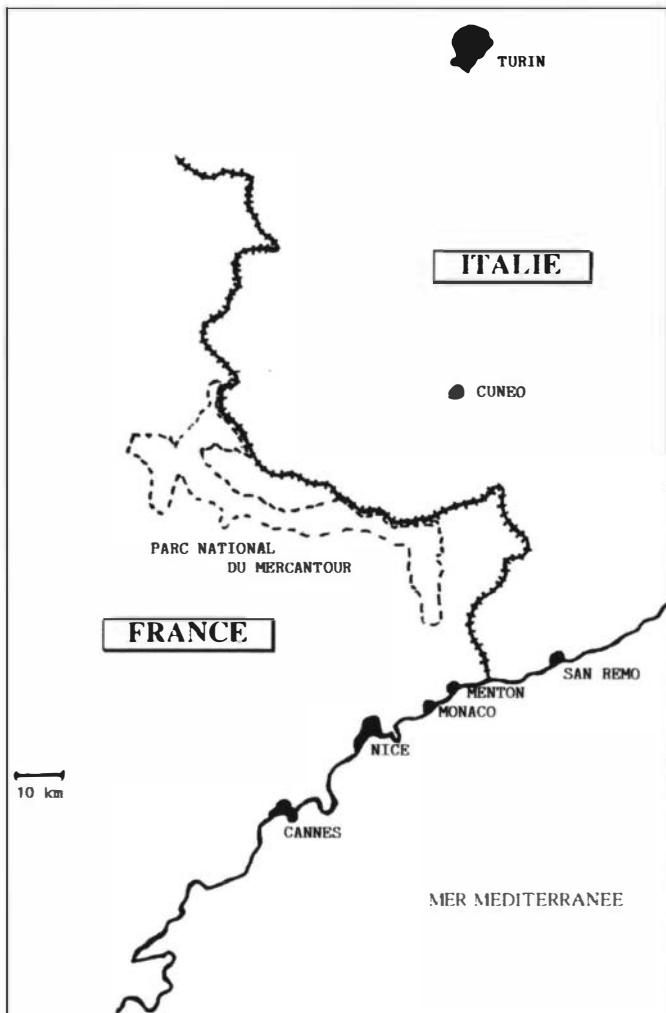


Fig. 3 : Situation du Parc national du Mercantour

également, dépassent ceux enregistrés les mêmes jours à Nice, et l'on a pu relever des valeurs de $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pendant plusieurs heures et ceci plusieurs jours de suite.

Mais il ne faut pas oublier que cette région est aussi placée sous l'influence de masses d'air polluées de la plaine du Pô transportées par les vents d'Est.

Des mesures effectuées pendant la même période à Cuneo, et les relevés de la station de Lingotto-Turin indiquent que le Piémont est fortement pollué par l'ozone durant la période estivale, et des maxima horaires de $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ont été enregistrés à Turin.

La mise en place dans le vallon de Mollières de bio-indicateurs végétaux sensibles à l'ozone (tabac BEL W3), l'étude de leurs symptômes, l'observation au microscope électronique à balayage de la dégradation des cires épicuticulaires de pins Cembro jaunissants, ont confirmé parallèlement l'impact négatif sur la végétation des niveaux d'ozone présents dans cette zone.

CONCLUSION

La pollution des forêts méditerranéennes par les embruns pollués reste toujours préoccupante, et en particulier on ignore encore la longueur totale de côtes touchées par ce problème dans les différents pays méditerranéens. L'installation ou l'amélioration des stations d'épuration des eaux usées dans les grandes agglomérations peut toutefois rapidement faire régresser cette nuisance.

Si la pollution par les embruns marins pollués, de par sa nature, reste toujours confinée à la frange très littorale des forêts méditerranéennes et ne concerne que de faibles surfaces, par contre on découvre actuellement une présence de plus en plus généralisée d'ozone au niveau de celles-ci.

Ces observations sur un impact de plus en plus présent de l'ozone sur les forêts méditerranéennes, mettent en évidence que :

- dans beaucoup de sites du bassin

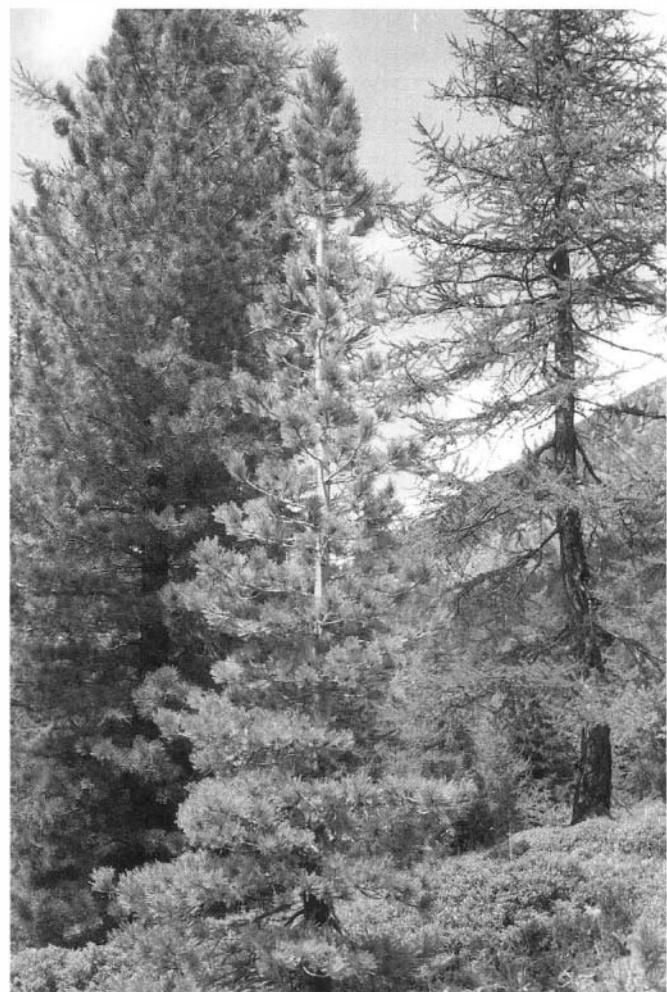


Photo 1 : Jeune Arolle jaunissant, Mercantour

méditerranéen, les concentrations d'ozone dans l'air dépassent régulièrement les normes CEE pour la protection des végétaux ($200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sur 1 heure) mais aussi pour la protection de la santé des populations ($180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sur 1 heure).

- les mesures d'ozone ne sont pas assez nombreuses en zones rurales ou forestières, comparativement à celles qui sont affectées en milieu urbain où l'on sait que les niveaux sont toujours plus faibles (ozone détruit par la présence simultanée de NO).

- aucune mesure n'est réalisée actuellement dans des régions suspectées d'avoir une forte pollution par l'ozone, comme la côte sud de l'Espagne, le sud de l'Italie et les grandes villes d'Afrique du Nord.

- des bio-indicateurs de l'ozone comme le tabac devraient être placés systématiquement dans les zones rurales ou forestières pour estimer rapidement les niveaux d'ozone présents (dans beaucoup de zones le tabac BEL W3 sera trop sensible et il faudra

le remplacer par la variété moins sensible BEL C).

- pour estimer les pertes de productivité des forêts par l'ozone dans les régions méditerranéennes, il faudra établir de nouvelles relations "dose-effet" adaptées à ces régions, c'est-à-dire qui tiennent compte des particularités de la végétation locale (longue saison de végétation, réduction de l'ouverture des stomates durant l'été).

Rappelons que pour les forêts tempérées, les niveaux critiques d'ozone pour les arbres ont été fixés à partir d'une "AOT 40" de 10 ppm·h, calculée sur 24 heures par jour et sur une saison de végétation (6 mois).

. AOT 40 (Accumulated exposure Over a Threshold of 40 ppb : exposition cumulée au dessus d'un seuil de 40 ppb)

. l'AOT 40 est calculée comme la somme des différences entre la concentration horaire d'ozone en ppb et 40 ppb, pour chaque heure au cours de laquelle la concentration dépasse 40 ppb.

Les niveaux critiques d'ozone sont définis comme entraînant des pertes de productivité inférieures à 10% tant qu'ils ne sont pas atteints,

- les espèces du genre *Pinus* bien représentées sur le pourtour du bassin méditerranéen semblent être des espèces particulièrement sensibles à la pollution par l'ozone.

D'une manière plus générale, en dehors des zones de pollution, la concentration d'ozone dans l'atmosphère moyenne de l'Europe augmente de 1 ppb par an, et tous les écosystèmes forestiers vont se trouver confrontés à des concentrations d'ozone croissantes. Si les concentrations ambiantes dans les régions méditerranéennes se situent déjà dans le domaine des valeurs nocives pour certaines espèces forestières sensibles, une élévation modérée des teneurs conduira à des effets d'ampleurs notables. L'élévation de température prédit parallèlement dans le cadre des changements climatiques globaux ne pourra que renforcer cette tendance.

Cependant toujours dans le cadre des changements climatiques globaux, les déficits de production de bois liés à la présence d'ozone dans l'atmosphère risquent d'être masqués, dans un premier temps, par les effets positifs sur

les forêts de l'augmentation du CO₂ et des dépôts azotés.

Si au cours des prochaines années, les problèmes globaux liés à l'augmentation de l'ozone vont être les plus préoccupants pour les forêts méditerranéennes, il ne faut pas oublier que de nombreuses zones du bassin méditerranéen vont continuer à être concernées par des pollutions locales (embruns marins pollués, SO₂, etc...), avec toutes les conséquences dramatiques que cela peut avoir pour les forêts des environs.

BIBLIOGRAPHIE

- (1) GARREC J.P. (1993). Evolution de la pollution atmosphérique en France. De la pollution locale à la pollution globale. Ann. Géo., n° 572, p. 359-365.
- (2) GARREC J.P., SIGOILLOT J.C., (1992). Les arbres malades de la mer. La Recherche, n°245, p. 940-941.
- (3) ACADEMIE DES SCIENCES (1993). Ozone et propriétés oxydantes de la troposphère. Rapport n° 30. Lavoisier, Paris, 262 p.
- (4) LORENZINI G. (1993). Towards an ozone climatology over the Mediterranean basin : environmental aspects. Medit., 4(2), p. 53-59.
- (5) DEVEZE L., SIGOILLOT J.C., (1978). Les arbres malades de la mer. Eau et Aménagement de la région provençale, n°19, p. 13-24.
- (6) SIGOILLOT J.C., NGUYEN M.H., DEVEZE L., (1981). Pollution par les aérosols marins dans les îles d'Hyères. Trav. sci. Parc nation. Port-Cros, 7, p. 45-54.
- (7) BADOT P.M., GARREC J.P., (1993). Dépérissement local du Pin d'Alep (*Pinus halepensis*) le long du littoral méditerranéen. Rev. For. Fr., XLV (2), p. 134-140.
- (8) GELLINI R., PANTANI F., GROSSONI P., BUSSOTTI F. (1987). L'influence de la pollution marine sur la végétation côtière italienne. Bull. Ecol., 18, (2), p. 213-219.
- (9) GIS-POSIDONIE. (1990). - Programme embruns marins pollués. Rapport final - Contrat SRETIE/MERE/89017, 80p.
- (10) RICHARD B., GRIEU P., BADOT P.M., GARREC J.P. (1995). Influence of marine salts on the localization and accumulation of surfactant in the needles of *Pinus halepensis* Mill. (à paraître).
- (11) BADOT P.M., RICHARD B., GARREC J.P. (1995). Changes in water content and surface alterations in needles of *Pinus halepensis* Mill. trees exposed to polluted sea spray. (à paraître).
- (12) FONTANA M. (1976). An aspect of coastal pollution. The combined effect of detergent and oil at sea on sea spray composition. Water Air Soil Pollut., 5, p. 269-280.
- (13) GELLINI R., PANTANI F., GROSSONI P., BUSSOTTI F., BARBOLANI E., RINALLO C. (1983). Survey of the deterioration of the coastal vegetation in the park of San Rossore in central Italy. Eur. J. For. Pathol., 13, p. 296-304.
- (14) GELLINI R., PANTANI F., GROSSONI P., BUSSOTTI F., BARBOLANI E., RINALLO C. (1985). Further investigation on the causes of disorder of the coastal vegetation in the park of San Rossore (central Italy). Eur. J. For. Path., 15, p. 145-157.
- (15) BUSSOTTI F., GROSSONI P., PANTANI F. (1995). The role of marine salt and surfactants in the decline of Tyrrhenian coastal vegetation in Italy. Ann. Sci. For., 52, p. 251-261.
- (16) SCHENONE G. (1993). Air pollution and vegetation in the mediterranean area. Medit., n° 2, p. 49-52.
- (17) GUDERIAN R. (Ed.). (1985). Air pollution by photochemical oxidants. Ecological Studies 52. Springer-Verlag, Berlin, 346 p.
- (18) GIMENO B.S., VELISSARIOU D., SCHENONE G., GUARDANS R. (1994). Ozone effects on the mediterranean region : an overview. "Critical levels for ozone". UN-ECE workshop report, n°16, J. FUHRER and B. ACHERMANN Eds., p. 122-136.
- (19) NAVEH Z., STEINBERGER E.H., CHAIM S., ROTHMANN A. (1980). Photochemical air-pollutants - a threat to mediterranean coniferous forests and upland ecosystems. Environ. Conser., 7 (4) p. 301-309.
- (20) HELIOTIS F.D., KARANDINOS M.G., WHITON J.C. (1988). Air pollution and the decline of the fir forest in Parnis National Park, near Athens, Greece. Environ. Pollut., 54, p. 29-40. .
- (21) CLAUSER F., GELLINI R., BUSSOTTI F., CENNI E., BOTACCI A. (1989). News types of damage to forest trees typical of the Mediterranean region. Eur. J. For. Path., 19, p. 78-89
- (22) GIMENO B.S., VELISSARIOU D., BARNES J.D., INCLAN R., PENA J.M., DAVISON A. W. (1992). Danos visibles por ozono en agujas de *Pinus halepensis* Mill. en Grecia y Espana. Ecología, n° 6, p. 131-134.
- (23) VELISSARIOU D., DAVISON A.W., BARNES J.D., PFIRRMANN T. MACLEAN D.C., HOLEVAS C.D. (1992). Effects of air pollution on *Pinus halepensis* (Mill.) : pollution levels in Attica, Greece. Atmos. Environ., 26A (3), p. 373-380.
- (24) DALSTEIN L. (1995). La pollution atmosphérique dans le massif du Mercantour. Impact sur le peuplement d'Arolles. Rapport d'études, 61 p.
- (25) GARREC J.P., DALSTEIN L. (1995). Les forêts méditerranéennes menacées par l'ozone (à paraître).

Résumé

La diversité des développements économiques des pays méditerranéens entraînent dans les forêts de ces régions, la présence d'une grande variété de polluants atmosphériques dont l'impact peut aller de l'échelle locale à l'échelle régionale.

Une pollution locale typique de ces régions est constituée par les embruns marins pollués par les détergents ménagers et industriels apportés par les eaux usées des grandes agglomérations du littoral. Cette pollution d'abord marine en devenant atmosphérique va se déposer sur les arbres, et les tensioactifs contenus dans les détergents en altérant les surfaces foliaires entraînent le dépérissement puis la mort des arbres.

Cette pollution qui ne concerne que les arbres proches de la côte est très présente en Italie (embouchure de l'Arno), mais aussi en Espagne (Barcelone) et en France particulièrement dans la zone Marseille-Toulon-Hyères.

Mais parallèlement ces régions méditerranéennes, de par leurs conditions climatiques favorables (chaleur et fort ensoleillement), sont aussi des aires à haut risque de pollution par l'ozone. De fait dans ces régions, l'ozone est devenu le polluant atmosphérique le plus répandu, particulièrement aux environs des zones fortement urbanisées et industrialisées.

Dès les années 80, des dépérissements sur pins parasol, pins maritime et pins d'Alep ont été signalés en Italie, en Grèce, en Israël et en Espagne. En altitude les sapins de Céphalonie sont également touchés en Grèce.

A partir des années 90, il est devenu de plus en plus évident que dans ces pays bordant la Méditerranée, l'ozone était le principal facteur affectant la vitalité des arbres.

En France, vers les années 90, des jaunissements prononcés d'aiguilles sont apparus en altitude sur des pins Cembro dans le Parc national du Mercantour.

Les recherches entreprises pour expliquer les causes de ce jaunissement ont montré qu'il pourrait être lié en particulier à la présence d'ozone dans cette région montagneuse.

Il apparaît que les écosystèmes forestiers méditerranéens se trouvent déjà confrontés à des concentrations d'ozone néfastes pour certaines espèces sensibles, et les augmentations prévues de ce polluant au cours des prochaines décennies risquent d'avoir un impact de plus en plus préoccupant.

Summary

The Pollution of Mediterranean Forests : an example of localised pollution due to sea winds and global pollution due to ozone.

The diversity in the type of economic development taking place in Mediterranean countries has had an effect on the forests of the Mediterranean Rim by generating a wide range of atmospheric pollutants whose impact ranges from local to the whole region.

An example of typical localised pollution is sea winds bearing spray polluted by domestic and industrial detergents that come from urban wastewater from the big conurbations near the coast. This type of pollution, first of all marine, becomes atmospheric and is then deposited on trees. The surfactants contained in the detergents affect the surface of the leaves, leading to the decline and death of the trees.

Such pollution, which affects only woodland near the coast, is in great evidence in Italy (mouth of the Arno river) as well as in Spain (Barcelona) and France, particularly in the Marseilles-Toulon-Hyères zone.

At the same time, these regions, on account of their prevailing climatic conditions, are also areas at high risk of ozone pollution. Indeed, in these regions ozone has become the most prevalent source of atmospheric pollution, especially near areas of dense population and industrialisation. In the 1980's, damage and decline were recorded for stone pine, maritime pine and Aleppo pine in Italy, Greece, Israel and Spain. At altitude in Greece, the Greek fir (Abies cephalonica) was also affected.

In the 1990's, it became increasingly clear that in the countries of the Mediterranean Rim, ozone had become the main factor affecting the vitality of trees.

At this time, pronounced yellowing of the needles of Arolla Pine (P. cembra) became evident at altitude in the Mercantour National Park (French Alps).

Research undertaken to find an explanation for this yellowing has shown that it could well be related to the presence of ozone in this mountainous area.

It would appear that Mediterranean forest ecosystems are already exposed to concentrations of ozone that are harmful to certain species and the forecast increase of this pollutant over the coming decades is likely to have an ever more disturbing effect.

Riassunto

L'inquinamento delle foreste mediterranee. Esempio di inquinamento locale dagli spruzzi e inquinamento globale dall'ozone.

La diversità degli sviluppi economici dei paesi mediterranei cagionano nelle foreste di queste regioni, la presenza di una grande varietà di agenti inquinanti atmosferici di cui l'impatto può andare dalla scala locale fino alla scala regionale.

Un inquinamento locale tipico di queste regioni è costituito dagli spruzzi marini inquinati dai detergenti domestici e industriali portati dalle acque consumate delle grandi agglomerazioni del litorale. Questo inquinamento da primo marino diventando atmosferico va depositarsi sugli alberi, e i tensioattivi contenuti nei detergenti alterando le superficie fogliari cagionano il deperimento e poi la morte degli alberi.

Questo inquinamento che riguarda soltanto gli alberi vicini alla costa è assai presente in Italia (foce dell'Arno), ma anche in Spagna (Barcellona) e in Francia particolarmente nella zona Marsiglia-Tolone-Hyères.

Ma parallelamente queste regioni mediterranee, in ragione delle loro condizioni climatiche favorevoli (calore e forte soleggiamento) sono anche aree di rischio alto di inquinamento dall'ozone. Di fatto in queste regioni, l'ozone è diventato l'agente inquinante atmosferico più diffuso, particolarmente nei dintorni delle grandi zone fortemente urbanizzate e industrializzate.

Fino dagli anni 80, deperimenti sui pini a ombrello, pini marittimi e pini d'Aleppo sono stati segnalati in Italia, in Grecia, in Israele e in Spagna. In altitudine, gli abeti di Cefalonia sono toccati anche loro in Grecia.

Dagli anni 90, è diventato sempre più evidente che in questi paesi costeggiando il mare Mediterraneo l'ozone stava il fattore principale affettando la vitalità degli alberi.

In Francia, verso gli anni 90, ingiallimenti pronunciati di aghi sono apparsi in altitudine sui Cembri nel Parco Nazionale del Mercantour.

Le ricerche intraprese per spiegare le cause di questo ingiallimento hanno mostrato che potrebbe essere legato in particolare alla presenza di ozono in questa regione montagnosa.

Appare che gli ecosistemi forestali mediterranei si trovano già confrontati a concentrazioni di ozono nefaste per certe specie sensibili e gli aumenti previsti di questo agente inquinante durante le prossime decennie rischiano di avere un impatto sempre più preoccupante.