État des forêts d'altitude en relation avec la pollution de l'air par l'ozone dans la région niçoise

High-altitude forest health condition related to ozone pollution in the Nice region, France

Laurence DALSTEIN-RICHIER*, Antoine MANGIN** , Pierre CARRÉGA***,
Céline GUEGUEN**, Nicolas VAS*, Olivier SANCHEZ**, Bertrand THÉODORE**, Wanda BÉROLO***

Résumé

Durant de longs mois, les pays bordant la Méditerranée sont soumis à des concentrations élevées en ozone près des grandes agglomérations. Dans le sud-est méditerranéen français, la problématique des effets de l'ozone sur la végétation a été abordée au cours des années 2002 à 2004. Ces travaux ont montré le réel impact de ce polluant sur la végétation. Des observations spécifiques de symptômes liés à l'ozone ont révélé des dégâts bien visibles notamment sur le pin cembro du Mercantour. Les mesures de l'ozone, nécessitant l'emploi d'analyseurs physico-chimiques et de capteurs passifs, ont montré de forts taux d'AOT 40. Des corrélations ont été établies entre les niveaux élevés d'ozone et la gravité des atteintes foliaires. Ponctuellement, les flux de pollution ont été suivis pour l'interprétation de symptômes bien visibles sur la végétation. Une reconstitution des trajectoires et profils des mouvements aériens et donc des polluants a été réalisée au moyen de lâchers de ballons afin de définir les caractères de la ventilation. Parallèlement, un projet de modélisation a été élaboré dans la région niçoise afin de vérifier, pour un épisode météorologique particulier, si une part des concentrations de polluants constatées sur la zone alpine était liée aux polluants émis sur la frange littorale où se concentre la majorité des activités humaines.

Abstract

For many months of the year, Mediterranean areas near large cities are submitted to high ozone concentrations. In the South-Eastern French Mediterranean region, the effects of ozone on vegetation were studied from 2002 to 2004. The results show that the pollutant has a real impact on plant life. Monitoring for specific symptoms linked to ozone pollution revealed clearly visible damage, especially on Arolla pine in the Mercantour. Using absorption analysers and passive samplers, high levels of AOT 40 were measured. A correlation was shown between high ozone levels and the severity of foliar damage. Pollution flow was monitored occasionally to better interpret the visible symptoms on the vegetation. Balloons were released in order to map trajectories and cross-sections of air currents, and thus of airborne pollutants, and to determine typical wind movements. A computer model was also developed for the Nice region in order to verify whether or not, for a given meteorological event, a part of the pollutants deposited in the alpine zones originated in the heavily populated coastal areas.

** Groupe International d'Études de Forêts Sud-européennes (GIEFS), 69, avenue des Hespérides, 06300 Nice.*

*** ACRI-ST, 260, route du Pin Montard, 06904 Sophia-Antipolis Cedex.*

**** Université Nice-Sophia-Antipolis, Équipe Gestion et Valorisation de l'Environnement (GVE) de l'UMR Espace – CNRS, 98, boulevard Édouard Herriot, 06204 Nice Cedex 3.*

Introduction

Si la pollution par l'ozone intéresse plus le milieu urbain en raison de ses conséquences sur la santé humaine, les recherches sur les effets de ce polluant sur le dépérissement de la forêt sont plus rares tant il est vrai que la qualité de l'air en milieu rural et son influence sur le monde végétal n'intéresse qu'une faible part de la population. Pourtant, la pollution gazeuse liée à l'ozone représente une cause réelle de l'affaiblissement de l'état de santé général de la forêt [1-5].

Les masses d'air, en balayant les zones urbaines ou en s'enrichissant de polluants industriels peuvent être transportées à longue distance et se transformer au cours de leur déplacement [6]. C'est le cas de l'ozone, qui existe de manière naturelle mais qui est produit par photochimie à partir des oxydes d'azote, de monoxyde de carbone ou d'hydrocarbures. Ces derniers sont des précurseurs, produits aujourd'hui en grande partie par les activités humaines.

En été 2003, sur l'ensemble du territoire européen et notamment en France, les épisodes de forte pollution par l'ozone ont révélé de nombreux dépassements des niveaux d'information réglementaires [7]. C'est en région Provence-Alpes-Côte d'Azur que ces dépassements ont été les plus fréquents. La côte méditerranéenne fortement urbanisée et bénéficiant d'un ensoleillement soutenu, a souffert d'une production d'ozone non négligeable. Les zones forestières proches de ces grandes agglomérations [Marseille, Nice, Valence (Espagne)] ont encore subi directement leurs nuisances [5, 8-11].

Au travers d'un programme européen Interreg III B, des équipes méditerranéennes se sont unies pour mettre en évidence les dégâts de la végétation liés à cette pollution photochimique au sein de leur pays : l'IPLA *(Istituto per le Piante da Legno e l'Ambiante)* de Turin a suivi ces phénomènes dans la région du Piémont, le CEAM *(Centro des Estudios Ambientales del Mediterraneo)* en Espagne a réalisé des investigations dans la région de Valence et le GIEFS (Groupe international d'études des forêts sud-européennes) a conduit ses travaux en région Provence-Alpes-Côte d'Azur, notamment dans les Alpes-Maritimes.

En France, le GIEFS a mis en place des systèmes de mesure de l'ozone au moyen de capteurs passifs disposés près de placettes de suivi forestier. Les dégâts ont été mis en évidence par les notations de déficit foliaire et par les notations de dommages induits spécifiquement par l'ozone. Cet article rend compte des résultats des atteintes visibles sur les pins cembro *(Pinus cembra)* du Mercantour dans le haut-pays niçois. Une recherche de symptômes visibles sur le feuillage de l'ensemble de la végétation a également été réalisée dans des zones éclairées proches de ces placettes forestières. Des corrélations par analyse statistique, ont ensuite été effectuées entre les niveaux moyens d'ozone et les symptômes spécifiques de l'ozone visibles sur les aiguilles des conifères d'altitude.

En 2003, pour vérifier qu'une part des dommages repérés en altitude dans le Mercantour étaient liés à la pollution provenant des activités humaines de la zone littorale où se concentre la majorité des activités humaines du département, la société ACRI-ST de Sophia-Antipolis et le laboratoire GVE (Gestion et valorisation de l'environnement) de l'Université de Nice-Sophia-Antipolis (UMR Espace – CNRS) ont été sollicités pour mettre en évidence, par mesure et par modélisation, les mouvements de masses d'air pollué remontant les vallées depuis la Côte d'Azur jusqu'au massif du Mercantour. Pour le GVE, il s'agissait de suivre et de mesurer le déplacement réel de masses d'air à l'aide de traceurs. L'objectif d'ACRI-ST était de le vérifier par modélisation, pour le même épisode météorologique. À cette fin, la dispersion de NO_x (polluants, précurseurs d'ozone) considérés comme traceurs passifs, a été suivie afin de visualiser la formation, l'évolution et le devenir des panaches issus des deux unités urbaines de Nice et de Cannes-Grasse-Antibes.

Matériel et méthode

Technique d'évaluation du dommage foliaire

Déficit foliaire

Dans le Mercantour, en 2003 et 2004, 15 placettes de 20 pins cembro, ont été notées pour réaliser l'inventaire des dommages foliaires. Les caractéristiques stationnelles de chaque placette étaient connues (exposition, altitude, type d'humus, compétition éventuelle des individus et pédologie). L'évaluation du pourcentage de déficit foliaire a suivi les références européennes [12-13]. Le déficit foliaire a été estimé par tranches de 5 %.

L'endommagement des arbres est réel pour un pourcentage de perte foliaire supérieur à 25 %.

Symptômes spécifiques liés à l'ozone

Selon le protocole européen de notation des dégâts d'ozone (issu du Manuel de l'*International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution on Forests, ICP-Forests* de l'Organisation des Nations Unies, Commission économique pour l'Europe, (http://www.gva.es/ceam/ICP-forests/), cinq arbres éclairés ont été choisis au sein de chaque placette forestière. Pour chaque arbre, cinq branches du tiers supérieur du houppier ont été prélevées.

Pour les conifères, les symptômes semblables à ceux dus à l'ozone ont été observés sur 30 aiguilles de l'année en cours (C) et 30 aiguilles âgées de 1 an (C + 1) et 2 ans (C + 2). Le pourcentage d'atteinte de la surface des aiguilles a été estimé.

Technique de mesure de l'ozone

Analyseurs par absorption UV
(Environnement SA : O_3 41M – France)

Quatre analyseurs appartenant au réseau Qualitair ont servi de référence pour ces travaux.

Deux d'entre eux ont été installés sur le littoral niçois : jardin botanique de Nice (110 m) et Nice-Cessole (50 m) et deux en altitude dans le Mercantour près des placettes de pins cembro : Adréchas (1 500 m) et Cians (1 450 m), à 70 km au nord de Nice. Ces analyseurs qui fournissaient des moyennes horaires ont permis de calculer l'AOT 40 *(average over threshold).*

Selon la directive 2002/3/CE du Parlement européen et du Conseil du 12 février 2002 relative à l'ozone dans l'air ambiant (Tableau 1), l'AOT40 est défini comme étant la somme des différences entre les concentrations horaires supérieures à 40 ppb et 40 ppb durant une période donnée en utilisant uniquement les valeurs sur une heure, mesurées quotidiennement entre 8 h et 20 h (heure de l'Europe centrale) [14].

Capsules à diffusion passive de l'ozone
(Laboratoire IVL – Suède)

Les capteurs passifs (Figure 1), au nombre de sept, toujours installés près de chaque placette mais hors couvert forestier, ont été protégés par un plateau métallique, placé à environ 1,80 m au-dessus du sol. Chaque capteur possédait une capsule enfermant un filtre imprégné d'une solution absorbant l'ozone. Le gaz migrait à l'intérieur du tube, *via* l'extrémité ouverte, par diffusion moléculaire. Le temps d'exposition était d'un mois. L'analyse de l'ozone s'est faite par chromatographie ionique.

Tableau 1.
Niveaux d'AOT 40 pour la protection de la végétation et de la forêt (Directive 2002/3/CE).
AOT 40 levels for vegetation and forest protection.

	Type de station	Niveau d'AOT 40	Période de calcul
Protection de la végétation	Périurbaine, rurale, rurale de fond	3 000 ppb	1 h, accumulée de mai à juillet
Protection de la forêt	Périurbaine, rurale, rurale de fond	10 000 ppb	1 h, accumulée d'avril à septembre

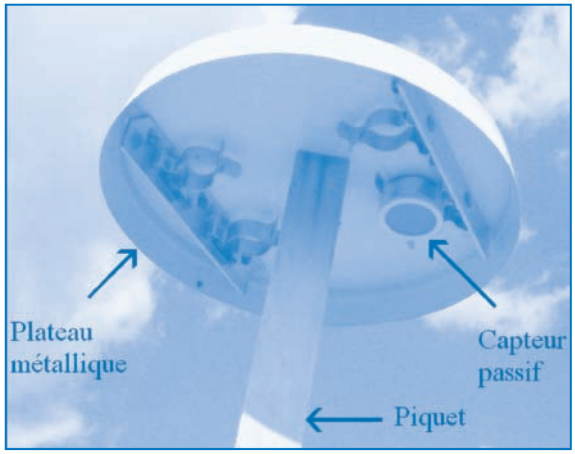


Figure 1.
Capteur passif d'ozone.
Passive ozone sampler.
(Photo : Nicolas Vas, GIEFS, 2 juin 2003)

Cette technique a été validée en 2000 : des tests ont été effectués pour vérifier la bonne correspondance des résultats entre tubes passifs et analyseurs de référence physico-chimiques en tenant compte de la distance à l'analyseur, de la hauteur de prélèvement et de la durée d'échantillonnage [15].

Suivi des flux de pollution dans les Alpes-Maritimes

Modélisation du devenir des panaches urbains

ACRI-ST a choisi de modéliser la dispersion des NO_x en les considérant comme une espèce passive : aucun inventaire d'émissions suffisamment complet au niveau du département des Alpes-Maritimes n'était disponible lors de la réalisation de l'étude pour utiliser une approche prenant en compte la photochimie. De plus, la modélisation de la formation et du transport de polluants secondaires comme l'ozone aurait nécessité la connaissance des apports extérieurs au domaine (transport à large échelle). L'objectif était donc davantage de caractériser de façon qualitative plutôt que quantitative les apports de polluant en provenance des agglomérations de la Côte d'Azur vers la zone d'intérêt.

Ce travail a été réalisé en trois étapes :

- modélisation météorologique de l'épisode retenu ;
- évaluation des émissions horaires de NO_x ;
- modélisation de la dispersion des NO_x en temps que traceur passif.

La modélisation a été réalisée à l'aide des logiciels MM5 (NCAR, *National Center for Atmospheric Research)* pour la météorologie et CALPUFF *(EarthTech)* pour la dispersion : l'utilisation d'un modèle météorologique de type pronostique comme MM5 était indispensable pour modéliser des écoulements cohérents au niveau des différentes vallées de l'arrière-pays niçois.

Le calcul du transport des polluants émis au niveau des agglomérations de Nice et d'Antibes-Cannes-Grasse imposait de connaître de façon précise les vents au niveau de l'ensemble des vallées de la zone d'étude.

Les influences combinées du relief très tourmenté de cette zone et de la mer Méditerranée confèrent à l'arrière-pays niçois des caractéristiques météorologiques complexes où les effets thermiques prédominent.

Zone d'étude

Le domaine d'étude de la météorologie était constitué d'un maillage horizontal régulier d'environ 90 km × 90 km dont la taille de maille était fixée à 1 km. Une résolution aussi fine était rendue nécessaire par l'escarpement de cette zone qui s'étendait du Muy à l'ouest à Menton à l'est et du Trayas au sud à Saint-Dalmas-le-Selvage au nord, dans la vallée de la Tinée. Ce domaine contenait les vallées menant au Parc national du Mercantour (vallées du Var, de la Vésubie, de la Gordolasque, de la Tinée et du Cians).

Le maillage vertical (en niveaux de pression adimensionnés) a été affiné dans la couche limite de manière à obtenir une bonne modélisation de la dispersion des polluants. Cette caractérisation du maillage était ainsi cohérente avec la résolution des données de topographie envisagée et le relief de la zone.

Le modèle météorologique MM5

MM5 est basé sur la technique des modèles emboîtés : les conditions limites des différents domaines considérés sont fournies par les champs météorologiques calculés sur le domaine supérieur appelé « domaine mère ». Les trois niveaux d'imbrication ont permis de passer d'une résolution à 9 km sur le domaine 1 ( ) à une résolution à 3 km au niveau du domaine 2 ( ) et à une résolution à 1 km au niveau de la zone d'étude domaine 3 ( ) (Figure 2).

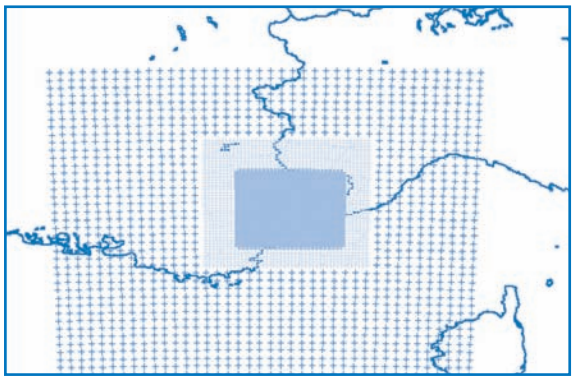


Figure 2.
Limites des trois domaines météorologiques imbriqués.
Location of the three domains used in the meteorological model.
(Source : ACRI)

Aux limites du domaine le plus grand, les sorties d'un modèle américain à l'échelle continentale COAMPS sur l'Europe développé par le FNMOC *(Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center),* fournissant des analyses et des prévisions à 72 heures, ont été utilisées. La résolution du modèle était de 0,2° soit environ 20 km. Les sorties du modèle COAMPS sont disponibles sur le serveur américain MEL à l'adresse http://mel.dmso.mil.

Calcul des émissions

L'objectif de la phase de calcul des émissions a permis d'estimer les émissions horaires de NO_x pour chaque maille du domaine de calcul pendant l'épisode modélisé.

Les seules données d'émissions disponibles étaient des données annuelles, concernant 1994 et relatives à de larges unités géographiques. Or, pour l'étude de dispersion, il était nécessaire de disposer de valeurs d'émissions horaires et spatialisées.

À cette fin, l'estimation de ces émissions de NO_x a été réalisée en trois étapes :

- spatialisation des données annuelles du Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique (CITEPA), 1994 sur la base de l'occupation du sol ;
- actualisation des données annuelles du CITEPA 1994 à l'année 2003 ;
- désagrégation horaire sur l'épisode modélisé (jour de semaine du mois d'août) des données annuelles spatialisées.

Topographie et occupation des sols

Le modèle MM5 a utilisé les données physiographiques des domaines d'étude :

- données d'occupation des sols ;
- données de topographie.

Dans le cadre de l'application de MM5 pour ce projet, des développements ont été réalisés pour prendre en entrée de MM5 des données physiographiques plus précises et validées sur la zone. Les données de topographie et d'occupation des sols (Corine L and Cover) en Provence-Alpes-Côte d'Azur distribuées par le CRIGE (Centre régional pour l'information géographique) et l'EEA *(European Environmental Agency)* ont été utilisées.

Épisode modélisé

La période modélisée s'est étendue entre le 2 et le 8 août 2003. Cette période coïncidait avec un épisode de pollution généralisée par l'ozone sur la France enregistré pendant l'été 2003.

Description du modèle de dispersion

Le logiciel CALPUFF a été exploité pour modéliser le transport des NO_x considérés comme traceurs passifs. CALPUFF est un modèle instationnaire, lagrangien, gaussien de dispersion de bouffées. Il est multicouches et multi-espèces et permet de modéliser les effets de conditions météorologiques variant dans l'espace et le temps. Il est totalement interfacé avec le logiciel météorologique diagnostique CALMET développé par la société Earthtech. Le couplage entre le modèle météorologique MM5 et le code de dispersion a été assuré en utilisant le logiciel CALMET : CALMET a permis d'interpoler les sorties MM5 sur la grille de calcul CALPUFF.

Les émissions des cinq grandes sources industrielles ont été considérées dans le modèle CALPUFF en tant que sources ponctuelles. Les autres émissions (transports routier et non routier, résidentiel) ont été modélisées à l'aide de sources volumiques réparties sur la grille météorologique. Les émissions ont donc été considérées comme émises au niveau du sol.

Mesure du déplacement des masses d'air

Deux principaux types de mesure du déplacement de l'air (chargé ou non de polluants) existent pour travailler à fine échelle spatiale et sur les premières centaines de mètres de l'atmosphère :

- le premier consiste à mesurer ses déplacements en un ou plusieurs niveaux au-dessus d'un point fixe, par anémomètre-girouette, ballon-sonde ou radar-Doppler et assimilés ;
- le second revient à suivre le déplacement de l'air lui-même, ou plutôt d'un objet témoin qui est un traceur en équilibre avec l'air qui l'entoure, et se déplaçant donc avec lui : fumée, ballon plafonnant…



Figure 3.
Ballon plafonnant en mylar avant son lancement, le 7 août 2003 à la Vacherie du Collet (vallon de Mollières). À droite : télémètre optique ; à gauche : théodolite optique.
Weather balloon made of mylar before release on August 7, 2003 at the Vacherie du Collet in the Mollières Valley. Optical telemetre visible at right, optical theodolite at left.
(Photo : Wanda Bérolo, UMR Espace – CNRS)

Le sondage par ballon gonflé à l'hélium appartient au premier type, bien que le ballon se déplace également latéralement. Le ballon (en latex) dont la vitesse d'ascendance est connue (environ 2 m/s) traverse des couches d'air éventuellement animées de mouvements horizontaux dont l'altitude est donnée par la mesure du temps écoulé depuis le départ. Cette technique largement employée dans le cadre de cette étude a permis de documenter les superpositions locales d'écoulements.

Les ballons plafonnants également utilisés pour ces travaux étaient en mylar, matière indéformable malgré la diminution de pression d'altitude, à l'inverse du latex. De ce fait, une fois qu'ils avaient atteint l'équilibre de densité avec l'air ambiant, les ballons se comportaient comme une bulle d'air : leurs mouvements devant être interprétés comme ceux de l'air dans lequel ils se trouvaient, et non comme les leurs [16-19]. La quantification précise des mouvements de l'air a nécessité une poursuite du ballon aux instruments : télémètre optique pour la distance, et théodolite optique pour l'azimut (écart relatif par rapport au nord) et pour la hauteur angulaire (écart par rapport à l'horizontale), visibles sur la figure 3.

Toutes les 30 secondes, une mesure de ces trois paramètres a été opérée pour restituer la trajectoire en plan du ballon et son profil vertical. Ce type de mesure est réservé à de relativement courtes distances, environ 4 km de portée des instruments optiques (nettement inférieure pour les lasers infrarouges), à moins de disposer de radars de poursuite, ce qui suppose une toute autre instrumentation et un autre coût… Un autre problème a été qu'en montagne et en forêt, il était difficile de trouver des sites se prêtant à l'installation des instruments.

Il a été également possible de recourir à des poursuites uniquement visuelles nécessitant alors un déplacement en automobile. La précision de cette estimation, évidemment sans commune mesure avec la poursuite instrumentale, a pu malgré tout fournir beaucoup d'informations par l'observation du ballon, en permettant de le suivre sur de longues distances (plus de 10 km).

Au cours de l'été 2003 et durant 11 journées, des mesures de traçage de masses d'air ont été effectuées dans différents sites regroupés en cinq secteurs géographiques :

- la basse vallée de la Vésubie et son raccordement à celle du Var ;
- la vallée de la Vésubie, plus en amont ;
- le vallon du Boréon : un des deux torrents donnant naissance à la Vésubie ;
- le col de Salèse avec ses deux vallons attenants : l'un, le vallon de Mollières descend vers l'ouest pour rejoindre la Tinée, l'autre, le vallon de Salèse descend vers l'est-sud-est et constitue le deuxième torrent en amont de la Vésubie ;
- la haute vallée de la Roya, plus à l'est.

Lors de la première quinzaine d'août 2003, période la plus chaude et la plus polluée en ozone, des mesures ont eu lieu les 5, 6, 7 et 12 août dans la vallée de la Vésubie, et en particulier dans les vallons du Boréon, de Salèse et de Mollières. Le choix de ces secteurs a été guidé par un double objectif : d'une part mettre en évidence la continuité de la circulation de l'air (vecteur d'éventuels polluants comme l'ozone ou ses précurseurs) au sein d'une même vallée ou entre la mer et le continent ; d'autre part insister sur certains lieux remarquables par leurs concentrations en ozone.

Dégâts foliaires sur pin cembro et relation avec l'ozone

Déficit foliaire

La description des caractéristiques stationnelles des différentes placettes d'arbres [15] et la recherche parasitaire ont permis de mieux interpréter l'état sanitaire des forêts. Les premières observations visuelles ont fait apparaître, pour les pins cembro, l'attaque de parasites secondaires. Ces examens ont conduit à écarter l'éventualité d'effets parasitaires graves sur cette essence. Ces forêts clairsemées, anciennement pâturées, évoluent souvent sur un substrat acide et pauvre en azote et potassium, issus d'un socle granitique [8].

Ces conditions expliquaient en partie le fait que ces pins pouvaient afficher des endommagements importants : la majorité de ces arbres se situant dans des moyennes de déficit foliaire entre 15 et 60 %.

La figure 4 récapitule l'intensité du déficit foliaire sur l'ensemble des pins cembro notés en 2003 et 2004.

Une augmentation du déficit foliaire a été constatée entre les années 2003 et 2004, vraisemblablement en raison de la canicule de l'été 2003. L'effet sécheresse et le stress hydrique ont influencé incontestablement l'état de santé général de ces arbres évoluant dans des conditions limites stationnelles. Datant de l'ère glaciaire, le pin cembro pousse dans le Mercantour en limite de son aire géographique surtout depuis ces dernières décennies où l'augmentation des températures et l'intensité de sécheresse sont plus marquées [8].

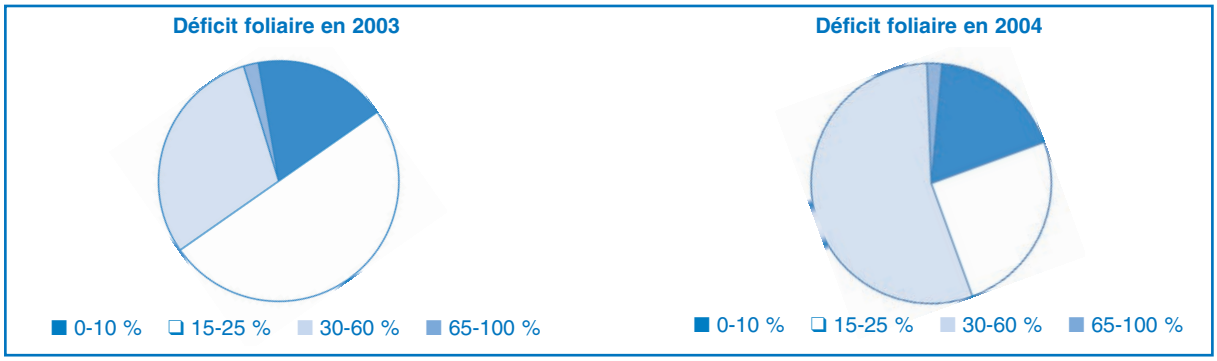


Figure 4.
Intensité du déficit foliaire des pins cembro notés en 2003 et 2004.
Foliar deficit recorded for Arolla pine in 2003 and 2004.

Symptômes spécifiques d'ozone

Les aiguilles de pins cembro examinées en 2003 et 2004, ont présenté des petites taches diffuses appelées *mottling* de couleur vert clair en particulier sur la face supérieure des rameaux et à la pointe des aiguilles (Figure 5). Ces chloroses étaient systématiquement plus présentes sur les aiguilles âgées. Ces dégâts spécifiques dus à l'ozone ont pu être confirmés par le centre de validation européen basé en Suisse (WSL, Birmensdorf).

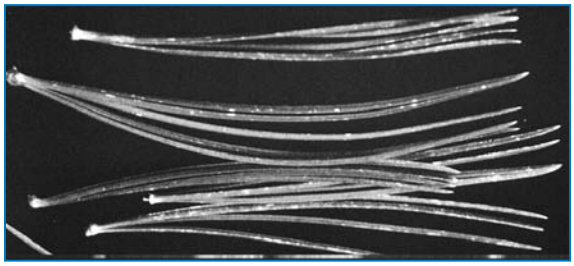


Figure 5.
Aiguilles de pin cembro, âgées de deux ans multisymptomatiques (ozone, gel, insectes).
Two-year-old Arolla pine needles showing multiple symptoms (ozone, frost and insect damage).
(Photo : Laurence Dalstein-Richier, GIEFS, 28 août 2003)



Figure 6.
Feuilles de saule Marsault *(Salix caprea)* présentant des symptômes confirmés dus à l'ozone.Vallée de la Roya.
Salix caprea leaves with confirmed ozone symptoms. Roya Valley.
(Photo : Laurence Dalstein-Richier, GIEFS, 5 août 2003)

Sur la végétation arbustive de montagne particulièrement sensible à l'ozone, sont apparus en 2003 et 2004 des symptômes. Ils se présentaient, selon les espèces, sous forme de ponctuations jaunâtres, rouges ou violacées toujours situées entre les nervures, se développant sur le feuillage supérieur exposé à l'éclairement (voir, par exemple, Figure 6). Le feuillage à l'ombre ou restant protégé par les feuilles supérieures (effet d'ombre) n'a pas montré d'endommagement spécifique comme décrit dans [2] et sur le site Internet du CEAM http://www.gva.es/ceam/ICP-forests/.

Concentrations d'ozone et corrélations avec les dégâts notés

Analyseurs physico-chimiques

Pour les étés 2003 et 2004 et pour les quatre analyseurs, la figure 7 présente les résultats des doses d'AOT 40 :

- calculées entre mai et juillet et comparées à l'AOT 40 pour la protection de la végétation fixé à 3 000 ppm.h^{-1} ;
- calculées entre mai et septembre et comparées à l'AOT 40 fixé pour la protection de la forêt à 10 000 ppm.h.

Les quatre stations ont largement dépassé ces limites européennes (Figure 7), ce qui signifie qu'il a pu y avoir des dégâts visibles et ou physiologiques sur l'ensemble de la végétation : herbacée, arbustive ou arborée. C'est sur le site de montagne de l'Adréchas que les valeurs les plus élevées ont été enregistrées. Située à 70 km de Nice et à 1 500 m d'altitude, cette station de montagne a été soumise vraisemblablement aux masses d'air remontant les vallées de la Tinée et de la Vésubie depuis la côte azuréenne.

En 2004, mis à part la station de Cessole située en centre urbain, toutes les autres stations ont affiché des valeurs d'AOT 40 inférieures à celles de 2003. L'effet canicule en 2003 a provoqué une photochimie importante générant une pollution par l'ozone.

Capteurs passifs

En 2003, comme en 2004, les moyennes de concentration d'ozone diffèrent suivant leur situation topographique.

Les zones de crêtes du moyen- ou haut-pays, en fonction de leur altitude, étaient plus concernées par les fortes concentrations que le littoral ou les fonds de vallées (Figure 8). Les moyennes étaient élevées sur les cols du Mercantour (entre 50 et 60 ppb). Le gradient de concentration était marqué entre base et cime des montagnes.

Ces sites de montagne ont enregistré des valeurs plus fortes en 2003 qu'en 2004.

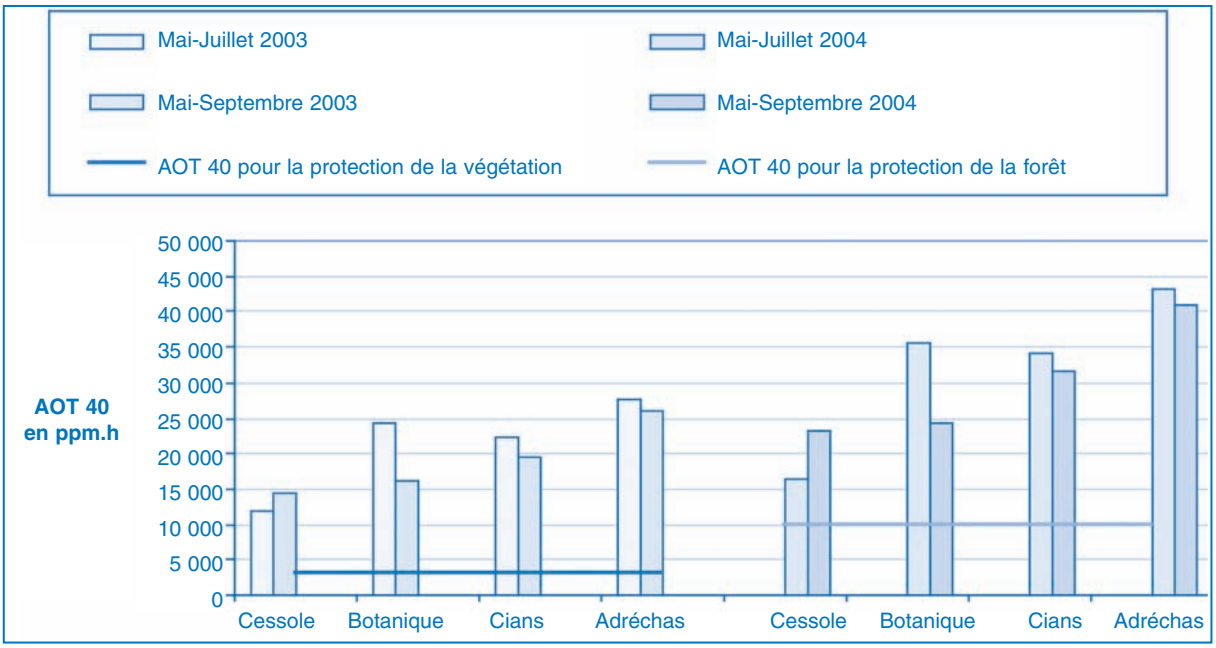


Figure 7.
Doses d'AOT 40 exprimées en ppm.h pour les quatre analyseurs physico-chimiques.
Périodes : de mai à juillet 2003 et 2004 et de mai à septembre 2003 et 2004.
AOT 40 values expressed in ppm.h for the four UV absorption analysers,
from May to July 2003 and 2004 and from May to September 2003 and 2004.

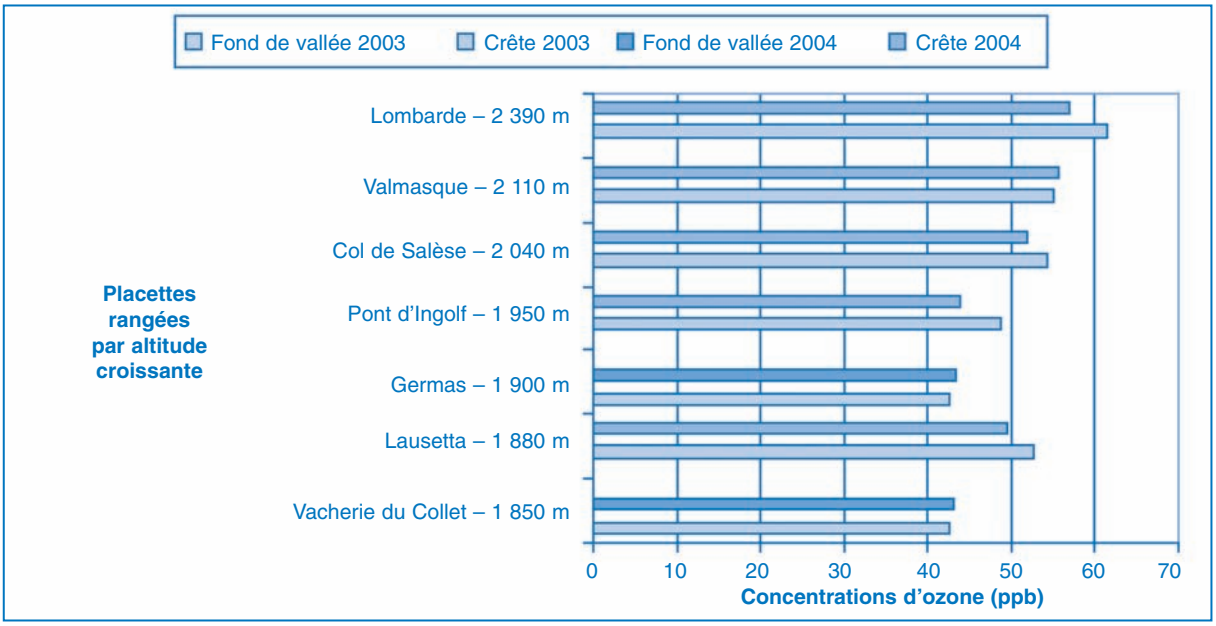


Figure 8.
Résultats des capteurs passifs localisés dans le Parc national du Mercantour en 2003 et 2004.
Fonds de vallon et zones de crêtes classés par altitude croissante.
Results from passive samplers in the Mercantour National Park in 2003 and 2004.
Valley bottoms and ridges are classified by increasing altitude.

Comparaison des symptômes d'ozone entre années d'aiguilles

La figure 9 présente les moyennes des taches chlorotiques (CM) exprimées en pourcentage de surface affectée et leurs erreurs standard pour les échantillons d'aiguilles âgées de 1 an (C + 1) et de 2 ans (C + 2) de pins cembro prélevés en 2003 et 2004. Quelles que soient les années, les taches chlorotiques ont affecté une plus grande surface d'aiguilles C + 2 que d'aiguilles C + 1.

Les aiguilles de l'année ont présenté très rarement des dégâts d'ozone en raison d'un temps d'exposition à l'ozone plus bref et de stomates souvent non matures et moins fonctionnels. Les aiguilles âgées de 2 ans ont systématiquement montré plus de taches chlorotiques que les aiguilles âgées de 1 an (Figure 9). Le test t de Student-Fischer a indiqué que la différence observée entre les aiguilles C + 1 et C + 2 était significative au seuil de 1 %.

Pour comprendre l'évolution des taches chlorotiques, les mêmes aiguilles C + 1 en 2003, devenues C + 2 en 2004, ont été suivies (Figure 9). Le test t de Student-Fischer a montré qu'il existait une différence très significative ($p < 0,01$) pour ces mêmes aiguilles entre les deux années. Les symptômes observés la deuxième année constituaient bien le cumul de ceux notés en 2003 et de ceux nouvellement apparus en 2004.

Corrélation entre les symptômes spécifiques dus à l'ozone et la concentration d'ozone

En 2003, la figure 10 montre que lorsque la concentration d'ozone augmentait, le pourcentage de surface foliaire affectée par des dégâts spécifiques d'ozone augmentait également. La corrélation entre taches chlorotiques et concentration d'ozone était très significative au seuil de 1 % pour les aiguilles âgées de 1 an ($R^2 = 0,92$) et pour les aiguilles âgées de 2 ans ($R^2 = 0,80$). Il y a bien eu une influence des niveaux d'ozone sur l'intensité des dégâts spécifiques observés sur ces arbres.

La même tendance a été observée en 2004 (Figure 11), il y a bien eu une corrélation entre les épisodes de fortes pollutions par l'ozone et les dégâts observés sur le feuillage. En 2003, cet effet a été plus marqué, l'effet sécheresse a accentué les épisodes de pollution et par-delà les endommagements spécifiques liés à l'ozone.

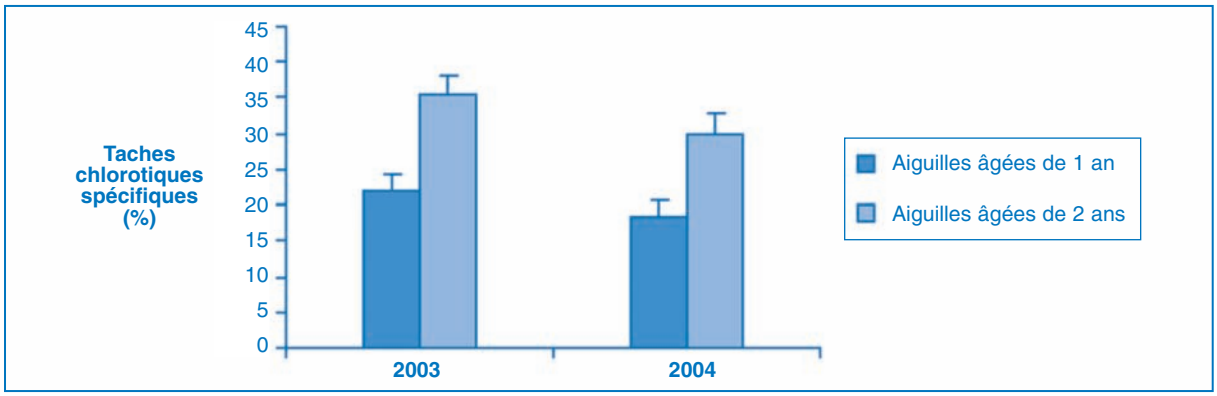


Figure 9.
Moyenne des taches chlorotiques (CM en %) et erreur standard sur la moyenne pour les échantillons d'aiguilles C + 1 et C + 2 des pins cembro notés en 2003 et 2004.
Average percentage of chlorotic mottles (CM) and standard deviation for Arolla pine needle samples C + 1 and C + 2 in 2003 and 2004.

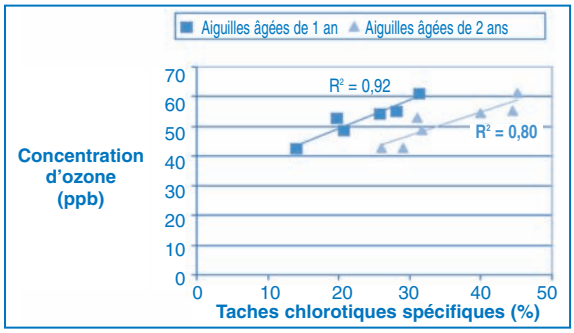


Figure 10.
Comparaison en 2003 des taches chlorotiques (CM) d'aiguilles de pins cembro âgées de 1 (C + 1) et de 2 ans (C + 2) avec la concentration moyenne en ozone exprimée en ppb.
Comparison of 2003 chlorotic mottle (CM) percentages for one-year old (C + 1) and two-year old (C + 2) Arolla pine needles ; average ozone concentrations are expressed in ppb.

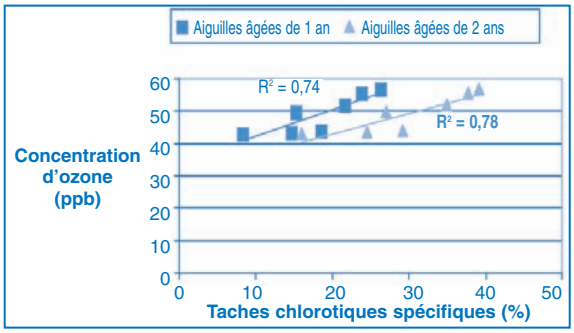


Figure 11.
Comparaison en 2004 des taches chlorotiques (CM) d'aiguilles de pins cembro âgées de 1 (C + 1) et de 2 ans (C + 2) avec la concentration moyenne en ozone exprimée en ppb.
Comparison of 2004 chlorotic mottle (CM) percentages for one-year old (C + 1) and two-year old (C + 2) Arolla pine needles ; average ozone concentrations are expressed in ppb.

Symptômes spécifiques de l'ozone et situation topographique des sites

La figure 12 indique la gravité des dégâts d'ozone pour les aiguilles âgées de 1 an notées en 2003 en fonction de la situation topographique des capteurs passifs (fond de vallée ou crêtes) et leur niveau de concentration d'ozone. Pour une concentration d'ozone importante, c'est-à-dire pour une majorité de capteurs situés en zones de crête frontalière, il apparaît que les symptômes d'ozone étaient d'autant plus prépondérants que les aiguilles étaient plus âgées.

Pour le pin cembro, la correspondance entre les dégâts d'ozone et les niveaux de ce dernier a été plus importante dès la première année d'aiguilles (Figure 12). Il semblerait que la sensibilité à l'ozone des cembraies soit bien marquée.

Modélisation du devenir des panaches urbains des unités urbaines de Nice et de Cannes-Grasse-Antibes

Modélisation de la météorologie

La période de simulation a été caractérisée par des vents faibles. La météorologie de la zone d'étude a été influencée essentiellement par des effets thermiques dus à la présence conjointe de la mer et des montagnes : on pourra noter que les vents au niveau de Nice étaient orientés au nord la nuit et au sud la journée indiquant l'influence de vents de vallée au niveau de la vallée du Var (Figure 13, p. 512).

Les champs de vent modélisés ont été comparés aux valeurs mesurées au niveau des 19 stations Météo-France réparties sur la côte, dans le moyen- et l'arrière-pays niçois (Figure 14, p. 513). Ces comparaisons ont montré que les champs de vent et de températures ont été correctement modélisés par MM5 même dans le cas d'un relief complexe.

Le phénomène de brise thermique a été modélisé. Il est illustré par les résultats de MM5 ci-après pour la journée du 5 août 2003 (coupe entre Saint-Laurent-du-Var et le vallon de Mollières) (Figure 15, p. 514).

À 12 h 00 (à gauche), on observe dans la couche de surface d'épaisseur 1,5 km un vent de mer (▭). À 1 h 00 (à droite), on observe un vent de terre (▭) dans la couche de surface d'épaisseur 1,5 km et une recirculation dans la couche située entre 1,7 km et 3 km d'altitude.

Résultats de dispersion

Les sorties horaires du modèle de dispersion CALPUFF ont été cartographiées pour l'ensemble des pas de temps constituant la période de simulation (Figure 16, p. 514).

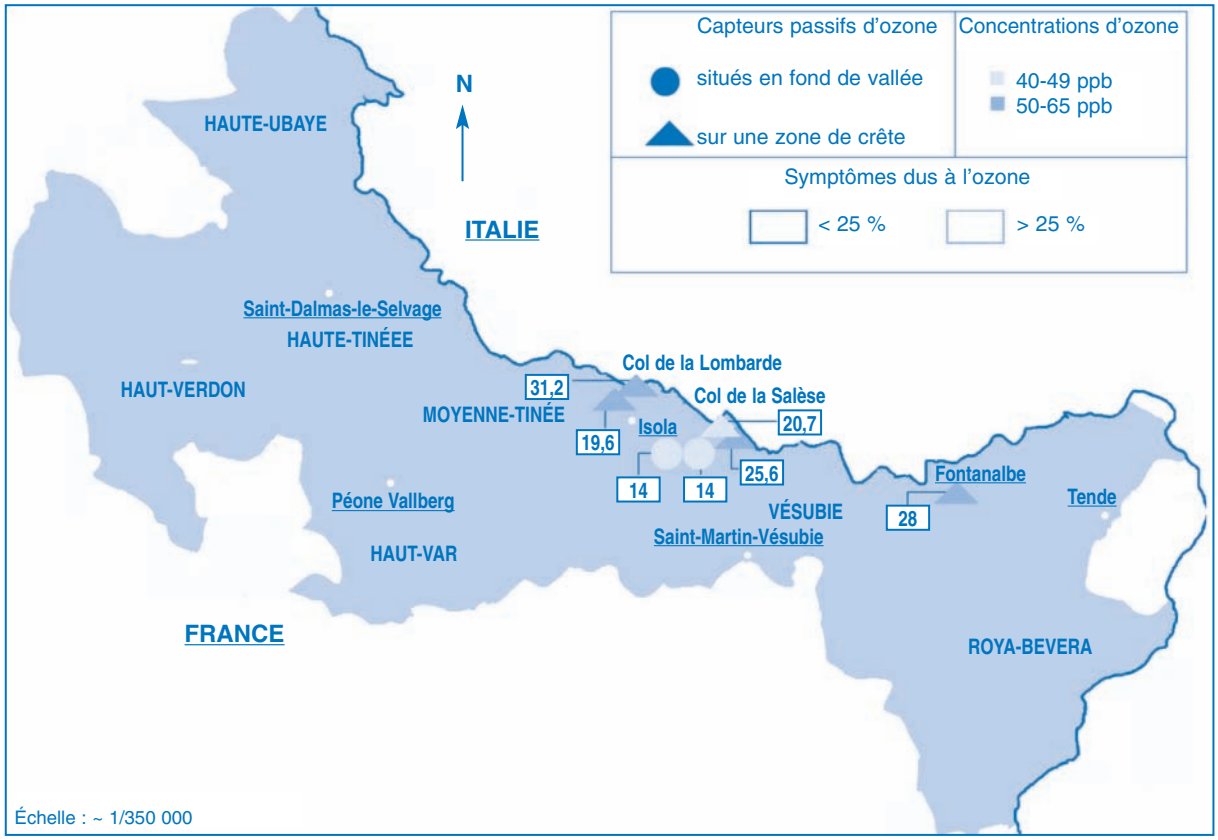


Figure 12.
Suivi des concentrations d'ozone et des taches chlorotiques sur les aiguilles de pins cembro âgées de 1 an en 2003.
Ozone concentrations and chlorotic mottling on one-year-old Arolla pine needles in 2003.
(Carte : GIEFS)

On peut constater que, dans des conditions météorologiques non perturbées, le panache des unités urbaines de Nice et de Cannes-Grasse-Antibes a balayé l'arrière-pays au gré des vents de vallées.

Le panache de Nice et d'Antibes s'est engouffré dans la vallée du Var, puis en fonction des vents, est remonté préférentiellement le long de certaines vallées : soit le long de la vallée du Var (le 4 août), soit le long de la Tinée (le 2 août), ou encore le long de la Tinée et de la Vésubie (les 2 et 3 août). Dans le cas d'une remontée le long de la Tinée et/ou de la Vésubie, le panache de Nice et d'Antibes a atteint le Parc national du Mercantour. Ce transport des précurseurs a favorisé la formation d'ozone dans l'arrière-pays et son transport vers le Mercantour.

Le panache de Cannes a suivi préférentiellement la vallée de la Siagne et est resté relativement séparé de celui de Nice et d'Antibes.

Traçage des masses d'air : modèle et mesures pour validation

Omniprésence du système de brises thermiques

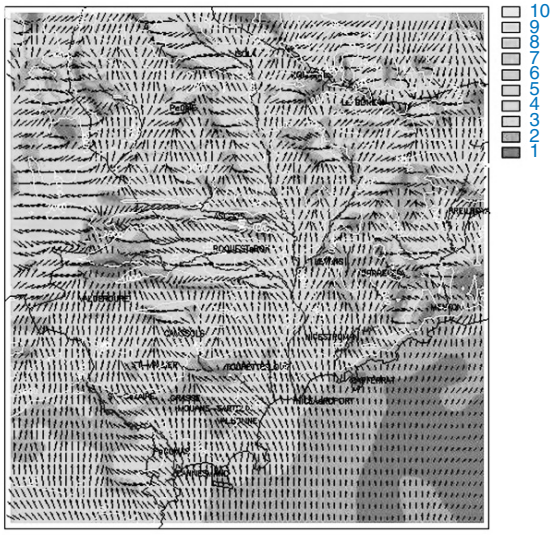
Contexte des mesures

La situation météorologique de l'été 2003 particulièrement remarquable par sa chaleur, a néanmoins été représentative (bien qu'accentuée), de l'été méditerranéen. En effet, la fréquence et l'intensité des périodes anticycloniques ont été élevées, ce qui est la règle dans la région, diminuant ainsi les advections de vent synoptique fort, et favorisant au contraire la quasi-permanence de systèmes de brises thermiques. À l'inverse des vents synoptiques d'échelle régionale à plus générale (pas de distance : centaines et milliers de kilomètres) obéissant à la position des grands centres d'action (anticyclones et dépressions) qui détermine le gradient horizontal de pression, les brises thermiques sont des vents engendrés par les contrastes thermiques d'échelle locale (quelques kilomètres à quelques dizaines de kilomètres).

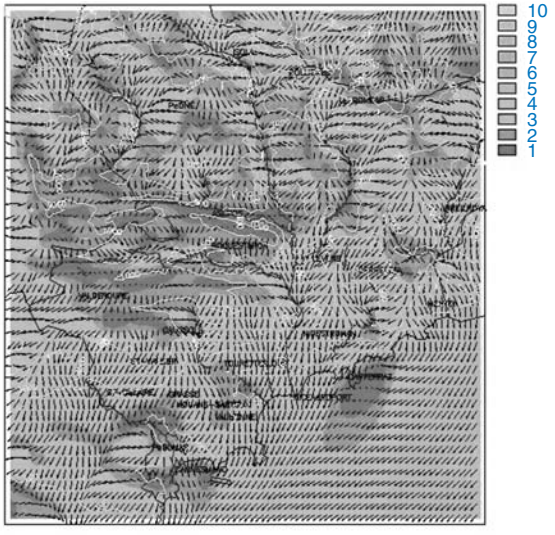
Le contraste thermique mer-continent engendre une brise provenant de la mer et dirigée vers la terre plus chaude, surmontée d'une relative dépression. Dans le même temps, les pentes des montagnes fortement ensoleillées génèrent des ascendances de l'air surchauffé qui appelle l'air de la vallée en aval par mouvement compensatoire : c'est la brise de vallée, qui prend ainsi sans limite observable le relais de la brise de mer, vers l'intérieur. De nuit, le mouvement s'inverse totalement, de la montagne vers la vallée, et de la terre vers la mer. Ces systèmes ne peuvent s'établir correctement qu'à deux conditions : absence ou faiblesse du vent synoptique et absence ou faiblesse de la nébulosité, ce qui facilite ainsi les transferts radiatifs.

Principaux résultats

À l'exception des orages qui ont perturbé provisoirement les écoulements et les ont rendus chaotiques, le même type de comportement des flux d'air a été retrouvé quotidiennement : lever en début de matinée d'une brise ascendante, remontant d'abord les pentes sur les versants insolés (orientés à l'est) perpendiculairement à l'axe de la vallée, cédant la place en milieu de matinée à une brise de vallée. Ces brises ont remonté les vallées, même celles qui convergeaient de part et d'autre d'une ligne de crête comme celle du col de Salèse, par exemple, et passaient alors l'une au-dessus de l'autre.



Champ de vent à 10 m (m/s) 03-08-2003 14 h (GMT)
MM5 – Alpes-Maritimes



Champ de vent à 10 m (m/s) 03-08-2003 4 h (GMT)
MM5 – Alpes-Maritimes

Figure 13.
Simulation des champs de vent à 10 m en août 2003 avec gradation (niveaux de gris) des vitesses de vent exprimées en m/s.
Simulation of wind fields at 10 m altitude in August, 2003 with speed of wind gradation expressed in m/s.
(Réalisation : ACRI-ST
Reproduit avec autorisation / Reproduced with permission).

Le 7 août vers 12 h, heure locale, par exemple, les sondages et les trajectoires de ballons plafonnants ont montré respectivement au-dessus du col de Salèse (2 031 m d'altitude), en partant du sol (Figure 17) :

- une première couche de brise de vallée d'est-sud-est (remontant le vallon de Salèse) de 10 m d'épaisseur ;
- une seconde couche de brise de vallée d'ouest-nord-ouest (remontant le vallon de Mollières) de 40 m d'épaisseur, se superposant à la première ;
- une couche de vent nul d'environ 200 m d'épaisseur ;
- un flux d'est à sud-est assez lent au-dessus de 2 300 m d'altitude environ, conforme aux données du profileur de vent de Nice-aéroport au même moment [20], où souffle dans l'air libre un vent d'est faible (5 à 10 nœuds) entre 1 000 et 3 500 m d'altitude. D'origine synoptique, ce flux d'est au départ a été néanmoins guidé par la topographie et infléchi en sud-est vers la ligne de crête de la frontière italienne. Celle-ci est située au nord du col de Salèse, secteur du lac Nègre dont les taux d'ozone ont été particulièrement élevés. Les ballons ont convergé vers le col puis ont été pris dans le flux de sud-est qui les a dirigés vers la crête frontière d'altitude supérieure à 2 500-2 600 m (Figure 17).

Le 7 août à 12 h10, la trajectoire d'un ballon lâché à la Vacherie du Collet (1 830 m) et poursuivi aux instruments (Figures 18 et 19, p. 516 et 517), a montré avec précision une première partie du parcours en brise de vallée, vers l'est. Ensuite, à 2 600 m d'altitude, après une longue hésitation (points 17 à 31), le ballon est rentré dans la couche de vent supérieure et, pris dans un flux de sud-sud-est, a changé radicalement de direction.

La figure 20 indique tous les lieux de poursuites de ballons plafonnants au cours de l'été 2003, dans les cinq secteurs précités, ainsi que les trajectoires types observées.

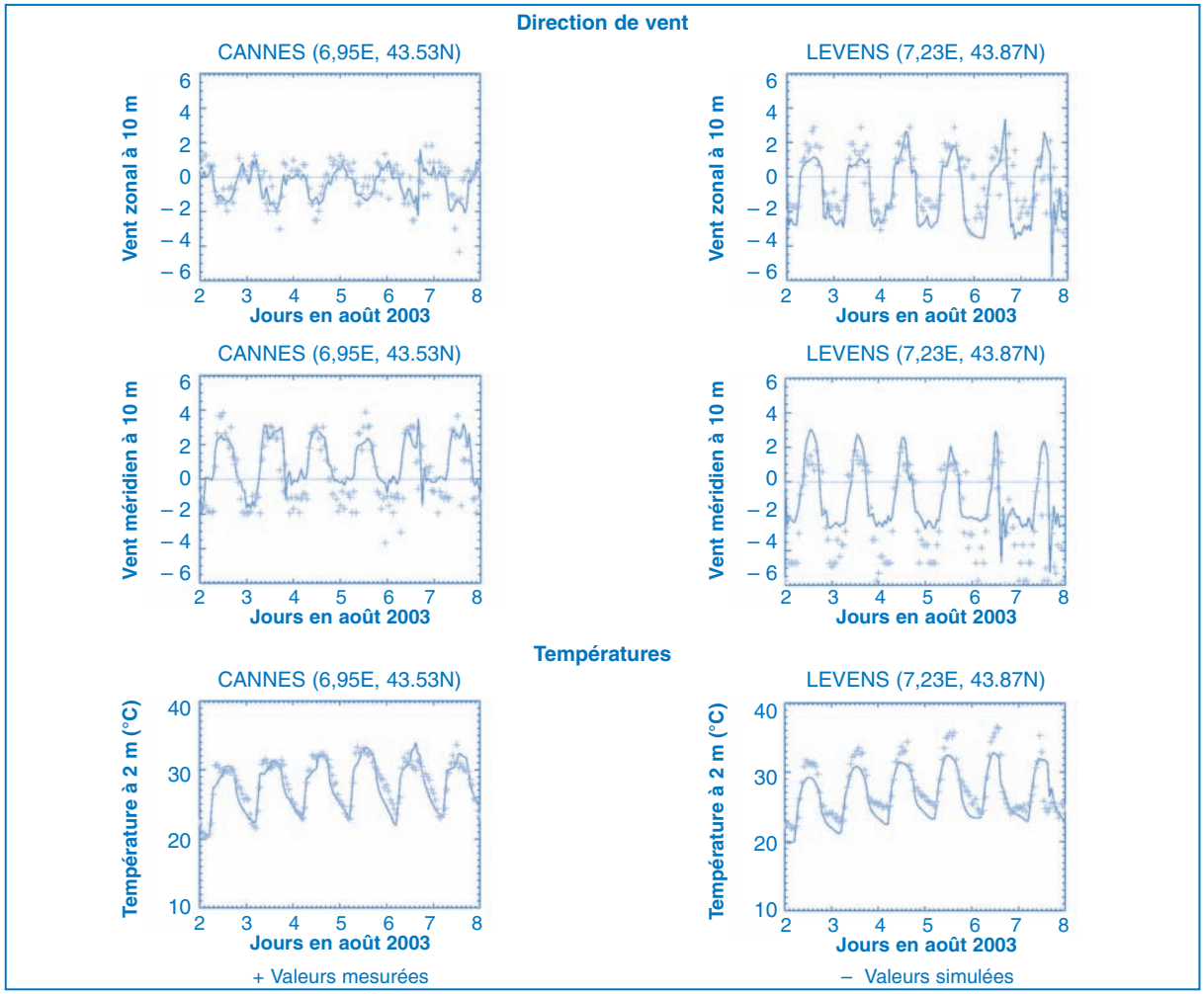


Figure 14.

Comparaison des températures simulées par le modèle (–) et observées (+) près de la côte (Cannes) et à l'intérieur des terres (Levens).
Vent zonal en m/s : valeur de la composante zonale du vent (positive pour E et négative pour W).
Vent méridien en m/s : valeur de la composante méridienne du vent (positive pour S et négative pour N).

Comparison between temperatures predicted by the model (–) and actual temperatures (+) near the coast (Cannes) and inland (Levens).
Zonal wind expressed in m/s : (positive for E et negative for W). Meridian wind expressed in m/s : (positive for S et negative for N).

(Réalisation : ACRI-ST
Reproduit avec autorisation / Reproduced with permission)

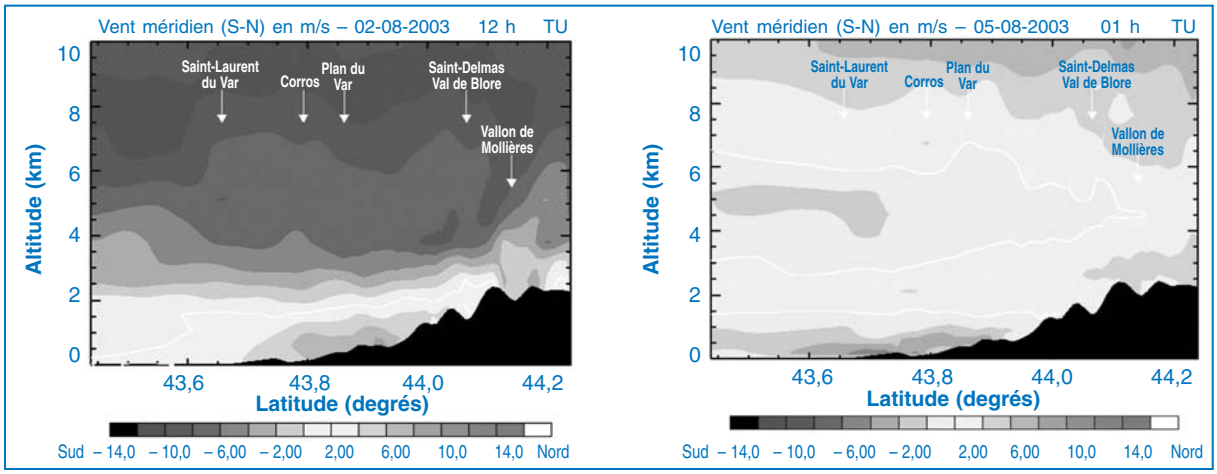


Figure 15.
Brise thermique modélisée par MM5. Coupe entre Saint-Laurent-du-Var et le vallon de Mollières.
Thermal breeze modelled by MM5. Cross-section between Saint-Laurent-du-Var and the Mollières Valley.
(Réalisation : ACRI-ST
Reproduit avec autorisation / Reproduced with permission)

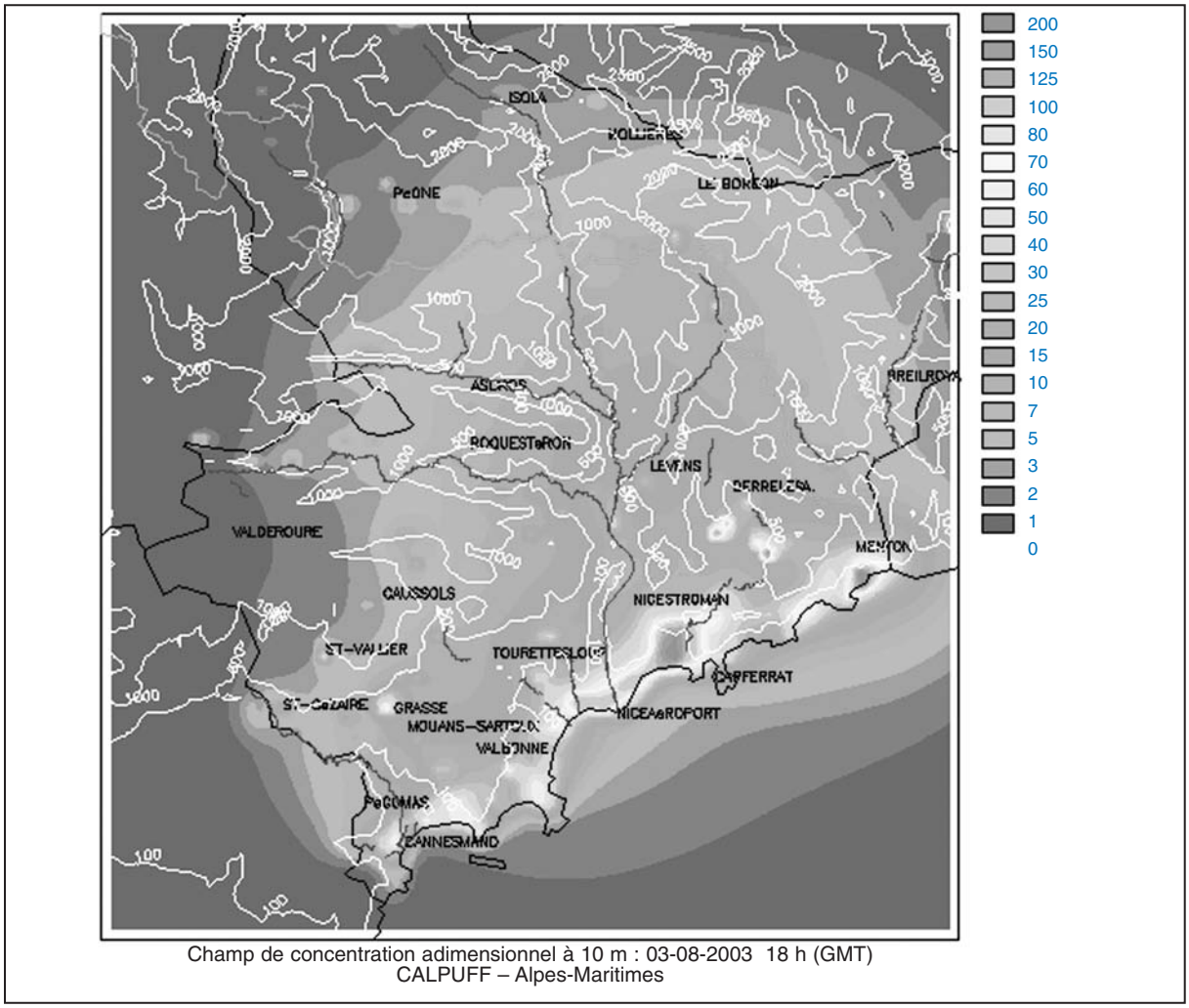


Figure 16.
Dispersion des NO_x considérés comme traceurs passifs (adimensionnel) le 3 août 2003 à 18 h (GMT).
NO_x dispersal on August 3, 2003 at 6:00 pm (GMT).
(Réalisation : ACRI-ST
Reproduit avec autorisation / Reproduced with permission)

Il est clair que tous les écoulements diurnes recensés provenaient d'aval dans un mouvement général orienté depuis le littoral jusqu'aux crêtes les plus élevées (frontière franco-italienne) par le mécanisme des brises thermiques diurnes. L'origine de flux d'air de basses couches (dans lesquelles baignent les végétaux), depuis l'Italie padane à travers les crêtes de l'Argentera-Mercantour a semblé extrêmement rare, en particulier durant les périodes de fortes concentrations d'ozone (situations anticycloniques favorisant l'instauration de brises) [21].

En revanche, cette possibilité existe, rarement en été, lors de régimes d'est en altitude supérieure à 2 500-3 000 m (Lombarde). Ces régimes transfèrent effectivement de l'air padan d'altitude sur le versant français. Mais dans ce cas, les concentrations en ozone observées sont modérées, proches de la pollution de fond (environ 70-90 µg/m³).

Discussion

Cette étude a permis de montrer que si la principale source de pollution est le milieu urbain (frange littorale méditerranéenne sud-est), l'ozone et ses précurseurs ont pu se déplacer sous l'effet des courants atmosphériques vers les milieux ruraux et en montagne, dans le Mercantour, à quelques dizaines voire quelques centaines de kilomètres. C'est dans ces régions que les arbres et les végétaux sont les plus exposés à cette forme de pollution. Les milieux naturels et les forêts proches des grandes agglomérations de Nice, Cannes et Monaco sont d'autant plus confrontés à la pollution par l'ozone que la région est fortement ensoleillée et dispose d'une frontière naturelle montagneuse, en l'occurrence le massif du Mercantour aspirant par le jeu des brises thermiques diurnes, les masses d'air polluées qui se développent sur le littoral.

Les dispositions de la réglementation concernant la protection de la végétation et de la forêt face à la pollution par l'ozone ont largement évolué depuis ces dernières années. Ces valeurs ont été fixées grâce à l'observation en laboratoires de plantes et d'arbres exposés artificiellement à différentes concentrations d'ozone. Les chambres de fumigation des centres européens de validation ont permis de détecter les seuils à ne pas dépasser avant l'apparition de symptômes visibles sur la végétation.

Pour la forêt, l'AOT 40 fixé à 10 000 ppb, a atteint dans les Alpes-Maritimes, à l'Adréchas, la valeur de 43 276 ppb pour les mois de mai à septembre 2003, année la plus chaude et la plus polluée. Les valeurs enregistrées dans l'est du bassin méditerranéen français confirment bien l'importance et la place prépondérante de ce polluant dans cette région.

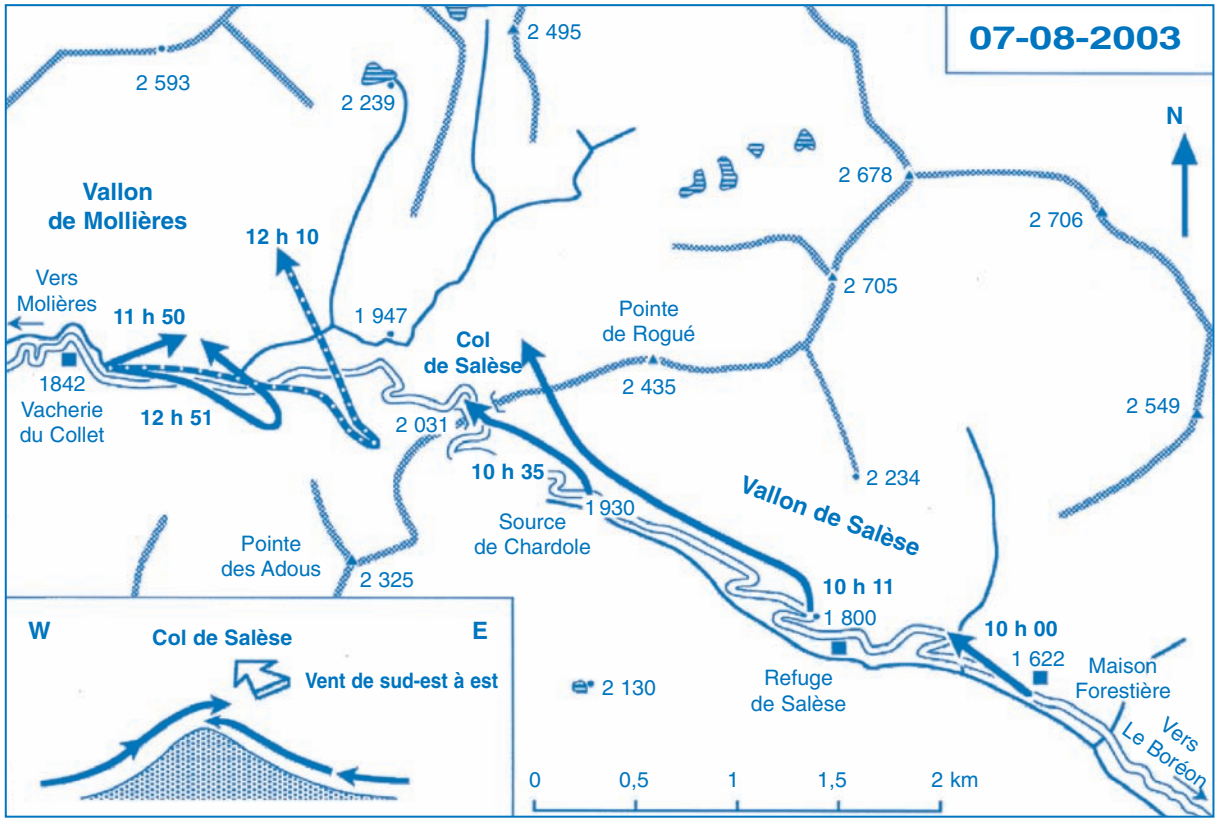


Figure 17.
Synthèse des parcours visuels et/ou instrumentés le 7 août 2003 de part et d'autre du col de Salèse.
Summary of air mass movements observed and/or measured on August 7, 2003 on both sides of the Salèse Pass.
(Cartographie : J.-Y. Ottavi ; UMR Espace – CNRS)

La première approche des mouvements de masses d'air par modélisation (ACRI-ST) a permis de montrer que dans les Alpes-Maritimes, il y a bien une influence des principales sources de pollution de la côte niçoise sur l'arrière-pays. Les brises thermiques de mer et les vents de vallée amènent pendant la journée sur le Mercantour les panaches de pollution formés sur les agglomérations de la Côte d'Azur. Le suivi des masses d'air par des ballons plafonnants (CLB) a permis de connaître le trajet précis d'une masse d'air au sein de vallées particulièrement exposées à de fortes concentrations d'ozone (GVE). Ainsi, l'ozone produit à partir des précurseurs émis au niveau des agglomérations du littoral mais également l'ozone issu du transport longue distance (produit en dehors du domaine de calcul) et passant au niveau de la Côte d'Azur est transporté vers l'arrière-pays et les cimes du Mercantour. En journée, surtout en été, les masses d'air ont remonté les vallées depuis la côte vers l'arrière-pays. Les inversions de température s'installant la nuit en fond de vallée, ont favorisé la consommation de l'ozone formé dans la journée par les réducteurs, ce qui ne s'est pas produit sur les sites de crêtes. Les concentrations d'ozone étaient telles sur ces cimes et notamment aux cols de Salèse ou de la Lombarde que toutes les conditions étaient réunies pour que ces effets transparaissent sur la forêt et d'une manière générale sur la végétation.

Les observations macroscopiques ont indiqué clairement l'existence de symptômes spécifiques attribuables à l'ozone. Les taches chlorotiques ont été plus nettes sur les aiguilles les plus âgées et les plus exposées à la lumière. Le « *mottling* » jaune-vert y était bien marqué. Les mêmes aiguilles âgées de 1 an en 2003, puis de 2 ans en 2004, ont montré l'évolution croissante de leurs dégâts spécifiques. Les symptômes observés la deuxième année ont bien constitué le cumul de ceux notés en 2003 et de ceux nouvellement apparus en 2004.

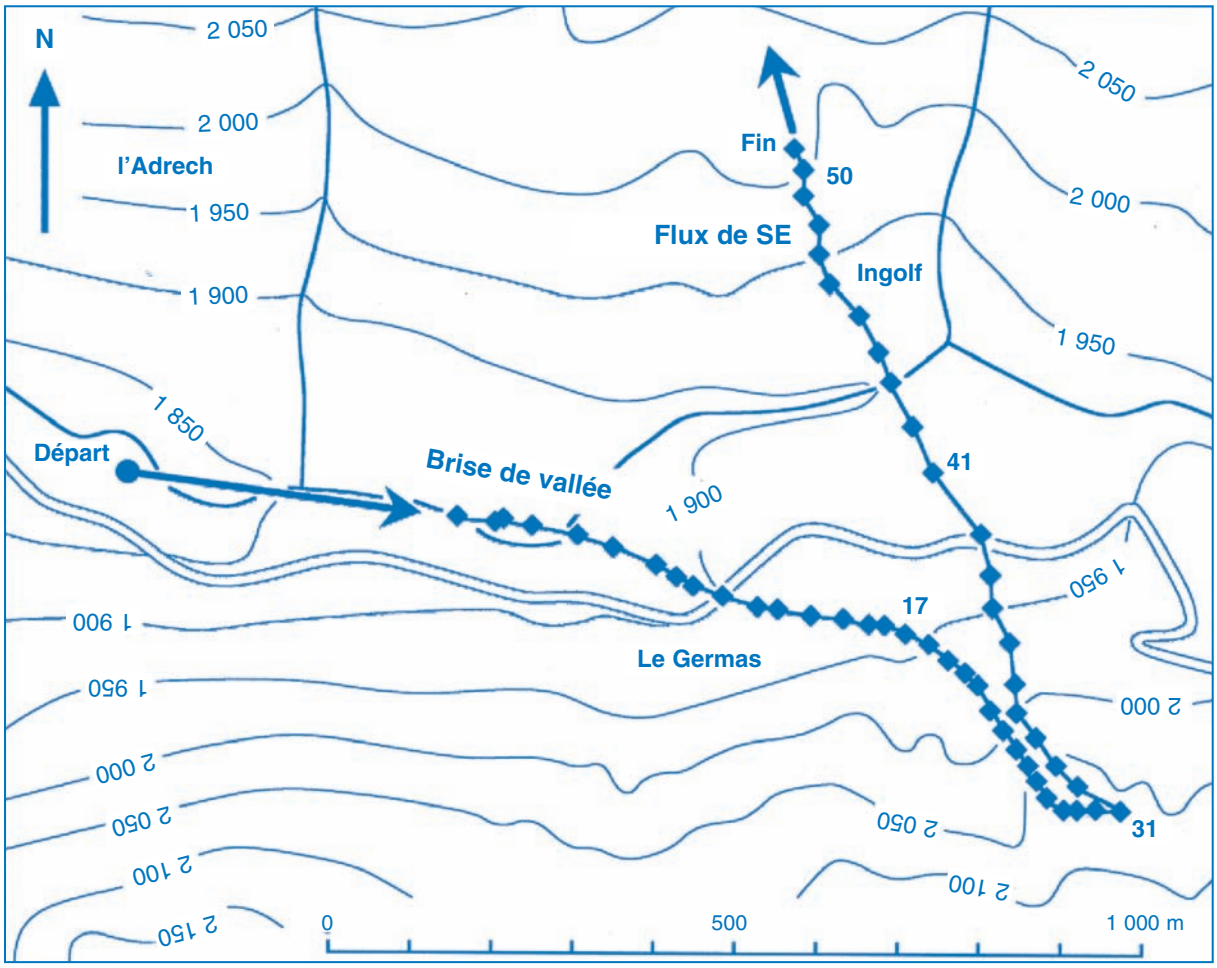


Figure 18.
Trajectoire d'un ballon plafonnant dans le vallon supérieur de Mollières le 7 août 2003, 12 h 10.
Chaque losange représente une mesure effectuée toutes les 30 secondes.
Trajectory taken by a weather balloon in the upper Mollières Valley on August 7, 2003 at 12:10 pm.
Diamonds show the location of measurements taken every 30 seconds.
(Cartographie : J.-Y. Ottavi ; UMR Espace – CNRS)

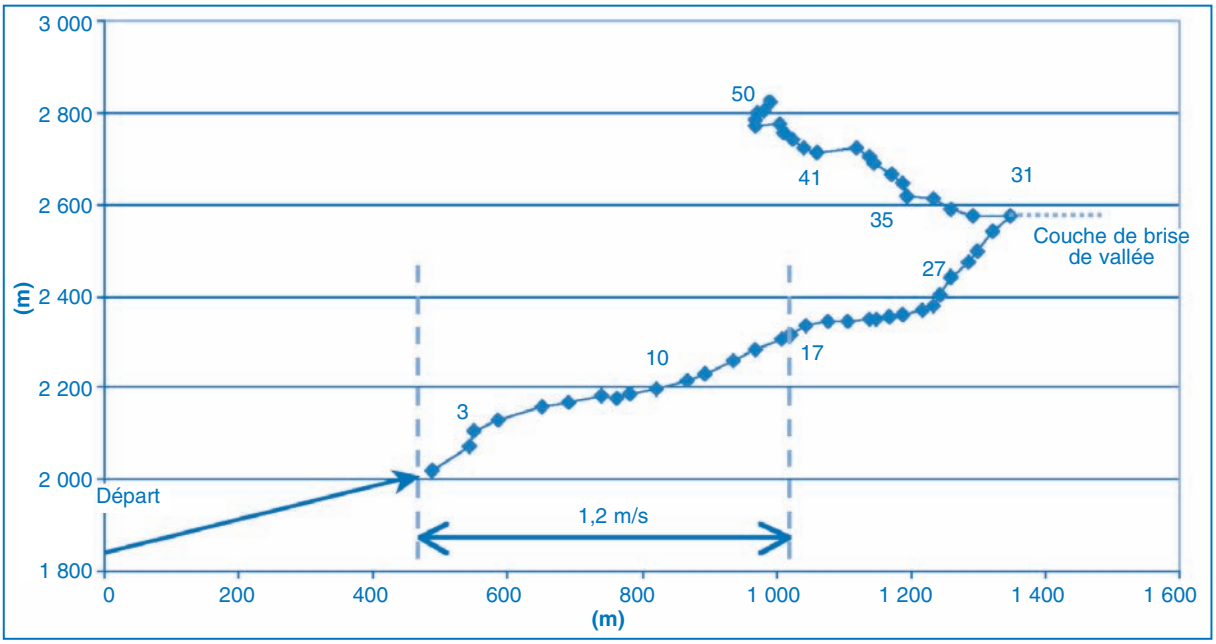


Figure 19.
Profil CLB *(Constant Level Balloon)* du 7 août 2003 à 12 h 10 loc. à la Vacherie du Collet (1 830 m) (Vallon de Mollières). Représentation en coupe de la trajectoire illustrée sur la figure 18.
CLB (Constant Level Balloon) profile from August 7, 2003 at 12:10 pm located at the Vacherie du Collet (el. 1,830 m.) in the Mollières Valley. Cross-section of the trajectory shown in Figure 18.

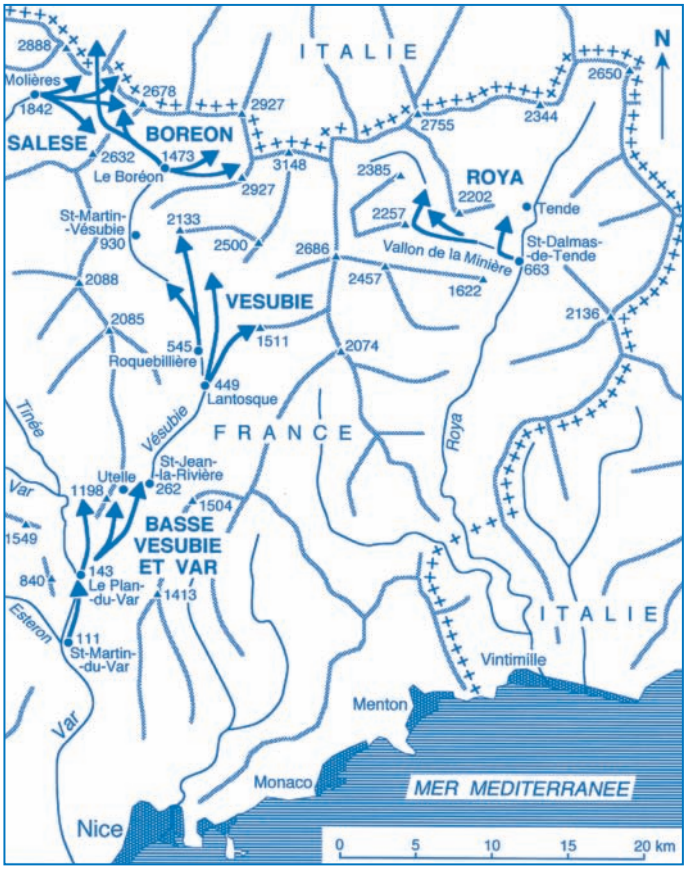


Figure 20.
Ensemble des parcours de ballons plafonnants lâchés sur les différents secteurs d'étude en été 2003.
Trajectories for all weather balloons released in the study area during the summer, 2003.
(Cartographie : J.-Y. Ottavi ; UMR Espace – CNRS)

Les interprétations statistiques, sur le pin cembro, ont montré de bonnes corrélations entre l'intensité du *mottling* et les concentrations d'ozone. On peut ainsi considérer comme possible la responsabilité de l'ozone dans la dégradation de l'état sanitaire de cette essence. La correspondance entre les dégâts d'ozone et les niveaux de ce dernier a été plus importante dès la première année d'aiguilles.

Cette étude a permis la confirmation du rôle de l'ozone comme élément d'affaiblissement dans l'état de santé des arbres d'altitude. Il a agi avec les perturbations climatiques et les facteurs édaphiques, comme un cofacteur de fragilisation des arbres. Mais ces derniers n'étaient pas seuls concernés par ces atteintes. Le suivi de l'ensemble de la végétation a conforté l'impact de l'ozone sur la végétation arbustive ou herbacée. Parmi les essences les plus sensibles ou développant des symptômes caractéristiques d'atteinte par l'ozone, se retrouvaient, le noisetier, l'épilobe, le saule, le mûrier, le géranium des bois, les cytises, les sureaux, les rumex ou encore les myrtilles.

Remerciements

Sont remerciés MM. Olivier, Boisseaux, Landrieu, Lequette et les agents du Parc national du Mercantour pour l'aide financière et technique apportée à l'élaboration de ce travail. Est remercié également le réseau Qualitair de Nice. Cette étude a été réalisée grâce aux organismes financiers : Europe (Projet Interreg III B, Formedozone), Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME, convention n° 02 62 022), Conseil Général des Alpes-Maritimes, Parc national du Mercantour.

Mots clés

Ozone. Symptômes spécifiques foliaires. Modélisation. Traçage des masses d'air.

Keywords

Ozone. Chlorotic foliar mottles. Modelisation. Tracing air masses.

Références

1. Günthardt-Goerg MS, McQuattie CJ, Maurer S, Frey B. Visible and microscopic injury in five deciduous tree species related to current critical ozone levels. *Environmental Pollution* 2000 ; 109 : 489-500.
2. Innes J, Skelly J, Schaub M. Ozone and broadleaved species : a guide to the identification of ozone-induced foliar injury. Ozon, Laubholz- und Krautpflanzen. Ein Führer zum Bestimmen von ozonsymptomen. Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, Bern, Stuttgart, Wien ; Haupt 2001 ; 136.
3. Sanz MJ, Sanchez G, Calatayud V, Minaya MT, Cervero J. La contaminacion Atmosferica en los bosques : Guia para la identificacion de danos visibmes causados por Ozono. Organismo Autonomo de Parques Nacionales 2001 ; 163.
4. Dalstein L, Vas N, Ulrich E, Cecchini S. Première approche de la dégradation de la forêt française en relation avec l'ozone. *Environnement technique* 2004 ; 236 : 42-4.
5. Dalstein L, Vas N. Ozone concentrations and ozone-induced symptoms on coastal and alpine Mediterranean pines in southern France. *Water Air Soil Pollut* 2005 ; 160 : 181-95.
6. Millan MM, Mantilla E, Salvador R, Carratala A, Sanz M.J. Ozone cycles in the Western Mediterranean basin : interpretation of monitoring data in complex coastal terrain. American Meteorological Society 2000 : 487-508.
7. ADEME. Le bilan de la pollution de l'air de l'été 2003 en France. Pollution de l'air et Canicule 2003 : bilan et conséquences. Colloque 4 mars 2004.
8. Dalstein L. État physiologique des cembraies du Mercantour et du Queyras en liaison avec la pollution atmosphérique et les facteurs écologiques. Thèse de Doctorat d'Écologie forestière, Faculté d'Aix-Marseille 1997 : 229 p.
9. Bussotti F, Ferretti M. Air pollution, forest condition and forest decline in Southern Europe : an overview. *Environmental Pollution* 1998 ; 101 : 49-65.
10. Sanz MJ, Calatayud V, Calvo E. Spatial pattern of ozone injury in Aleppo pine related to air pollution dynamics in coastal-mountain region of Eastern Spain. *Environmental Pollution* 2000 ; 108 : 239-47.
11. Dalstein L, Vollenweider P, Vas N, Günthardt-Goerg MS. L'ozone et les conifères du sud-est de la France. *For Med* 2002 ; 2 (XXIII) : 105-16.
12. Ferretti M. Mediterranean Forest Trees. A Guide for Crown Assessment. UN/ECE, Brussels 1994.
13. PCC (Programme Co-ordinating Center). International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests. Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. BFH 1998, Hamburg, Germany.

14. Directive ozone 2002/3/CE du Parlement européen et du Conseil du 12 février 2002 relative à l'ozone dans l'air ambiant. *Journal officiel des Communautés européennes* 9 mars 2002 : L67/14-30.
15. Dalstein L, Teton S, Cottereau C, Vas N. Niveaux d'ozone et endommagement foliaire sur quelques essences méditerranéennes. *Pollution Atmosphérique* 2001 ; 170 : 263-77.
16. Longhetto A. Some improvements in the balanced pilot balloons technique. *Atmos Environ* 1971 ; 5 : 327-31.
17. Carréga P, Ruffieux D. Research into the urban heat island and the windflow above the city of Nice in summer, by vertical measurements and constant level balloons. Intern. Symposium on Urban and Local Climatology, Freiburg (RFA), 20-21 febr. 1986 : 96-109.
18. Carréga P. Topoclimatologie et habitat. *Revue d'Analyse Spatiale*, Nice 1994 ; 35-36 : 408 p.
19. Carréga P, Bérolo W, Martin N. Tropospheric ozone and air circulation in the mountains of South East France. EGU congress 2005, Vienne, Autriche. AS3.03.
20. MetOffice (Météo britannique). Données du profileur de vent de Nice-aéroport (Météo-France) ; Site Internet.
21. Qualitair. Données de pollution en ozone des stations de l'Adréchas et Nice-botanique. Site Internet : http://www.atmo-qualitair.net