

# LA SANTÉ DE LA FORET D'AROLLE DU MERCANTOUR

par Laurence DALSTEIN \*, Jean-Pierre GARREC\*  
et Maurice BONNEAU\*\*

## I - INTRODUCTION

Le Pin cembro ou Arolle est une des essences de l'étage subalpin qui peuple le vallon de Mollières situé au coeur du Parc National du Mercantour. Implanté sur ce site depuis des millénaires, l'Arolle y entre en compétition avec le Mélèze et le Pin à crochets vers 2000 m d'altitude. Réputé robuste, il s'est toujours accommodé des écarts de température importants, sols acides et rudesse des conditions écologiques de ce milieu. Pourtant, depuis une dizaine d'années, certains arbres présentent un jaunissement des aiguilles d'une ampleur anormale, voire un dépérissement prématuré chez les jeunes sujets.

L'observation des aiguilles montre de nombreux points blanchâtres auréolés et marbrés évoluant en plages jaunies, des brunissements d'extrémités, un éclaircissement des cimes chez les adultes. Ces altérations tissulaires traduisent un dépérissement foliaire évolutif qui précède souvent une chute des aiguilles les plus âgées.

L'examen microscopique indique parfois une attaque par les insectes, pucerons. Cependant, il ne s'agit pas de pathogènes au sens strict et ces attaques ne peuvent justifier à elles seules le jaunissement observé.

Le but de ce travail est de prendre en considération les facteurs susceptibles d'être responsables du dysfonctionnement de cet arbre : perturbations climatiques de ces dernières années, pauvreté du sol et carences minérales, facteurs anthropiques tels que les dépôts atmosphériques ou pollution

---

\* Institut national de la recherche agronomique  
Laboratoire pollution atmosphérique  
INRA Nancy-Champenoux, 54280 Champenoux  
\*\* Equipe cycle biogéochimique INRA Champenoux

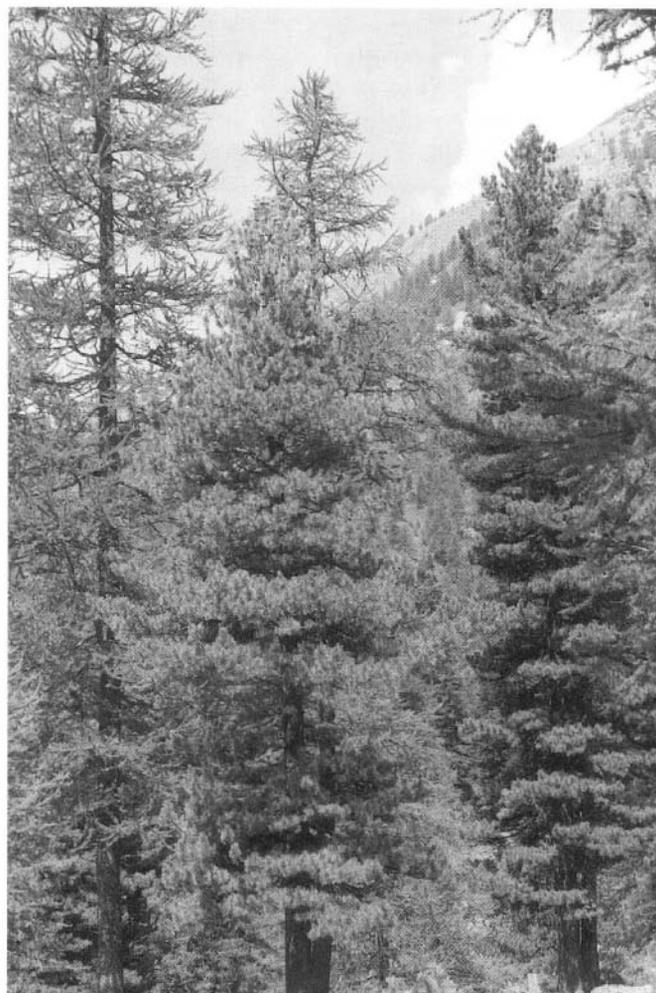


Photo 1 : Houppier jaunissant de l'Arolle adulte, Mercantour

photoxydante par l'ozone.

Il est important également d'établir des comparaisons avec d'autres sites du massif alpin, ce qui fut fait avec le Queyras, les Ecrins et côté italien l'Argentera.

## II - HYPOTHESES ENVISAGÉES

Les facteurs naturels et anthropiques ont été successivement considérés :

### 1 - LE CLIMAT

La répétition des fluctuations climatiques traduite par un décalage des saisons peut jouer un rôle dans la vitalité de l'Arolle du Mercantour. Depuis plusieurs années, il existe une variation du système climatique avec une augmentation des températures, un enneigement hivernal moins abondant et tardif au printemps, d'où en été un dessèchement des sols entraînant des perturbations hydriques au niveau des arbres et des aiguilles. Les informations météorologiques ont été collectées auprès du centre national le plus proche sur la commune d'Isola 2000 (L.DALSTEIN, 1993).

### 2- NUTRITION MINERALE

La période d'étude recouvre les mois de mai à octobre. Huit sites ont été retenus suivant des critères d'altitude, d'ensoleillement, d'orientation par rapport aux vents dominants et degré d'atteinte des Arolles. Ces pla-

N° d'ordre	Désignation	Localisation	Altitude
1	Source "Chardole"	Haut vallon de Salèses	1930 m
2	Col de Salèses		2031 m
3	Route du Lac Nègre	Vallon de Mollières	2053 m
4	Pont d'Ingolf	Vallon de Mollières	1947 m
5	Vacherie du Collet	Vallon de Mollières	1840 m
6	Bas vallon de Tavel		1950 m
7	Haut vallon de Tavel		2227 m
8	Route de la Mercière	Vallon de Mollières	2027 m

Tab. I : Caractéristiques des différents sites choisis

cettes ont été disposées en haut des vallons de Mollières et de Salèses. (Cf. Tab. I)

- Dans le cadre de l'analyse foliaire, les échantillons d'aiguilles ont été prélevés au niveau des huit placettes, sur des arbres adultes, de même taille, en partie médiane et externe de leur couronne. Des prélèvements sur des arbres moins atteints du bas de la vallée ont été également effectués afin d'établir des comparaisons (arbres témoins).

- Une analyse pédologique a été conduite parallèlement sur les sites n° 2, 4 et 6. Les échantillons de sols prélevés à une profondeur de 5 cm, 20 cm et 35 cm ont fait l'objet d'une analyse chimique par l'I.N.R.A. (Institut national de la recherche agronomique) d'Arras.

- En fonction des résultats d'analyse foliaire déjà obtenus l'année précédente, il a été effectué des apports d'engrais sur un petit nombre d'arbres pour les sites les plus carencés, ceci a

été programmé deux années de suite : 10 g de  $P_2O_5/m^2$  sous forme de superphosphate triple, 15 g de  $K_2O/m^2$  sous forme de sulfate, 15 g de N/m<sup>2</sup> sous forme d'ammonitrate dispersés dans un périmètre équivalent à la couronne d'arbres.

### Résultats

La mauvaise nutrition minérale des arbres peut s'expliquer par des carences en éléments tels que le Mg, K et N relevées dans l'analyse pédologique. Par exemple, au pont d'Ingolf, il n'y a que 3% de matière organique dans l'horizon A1 et à 20 et 30 cm de profondeur, le rapport C/N s'élève à 25 tandis que les teneurs en potassium et magnésium échangeable ne sont que de 0,02 à 0,05 mol /kg. Cette carence peut s'expliquer par les couches superficielles meubles du sol qui ont été remaniées et lessivées par l'eau au fil des années.

Le tableau II ci-dessous indique les résultats de l'analyse chimique des

Désignation des feuilles	Etat sanitaire		N %	P %	K %	Ca %	Mg %	Mn ppm	S %
	Sain	Malade							
1 - Haut vallon du Boréon	X		1,53	0,147	0,46	0,53	0,13	389	0,06
2 - Haut vallon du Boréon	X		1,82	0,200	0,68	0,34	0,14	267	0,07
3 - Haut vallon du Boréon	X		1,64	0,186	0,62	0,62	0,15	574	0,06
4 - Chardole		X	1,55	0,144	0,45	0,55	0,10	1200	0,05
5 - Aval Col de Salèses		X	1,34	0,140	0,39	0,52	0,14	539	0,06
6 - Col de Salèses		X	1,26	0,104	0,35	0,36	0,10	584	0,05
7 - Route du Lac Nègre		X	1,39	0,108	0,40	0,49	0,13	375	0,05
9 - Pont d'Ingolf		X	1,28	0,103	0,41	0,43	0,11	606	0,05
10 - Route de Mercière		X	1,52	0,121	0,47	0,65	0,11	931	0,06
11 - Vacherie du Collet		X	1,50	0,125	0,42	0,50	0,11	851	0,05

Tab. II : Analyses chimiques des aiguilles d'Arolle dans les différents sites

aiguilles d'Arolle pour un prélèvement effectué en octobre 1993. Cette faiblesse minérale est retrouvée dans l'analyse des feuilles (séchées à 65°) et N, K, ou P ont tous trois un niveau faible chez les arbres atteints ; les différences de teneur foliaire avec les arbres sains sont plus nettes pour P et surtout K, que pour N. Les alimentations en Ca et Mg semblent optimales (pour autant qu'on connaisse l'alimentation minérale de l'Arolle). Les faibles teneurs en soufre pourraient correspondre à un accident annuel, ou à une erreur analytique : elles se rétablissent en 1994 au voisinage de 0,1%, ce qui est mieux en rapport avec les teneurs trouvées en azote.

### Discussion

L'alimentation minérale n'est pas optimale. Les déficiences en potassium peuvent expliquer en partie le jaunissement lorsque la teneur est inférieure à 0,4%, ce qui est le cas pour une majorité d'arbres malades. L'alimentation en P est faible mais ne va pas jusqu'à la carence. Cette situation rappelle, malgré les différences écologiques, les constats antérieurs effectués dans beaucoup de peuplements de sapin ou d'épicéa des Alpes du Nord et des Pyrénées (CHÉRET *et al*, 1987) (LANDMANN et BONNEAU, 1995).

### 3 - ACIDITE DES EAUX DE PLUIES

Des collecteurs d'eaux de pluies hors couvert et sous couvert ont été installés dans tout le vallon de Mollières et de Salèses, auprès des huit placettes précitées, afin de connaître les apports atmosphériques.

#### Matériel et méthodes

Le pH de l'eau a été mesuré à l'aide d'un pH mètre électronique *in situ* après chaque pluie significative entre mai et octobre.

Les prélèvements 1 à 8 sous couvert ont été récupérés sous des Arolles adultes de taille identique, ils correspondent aux pluiolessivats contenant les ions récrétés par les tissus des aiguilles, les dépôts secs et occultes. Les prélèvements 1' à 8', situés hors des arbres, correspondent aux précipitations hors couvert.

L'analyse ionique des pluiolessivats et des pluies a été traitée par chromatographie ionique. Les éléments recherchés concernent les :

- cations : Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> (et plus récemment NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)
- anions : HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup>, F<sup>-</sup>, Br<sup>-</sup>.

### Résultats et interprétation

(Cf. Tab. III)

Les concentrations en cations et anions dans les eaux de pluiolessivats sous couvert sont beaucoup plus fortes que dans les pluies, surtout pour Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> : les rapports vont de 4 (Cl<sup>-</sup>) à 15 (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>). La forte augmentation de la teneur en K est habituelle dans les écosystèmes forestiers car le cycle du potassium s'y fait essentiellement par voie liquide. Les fortes augmentations de concentration de Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup> proviennent sans doute majoritairement d'un lessivage de dépôts secs et occultes sur les aiguilles du Pin cembro. En effet, l'acidité des pluies (Cf. Fig. 1) est assez faible et elle n'a guère donc de chance de provoquer une "récrétion" (excrétion d'ions des tissus foliaires vers l'extérieur) par échange entre H<sup>+</sup> et cations.

Par ailleurs, les nitrates ne sont présents qu'à un niveau très faible dans les aiguilles et ne peuvent donc pas être récrétés. Il est vraisemblable que l'augmentation de teneur en cations dans les pluiolessivats par rapport aux pluies est liée soit à une dissolution de dépôts alcalins (poussières carbonatées) ou de sels minéraux sur le feuillage, soit à la présence éventuelle

mg/l	Ca	Mg	Na	P	HCO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	Cl	NO <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	NO <sub>2</sub>
Sous couvert	36,80	6,35	6,68	38,81	11,72	52,05	25,93	56,04	7,35	9,12
Hors couvert	4,80	0,65	1,45	5,55	8,19	19,49	6,91	13,93	6,53	0,63

Tab. III (ci-dessus) : Concentration moyenne en mg/l des cations et anions dans les eaux hors couvert et sous couvert, tous sites confondus

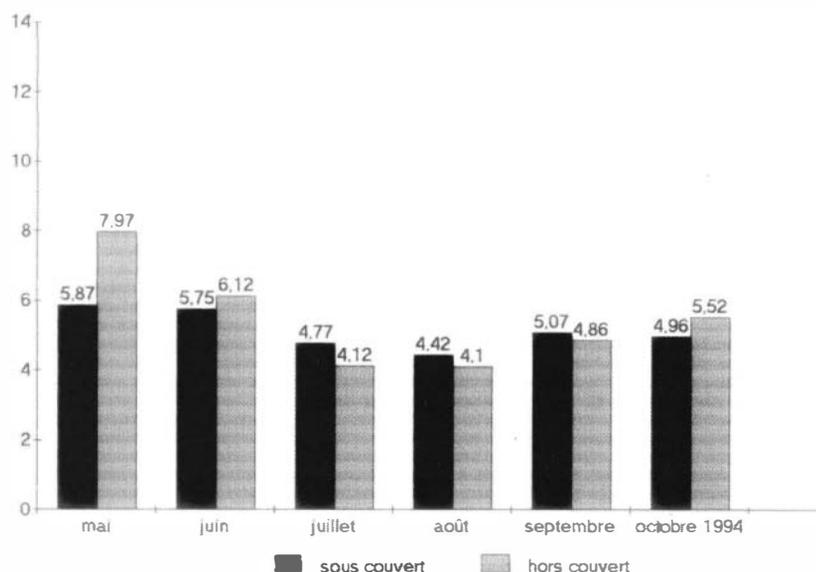


Fig. 1 (ci-contre) : Valeur moyenne des pH tous sites confondus

d'ions  $\text{NH}_4^+$  dans les pluies (non dosées jusqu'à maintenant), susceptibles de provoquer la récrétion de cations foliaires (BONNEAU *et al.*, 1991).

L'augmentation de concentration des nitrates serait liée au lessivage d'ions  $\text{NO}_3^-$  déposés sur les aiguilles sous forme d'aérosols. Il s'agit vraisemblablement de la présence de  $\text{HNO}_3$  dans les aérosols atmosphériques et dans la pluie à certaines saisons (pH < 5,5 en juillet et août), peut-être en liaison avec le trafic automobile. L'augmentation de concentration de sulfates entre pluies et pluviollessivats est nettement plus faible que celle des nitrates. Enfin, il faut remarquer que le rapport  $\text{Cl}/\text{Na}$  est, aussi bien dans les pluies que dans les pluviollessivats, très supérieur à celui qui correspondrait à une charge en  $\text{NaCl}$ . Il y a donc d'autres sources chlorures que les aérosols marins :  $\text{HCl}$  des usines d'incinération, éventuellement chlorures salins apportés par le vent depuis des dépôts terrigènes africains (sirocco).

A noter aussi que le pH des eaux sous couvert est tantôt plus faible que dans les pluies (mai, juin, octobre, Fig. 1), tantôt plus élevé (juillet-août). Il y aurait donc déposition acide préférentiellement hors saison de végétation et lessivage de dépôts alcalins et récrétion de cations préférentiellement en été. A cette variation saisonnière se superpose une variation locale : la concentration des ions dans les pluviollessivats augmente davantage, par rapport aux pluies, dans les stations de crêtes (2,3,7).

#### 4 - IMPACT ATMOSPHERIQUE

L'activité humaine, dont les transports, génère en grande quantité des composés organiques volatils (dérivés d'hydrocarbures) et des oxydes d'azote, précurseurs de l'ozone. La réaction de formation de l'ozone est accélérée, en présence de fortes radiations solaires et de chaleur. La formation de l'ozone croît en s'éloignant des villes au fur et à mesure de la diminution du taux de monoxyde d'azote susceptible de détruire l'ozone. Le maxi-

mum est atteint en zone rurale périurbaine, ou mieux encore en altitude. Les barrières naturelles montagneuses situées près des pôles urbains sont les plus touchées par cette pollution. (S. SANDRONI *et al.*, 1994)

La situation géographique du massif du Mercantour, entre deux mégapoles : Nice, côté français et Cuneo-Turin, côté italien en fait une cible privilégiée. Cette région bénéficie d'un rayonnement solaire intense toute l'année. Dans ces conditions, les niveaux d'ozone méritent une grande attention.

#### Matériel et méthodes :

- Une mise en place de bio-indicateurs végétaux (plants de tabac BEL W3), sensibles à l'ozone (GARREC et ROSE, 1988), a été effectuée sur les sites d'étude, entre 1800 m et 2100 m d'altitude. Cette approche qualitative avait pour but d'estimer sur le terrain, en un test simple, les valeurs de la concentration en ozone. Des graines de Tabac Bel B résistantes à l'ozone et de Tabac Bel W3 sensibles, ont été fournies par l'institut expérimental du Tabac de la SEITA. Les cultures ont été installées le 1er juillet 1994. Cinq sites représentatifs des diverses situations (altitude, exposition) dans les vallons de Mollières et de Salèses ont

été choisis :

- Source Chardole : 1930 m, adret.
- Route du lac Nègre: 2053 m, orienté ouest.
- Vacherie du Collet. 1840 m, ubac.
- Col de Salèses : 2031 m, ubac.
- Pont d'Ingolf : 1947 m, adret.

Les mesures ont été poursuivies pendant juillet et août 1994 en relation avec le laboratoire Pollution Atmosphérique de l'I.N.R.A. de Nancy. Les relevés hebdomadaires ont été pratiqués au niveau de chaque placette. Les évaluations ont été effectuées à partir du calcul de l'indice de dommages foliaires : I.D.F. selon la formule suivante :

$$IDF = \frac{\sum_{n=1}^{n=N} (D_t - D_{t-1})}{N}$$

dont les paramètres sont :

- $D_t$  : % de surfaces nécrosées de chaque feuille par l'ozone à la fin de la semaine.
- $D_{t-1}$  : % de surfaces nécrosées de chaque feuille par l'ozone au début de la semaine.
- $n$  : nombre total de feuilles.
- $N$  : nombre total de feuilles vivantes à la fois à  $t$  et  $t-1$  et ayant une valeur  $D_{t-1} < 10\%$ .



Photo 2 : Nécroses des feuilles de tabac Bel W 3 sous l'effet de l'ozone, Mercantour

Le pourcentage de nécroses par rapport à la surface totale de la feuille est classé à partir d'une échelle d'évaluation des pourcentages de surface foliaire détruite

D'autre part, de chaque côté de la frontière, les mesures de la teneur de l'air en ozone et en dioxyde de soufre ont été conduites par des réseaux officiels. Côté français, le réseau Qualitair 06 a mis à notre disposition, non loin de la vallée de Mollières, un analyseur d'ozone et de dioxyde de soufre à 1500 m d'altitude, au sommet d'un col (station Adrechas Mercantour) en pleine forêt surplombant deux vallées orientées Nord-Sud en direction de Nice : vallées de la Vésubie et de la Tinée. En effet, le site de Mollières non encore électrifié ne permettait pas l'installation d'appareils de mesure. La période de mesures s'est étalée de mi-juillet à mi-septembre.

## Résultats

### a) Concentrations en ozone sur les versants français et italiens

#### - Réseaux niçois

Les niveaux d'ozone des réseaux de Nice, Mercantour, Cuneo et Turin, recueillis pendant l'été 1994 affichent des valeurs élevées alors que pour le SO<sub>2</sub>, les concentrations bien au-dessous des normes, ne peuvent avoir de responsabilité dans les dommages constatés, ceci quelque soient les stations. Ce résultat est en accord avec la faible acidité des eaux de pluie.

- Pour le réseau de Nice, plusieurs dépassements de la norme C.E.E pour la population (180 µg/m<sup>3</sup>) ont été notés en juin et juillet. Les niveaux critiques pour les végétaux (200 µg/m<sup>3</sup>) sur une heure et 65 µg/m<sup>3</sup> sur 24 heures ont également été atteints.

En montagne, la station Adrechas-Mercantour a recueilli pour l'ozone des valeurs plus élevées que sur le littoral et les valeurs de nuit sont supérieures de 40% en juillet et août. Les maxima de concentration horaire en altitude sont toujours supérieurs à ceux enregistrés les mêmes jours à Nice et persistent plus longtemps. L'exemple de la journée du 17 juillet est significatif : le pic de concentration pour Nice et le Mercantour est noté à 14h ; autour de 200µg/m<sup>3</sup> en altitude, il dure plus de 3 heures alors que les

stations de Nice enregistrent des maxima horaires entre 180 et 190 µg/m<sup>3</sup> durant 1 heure. Le minimum horaire se situe entre 0 et 20 µg/m<sup>3</sup> sur le littoral et 114 µg/m<sup>3</sup> en montagne, ce minimum a duré plus de 3 jours en altitude, alors que, rappelons-le, la dose maximale chez le végétal à ne pas dépasser d'après les normes de la C.E.E est de 65 µg/m<sup>3</sup>/ 24h.

Les courbes des moyennes horaires en ozone montrent aussi une distribution très différente sur la côte et dans le Mercantour (Cf. Fig. 2). De jour comme de nuit, il y a pendant plusieurs jours persistance d'un front de pollution en montagne correspondant à des conditions météorologiques favorables : (anticyclones). La rose des vents indique pour la journée du 17 juillet une brise faible venant du sud, d'une vitesse de l'ordre de 3 mètres/seconde.

En montagne, il y a eu transport d'ozone et de ses précurseurs depuis la plaine côtière suivi *in situ* ou lors du transport, de la production d'ozone photochimique, ce qui explique le maintien de ces hauts niveaux et la persistance des pics de concentration par rapport à Nice.

#### - Réseau d'altitude du Parc national des Ecrins

La station du Casset située dans le massif alpin des Ecrins à 1780 m d'altitude nous permet d'établir des comparaisons avec les enregistrements réalisés à Adrechas - Mercantour (1500 m) et des parallèles entre Alpes

du Nord et Alpes du Sud.

Le site des Ecrins est sur le versant ubac de la vallée de la Guisane. Les concentrations d'ozone mesurées sur cet emplacement sont les plus faibles de tous les réseaux MERA (programme national de surveillance des retombées atmosphériques) à l'échelon national. Les faibles niveaux de dépôts polluants peuvent être interprétés par un faible impact de l'environnement urbain sur le versant français, et par la présence d'un massif montagneux rocheux très élevé (plus de 3000 m) sur le versant italien, jouant le rôle d'une barrière face aux éventuelles retombées italiennes.

Les niveaux enregistrés dans les Ecrins ont des seuils inférieurs aux normes limites de la communauté européenne. En aucun cas, des épisodes aigus de concentration à court terme n'ont été appréhendés, ni même des niveaux de base élevés perdurant dans le temps. Ces faibles données sont enregistrées depuis des années. On peut donc supposer qu'il n'existe pas dans cette région d'impact ozonique sur la végétation. Aucune perturbation physiologique des Arolles n'ayant d'ailleurs été répertoriée par les agents du Parc national des Ecrins.

#### - Réseaux italiens

La plaine du Pô est très peuplée et fortement industrialisée. Les vents d'est circulant dans cette région balayent la vallée du Pô ; d'après S. SANDRONI *et al*, (1994), en été, quand l'activité photochimique repart, le

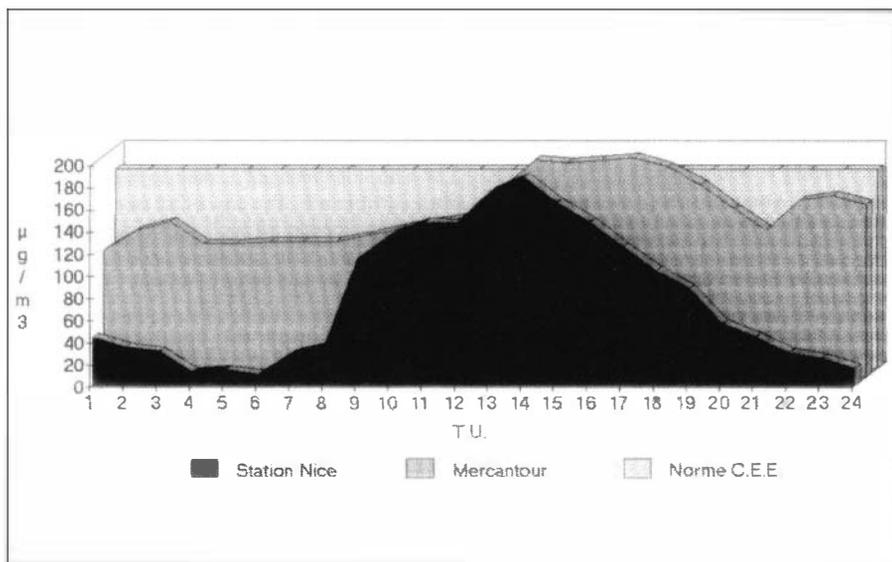


Fig. 2 : Valeurs des concentrations horaires d'ozone à Nice et à Mercantour-Adrechas - Journée du 17 juillet 1994

mélange vertical et le gradient de température entre la vallée et la montagne sont très élevés, les polluants libérés dans la plaine sont alors soulevés et transportés vers les crêtes.

A Cuneo, pendant l'été 1995, les concentrations en dioxyde de soufre se sont révélées faibles, les valeurs d'ozone à quatre reprises ont été supérieures à 180  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (un maximum à 200  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), ceci entre le premier et le treize juillet. Les mois de juin et août enregistraient des valeurs plus faibles.

A Lingotto-Turin, les mesures d'ozone dépassent largement les niveaux du littoral niçois. Siège principal de l'industrie lourde italienne de l'automobile et des industries périphériques (chimie de base, peintures automobiles, pétrochimie etc..) ce grand pôle industriel envoie dans l'atmosphère des quantités considérables de produits polluants. Le trafic automobile est en rapport avec la densité de la population urbaine. La climatologie de la vallée du Pô est caractérisée par des vents faibles (1 à 3 m/s), des brises de montagnes et de vallées. (GIULACCI, 1985). Toutes les conditions sont réunies pour une bonne néoformation de l'ozone en présence d'un rayonnement solaire important, c'est-à-dire, de préférence en période estivale.

Les moyennes mensuelles d'ozone les plus élevées recueillies à Turin durant les étés 1993 et 1994, ainsi que le nombre de dépassements de la valeur 200  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , niveau critique chez le végétal, sont indiquées dans le tableau IV.

Les moyennes et les maxima horaires avec 15 à 20 dépassements de plusieurs heures des 200  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  durant les mois de juin, juillet et août laissent présager des conséquences non négligeables sur le patrimoine forestier environnant...

Le site de Mollières est une vallée d'orientation perpendiculaire aux autres qui sont généralement ouvertes du Nord en direction du Sud, cette disposition exceptionnelle en fait une zone privilégiée pour la remontée de masses d'air chargées en polluants photochimiques ou précurseurs à partir du littoral niçois, ainsi que du Piémont, après avoir franchi les crêtes.

	Valeurs mensuelles en $\mu\text{g}/\text{m}^3$		Nbre de dépassements des 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
	1993	1994	1993	1994
juin	79	71	2	7
juillet	79	90	3	5
août	88	71	19	4

Tab. IV : Valeurs mensuelles d'ozone et nombre de dépassements à Turin durant la période estivale

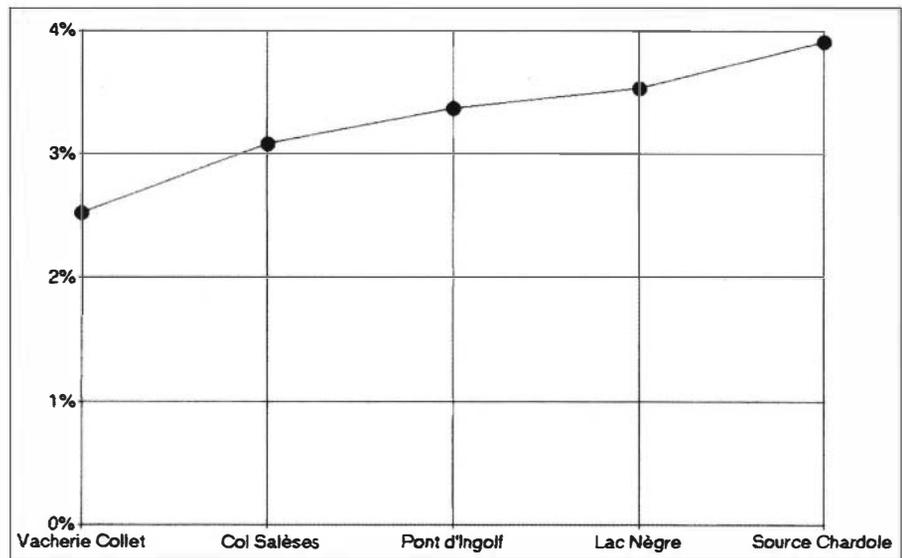


Fig. 3 : Moyenne de l'indice de dommage foliaire des tabacs, dû à l'ozone, sur juillet-août par site

#### b) Bio-indication végétale

L'apparition des nécroses sur les feuilles de tabac a été précoce dès la fin de la première semaine. Les plants de la variété résistante n'ont présenté aucune nécrose, la réaction des tabacs sensibles ne pouvaient être dus qu'à la présence d'ozone. En fonction des conditions d'exposition des placettes : altitude, ensoleillement, répartition topographique, le nombre et la surface des nécroses observées ne sont pas semblables. "L'influence significative de l'altitude sur l'altération des surfaces foliaires de tabac est prépondérante. Plus les stations sont élevées, plus les plans sont atteints, ceci quelque soit la durée de l'exposition." (GARREC et ROSE, 1988).

Nous avons pu vérifier ces résultats bien qu'au départ les conditions altitudinales ne nous permettaient pas de

prévoir si les plants résisteraient. La placette de la vacherie du Collet à 1840 m d'altitude, offre des taux de surface nécrosée inférieurs aux plants de la route du lac Nègre plus élevés en altitude, 2053 m. La figure 3 représente la moyenne des indices de dommage foliaire par placette calculée sur les mois de juillet et août 1994 ; le site le plus atteint se localise près de la source Chardole. Il est orienté plein sud, domine le vallon de Salèses et au delà la vallée de la Vésubie. Situé sur le versant adret de la montagne, il bénéficie directement des retombées d'émissions de polluants de la côte niçoise, qui sont poussés par des brises marines. Son ensoleillement prolongé peut favoriser sur place la transformation photochimique des précurseurs. Autre zone très touchée et très ensoleillée : le pont d'Ingolf : 1947 m.

## 5 - ANALYSE MICROSCOPIQUE DES SURFACES FOLIAIRES ET DES TISSUS

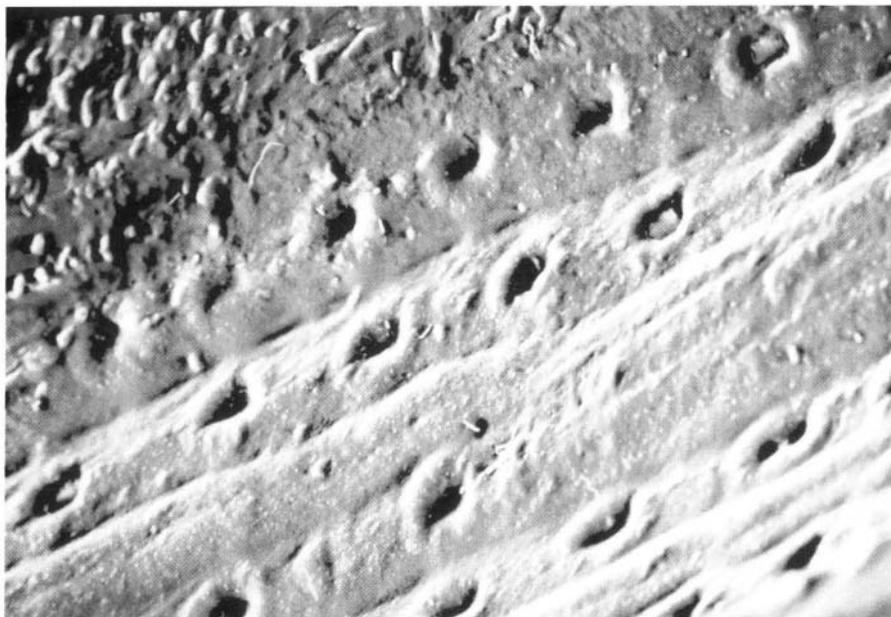


Photo 4 : Evolution du jaunissement de l'aiguille de Pin cembro, Mercantour



Photo 3 : Microscopie à balayage ; aiguille de Pin cembro nécrosée, Mercantour, fusion des cires, stomates bien ouverts.

Le constat visuel des dommages en fonction de la topographie a été accompagné de l'analyse microscopique électronique des aiguilles à partir de coupes histologiques. Une analyse cryptogamique a été réalisée en collaboration avec le laboratoire de pathologie forestière de l' I.N.R.A. de

Nancy. Nous avons étudié également les dommages d'insectes sur les échantillons foliaires avec l'aide du laboratoire d'entomologie du Muséum d'histoire naturelle. Les pucerons recueillis dans un liquide conservateur ont donné lieu à un examen macroscopique puis microscopique.

L'étude des surfaces foliaires en microscopie électronique à balayage a été effectuée au centre I.N.R.A. de Nancy, Laboratoire de la pollution atmosphérique. Les aiguilles d'Arolles analysées ont été prélevées conjointement sur des sites du Queyras et du Mercantour, ce qui a permis d'établir des comparaisons entre différents gradients d'atteinte ; le Parc naturel régional du Queyras bénéficiant de grandes cembraies apparemment moins atteintes que celles du Mercantour. Ces images montrent que plus les aiguilles sont nécrosées, plus les cires épicuticulaires et substomatiques disparaissent de leur surface (J.P.GARREC, communication personnelle). La cire forme une couche imperméable à la surface de l'aiguille. Sur ces photos, les cires épicuticulaires des aiguilles atteintes présentent une dégradation de leur structure, la forme en plaques disparaît et laisse apparaître une texture amorphe. Or, les retombées de l'ozone, agent polluant sont parmi les facteurs qui influencent le plus l'altération des cires épicuticulaires des conifères. Dans les environnements pollués, les essences d'altitude montrent une accélération du niveau de dégradation des cires épicuticulaires qui subissent une sorte de fusion (M.S GUNTARDT-GOERG, 1986), ceci après une exposition de plusieurs jours à  $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$  d'ozone, 6 heures par jour. Le nombre de stomates obstrués par de la cire est en augmentation.

L'analyse cryptogamique montre au niveau de la pousse, la présence d'une microflore variée : *Altenaria*, *Cladosporia*, *Curvularia*, *Botrytis*, *Hormonema*, *Phoma*, *Raffaeba*, *Trichoderma*. Le cryptogame le plus important de cette liste, *Hormonema dermatioïdes*, se manifeste sur des sujets stressés (cause à découvrir localement). Il n'y a pas de pathogènes stricts mais des secondaires dont certains sont capables d'induire des mortalités partielles. (M. MORELET, communication personnelle.)

Des insectes ont été repérés tels que *Cinara cembrae*, gros puceron noir visible à l'oeil nu ou *Pineus cembrae* au microscope. Ces deux pucerons communs chez l'Arolle sont des parasites secondaires d'arbres déjà affaiblis par d'autres causes.

## 6- DISCUSSION ET CONCLUSION

Les recherches, engagées au cours de l'été 1994 dans la vallée de Mollières pour comprendre les causes des jaunissements et défoliations constatées sur le Pin cembro, permettent d'envisager plusieurs explications sans qu'aucune preuve formelle puisse cependant être apportée.

Les déficiences minérales, notamment en potassium, peuvent apporter une explication partielle puisque, chez les résineux en général, une carence en cet élément conduit à un jaunissement des aiguilles, surtout à la base des pousses. Cependant, une telle situation doit exister depuis de nombreuses années et il faudrait donc faire l'hypothèse qu'elle a empiré, à la faveur d'une interaction avec des facteurs climatiques ou avec la pollution atmosphérique.

La pollution acide est de toute évidence assez limitée et la teneur de l'air en SO<sub>2</sub> est négligeable. Il faudrait cependant dans l'avenir, s'assurer de l'importance des apports de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> qui peuvent jouer un rôle acidifiant au même titre que les protons.

La pollution par l'ozone est fortement probable. Les dommages constatés sur tabac BEL W 3, incontestablement liés à l'action de ce gaz, ne constituent pas une preuve suffisante car ce végétal est très sensible, bien plus probablement que le Pin cembro, et peut donc subir des dommages notables sans que le pin soit affecté. Il faut signaler toutefois que le Pin cembro est reconnu comme une espèce sensible à l'ozone. Plus convaincants sont les niveaux élevés d'ozone en été, leur persistance pendant plusieurs jours, l'absence de rémission notable pendant la nuit, toutes constatations en accord avec l'existence de part et d'autre du Mercantour, en Italie et sur le littoral niçois, de pôles touristiques ou industriels où peuvent être émis en abondance les précurseurs de l'ozone, que les vents poussent vers la barrière montagneuse qui les sépare. Les premières études microscopiques, qui montrent une altération des cires cuticulaires des Pins cembro de Mollières, sont en conformité avec l'existence de niveaux élevés d'ozone. D'autres études, notamment sur des coupes de

tissus, devraient être entreprises pour vérifier s'il existe des symptômes précis de dommages par l'ozone (destruction partielle du parenchyme lacuneux, cristaux d'oxalate de calcium à l'intérieur des cellules...) (PUECH, 1995).

Dans l'état actuel des connaissances acquises à Mollières, l'ozone reste une piste "privilégiée" mais il serait prématuré d'être affirmatif.

**L.D., J-P.G., M.B.**

### Remerciements :

Je remercie Messieurs LAUGIER et GUERNET pour leur assistance technique dans les analyses hydrologiques, M. MORELET et M. REMAUDIERE pour leur analyse de la pathogénie.

### Résumé

Depuis les années 1982-1983, l'observation du Pin cembro dans le Parc national du Mercantour révèle sur certains arbres un jaunissement anormal des aiguilles suivi de la chute prématurée de plus anciennes. Plusieurs facteurs agissant en synergie pourraient être responsables du dysfonctionnement de cet arbre, parmi lesquels, le climat, les carences minérales et la pollution atmosphérique gazeuse, ozonique en particulier.

### Summary

**State of health of the Arolla Pine (*P. cembra*) forest in the Mercantour National Park (France)**

Observations of the Arolla Pine in the Mercantour National Park, begun in 1982-83, have revealed an abnormal yellowing of the needles, with the oldest falling off prematurely. Several factors acting in synergy would appear to be the cause of the dysfunction, namely: climate, mineral deficiencies and gaseous pollution of the atmosphere, particularly by ozone.

### Riassunto

**Salute della foresta di cembro del Mercantour**

Dagli anni 1982-1983, l'osservazione del cembro (*Pinus cembra*) nel Parco Nazionale del Mercantour rivela su certi alberi un ingiallimento anormale degli aghi seguito dalla caduta prematura del più anziani. Parecchi fattori che agiscono in sinergia potrebbero essere responsabili del disfunzionamento di questo albero, tra i quali, il clima, le carenze minerali e l'inquinamento atmosferico gassoso, ozonico in particolare.

## BIBLIOGRAPHIE

- ACADEMIE DES SCIENCES., (1993). - Ozone et propriétés oxydantes de la troposphère. *Lavoisier Ed*, rapport n°30, 249 p.
- BONNEAU M., DAMBRINE E., ASCHAN C (1991).- Apport de pollution et de nutriments aux peuplements forestiers par l'atmosphère : intensité et variations dans le massif vosgien. *Courrier de la cellule Environnement de l'INRA*, n°16, p 27-32.
- CHERET V., DAGNAC J., FROMARD F., (1987).- Le dépérissement du sapin dans les Pyrénées luchonnaises. *Rev.For Fr.*39 (1), p.12-24.
- DALSTEIN L., (1994).- Le dépérissement du Pin cembro en vallée de Mollières, Parc national du Mercantour. Rapport d'études n°1.
- GARREC J.P., ROSE C., (1988). - Utilisation d'un bio-indicateur végétal pour la mesure de l'ozone en montagne. *Pollution atmosphérique*, p.271-276.
- GIULACCI M., (1985). - Climatologia Statica e Dinamica della Valpadana. C N R Report AQ/3/18, Milano.
- GUNTARDT-GOERG M.S., (1986). - Epicuticular wax of needles of *Pinus cembra*, *Pinus sylvestris* and *Picea abies*. *Verlag Paul Parey Ed.*, Hambourg, p 400-408.
- LANDMANN G, BONNEAU M, BOUHOT-DEL DUC L, FROMARD F, CHERET V, DAGNAC J, SOUCHIER B., (1995). - Crown damage in Norway spruce and silver fir : relation to nutritional status and soil chemical characteristics in the French mountains. In: Landmann G, Bonneau M (eds). Forest decline and atmospheric deposition effects in the French mountains. *Springer*, Berlin Heidelberg New York, p 41-81.
- PUECH L.,(1995).-Critères microstructuraux pour l'identification des causes abiotiques des dépérissements de sapin (*Abies alba*) et de l'épicéa (*Picea abies*) dans les Vosges et dans les Alpes Dauphinoises externes. Thèse de doctorat, Université de Grenoble I, pp1-150.
- SANDRONI S., BACCI P., BOFFA G., PELLEGRINI U., VENTURA A., (1994). -Tropospheric ozone in the pre-alpine and alpine regions. *The science of the Total Environment*, n°156, p 169-182.