

JAUNISSEMENT ET VITALITÉ DU PIN CEMBRO DANS LE MERCANTOUR

Laurence DALSTEIN - J.-P. GARREC - M. BONNEAU

En vallée de Mollières (massif cristallin de l'Argentera-Mercantour, parc national du Mercantour), le Pin cembro constitue, à partir de 1 800 m d'altitude, des peuplements clairs, en association avec l'Épicéa commun et le Sapin pectiné (Contini et Lavarello, 1982). Depuis un peu plus d'une dizaine d'années, l'Arolle présente dans cette région des symptômes de jaunissement d'aiguilles : apparition de nombreuses ponctuations marbrées pouvant confluer en plages jaunies ; aux extrémités de certaines aiguilles, des brunissements marquent une altération profonde des tissus. Les aiguilles atteintes finissent par tomber. Cette atteinte ne concerne qu'une petite proportion de l'ensemble des arbres, du reste concentrés dans certains secteurs, et ne semble pas très inquiétante pour le moment. Cependant, des symptômes voisins affectent aussi, dans d'autres régions du massif (à La Colmiane près de Valdeblore par exemple), l'Épicéa.

Il était donc intéressant de tester les principales hypothèses susceptibles d'expliquer ce jaunissement : problèmes climatiques, déficiences d'alimentation minérale, pollution atmosphérique. Cet article donne les résultats des premières études entreprises depuis trois ans, sans prétendre encore conclure avec certitude.

LE CLIMAT

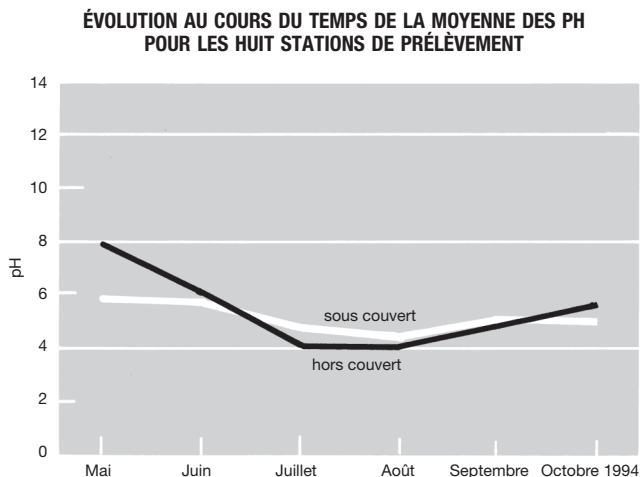
Les informations collectées auprès de la Météorologie nationale indiquent depuis 1982 une augmentation de la température et une diminution de l'enneigement hivernal, ainsi que l'apparition d'un enneigement tardif au printemps, au début de la période de végétation. Ces changements peuvent éventuellement affecter la vitalité du Pin cembro, notamment la moindre chute de neige d'hiver et le réchauffement qui sont susceptibles de détériorer le bilan hydrique.

LES PLUIES ACIDES

Les pluies à découvert et sous le couvert de Pins cembro sont recueillies régulièrement dans huit stations de la vallée de Mollières ou dans ses environs immédiats à des altitudes qui s'échelonnent de 1 840 à 2 227 mètres.

Les pH moyens des eaux de pluie et des pluviollessivats dans ces huit stations, indiqués figure 1 (ci-dessous) pour les six mois de végétation de 1994, mettent en évidence la faible acidité générale des précipitations, moins acides que les pluies naturelles exemptes de pollution (pH 5,5), sauf en juillet-août (liaison possible avec l'acide nitrique produit par le trafic automobile).

Figure 1



Le tableau I (ci-dessous) donne la concentration des principaux anions et cations hors couvert et sous couvert. Les coefficients de concentration (rapport de la concentration sous couvert à la concentration hors couvert) sont élevés, sauf pour les phosphates et les bicarbonates, notamment pour Ca, Mg et K. Pour K, il s'agit d'un phénomène naturel toujours constaté en forêt (retour du potassium absorbé en excès pour équilibrer électriquement la sève brute). Pour Ca et Mg, il peut s'agir, soit de lessivage de dépôts secs (poussières apportées par le vent après érosion éolienne en Provence calcaire ou en Afrique du Nord), soit de récréation (échange, au niveau des tissus foliaires, entre H^+ ou NH_4^+ et les cations Ca^{++} , Mg^{++} , et Mn^{++}). La faible variation de pH sous couvert par rapport au pH hors couvert, ainsi que la faible acidité de la pluie incidente, n'incitent pas à impliquer les ions H^+ dans cette récréation. Par contre, la forte concentration de NH_4^+ sous couvert, constatée en 1995 (malheureusement cet ion n'a pas été dosé en 1994), pourrait expliquer une récréation importante de Ca et Mg (tableau II, p. 43).

Tableau I

Concentration des eaux de pluie hors couvert et sous couvert
pour divers ions, en mg/l,
pour la période de mai à octobre 1994

	Ca	Mg	Na	K	P	HCO ₃	SO ₄	Cl	NO ₃	H ₂ PO ₄	NO ₂
Hors couvert	4,8	0,65	1,45	0,93	5,5	8,2	19,5	6,9	13,9	6,5	0,63
Sous couvert	36,8	6,35	6,68	6,56	38,8	11,7	52,1	25,9	56,0	7,3	9,12
Rapport de concentration	7,7	9,8	4,6	7,0	7,01	1,4	2,7	3,7	4,0	1,1	14,5

Globalement, il faut conclure que l'acidité des pluies est, la plupart du temps, modérée et ne peut pas être retenue comme un éventuel facteur de dépérissement du Pin cembro. La pollution par l'azote est plus importante, à la fois sous forme nitrique et sous forme ammoniacale. Il faut noter aussi que, si l'on traduit en moles les concentrations de Cl et de Na, la concentration en Cl excède largement celle en Na ; on en déduit qu'il y a des sources de chlore non marines (installation d'incinération de déchets urbains ?).

Tableau II **Concentration moyenne des eaux de pluie en azote nitrique et en azote ammoniacal hors couvert et sous couvert** de mai à septembre 1995, en mg/l de N

	N-NO ₃	N-NH ₄	N minéral total
Hors couvert	0,3	0,5	0,8
Sous couvert	3,8	3,9	7,7
Rapport de concentration	12,7	7,8	9,6

NUTRITION MINÉRALE

Des analyses de sol et des analyses foliaires ont été effectuées afin de vérifier si l'alimentation minérale pouvait être en cause dans le jaunissement. Les sols sont fortement acides, comme on pouvait s'y attendre du fait qu'ils sont développés sur un granite très pauvre, le granite de l'Argentera.

Les teneurs moyennes des aiguilles de l'année, en octobre 1993 et en octobre 1994, indiquées au tableau III (ci-dessous), montrent que, dans plusieurs stations où les pins sont jaunes, l'alimentation minérale est plus faible que dans les stations saines. C'est le cas notamment pour le potassium, l'azote, le phosphore (différences significatives à 1 %) et c'est seulement pour ces trois éléments qu'on note des valeurs nettement plus faibles que l'optimum présumé pour le Pin cembro. Elles ne descendent que rarement jusqu'au seuil de carence et c'est surtout le cas pour le potassium en 1994 (station du Col de Salèse).

Il ne semble pas qu'on puisse attribuer à une carence bien nette en un élément déterminé, sauf peut-être le potassium, les jaunissements constatés.

Tableau III **Teneurs des aiguilles de l'année en éléments majeurs** en automne 1993 et 1994, en g/kg.
Ligne supérieure : valeurs extrêmes ; ligne inférieure : moyenne

		N	P	K	Ca	Mg	S
Arbres sains	1993	15,3-18,2 16,6	1,5 - 2,0 1,77	4,6 - 6,8 5,9	3,4 - 6,2 5,0	1,3 - 1,5 1,4	n. d.
	1994	14,6-15,7 15	n. d.	4,2 - 4,6 4,4	3,4 - 7,5 4,8	1,0 - 1,0 1,0	1,0 - 1,2 1,1
Arbres dépérissants	1993	12,6-15,5 14,0	1,0 - 1,4 1,21	3,5 - 4,7 4,1	3,6 - 6,5 5,0	1,0 - 1,4 1,1	n. d.
	1994	12,9-14,1 13,4	n. d.	2,5 - 4,5 3,5	5,3 - 9,9 7,5	0,7 - 1,2 1,0	1,1 - 1,2 1,1

POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE GAZEUSE

La pollution atmosphérique est aussi une cause de dépérissement à envisager. Les mesures effectuées sur le réseau de Qualitair 06 (Nice), ainsi que dans un secteur du Mercantour lors d'une campagne de trois mois en 1994, n'ont mis en évidence que des teneurs très modérées en SO₂ bien inférieures aux normes européennes.

Par contre, la chaîne du Mercantour se positionne entre deux mégalo-poles : Nice, côté français et Cuneo-Turin, côté italien, où les émissions de monoxyde d'azote et de composés organiques volatils, précurseurs de l'ozone (Académie des Sciences, 1993), sont fortes. Dans ces conditions, les niveaux d'ozone de cette région méritent une grande attention car on peut présumer que des quantités importantes d'ozone peuvent prendre naissance sur la Côte d'Azur et à Turin au cours des journées d'été et être transportées par les masses d'air chaud s'élevant jusqu'aux crêtes du Mercantour (Sandroni *et al.*, 1994).

Deux techniques ont été employées pour étudier la pollution par l'ozone : mesures physiques et bio-indicateurs.

Mesures

Les mesures d'ozone sur le réseau Qualitair 06 (figure 2, p. 45), en 1994, montrent des maxima horaires élevés en juin et juillet puisque la norme européenne pour la santé des populations (180 µg/m³ en moyenne horaire) est dépassée six fois au cours de cette période. Les maxima horaires mensuels atteignent 200 µg/m³ en juin et juillet, 160 µg/m³ en août, 120 µg/m³ en septembre.

De même, dans la vallée du Pô, caractérisée par des vents faibles de montagne et de vallées (Giulacci, 1985), cette norme est dépassée à quatre reprises en 1995. Le tableau IV (ci-dessous) donne, pour le réseau de Lingotto-Turin, les concentrations moyennes en O₃ pour juin, juillet, août 1993 et 1994 et le nombre de dépassements du seuil de 200 µg/m³, particulièrement élevé en août 1993.

Tableau IV

Concentrations moyennes mensuelles d'ozone
et nombre de dépassements horaires des 200 µg/m³ à Turin

	Concentrations moyennes mensuelles en µg/m ³		Nombre de dépassements horaires des 200 µg/m ³	
	1993	1994	1993	1994
Juin	79	71	2	7
Juillet	79	90	3	5
Août	88	71	19	4

Dans le Mercantour même, une campagne locale a été effectuée de mi-juillet à mi-septembre 1994 à Adréchas-Mercantour, à 1 500 m d'altitude, dans un site qui surplombe les deux vallées nord-sud qui débouchent sur Nice, celle de la Tinée et celle de la Vésubie. La figure 2 (p. 45) représente, pour la journée du 17 juillet, les concentrations horaires en O₃ à Nice et à Adréchas-Mercantour. On peut voir que le maximum horaire est le même dans les deux sites mais que des valeurs élevées supérieures à 120 µg/m³ ne durent que de 9 à 17 heures à Nice, tandis qu'elles persistent pendant 24 heures dans le Mercantour. Cette situation est classique en montagne : les substances réductrices qui détruisent l'ozone la nuit en ville (NO émis par les automobiles par exemple et non transformé en NO₂ faute de rayonnement solaire) n'existent pas en montagne ; elles restent confinées dans les vallées du fait des inversions de températures (Paffrath et Peters, 1988), ce qui explique que la végétation soit particulièrement exposée aux dommages d'ozone en altitude.

Une conférence, organisée par le Conseil économique des Nations-Unies pour l'Europe (Fuhrer et Achermann, 1994), a fixé, pour les arbres forestiers, le seuil nocif de doses cumulées (dose = concentration x temps) à 10 000 ppb x heure (20 000 $\mu\text{g}/\text{m}^3 \times \text{h}$) de cumul des concentrations horaires supérieures à 40 ppb (1 ppb = 10^{-6} en volume = $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$) pour 24 heures par jour et pour 6 mois (saison de végétation). Cette valeur est appelée AOT 40. Si on reprend le détail des données recueillies à Adréchas-Mercantour, on peut calculer que, pour la seule période du 12 au 31 juillet (et malgré trois jours d'arrêt de l'enregistreur pendant cette période), on arrive à un AOT 40 de $14\,810 \mu\text{g}/\text{m}^3 \times \text{h}$; pour le mois d'août avec quatre jours de panne, l'AOT 40 atteint $19\,562 \mu\text{g}/\text{m}^3 \times \text{h}$. C'est dire que, dans la vallée de Mollières, on dépasse probablement, en deux mois de saison de végétation seulement, le double de la dose-seuil de dommages retenue pour six mois.

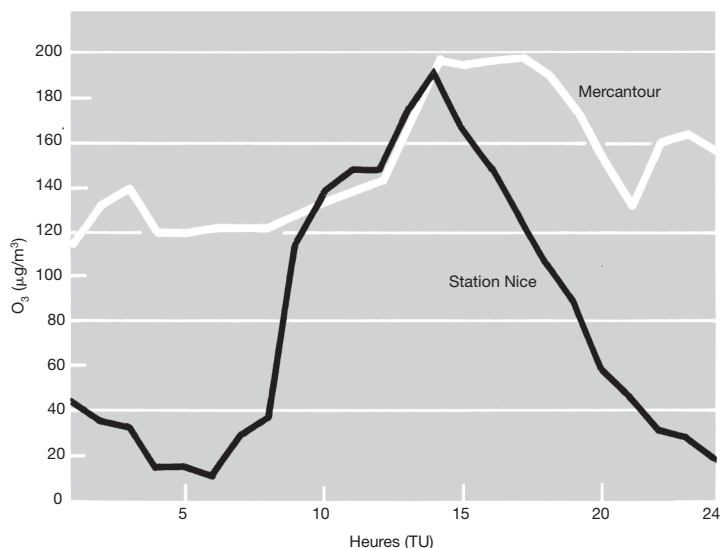


Figure 2
ÉVOLUTION DURANT LA JOURNÉE DU 17 JUILLET 1994 DES CONCENTRATIONS HORAIRES D'OZONE SUR LE LITTORAL NIÇOIS ET DANS LE MERCANTOUR

Bioindicateurs

D'une part, on a utilisé le tabac BEL W3, connu pour sa grande sensibilité à l'ozone (Garrec et Rose, 1988). Des plants de cette variété ont été cultivés à basse altitude, puis mis en place le 1^{er} juillet 1994 dans cinq stations de la vallée de Mollières : Source Chardolle (1 930 m d'altitude, adret), route du Lac Nègre (2 053 m, exposition Ouest), Vacherie du Collet (1 840 m, ubac), Col de Salèse (2 031 m, ubac), Pont d'Ingolf (1 947 m, adret).

Un indice de dommages foliaires (IDF) est calculé : c'est la moyenne hebdomadaire de l'augmentation du pourcentage de surface foliaire nécrosée pour le nombre total de feuilles vivantes en fin de semaine. La figure 3 (p. 46) donne la moyenne de ces indices pour la période juillet-août 1994 et pour les cinq stations choisies. Noter que les plants de tabac sont remplacés périodiquement car ils ne survivraient pas à une exposition de longue durée. Les nécroses sont nettes et rapides, montrant la réalité de concentrations élevées d'ozone.

Les dommages sont plus élevés dans les trois stations d'adret ou d'exposition Ouest que dans les stations d'ubac. La station "Source Chardolle" en adret et située en tête du vallon de Solèse débouchant sur la vallée de la Vésubie, et donc recevant directement les arrivées de polluants de la côte niçoise, est la plus atteinte.

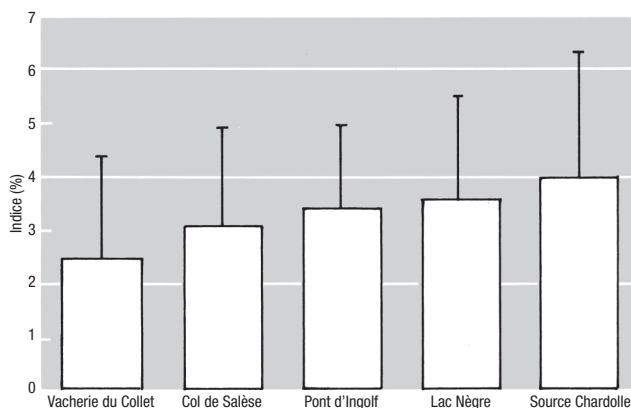


Figure 3

**MOYENNE DE L'INDICE
DE DOMMAGES FOLIAIRES
SUR LES TABACS EN JUILLET-AOÛT 1994
POUR LES DIFFÉRENTES STATIONS**

Bien entendu, on ne connaît pas, pour le moment (une expérimentation est en cours), le seuil de sensibilité à l'ozone propre au Pin cembro. Le tabac BEL W3 est tellement sensible que les indications qu'il donne n'ont qu'une valeur relative entre stations, mais le fait qu'il soit nécrosé ne peut suffire à conclure que le Pin cembro de Mollières soit victime de pollution par l'ozone. Cependant, les niveaux élevés persistants en été, ainsi que le calcul de la somme des doses d'exposition en excédent de $80 \mu\text{g}/\text{m}^3 \times \text{h}$ rendent cette hypothèse plausible.

Une étude en microscopie électronique à balayage a montré que les cires épicuticulaires et subtomatiques des aiguilles jaunissantes présentaient des dégradations : la structure en réseau des aiguilles saines disparaît et la cire devient amorphe. Cette observation, sans constituer une preuve car d'autres facteurs peuvent induire cette évolution, est toutefois compatible avec l'hypothèse de dommages d'ozone (Lorenzini et Pucci, 1990).

RECHERCHE DE PARASITES ÉVENTUELS

L'étude cryptogamique montre, au niveau des pousses de Pin cembro, la présence d'une microflore variée : *Alternaria*, *Cladosporia*, *Curvularia*, *Botrytis*, *Hormonema*, *Phoma*, *Raffaeba*, *Trichoderma*. Le cryptogame le plus important, *Hormonema dermatoides*, se manifeste seulement sur des sujets stressés. Il n'y a pas de pathogènes stricts mais habituellement des pathogènes secondaires dont certains sont capables d'induire des mortalités partielles (Morelet, communication personnelle).

Deux pucerons communs de l'Arolle, *Cinara cembrae* et *Pineus cembrae* ne peuvent justifier à eux seuls le jaunissement intense des arbres. Ce ne sont que des parasites secondaires, colonisant des arbres déjà affaiblis par d'autres causes.

CONCLUSIONS

Le jaunissement qui atteint une partie de la population de Pin cembro en vallée de Mollières, ainsi que l'Épicéa commun dans d'autres secteurs proches, n'est pas pour le moment alarmant mais justifie néanmoins qu'on essaie d'en déterminer les causes.

La faible acidité des pluies et le faible taux de SO_2 en général ne permettent pas de retenir ces deux facteurs comme générateurs des dommages constatés.

L'étude des facteurs biotiques ne révèle pour le moment que des champignons et des pucerons qui s'installent habituellement sur des arbres affaiblis.

La faiblesse de l'alimentation minérale constatée dans les stations malades par rapport aux stations saines n'est pas telle qu'on puisse la considérer comme une cause primaire. Cependant, les arbres jaunis semblent plus fréquents dans des bas de versants humides où des nappes de pente circulent presque en permanence et sont susceptibles de lessiver les éléments nutritifs les plus mobiles, le potassium notamment. Cette coïncidence entre stations susceptibles de perdre plus facilement les éléments nutritifs et zones de jaunissement préférentiel permet cependant d'avancer l'hypothèse que la faiblesse de la nutrition minérale pourrait être un facteur prédisposant. Selinger *et al.* (1986) ont montré que la photosynthèse de l'Épicéa est davantage diminuée par l'ozone lorsque l'alimentation minérale est déficiente.

Les niveaux élevés d'ozone qui ont été enregistrés font de ce polluant un candidat sérieux au rôle de facteur prépondérant. Rappelons que les doses mesurées sont nettement supérieures au seuil d'AOT 40 de $20\ 000\ \mu\text{g}/\text{m}^3 \times \text{h}$ suggéré par la Conférence du Conseil économique des Nations-Unies pour l'Europe. Il faut remarquer aussi que les dommages constatés et les caractères de l'alimentation minérale ne sont pas sans rappeler les jaunissements observés sur Sapin et Épicéa dans les années quatre-vingt dans d'autres régions alpines ; une étude détaillée de l'anatomie des aiguilles d'Épicéa en Chartreuse et en Belledonne (Puech, 1995) avait conclu, par comparaison avec les connaissances déjà acquises sur le sujet, à la vraisemblance de dommages dus à l'ozone.

Cependant, il est encore prématuré d'affirmer que l'ozone est bien le responsable. Cette hypothèse, vraisemblable compte tenu des doses d'exposition, doit être confirmée par plusieurs types d'études menées par le Groupe international pour l'étude des forêts subalpines :

- achèvement de l'étude expérimentale commencée dans les chambres à ciel ouvert du Donon qui avaient déjà été utilisées pour déterminer la sensibilité à l'ozone de l'Épicéa et du Hêtre ;
- poursuite des mesures de teneur en ozone de l'air *in situ* ;
- étude anatomique confirmant que l'on trouve bien au niveau tissulaire les symptômes des dommages d'ozone décrits chez d'autres essences (cristaux d'oxalate de calcium à l'intérieur des cellules, accumulation d'une substance proche de la lignine dans le tissu palissadique des aiguilles, etc.) ;
- confirmation que les taches chlorotiques sur les aiguilles n'ont pas de cause biotique ou mécanique.

En outre, la mesure du taux d'acide abscissique dans les aiguilles comme marqueur de stress, une étude dendroécologique (largeur des cernes selon les époques) et celle de l'évolution de la flore des peuplements étudiés renseigneront sur l'intensité, l'histoire et l'évolution des stress subis par ces peuplements de Pin cembro.

Laurence DALSTEIN
Groupe international
pour l'Étude des Forêts alpines
69, avenue des Hespérides
F-06300 NICE-MONTBARON

J.-P. GARREC
Laboratoire d'Étude
de la Pollution atmosphérique
INRA - Centre de Recherches de Nancy
F-54280 CHAMPENOUX

M. BONNEAU
Équipe
Cycles biogéochimiques

Remerciements

Nous remercions MM. Laugier et Guernet pour leur assistance technique dans les analyses hydrologiques, MM. Morelet et Renaudière pour leurs analyses de la pathogénie, ainsi que les laboratoires INRA de Champenoux, Arras et Pont-de-la-Maye.

BIBLIOGRAPHIE

- ACADÉMIE DES SCIENCES. — Ozone et propriétés oxydantes de la troposphère. — Paris : Lavoisier, 1993. — 249 p. (Rapport n° 30).
- CONTINI (L.), LAVARELO (Y.). — Le Pin cembro. Répartition, écologie, sylviculture et production. — Versailles : INRA, 1992. — 197 p.
- DALSTEIN (L.). — La Pollution atmosphérique dans le massif du Mercantour. Impact sur le peuplement d'Arolles. — *Rapport d'Études*, 1995.
- DALSTEIN (L.), GARREC (J.-P.), BONNEAU (M.). — La Santé de la forêt d'Arolle du Mercantour. — *Forêt méditerranéenne*, vol. XVII, 1996, pp. 89-96.
- FUHRER (J.), ACHERMANN (B.) Éd. — Critical loads for ozone, a UN.ECE Workshop report. — Liebefeld-Bern (Suisse) : Station fédérale de Recherche en Chimie agricole et sur l'Hygiène de l'Environnement, 1994 (Les Cahiers de la FAC Liebefeld ; n° 16).
- GARREC (J.-P.), ROSE (C.). — Utilisation d'un bioindicateur végétal pour la mesure de l'ozone en montagne. — *Pollution atmosphérique*, 1988, pp. 271-276.
- GIULACCI (M.). — Climatologia statica e dinamica della Valpadana. — CNR Report AQ/3/18. — Milano, 1985.
- LORENZINI (G.), PUCCI (N.). — Avversita delle Abetine. Aspetti della Fitotossicità dell'Ozono su Abete. — Università di Pisa, Sez. Patologia Vegetale, Tiposerv. Ed., 1992. — pp. 249-259.
- PAFFRATH (D.), PETERS (W.). — Betrachtung der Ozonverteilung im Zusammenhang der neuartigen Waldschäden. — *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, vol. 107, 1988, pp. 152-159.
- PUECH (L.). — Critères microstructuraux pour l'identification des causes abiotiques des dépérissements du Sapin (*Abies alba* Mill.) et de l'Épicéa (*Picea abies* (L.) Karst.) dans les Vosges et dans les Alpes dauphinoises. — Grenoble : Université Joseph-Fournier, 1995 (Thèse Spécialité Biologie).
- SANDRONI (S.), BACCI (P.), BOFFA (G.), PELLEGRINI (U.), VENTURA (A.). — Tropospheric ozone in the pre-alpine and alpine regions. — *The Science of the Total Environment*, n° 156, 1994, pp. 169-182.
- SELINGER (H.), KNOPPIK (D.), ZIEGLER-JÖNS (A.). — Einfluss von Mineralstoffernährung, Ozon und saurem Nebel auf Photosynthese-Parameter und stomatare Leitfähigkeit von *Picea abies* (L.) Karst. — *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, vol. 105, 1986, pp. 239-242.