

Effets de la pollution à l'ozone sur la végétation de la Principauté de Monaco et sa périphérie

par Marie-Lyne CIRIANI et Laurence DALSTEIN

***Les panaches de pollution formés
au niveau des villes du littoral
azuréen ont des conséquences
jusque dans les arrière-pays.
La pollution à l'ozone, couplée
aux effets du changement
climatique, provoque des dégâts
sur la végétation, notamment
sur les pins d'altitude.***

Introduction

Depuis plus de dix ans, le Groupe international d'études des forêts sud-européennes (GIEFS) étudie les effets de l'ozone sur les forêts méditerranéennes. L'ensemble des dégâts foliaires visibles dus à l'ozone est évalué sur la végétation arbustive et herbacée, conformément au protocole européen défini par l'ICP-Forests (*International Cooperative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution on Forests*, Commission économique pour l'Europe). En 2016, le GIEFS en collaboration avec la Principauté de Monaco, a réalisé une étude portant sur les effets de l'ozone sur la végétation monégasque et ses environs, à savoir depuis la commune de la Turbie jusqu'au Col de la Madone sur la commune de Peille. Au total, dix sites forestiers ont été choisis en collaboration avec le Service de l'aménagement urbain monégasque. Sur chacune de ces placettes ont été mesurés, sur le terrain, à la fois les concentrations en ozone et leurs dégâts visibles sur la végétation. Ceci a été effectué dans le but d'établir un lien entre les niveaux réels d'ozone *in situ* et les impacts visibles sur le feuillage de la végétation. Une telle étude revêt toute son importance dans cette zone où le trafic routier est élevé et où, de surcroît, le fort ensoleillement favorise la formation plus facile de l'ozone (VESTRENG *et al.*, 2009). L'ozone est produit principalement par la transformation, sous l'effet du rayonnement solaire, des oxydes d'azote (NOx) et des Composés organiques volatiles (COV) émis majoritairement par les activités humaines.

De plus, le bassin méditerranéen est une des régions du monde les plus fortement concernées par le changement climatique (IPCC, 2014). Les températures moyennes pourraient augmenter de 5,2°C à l'horizon 2080 d'après de récentes études du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). Or, la formation de l'ozone dépend de la température et plus spécifiquement du rayonnement solaire (THE ROYAL SOCIETY, 2008), donc la production d'ozone pourrait encore augmenter dans les prochaines années si rien n'est mis en œuvre pour réduire les précurseurs de l'ozone (MELEUX *et al.*, 2007 ; SOLBERG *et al.*, 2008). L'ozone ayant été désigné comme le polluant atmosphérique le plus préoccupant pour les forêts et plus particulièrement pour les forêts méditerranéennes (DALSTEIN *et al.*, 2004 ; DALSTEIN et VAS, 2005 ; DALSTEIN *et al.*, 2005 ; PAOLETTI *et al.*, 2006), il s'avère primordial de mener ces études de suivi de ses effets sur l'ensemble de la végétation, à la fois forestière et aussi arbustive.

Le mode opératoire est toujours identique. Ce polluant pénètre dans les feuilles, à travers les stomates formant de petites ouvertures en surface du feuillage. Il se dégrade ensuite instantanément au contact des cellules, entraînant des réactions en chaîne pouvant aboutir à la mort de celles-ci. Ces dommages sont visibles sur les arbres, les arbustes ou encore les herbacées (DALSTEIN

et al., 2002 ; DALSTEIN *et al.*, 2004 ; ULRICH *et al.*, 2006 ; TIWARIET *et al.*, 2016). Les symptômes peuvent être des nécroses foliaires, une chute prématurée des feuilles, une modification de l'ouverture des stomates et donc une réduction du taux d'activité photosynthétique. Les dégâts observés entraînent des diminutions de croissance et un affaiblissement des plantes, les rendant plus sensibles aux attaques parasitaires et aux aléas climatiques (sécheresse).

Dans la région niçoise, au cours de ces 20 dernières années, l'état de santé d'arbres suivis sur les mêmes placettes forestières (déficit foliaire, décoloration) a montré une dégradation généralisée probablement due au climat plus chaud (SICARD et DALSTEIN-RICHIER, 2015).

Le sud-est de la France peut être considéré comme un cas d'étude pour évaluer les impacts du changement global et plus particulièrement de l'ozone, sur les forêts (SICARD et DALSTEIN-RICHIER, 2015).

Dans ce contexte, l'étude menée en Principauté de Monaco avait plusieurs objectifs :

- le suivi des concentrations en ozone et l'évaluation de ses impacts foliaires sur un ensemble de placettes forestières de pins et sur la végétation arbustive ou herbacée avoisinante ;
- une comparaison sur chaque site, entre les niveaux de l'ozone et les symptômes foliaires observés à Monaco-ville et en périphérie ;
- la compréhension du rôle de l'altitude et de la situation topographique et stationnelle des sites.

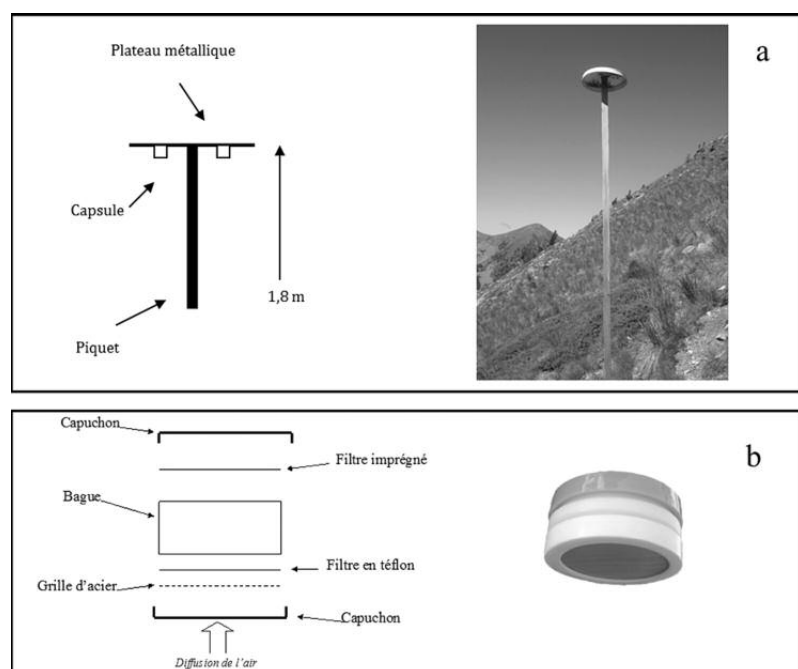
Matériels et méthodes

Technique de mesure de l'ozone par capteurs passifs

Les capteurs passifs, installés par le GIEFS près de chaque placette forestière mais hors couvert forestier, sont protégés par un plateau métallique, placé à environ 1,80 m au-dessus du sol (Cf. Fig. 1a). Chaque capteur possède un capuchon dont l'extrémité fermée contient un filtre en téflon imprégné d'une solution absorbant l'ozone (Cf. Fig. 1b). Le gaz migre à l'intérieur du capteur, via l'extrémité ouverte, par diffusion moléculaire. Le temps d'exposition est

Fig. 1 :

Schémas et photos de l'installation d'un capteur passif sur une placette forestière (a) et de la composition d'un capteur passif d'ozone (b).



de un mois. L'analyse de l'ozone se fait par chromatographie ionique. Les capteurs passifs d'ozone ont été fournis et analysés par le laboratoire suédois IVL (Swedish Environmental Research Institute).

La mise en place des capteurs passifs a été effectuée mensuellement par le technicien du GIEFS entre mai et octobre 2016, au niveau de quatre placettes forestières des jardins urbains de la Principauté et au niveau de deux placettes forestières en amont de la Principauté (Cf. Fig. 2). Au total six capteurs passifs d'ozone ont donc été installés. Ceux de la Tête de Chien et du Mont Agel, sur la commune de La Turbie, surplombent par leur altitude élevée et croissante (Cf. Tab. I).

Les résultats obtenus permettent d'effectuer des corrélations entre la sévérité des dégâts foliaires observés et les concentrations en ozone.

Description des placettes forestières sélectionnées

Au total, quatre placettes forestières sont notées en Principauté de Monaco, toutes équipées d'un capteur passif d'ozone. Six placettes sont suivies en périphérie avec seulement deux capteurs passifs d'ozone installés au niveau de la Tête de Chien et du Mont Agel (Cf. Fig. 2).

Ces sites sont choisis pour leur gradient d'altitude et les conséquences de ce dernier sur les niveaux de l'ozone et de ses impacts sur différentes essences de pins (pin sylvestre, pin maritime et pin d'Alep). L'analyse de l'endommagement sanitaire des arbres est réalisée à partir du déficit foliaire et de la décoloration.

Les sites forestiers de la Principauté de Monaco sont pour la plupart constitués de pins maritimes (Cf. Tab. II). Seule la placette du Jardin du Rocher, près du Palais princier, est plantée de pins d'Alep. En périphérie de la Principauté, trois placettes de pin d'Alep et deux de pin maritime et de pin sylvestre sont étagées entre 300 et 930 mètres.

Évaluation des dommages foliaires

Le pourcentage de perte foliaire de la couronne des arbres (déficit foliaire) et la proportion de décoloration des aiguilles sont identifiés selon le protocole du Département de la Santé des forêts et de l'Office national des forêts (ANON, 1994 ; FERRETTI, 1994 ;



Fig. 2 :

Localisation des placettes forestières en Principauté de Monaco et en périphérie. Blanc : Placette ayant un capteur passif d'ozone. Noir : Placette utilisant les résultats des capteurs passifs d'ozone les plus proches.

Tab. I :

Altitude et nom des capteurs passifs d'ozone.

Capteurs passifs	Altitude (m)
Roseraie	8
Jardin Japonais	11
Jardin du Rocher	28
Moneghetti	91
Cime de la Tête de Chien	580
Cime du Mont Agel	875

ULRICH & LANIER, 1996). Ces notations sont toujours réalisées en fin d'été (mi-août à début septembre), en fin de période de végétation.

Déficit foliaire et décoloration

Le déficit foliaire est estimé par tranche de 5%. Il y a quatre classes : 0-10% ; 15-25% ; 30-60% et 65-100%.

Le gradient de décoloration comporte des classes numérotées de 0 (arbre totalement vert) à 4 (arbre totalement jaune).

Les arbres sont considérés comme non endommagés lorsque le déficit foliaire est inférieur ou égal à 25% et la décoloration

Placette	Essence pin	Altitude (m)
Roseraie	maritime	8
Jardin Japonais	maritime	11
Jardin du Rocher	Alep	28
Moneghetti	maritime	91
Aval de la Tête de Chien	Alep	300
Complexe sportif	maritime	496
Cime de la Tête de Chien	Alep	580
Mont Bataille	Alep	782
Mont Agel	sylvestre	875
Cime du Baudon	sylvestre	930

Tab. II :

Essence des pins et altitude de chaque placette forestière.

Tab. III :
Nomenclature
des différents types
de symptômes dus à
l'ozone pour les conifères
et les feuillus.

Conifères	Feuillus
<i>Mottling</i> : petite tache de couleur jaune / vert clair ou marbrures à contour diffus, en particulier sur la face supérieure et à la pointe des aiguilles.	<i>Stippling</i> : ponctuation de petite taille et de couleur variable à la surface des feuilles entre les nervures.
<i>Photobleaching</i> : décoloration des parties exposées à la lumière.	<i>Bronzing</i> : coloration brun-cuivre ou brun-violacé sur la partie supérieure du feuillage.
	<i>Chlorose</i> : décoloration des parties exposées à la lumière.

inférieure à la classe 2. Le stade « d'avertissement » est atteint pour un déficit foliaire compris entre 10 et 25%. L'endommagement des arbres est réel pour une classe de décoloration 2 ou plus et un pourcentage de perte foliaire supérieur à 25%. Sur 20 arbres de chaque placette, la perte foliaire et la décoloration ont été notées.

Symptômes spécifiques à l'ozone

Pour chaque placette, l'évaluation des symptômes spécifiques d'ozone est réalisée sur cinq arbres bien éclairés. Pour chaque arbre, cinq branches exposées à la lumière sont prélevées. Pour chaque branche, au moins 30 aiguilles des différentes classes d'âge, placées côte à côte, sont examinées. Une fois les aiguilles collectées et les diffé-

rentes classes d'âge clairement identifiées, les taches chlorotiques sont notées pour les aiguilles de l'année (C), celles âgées d'un an (C+1) et de deux ans (C+2). Le pourcentage du total de la surface affectée est noté. S'il n'existe pas de symptômes, leur absence est notée pour chaque branche, ceci en vue de l'établissement final de l'échelle des dégâts. Si des symptômes sont repérés sur tout ou partie des cinq branches des cinq arbres, les symptômes sont notés et le feuillage symptomatique est photographié. Si les dommages d'ozone observés sur les aiguilles des conifères sont masqués par un jaunissement dont l'origine est due à une autre cause, l'échantillon est exclu de la notation.

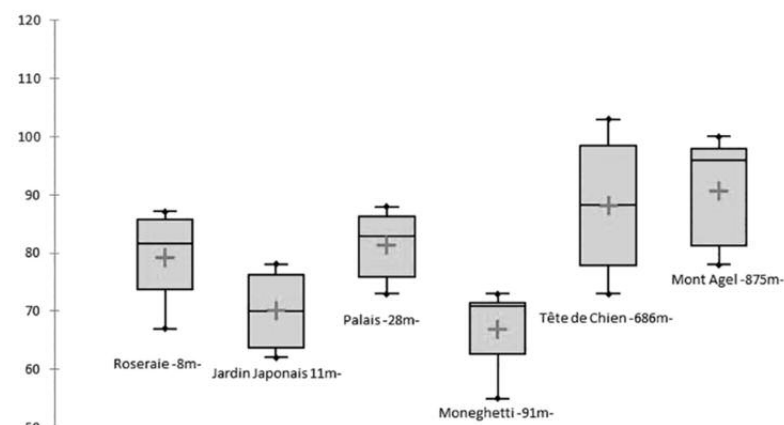
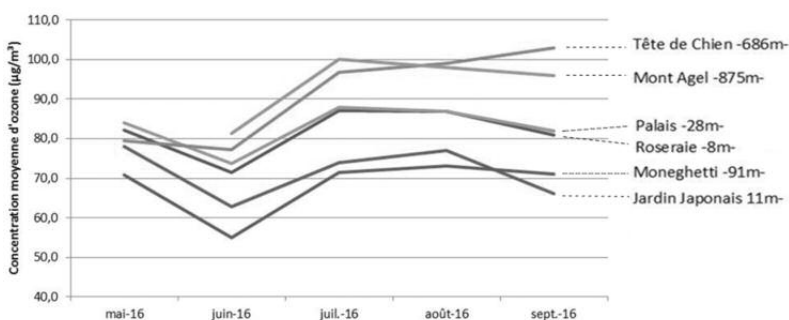
Les effets visibles de l'ozone ne s'expriment pas de la même manière selon les essences. Cependant, certaines caractéristiques sont communes : effets plus fréquents sur les feuilles âgées, marques visibles entre les nervures et sur les feuilles exposées à la lumière.

L'expression des symptômes spécifiques à l'ozone sont différents entre les conifères et les feuillus (Cf. Tab. III). En ce qui concerne le pin cembro, le *mottling* est le symptôme le plus généralement observé.

Les comparaisons de symptômes spécifiques à l'ozone et dommages foliaires sont réalisées entre essences de pins identiques et différentes

Fig. 3 (ci-dessous) :
Concentration moyenne
mensuelle d'ozone
($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de mai à octobre
2016 sur chaque site.

Fig. 4 (en bas) :
Boîtes à moustaches
représentant les
concentrations moyennes
d'ozone mesurées sur la
période de mai à octobre
2016 pour chaque site
classé par altitude
croissante.



Résultats

Concentrations en ozone

A partir du mois de juillet, l'augmentation assez importante des concentrations en ozone est bien visible comparée aux mois de mai et de juin. Les niveaux se maintiennent élevés au mois d'août (Cf. Fig. 3). Le mois de juin a enregistré les plus faibles concentrations en ozone. En septembre, le capteur de la Tête de Chien enregistre la valeur la plus

élevée avec un taux de $103 \mu\text{g}/\text{m}^3$, le plus fort taux estival enregistré pour l'ensemble des capteurs.

La concentration moyenne en ozone la plus importante sur la période de mai à octobre 2016, est celle du Mont Agel, site d'altitude, affichant $90,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Cf. Fig. 4). La concentration moyenne d'ozone enregistrée par le capteur de la Tête de Chien est également assez élevée puisqu'elle atteint $88,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Concernant, les capteurs de la Principauté de Monaco, leurs concentrations sont toutes inférieures à celles de la périphérie (Cf. Fig. 4).

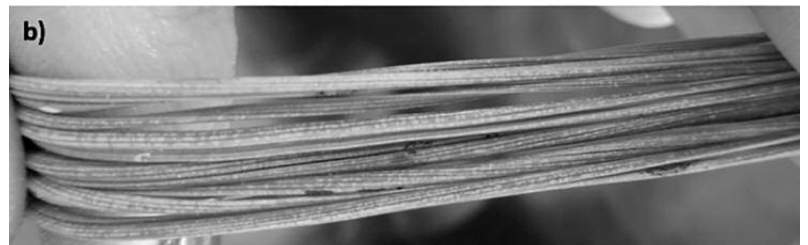
Le graphique montre une corrélation positive entre la concentration moyenne d'ozone et l'altitude avec un coefficient de détermination (R^2) de 0,62 signifiant qu'environ 62% de la variabilité de la concentration d'ozone est expliquée par l'altitude (Cf. Fig. 5).

Évaluation des dégâts visibles foliaires d'ozone

Les dégâts foliaires causés par l'ozone se caractérisent toujours par des petites taches jaune clair, plus ou moins marquées, présentes sur la partie supérieure exposée à la lumière des aiguilles (Cf. Photos 1). Sur le pin maritime, ces tâches apparaissent un peu plus diffuses. Chaque essence de pin a une sensibilité différente à l'ozone d'où l'intérêt de ne comparer que les mêmes essences entre elles.

Les aiguilles âgées de un an ont des pourcentages de taches chlorotiques plus faibles que les aiguilles âgées de deux ans, ceci quelles que soient les placettes (Cf. Fig. 6). Il ya bien un surajout des dégâts au fur et à mesure des années.

Les pins d'Alep urbains des Jardins du Rocher-Palais ont montré un pourcentage de dégâts foliaires et une concentration d'ozone (respectivement $C+2 = 15,6\%$ et $81,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$) bien inférieurs à ceux de la Tête de Chien (respectivement $C+2 = 22,5\%$ et $88,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$) (Cf. Fig. 6). Les pins d'Alep de la Tête de Chien affichent ainsi 44% d'atteinte supplémentaire par rapport à ceux des Jardins du Palais. Les placettes de haute altitude affichent donc systématiquement plus de dégâts



Photos 1 :

Photographies du phénomène de *mottling* observé sur les aiguilles de :

- a) pin maritime de la Roseaie,
- b) pin d'Alep des jardins du Palais,
- c) pin sylvestre du Mont Agel.

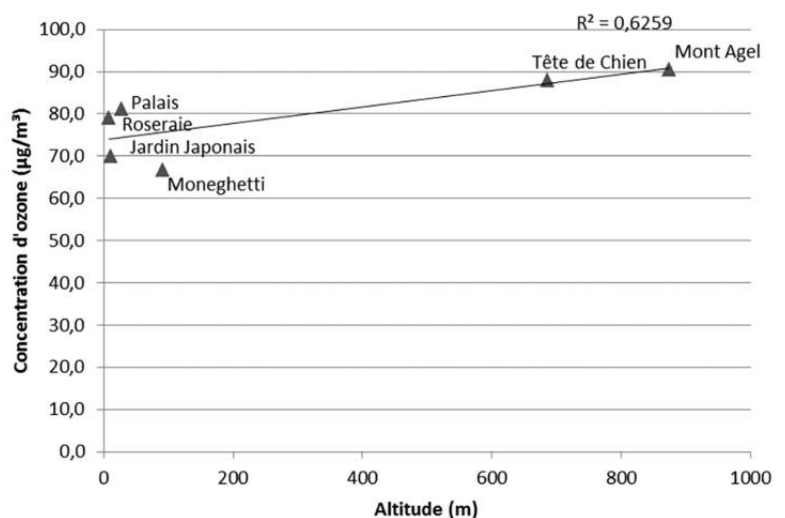


Fig. 5 (ci-contre) :

Courbe de tendance de la concentration moyenne d'ozone ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) mesurée par chaque capteur de mai à octobre 2016 en fonction de l'altitude des sites (m).

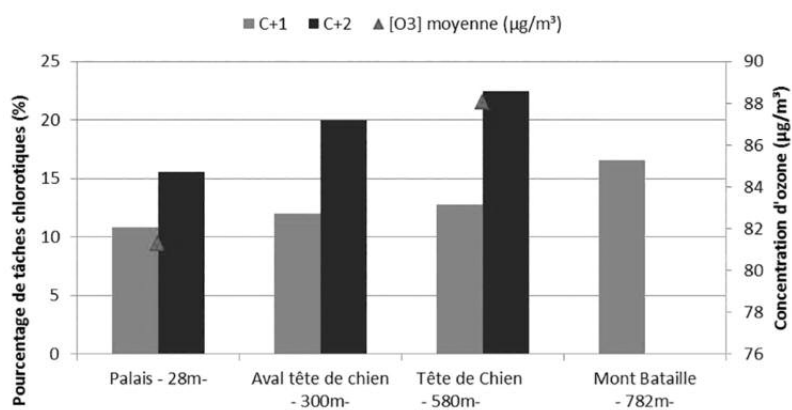


Fig. 6 (ci-dessus) :
Pourcentage moyen par placette de taches chlorotiques présentes sur les aiguilles de pin d'Alep âgées de un an (C+1) et de deux ans (C+2) et concentrations moyennes d'ozone (µg/m³) mesurées au Palais princier et à la Tête de Chien.

foliaires et des concentrations d'ozone plus élevées.

Les pins maritimes des trois placettes de la Principauté (Rosaie, Jardin Japonais, Moneghetti) ont montré des pourcentages de taches chlorotiques faibles avec en moyenne 10% de dégâts contre 16% pour ceux du Complexe sportif de la Turbie, situé à 496 m d'altitude (Cf. Fig. 7).

L'altitude semble donc bien influencer le pourcentage de dégâts foliaire d'ozone comme elle influence les concentrations en ozone.

Placette	Essence	Altitude (m)	Pourcentage de dégâts d'ozone	
			C+1	C+2
Palais	Pin d'Alep	28	10,8	15,6
Aval tête de chien	Pin d'Alep	300	12	20
Tête de Chien	Pin d'Alep	580	12,8	22,5
Mont Bataille	Pin d'Alep	782	16,6	-
Mont Agel	Pin sylvestre	875	5,4	10
Cime du Baudon	Pin sylvestre	930	9,4	16,8
Rosaie	Pin maritime	8	9,4	-
Jardin Japonais	Pin maritime	11	9,25	-
Moneghetti	Pin maritime	91	11,6	-
Complexe sportif	Pin maritime	496	16,4	-

Les pins sylvestres de la Cime du Baudon, à 930 mètres d'altitude, affichent un pourcentage de taches chlorotiques (C+1 = 9,4% et C+2 = 16,8%) supérieur à ceux du Mont Agel (C+1 = 5,4% et C+2 = 10%) (Cf. Tab. IV). Malheureusement, la Cime du Baudon ne disposait pas de capteur passif d'ozone. La différence altitudinale entre les deux placettes est faible mais l'exposition des arbres est différente. La placette de la cime du Baudon est exposée plein sud face aux brises maritimes ramenant la pollution du littoral. Au Mont Agel, une bonne partie des arbres notés est sur le versant nord ; ils sont moins éclairés et davantage protégés des apports aériens de la côte, bien que la concentration en ozone atteigne un niveau assez élevé de 90,7 µg/m³.

Sensibilité des essences de pins à l'ozone

Si l'altitude est légèrement différente pour les placettes périphériques, le pin d'Alep est nettement plus sensible aux effets de l'ozone que le pin maritime avec 37% de dégâts supplémentaires pour les aiguilles âgées de deux ans et plus du double d'atteinte pour les aiguilles âgées d'un an (Cf. Fig. 8).

Tab. IV (ci-contre) :

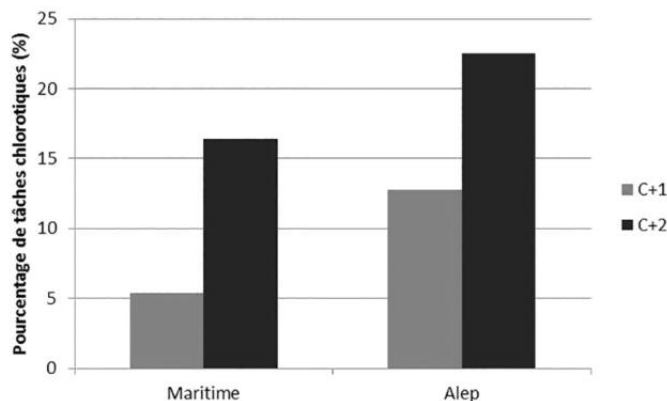
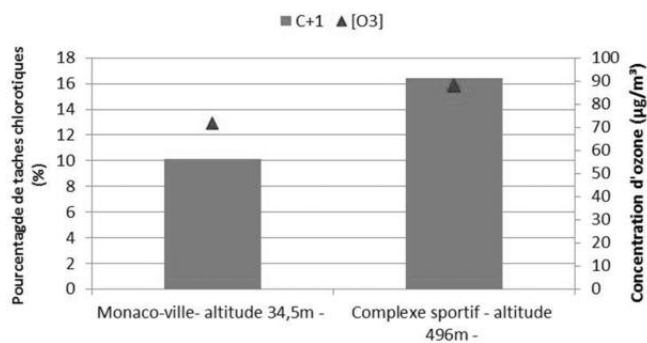
Pourcentage de taches chlorotiques sur des aiguilles âgées de un an (C+1) et de deux ans (C+2).

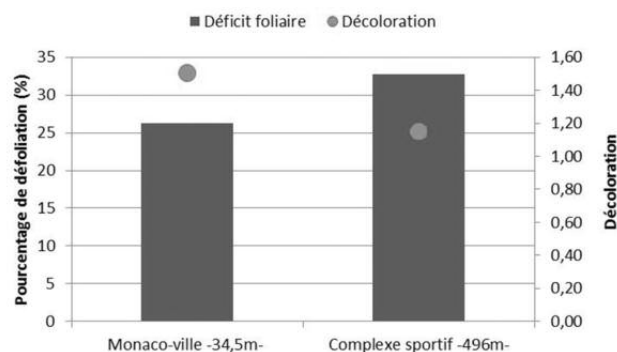
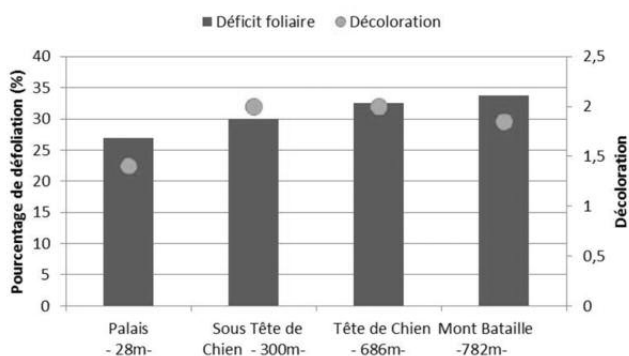
Fig. 7 (en bas, à gauche) :

Pourcentage moyen de taches chlorotiques des aiguilles de pin maritime âgées de un an (C+1) et concentration moyenne d'ozone (µg/m³) à Monaco-ville et au Complexe sportif.

Fig. 8 (en bas, à droite) :

Pourcentage moyen de taches chlorotiques des aiguilles âgées de un an (C+1) et de deux ans (C+2) des pins maritimes du Complexe sportif de la Turbie et des pins d'Alep de la Tête de Chien.





Déficit foliaire et décoloration des pins étudiés

Les pins d'Alep des Jardins du Rocher-Palais sont moins défoliés et moins décolorés que ceux d'altitude (Cf. Fig. 9).

Le déficit foliaire moyen des pins maritimes de Monaco-ville (26%) est également inférieur au déficit foliaire des pins maritimes du Complexe sportif de la Turbie (33%) (Cf. Fig. 10).

Les pins sylvestres du Mont Agel sont apparus très défoliés avec un pourcentage de déficit foliaire de 46% contre 27% pour ceux de la cime du Baudon (Cf. Fig. 11). Le Mont Agel se situe à la limite d'aire de croissance de cette essence. En effet, le climat montagnard est plus favorable à son développement. Ce climat plus frais est mieux représenté à la Cime du Baudon. Le Mont Agel affiche clairement un climat méditerranéen. Cette essence n'est pas adaptée aux fortes contraintes écologiques de ce climat côtier à la différence des pins maritimes ou des pins d'Alep.

Observation des dégâts d'ozone sur les essences environnantes dans les zones de clairière proches des sites forestiers (LESS)

Sur le site de la Roseraie, onze essences différentes de rosiers sur treize montrent des dégâts d'ozone (Cf. Photos 2 et 3). D'autres essences sont sensibles à l'ozone comme l'eucalyptus, l'arbuste *Abelia fluribunda*, la glycine ou le Brachychiton.

Au jardin Japonais, sur les dix neuf essences observées, représentées une ou plusieurs fois, quinze réagissent à l'ozone (Cf. Fig. 13). Parmi celles-ci, citons le lierre anglais, le pin maritime, la Véronique, le Feijoa, l'érable, le pin sylvestre, le pin noir d'Autriche, le camphrier, la spirée et le Brachychiton. Seules quatre essences résistent aux atteintes à l'ozone : la glycine, le rhododendron, le genévrier et le laurier thym.

Fig. 9 (à gauche) : Pourcentage de déficit foliaire (%) des pins d'Alep des placettes du Palais, de l'aval de la Tête de Chien, Tête de Chien et Mont Bataille, classées par altitude croissante.

Fig. 10 (à droite) : Pourcentage moyen de déficit foliaire (%) observé sur les placettes de Pin maritime de Monaco-ville et du Complexe sportif de la Turbie.

Fig. 11 (en bas, à gauche) : Pourcentage moyen de déficit foliaire (%) des pins sylvestre du Mont Agel et de la Cime du Baudon.

Fig. 12 (en bas, à droite) : Diagramme circulaire représentant le nombre d'essences de rosiers symptomatiques et asymptomatiques observés à la Roseraie.

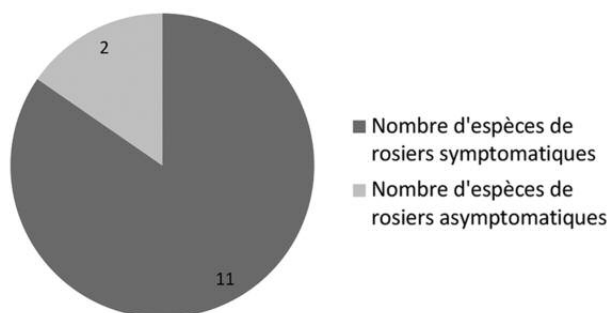
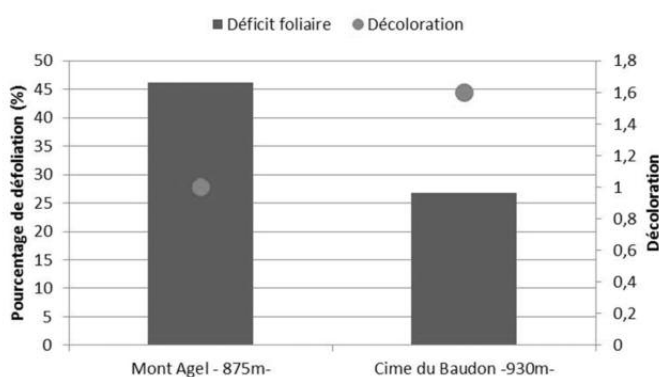


Photo 2 :
Rosa celsiana montrant
des symptômes
avec du *stippling*.

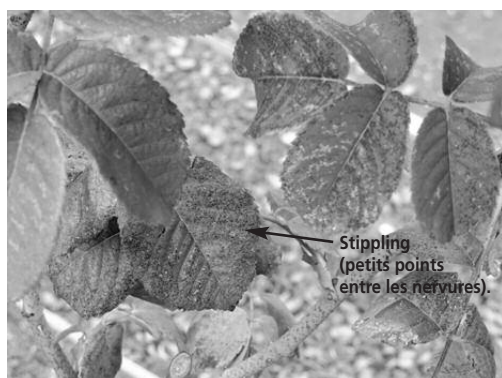


Photo 3 :
Rosier Constance Spry et
symptômes d'ozone
entre les nervures.



Discussion et conclusion

Concentration en ozone

Une corrélation positive significative est montrée entre la concentration moyenne en ozone et l'altitude ($R^2 = 0,63$) : il existe un gradient altitudinal significatif, ce qui est cohérent avec de nombreuses études (VINGARZAN, 2004).

Les concentrations en ozone sont plus élevées loin des sources d'émission de ses précurseurs à des distances de plusieurs dizaines de kilomètres. La production d'ozone ne dépend pas seulement de la quantité de précurseurs mais des réactions de formation ou de destruction de l'ozone au fur et à mesure de son déplacement et du degré de rayonnement solaire. En zone urbaine, le trafic routier responsable des émissions d'oxydes d'azote (NOx), engendre une réaction de destruction de l'ozone. De plus, les NOx ont une faible durée de vie, ils se déplacent peu sur de longues distances. Cela explique que de plus faibles niveaux d'ozone soient enregistrés en Principauté de Monaco que sur les sites périphériques. De plus, ces sites en périphérie ont une végétation dense, connue pour émettre des COV biogéniques, à plus longue durée de vie, qui accroissent la production d'ozone.

La situation topographique (zone côtière ou zone de crête) joue également un rôle important. Les mouvements de masses d'air étudiés par modélisation il y a quelques années, ont permis de confirmer, pour les Alpes-Maritimes, l'influence des principales sources de pollution de la côte azurée sur l'arrière-pays (DALSTEIN *et al*, 2001). Ceci se vérifie à Monaco. Les brises thermiques de mer amènent sur La Turbie et au Mont Agel, pendant la journée, les panaches de pollution formés au niveau des agglomérations de Monaco et de la Côte d'Azur. Durant ce transport, les polluants primaires (oxydes d'azote, composés organiques volatils) subissent des réactions photochimiques produi-

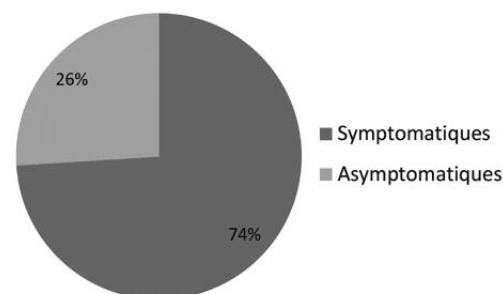
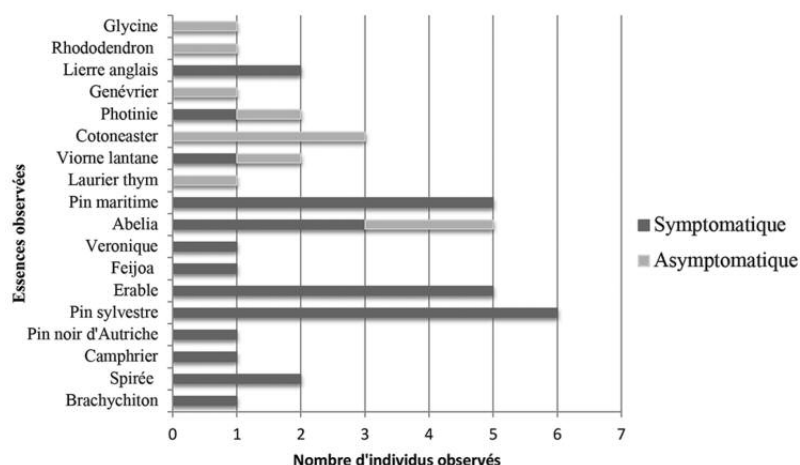
Fig. 13
(en bas, à gauche) :
LESS du Jardin Japonais.
Nombre d'individus
symptomatiques
et asymptomatiques
observés par essence.

Fig. 14
(en bas, à droite) :
Nombre d'individus
symptomatiques
et asymptomatiques
observés dans le LESS
du Jardin Japonais.

Au total, 74% des individus réagissent contre seulement 26% totalement indemnes (Cf. Fig. 14).

Au niveau du LESS de la Tête de Chien, le faux-acacia *Robinia pseudoacacia*, le poirier *Pyrus* sp. ou encore l'ailante (Cf. Photo 4) sont les plus sensibles.

Pour les LESS des placettes du Mont Bataille et de la Tête de Chien, le figuier, le frêne *Fraxinus excelsior* ou encore le chêne vert ont bien réagi.



sant de l'ozone qui s'accumule en altitude dans des couches réservoirs. Ainsi l'ozone, produit à partir des précurseurs émis au niveau de Monaco-ville et du littoral en général, est transporté vers la crête de la Turbie et l'arrière-pays de Peille et se surajoute à l'ozone issu d'émissions biogéniques, produites par les arbres *in situ*.

Les résultats de cette étude sur Monaco-ville et sa périphérie confortent ces observations. Les concentrations d'ozone les plus élevées ont été enregistrées au Mont Agel avec un maximum de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ au mois de juillet et un maximum de $103 \mu\text{g}/\text{m}^3$ enregistré à la Tête de Chien au mois de septembre.

Dégâts foliaires causés par l'ozone

Quelles que soient les essences de pins étudiés, plus l'altitude est élevée, plus l'intensité du *mottling* est importante. Les dégâts oscillent entre 18% et jusqu'à 62% d'atteinte supplémentaire sur les sites d'altitude, de manière plus nette sur les aiguilles les plus âgées et les plus exposées à la lumière. Citons pour exemple, 50% d'atteinte supplémentaire sur les aiguilles de deux ans pour les pins sylvestre de la Cime du Baudon. Par ailleurs, l'observation de la végétation des zones de clairière permet de cibler des essences plus résistantes.

Décoloration et déficit foliaire

Le déficit foliaire plus important des pins situés en altitude s'explique aussi par des conditions climatiques difficiles avec d'importants stress hydriques durant la période estivale et par des sols rocheux assez pauvres. Le déficit foliaire est souvent causé par un ensemble de cofacteurs climatiques et édaphiques tels que la température et l'humidité relative de l'air et surtout par la teneur en eau des sols (SICARD et DALSTEIN-RICHIER, 2015). Les pins de la Principauté quotidiennement arrosés sont moins soumis au stress hydrique. Ils bénéficient de conditions plus favorables. Leurs sols sont enrichis en nutriments organiques qui leur permettent une meilleure croissance et une meilleure résistance aux facteurs biotiques et abiotiques tels que la pollution. De plus, les pins d'altitude se situent souvent sur des pics montagneux exposés tout au long de la journée à un fort ensoleillement.

Des études récentes ont montré que le déficit foliaire et la décoloration des pins aug-

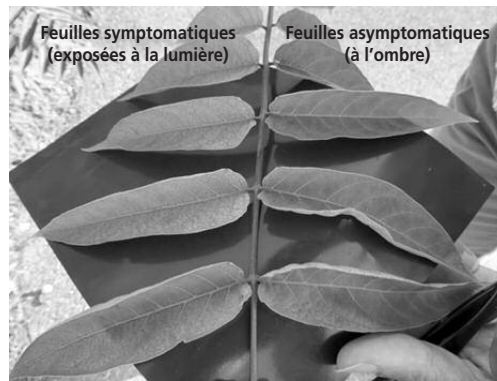


Photo 4 :

Branche d'ailante dont les feuilles à gauche, exposées à la lumière, présentent de très légers symptômes d'ozone (léger *stippling* + *photobleaching*), et dont les feuilles à droite (léger *stippling* en bas), à l'ombre, ne présentent pas de symptômes d'ozone.

mentent de façon significative depuis 15 ans dans le Parc national du Mercantour (SICARD et DALSTEIN-RICHIER, 2015) en raison notamment du changement climatique qui tend à augmenter le nombre et l'intensité des événements extrêmes (sécheresse, pluies intenses, canicules). Des mesures complémentaires (contenu en eau du sol, rayonnement solaire ou mesures de croissance radiale) pourraient permettre de préciser à Monaco et dans son agglomération, les paramètres qui influencent le déficit foliaire.

Dans les aménagements d'espaces verts urbains, il faudrait privilégier les essences résistantes à l'ozone tout en diversifiant les essences sélectionnées. En effet, la diversification des essences forestières permet une meilleure stabilisation du sol (lutte contre l'érosion) et participe à son enrichissement (présence de mycorhizes) tout en permettant une meilleure infiltration de l'eau dans le sol. C'est un des principes de l'agroforesterie. Par ailleurs, elle permet de préserver la biodiversité en multipliant les types d'habitats et de nourritures disponibles pour des espèces diverses et aussi des espèces clés pour le maintien des écosystèmes comme les insectes pollinisateurs.

Il est également important de renouveler les peuplements tout en gérant le volume global sur pied : un nombre d'arbres limités permet de limiter la consommation d'eau dans le sol et minimise le risque incendie, élevé en région méditerranéenne.

Cette étude précise que les pins sont de très bons indicateurs, presque des bio-indicateurs, de la présence de l'ozone. Ils sont également très sensibles au stress hydrique. Ils pourraient donc être de très bons marqueurs de l'évolution du changement climatique. Un suivi à long terme de leur écosystème mériterait d'être effectué en y incluant des paramètres de mesures physiologiques et biochimiques.

M.L.C., L.D.

Marie-Lyne CIRIANI
Laurence DALSTEIN
GIEFS
Groupe international
d'études des forêts
sud-européennes
69 avenue
des Hespérides
06300 Nice
Mél :
legiefs@aol.com

Remerciements

Le GIEFS remercie la Principauté de Monaco pour son soutien financier et technique apporté pour cette étude.

Bibliographie

- Anon, 1994, *Forest Condition in Europe. Results of the 1993 Survey*. UN-ECE, Geneva and EC, Brussels.
- Dalstein, L., Vollenweider, P., Vas, N., Günthardt-Goerg, M.S., 2002. L'ozone et les conifères du sud-est de la France. *For. Med*, t XXIII, n°2, pp 105-116.
- Dalstein L., Vas N., Ulrich E., Cecchini S., 2004. Dégradation de la forêt française en relation avec l'ozone, première approche. *Environnement et Technique* 236, 42-44.
- Dalstein, L., Vas, N., Tagliaferro, F., Ferrara, AM., 2005. Effets de l'ozone sur la forêt et la végétation dans les Alpes franco-italienne. *For. Med. T. XXVI*, n°2, pp. 149-156.
- Dalstein L. & Vas N., 2005. Ozone concentrations and ozone-induced symptoms on coastal and alpine Mediterranean Pines in southern France. *Water, Air and Soil Pollution* 160, 181-195.
- Dalstein-Richier L., Mangin, A., Carrega, P., Gueguen, C., Vas, N., Sanchez, O., Theodore, B., Berolo, W., 2005. État des forêts d'altitude en relation avec la pollution par l'ozone dans la région niçoise. *Pollution atmosphérique* 188, 503-519.
- Département de la santé des forêts (DSF), 1994, Protocole pour les observations. Réseau de surveillance de l'état sanitaire des forêts (réseau européen). Ministère de l'agriculture, de la pêche et de l'alimentation. DERF, Paris 107.
- Ferreti M., 1994, *Mediterranean Forest Trees. A Guide for Crown Assessment*. CEC-UN/ECE, Brussels.
- IPCC, 2014, Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Barros, V.R., C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 688.
- Meleux F., Solmon F., Giorgi F., 2007, Increase in European summer ozone amounts due to climate change. *Atmospheric Environment* 41: 7577-7587.
- Paoletti, E., 2006. Impact of ozone on Mediterranean forest: a review. *Environmental Pollution* 144, 463-474.
- Sicard P. & Dalstein-Richier L., 2015, "Health and vitality assessment of two common pine species in the context of climate change in Southern Europe". *Environmental Research* 137: 235-245.
- Solberg S., Hov Ø., Søyde A., Isaksen I.S.A., Coddeville P., De Backer H., Forster C., Orsolini Y., Uhse K., 2008, European surface ozone in the extreme summer 2003. *Journal of Geophysical Research* 113: D07307.
- Tiwariet, S., Grote, R., Churkina, G., Butler, T., 2016. Ozone damage, detoxification and the role of isoprenoids - new impetus for integrated models. *Functional Plant Biology* 43, 324-326.
- The Royal Society report, (2008). Ground-level ozone in the 21st century: future trends, impacts and policy implications. Science Policy.
- Ulrich E. & Lanier M., 1996, "RENECOFOR - Etat sanitaire des peuplements du réseau en 1994 et 1995". O.N.F, département des recherches techniques. I.S.B.N. 2 47 X : 36.
- Ulrich, E., Dalstein, L., Günthardt-Goerg, M.S., Vollenweider, P., Cecchini, S., Vas, N., Sjöberg, K., Skarman, T., Karlsson, G.P., 2006. *Effets de l'ozone sur la végétation, concentrations d'ozone (2000-2002) et symptômes d'ozone sur la végétation forestière (2001-2003)*. Office National des Forêts, Direction Technique, Département Recherche, ISBN 2-84207-300-2, 126.
- Vestreng, V., Ntziachristos, L., Semb, A., Reis, S., Isaksen, I.S.A., Tarrason, L., 2009. Evolution of NOx emissions in Europe with focus on road transport control measures. *Atmospheric Chemical Physics* 9, 1503-1520.
- Vingarzan, R., 2004. A review of surface ozone background levels and trends. *Atmospheric Environment* 38, 3431-3442.

Résumé

L'ozone, polluant atmosphérique le plus nocif pour la végétation, est très présent en région méditerranéenne. Le Groupe international d'études des forêts sud-européennes, en collaboration avec la Principauté de Monaco, a réalisé une campagne de mesures des concentrations en ozone et de relevés des dommages causés sur la végétation, sur une dizaine de placettes forestières réparties en Principauté de Monaco et sur ses communes périphériques. Les résultats de cette étude ont montré que les concentrations en ozone sont significativement plus élevées sur des sites d'altitude élevée, comme à Peille ou la Turbie, loin des sources d'émission des précurseurs d'ozone, à cause des brises thermiques de mer amenant les panaches de pollution formés au niveau des villes du littoral azuréen. Cette étude a permis de confirmer les forts niveaux d'ozone dans ce secteur et la présence marquée de dégâts foliaires afférents. Les pins d'altitude ont également montré un déficit foliaire plus marqué que les pins de la zone littorale, en partie dû au stress hydrique et à un sol rocheux assez pauvre. Les pins sont de bons indicateurs de la présence d'ozone tout en étant très sensibles au stress hydrique, ils pourraient donc être de très bons marqueurs du changement climatique.

Summary

Impact of ozone pollution on the vegetation of the Principality of Monaco and its surroundings (S.-E. France)

Ozone, which is the type of atmospheric pollution most damaging to vegetation, is highly present around the Mediterranean Rim. The International Study Group for Southern European Forests, in collaboration with the Principality of Monaco, has carried out a series of measurements of the ozone concentration and recorded the damage done to the vegetation on some ten small forested plots located in the Principality and the surrounding municipalities. The results of the study show that ozone concentrations are significantly greater at high altitudes which lie a long way off from the sources of ozone precursors, e.g. at Peille or La Turbie; this is due to the warm sea breezes coming inland that waft upwards the pollution that is formed in the urban areas along the Riviera seaboard. This study has brought confirmation of the high levels of ozone pollution in this area along with the concomitant notable damage to foliage. Pines growing at altitude also showed a greater deficit in foliage than coastal pinewoods, partly on account of the aridity and the fairly infertile rocky soil. Pines, a good indicator for the presence of ozone, are also very sensitive to drought conditions and so provide a very good touchstone for observing climate change.