

FORÊT • NATURE

OUTILS POUR UNE GESTION
RÉSILIENTE DES ESPACES NATURELS

Tiré à part de la revue **Forêt.Nature**

La reproduction ou la mise en ligne totale ou partielle des textes
et des illustrations est soumise à l'autorisation de la rédaction

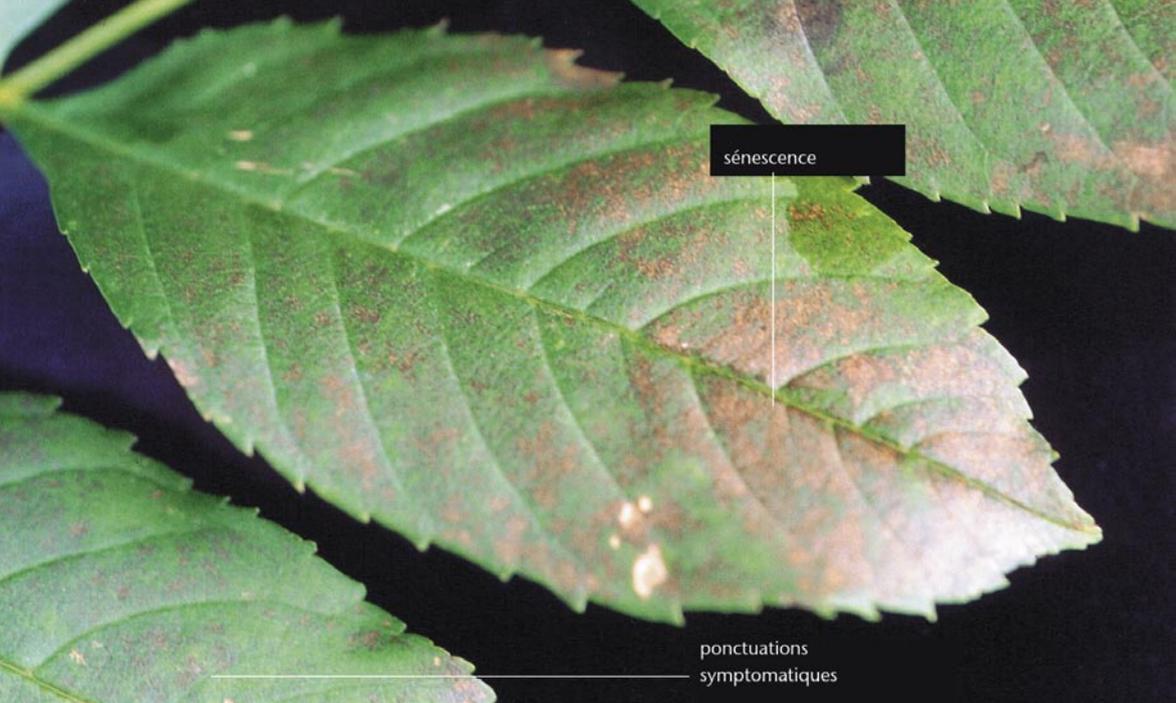
foretnature.be

Rédaction : Rue de la Plaine 9, B-6900 Marche. info@foretnature.be. T +32 (0)84 22 35 70

Abonnement à la revue Forêt.Nature :
librairie.foretnature.be

Abonnez-vous gratuitement à Forêt.Mail et Forest.News :
foretnature.be

Retrouvez les anciens articles de la revue
et d'autres ressources : **foretnature.be**



© L. Dalstein

EFFETS DE L'OZONE SUR LA VÉGÉTATION FORESTIÈRE. INTRODUCTION GÉNÉRALE DANS LA PROBLÉMATIQUE

ERWIN ULRICH

Depuis une dizaine d'années les médias et le grand public sont sensibilisés par l'ozone (O_3) et ses effets sur la santé humaine. Les effets sur la végétation sont rarement évoqués et pourtant ils existent ! Bien que régulièrement des alertes d' O_3 pour le dépassement des seuils de la santé humaine aient été diffusées en France, aucune information n'a concerné la végétation. Les forestiers qui se posent des questions sur l' O_3 n'ont pas vraiment accès à une information synthétique. Cet article vise à combler ce vide.

En 1992, une première directive européenne sur l' O_3 (n° 92/72/CEE du conseil du 21 septembre 1992) a fixé plusieurs seuils de concentration :

- pour la protection de la santé humaine ($110 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour la moyenne mobile sur 8 heures) et
- pour la protection de la végétation sur une ($200 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ou 24 heures ($65 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

En 2002, du fait de l'évolution des connaissances scientifiques notamment sur les effets sur la végétation, la directive n° 2002/3/CE (tableau 1) l'a abrogée. Plus que les concentrations seuils, les plantes sont susceptibles de réagir à une dose cumulée d' O_3 , avec divers symptômes décrits plus bas. Cette dose se calcule en multipliant au fur et à mesure chaque concentration horaire mesurée avec sa

durée. Les valeurs « cible » et les objectifs à long terme indiqués dans le tableau 1 ont été déterminés par des expérimentations réalisées sur des dizaines d'espèces différentes¹, et l'ensemble de ces études a permis de définir les seuils du règlement de 2002 (tableau 1). Ce sont plutôt les fortes concentrations qui ont un impact sur la plante. La dose cumulée jusqu'à l'apparition de symptômes visibles est normalement différente pour chaque espèce². La valeur « cible » de 18 000 µg/m³.heure protège plutôt les plantes peu sensibles et l'objectif à atteindre à long terme est de 6 000 µg/m³.heure pour les espèces sensibles.

QUELLES SONT LES CARACTÉRISTIQUES DE L'OZONE ?

Le mot ozone, vient du grec « οζο » qui signifie « je sens ». L'ozone ou trioxygène (O₃), a une odeur électrique pour une concentration de plusieurs centaines de µg/m³. Cette odeur est perceptible par exemple à côté d'imprimantes laser, de photocopieuses ou de lampes UV. Incolore à température ambiante et bleu clair à très basse température, l'O₃ est un oxydant très puissant aussi bien en milieu acide que basique. Il sert entre autres à forte concentration à désinfecter l'eau dans des stations d'épuration. L'O₃ peut provoquer chez l'homme des maux de tête, de l'asthme, des irritations des yeux, de la gorge, ou de toutes les muqueuses en contact direct avec l'air.³

L'air contient 78,09 % d'azote (N₂), 20,95 % d'oxygène (O₂) et environ 0,93 % d'argon (Ar). Les 0,03 % restants contiennent une multitude de gaz (plusieurs centaines) en quantité assez variable, dont

le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), le dihydrogène (H₂), le protoxyde d'azote (N₂O), le monoxyde de carbone (CO) et l'ozone (O₃ ≈ 10⁻⁸ à 10⁻⁷ %).

DE QUEL OZONE PARLONS-NOUS ?

Nous parlons ici uniquement de l'O₃ de la troposphère (couche de l'atmosphère se trouvant entre 0 et 12 à 14 km d'altitude en moyenne). Au-dessus de la troposphère se trouve la tropopause, d'une épaisseur d'environ 2 à 3 km et dans laquelle circulent des vents assez forts, puis, au-delà, la stratosphère jusqu'à environ 40 km. La « couche d'ozone » se trouve dans la stratosphère. Le problème de l'O₃ est inversé entre la troposphère et la stratosphère : dans la première les concentrations augmentent, dans la seconde elles diminuent, conduisant au « trou d'ozone ». Les échanges entre les deux sphères existent mais sont faibles, la tropopause avec ses vents forts empêchant probablement une grande partie de ces échanges.

COMMENT L'OZONE EST-IL FORMÉ ?

En présence de rayons ultraviolets de courte longueur d'onde, une molécule de dioxygène (O₂) peut être cassée pour former deux atomes d'oxygène élémentaire très réactifs. Ceux-ci peuvent réagir avec le dioxygène pour former le trioxygène : l'O₃ (on parle ainsi de photo-oxydant). Cette réaction, la plus simple, concerne en moyenne une molécule pour 1 million de dioxygène entre 15 et 30 km dans la stratosphère.

Dans la troposphère, une multitude de gaz à faible concentration intervient en

plus dans la formation d'O₃ : le dioxyde d'azote (NO₂, provenant des émissions de monoxyde d'azote, NO, en majorité produit par les moteurs thermiques des automobiles et des bateaux) et les hydrocarbures d'origine anthropique (émis aussi bien par les automobiles que par l'industrie pétrolière). Plusieurs centaines de réactions chimiques conduisent à la production d'ozone soit en tant que sous-produit, soit en tant que produit final⁴. C'est l'augmentation des émissions d'oxydes d'azote et d'hydrocarbures qui a conduit à l'augmentation des concentrations d'O₃ depuis 1850 (voir plus bas).

La formation de l'O₃ prend du temps et les concentrations les plus fortes sont enregistrées hors des zones de production des précurseurs d'O₃. Souvent, les lieux de production sont les grandes agglomérations et les fortes concentrations d'O₃ se situent en milieu rural, vers lequel les masses d'air se sont déplacées. Pendant ce déplacement, avec l'aide des rayons ultraviolets et de la chaleur, la production d'O₃ est amplifiée.

POURQUOI NE PARLE-T-ON TOUJOURS QUE DE L'OZONE ? N'Y A T-IL PAS D'AUTRES PHOTO-OXYDANTS ?

L'ozone est la molécule phare des photo-oxydants. Il existe plusieurs dizaines de photo-oxydants (par exemple le PAN = peroxy-acétyle-nitrate, l'eau oxygénée, H₂O₂, les aldéhydes). L'O₃ a l'avantage de pouvoir se mesurer facilement en continu. Ce n'est pas le cas des autres photo-oxydants, pour lesquels les méthodes de mesure sont très lourdes et ne permettent qu'un échantillonnage discontinu. Le problème principal réside dans la concentration : l'O₃ a les plus fortes concentrations. Les autres photo-oxydants, pas moins réactifs, sont en moyenne dix à cent fois moins concentrés dans l'air.

LA VÉGÉTATION PARTICIPE-T-ELLE À LA PRODUCTION D'OZONE ?

Toutes les plantes émettent des hydrocarbures lors de leurs échanges gazeux

Tableau 1 – Limites pour la santé humaine et la végétation fixées par la directive européenne n° 2002/3/CE du parlement européen et du conseil du 12 février 2002, relative à l'O₃ dans l'air ambiant.

	Référence	Valeur cible	Objectif à long terme
Santé humaine	Maximum journalier de la moyenne glissante sur 8 heures	120 µg/m ³ à ne pas dépasser plus de 25 jours par année civile	120 µg/m ³ à ne jamais dépasser
Végétation	AOT* 40, calculé à partir de valeurs supérieures à 80 µg/m ³ sur 1 heure, de mai à juillet, mesurées entre 8 et 20 heures	18 000 µg/m ³ .heure par an	6 000 µg/m ³ .heure par an

* AOT40 : dose accumulée au-dessus du seuil de 40 ppb**.

** ppb : partie par milliard.

avec l'atmosphère. Avec le méthane (CH₄, émis essentiellement par le sol et par les eaux de surface), les émissions naturelles d'hydrocarbures de tous les écosystèmes dépassent d'un facteur d'environ cinq les émissions anthropiques⁵. Les émissions de monoterpènes des plantes seraient au niveau mondial de l'ordre de 9.10⁸ tonnes par an, comparées aux émissions anthropiques d'hydrocarbures de l'ordre de 65.10⁶ tonnes par an.⁶

Les terpènes essentiellement produits par les arbres, même si leur quantité est extrêmement faible, jouent le rôle de catalyseurs dans la production en chaîne des photo-oxydants, mais pas nécessairement dans la production de l'ozone. Les terpènes sont d'abord dégradés en consommant de l'ozone. Ensuite les produits de cette dégradation participent entre autres à la production d'O₃, ainsi que d'aérosols qui peuvent à leur tour être responsables du smog⁷. La production de photo-oxydants et d'autres composés potentiellement toxiques est donc amplifiée en forêt. Ce n'est pas pour autant qu'il faille rendre la végétation responsable de l'augmentation des niveaux d'ozone, bien qu'elle soit responsable d'un fond « naturel » de photo-oxydants qu'elle est tout à fait capable de supporter. L'augmentation des émissions humaines, surtout en oxydes d'azote mais également en hydrocarbures, reste bien la seule responsable. L'augmentation de la surface forestière française depuis 1940, de près de 5 millions d'hectares⁸ peut être considérée comme responsable de l'augmentation d'émissions de terpènes. Leurs produits de dégradation ne seraient certainement pas orientés vers des photo-oxydants si variés si les concentrations en oxydes d'azote n'étaient pas si élevées.⁹

QUELLES SERAIENT LES CONCENTRATIONS NATURELLES DE L'OZONE ?

Les concentrations les plus faibles mesurées dans les régions les moins soumises à des émissions industrielles peuvent nous donner un ordre de grandeur. KATO *et al.*¹⁰ et POCHANART *et al.*¹¹ ont par exemple mesuré l'O₃ dans l'air en 1997 et 1998 dans le Pacifique Ouest, dans l'île de Chichijima, les îles d'Okinawa, Ogasawara, Oki et Rishiri entourant le Japon jusqu'à une distance de 1 000 km. Ils ont mesuré environ 26 µg/m³ d'ozone dans la période estivale, avec des origines des masses d'air essentiellement maritimes et de l'ordre de 80 µg/m³ d'ozone en période hivernale, où les masses d'air venaient souvent du continent asiatique et des îles japonaises. Les concentrations estivales concordent bien avec les mesures réalisées en France au milieu du XIX^e siècle (voir ci-dessous).

ÉVOLUTION DES CONCENTRATIONS D'OZONE DEPUIS 1850

Jusqu'au début des années 1990, différentes sources internationales montrent des tendances à une augmentation généralisée de 1 à 2 % par an¹²⁻¹³⁻¹⁴. Entre 1990 et 2000, peu de publications existent pouvant attester ces tendances. Depuis 2000, plusieurs publications parues dans des journaux scientifiques de haut niveau montrent des tendances variables selon le critère observé et la couche de l'atmosphère concernée (hausse, baisse ou stabilité).

Pour la France, actuellement aucune publication n'a fait état des tendances sur les 20 à 30 dernières années, car le réseau

français de mesures de l'O₃ n'a été consolidé que les dix dernières années¹⁵. Pour cette raison nous tentons une comparaison indirecte. Cette comparaison repose sur des mesures à basse altitude, afin de se rapprocher le plus possible des conditions dans lesquelles la majorité de la forêt française se trouve.

Parmi les mesures les plus fiables au monde au milieu du XIX^e siècle figurent celles d'Albert-Lévy. Ces mesures ont même été testées avec des analyseurs modernes¹⁶ ce qui a montré leur parfaite pertinence. Les concentrations observées par Albert-Lévy entre 1876 et 1910 étaient de l'ordre de 20 µg/m³ d'air en moyenne annuelle (figure 1 (a)). Sur la base de ces 20 µg/m³ des simulations (avec des taux d'augmentation variant de 0,5 à 1 %) sont présentées figure 1 entre 1850 et 2020. Dans les années 1990, les réseaux français de surveillance de la qualité de l'air ont progressivement installé des analyseurs continus d'O₃. À ce jour et depuis seulement une dizaine d'années, plus de 400 stations de mesure sont répertoriées¹⁵, dont seulement un faible nombre (n = 37) est en site « rural ». Les concentrations moyennes annuelles de ces 37 stations sont indiquées pour les années 1994, 1997 et 2001 dans la figure 1 (b). En 11 ans seulement, de 1991 à 2001, l'ADEME¹⁵ observe une hausse pour ces 37 stations. La comparaison entre les concentrations de 1850 et celles de 1994 à 2001 indique plutôt une tendance à la hausse de l'ordre de 0,6 % en moyenne annuelle sur un siècle et demi. Ce ne sont pas les moyennes annuelles qui inquiètent, mais plutôt l'augmentation des maxima (voir doubles flèches oranges = amplitude minimum-maximum). Si la fréquence des fortes concentrations aug-

mente, dépassant les seuils acceptables des plantes sensibles à très sensibles, les effets à court, moyen et long termes décrits plus bas risquent de devenir réalité. Seule une politique de réduction massive des émissions d'oxydes d'azote peut faire infléchir cette tendance.

QUELS SONT LES EFFETS PHYSIOLOGIQUES OU BIOCHIMIQUES DE L'OZONE SUR LA VÉGÉTATION ?

Un nombre très important de travaux scientifiques sur l'O₃ a vu le jour ces vingt dernières années dans le monde. En France, différentes équipes d'écologie et écophysiologie forestières ont travaillé en milieu forestier, essentiellement sur la physiologie et les modifications biochimiques des essences suivantes :

- peuplier (*Populus tremula x alba*) ;
- érable à sucre (*Acer saccharum*) ;
- plusieurs espèces de pin (*Pinus halepensis*, *P. cembra*, *P. taeda*) ;
- hêtre (*Fagus sylvatica*) ;
- plusieurs espèces de chêne (*Quercus robur*, *Q. petraea*, *Q. rubra*, *Q. Cerris*) ;
- deux espèces d'épicéa (*Picea abies*, *P. sitchensis*).

Selon l'espèce, une feuille ou une aiguille possède entre 20 et 900 stomates par mm² de surface (soit surface supérieure, soit inférieure, soit les deux¹⁷). Après le passage des stomates, l'O₃ dégrade petit à petit les cellules les plus vulnérables¹⁸⁻¹⁹. Chaque plante a une capacité naturelle de détoxification de l'O₃ ou de ses produits de dégradation qui permet de neutraliser des radicaux libres ou de l'oxygène élémentaire, très réactifs. Si les concentrations d'O₃ sont fortes et que la plante n'arrive pas à produire suffisamment de substances

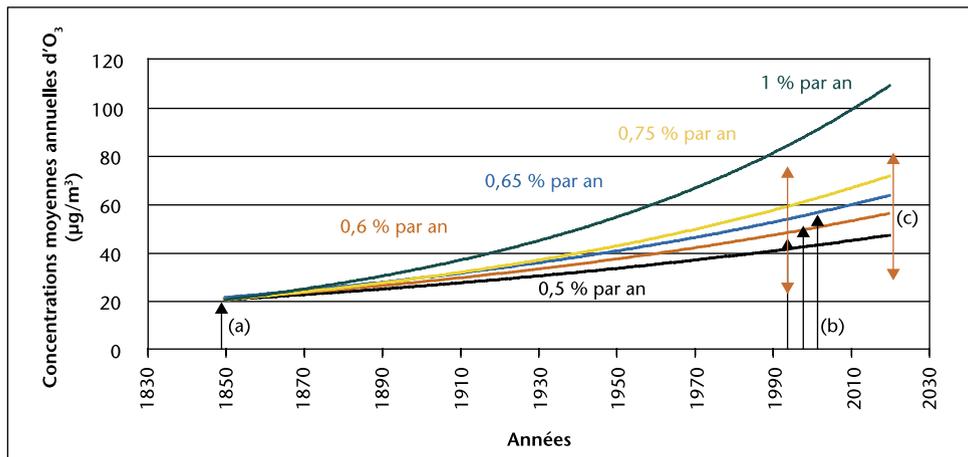


Figure 1 – Comparaison d'augmentations hypothétiques des concentrations annuelles moyennes d'O₃ à partir de 1850, en partant de 20 µg/m³ (a) de 0,5, 0,6, 0,65, 0,75 ou 1 % par an avec les concentrations moyennes annuelles mesurées par 37 stations « rurales » en France en 1994, 1997 et 2001 (b) ainsi que leur amplitude ((c), centile 10 et 90).

pour le dégrader, des dommages visibles apparaissent.²⁰⁻²¹⁻²²⁻²³⁻²⁴⁻²⁵

En général et durant des périodes avec des concentrations d'O₃ élevées, les plantes montrent des réactions biochimiques diverses bien avant l'apparition visible de symptômes, par exemple, augmentation de la photosynthèse, de la respiration, du métabolisme du carbone ou du processus de détoxification. Ces changements dans le métabolisme cellulaire concernent la réparation et la maintenance de la structure des cellules.

Comme cela a été montré dans différents travaux, la dose cumulée jusqu'à l'apparition de symptômes visibles est normalement différente pour chaque espèce (figure 2). Des disparités d'AOT 40 très importantes sont observées entre les espèces les plus sensibles (ici par exemple le cerisier tardif, *Prunus serotina* ou le sureau à grappes, *Sambucus racemosa*) et les espèces un peu plus résistantes (par

exemple le hêtre, *Fagus sylvatica*). Les différences entre années de doses provoquant des symptômes chez la même espèce (ici 1997 et 1998) semblent, en revanche, faibles.

QUELS EFFETS PEUT-ON CRAINDRE À L'AVENIR SI LES CONCENTRATIONS CONTINUENT À AUGMENTER ?

Les concentrations d'O₃ sont régulièrement plus importantes dans le Sud. Dans le Nord, cependant, les dégâts dus à l'O₃, bien que moins importants, sont indéniables. La sécheresse et la chaleur sont des facteurs provoquant la fermeture des stomates et c'est pourquoi, dans le Sud, la pénétration d'O₃ peut être réduite. En outre, dans le Nord, du fait d'un bon approvisionnement en eau, de températures favorables et d'une illumination naturelle prolongée, les dégâts dus à l'O₃ (et visibles) peuvent être conséquents, car les doses (= effet cumulatif) peuvent être importantes.

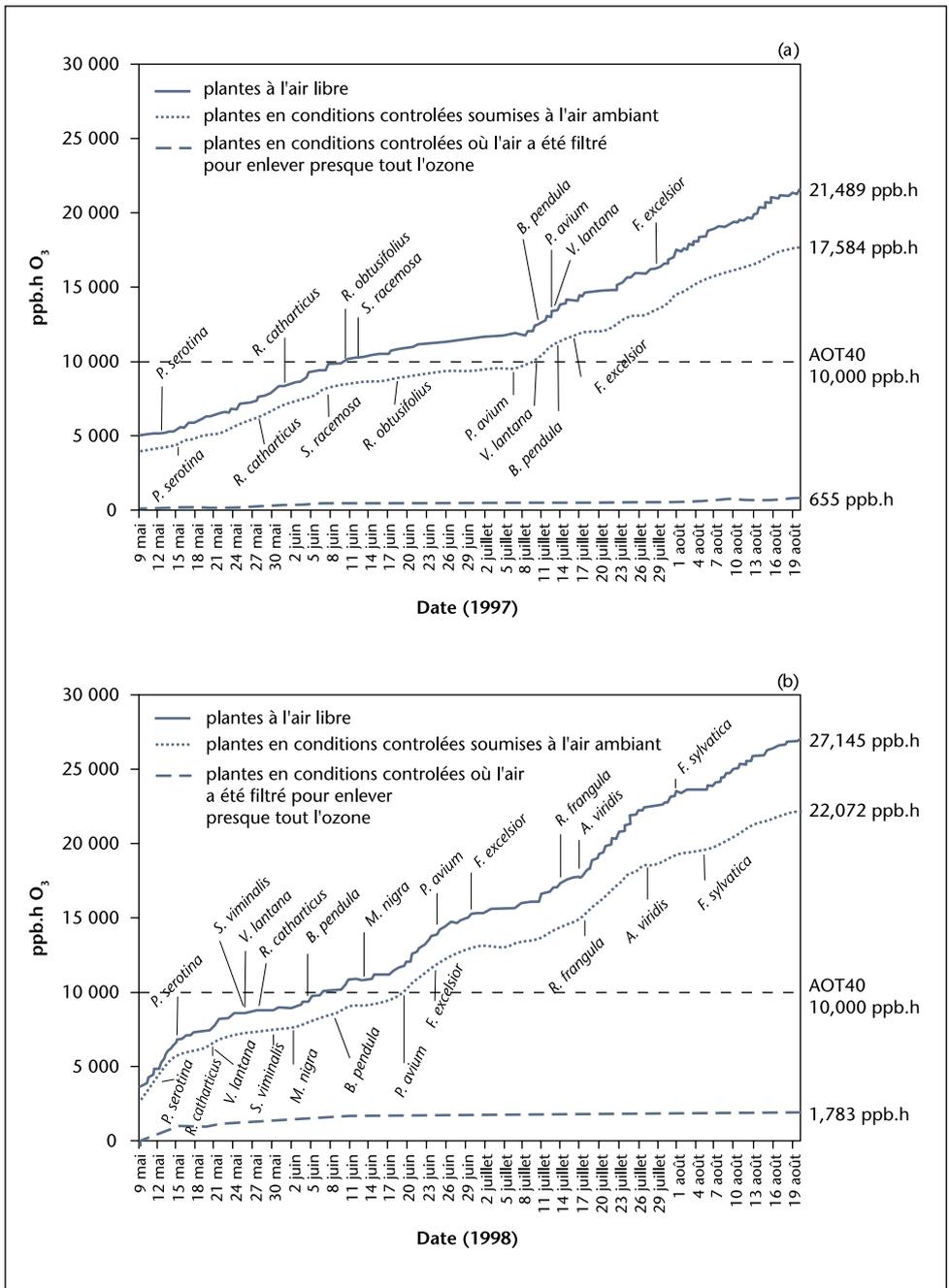


Figure 2 – AOT 40 cumulé en fonction de la date d'apparition de symptômes d'ozone visibles sur le feuillage des plantes indiquées en 1997 (a) et 1998 (b). Résultats d'une expérimentation avec des chambres à ciel ouvert dans le Tessin, en Suisse. Pour chaque essence, la dose cumulée à partir de laquelle les premiers symptômes sont observés est indiquée. (reproduit avec l'autorisation d'Elsevier)

Après environ 20 ans de recherche sur les effets physiologiques de l'O₃ sur les plantes, l'hypothèse d'un enchaînement des effets est envisageable selon la longueur de la période d'impact, à condition que les concentrations continuent à augmenter comme dans le passé. Les effets peuvent être classés comme suit :

Effets à court terme

Ils sont observés quotidiennement pour les plantes sensibles. Il s'agit d'effets visibles, par exemple : ponctuations jaunes internervaires, nécroses. Ces effets sont provoqués par l'entrée de l'O₃ au niveau des voies de respiration, des stomates.

Effets à moyen terme

Dans les 10 à 20 années à venir, les plantes sensibles évolueraient vers l'affaiblissement de leur état physiologique :

- raccourcissement des périodes de végétation à cause d'une sénescence prématurée²⁶ ;
- légère diminution de la croissance, actuellement observée pour les jeunes arbres²⁷⁻²⁸⁻²⁹ et arbres âgés³⁰ ;
- probable difficulté progressive de la maturation des fruits et des graines, chez les feuillus notamment ;
- probable difficulté progressive de la reproduction/régénération des espèces les plus sensibles ;
- finalement disparition des espèces sensibles à très sensibles dans les régions les plus polluées par l'O₃.

Effets à long terme

Dans les 20 à 50 années à venir, la désstabilisation d'écosystèmes entiers pourrait apparaître avec un changement progressif de la composition floristique et arborée, en fonction des conditions locales et régionales et de la sensibilité des plantes. Au

niveau forestier, cela pourrait poser des problèmes de régénération d'espèces principales de la forêt française.

Il est bien entendu que ce scénario n'est valable que dans l'hypothèse d'une constante augmentation des concentrations d'ozone. Si les mesures de diminution des émissions arrivent à stabiliser, voire infléchir, les concentrations, ce scénario ne sera heureusement qu'une utopie. Malheureusement, il sera difficile, mais nécessaire, de faire la part due à l'O₃ et celle due au changement climatique, l'eutrophisation par l'azote, etc.

QUELS SONT LES EFFETS DE L'OZONE SUR LES PLANTES AGRICOLES ?

En agriculture, les expérimentations sur l'ozone ont démarré bien avant celles en foresterie. Les très fortes concentrations d'O₃ enregistrées en plaine de Californie et la chute de production agricole constatée parallèlement ont permis d'engager de très nombreuses études. Ainsi, des plantes comme les pommes de terre, le blé (d'hiver ou d'été), le soja, les haricots, le maïs, le coton, etc. ont été soumises à des concentrations contrôlées d'O₃. Les mêmes effets physiologiques présentés ci-dessus sont observés. Ces effets conduisent, selon la plante, à des réductions de rendement pouvant aller jusqu'à 30 %, avec une moyenne située entre 10 et 15 %.³¹⁻³²⁻³³⁻³⁴⁻³⁵⁻³⁶⁻³⁷⁻³⁸

Y A-T-IL UNE DIFFÉRENCE IMPORTANTE ENTRE LES EFFETS SUR LES PLANTES AGRICOLES ET CEUX SUR LES PLANTES FORESTIÈRES ?

Oui ! La plupart des plantes agricoles sont des plantes annuelles. Il n'y a donc

pas d'effet cumulé sur plusieurs années comme chez les arbres, arbustes et plantes herbacées pluriannuelles, à l'exception de plantes herbacées annuelles, bien sûr.

Cette différence est loin d'être négligeable pour au moins quatre raisons :

- le cumul pluriannuel et donc des effets « mémoire » possibles sur le fonctionnement physiologique et biochimique interne ;
- l'évolution de la sensibilité des arbres et arbustes avec l'âge ; celle-ci semble plutôt aller dans le sens d'une meilleure résistance des sujets plus adultes pour des doses comparables d'ozone²⁸ ;
- la différenciation spatiale réelle des effets de l'ozone selon les conditions édaphiques des arbres et arbustes : il s'agit par exemple de différences atmosphériques (fréquence de temps humides) ou de nutrition (une déficience en phosphore avec de l'ozone conduira à des effets différents par rapport à une déficience azotée ou magnésienne, etc.²⁹), auxquelles s'ajoute bien sûr, une pollution de l'ozone assez variable d'une région à l'autre et même au sein d'un massif forestier ;
- la prédisposition croissante à des attaques parasitaires (champignon, insectes, etc.) à cause d'un affaiblissement des sujets, bien avant la détection d'effets visibles.³⁹

QUELLE EST LA RÉPARTITION VERTICALE DES CONCENTRATIONS D'OZONE À L'INTÉRIEUR D'UN PEUPLEMENT ?

De nombreuses mesures de profils verticaux des concentrations d'ozone, à l'aide de tours érigées à l'intérieur de peuple-

ments adultes et montant jusqu'à 50 mètres⁴⁰⁻⁴¹⁻⁴²⁻⁴³, montrent la distribution suivante : les concentrations les plus faibles se trouvent près du sol jusqu'à quelques mètres au-dessus. Les concentrations augmentent jusqu'au-dessus des cimes pour atteindre un maximum à hauteur du sommet de la canopée, puis elles décroissent très lentement. En moyenne annuelle, le gradient de concentration en ozone entre, par exemple 44 et 7 mètres de hauteur, est de l'ordre de 4 µg/m³, mais peut atteindre dans des situations extrêmes (fortes températures, fort ensoleillement) jusqu'à 60 µg/m³.⁴³

QUELLES ESPÈCES SONT CONSIDÉRÉES AUJOURD'HUI COMME SENSIBLES OU TRÈS SENSIBLES ?

En juin 2004, la liste des espèces considérées à ce jour comme sensibles comporte 179 espèces et 18 genres (tableau 2).

CONCLUSIONS

En 2001, nous avons juste commencé l'inventaire des effets de l'ozone sur la végétation forestière française. Nous ne pouvons donc pas donner d'informations sur son ampleur au niveau du territoire français. Il est évident que les effets sont très variables d'une région à l'autre et d'une espèce à l'autre, ce qui nous impose une grande vigilance.

En revanche, la France connaît, grâce à son système de surveillance de la santé des forêts⁴⁴, un nombre très important de problèmes phytosanitaires. Ces problèmes sont essentiellement abiotiques (vent, grêle, sécheresse, feu, déficiences nutritionnelles,

Tableau 2 – Liste des espèces forestières considérées comme étant sensibles à l'ozone, triées par ordre alphabétique (source : groupe de travail sur l'ozone du PIC-Forêt, www.gva.es/ceam/ICP-Forests, menu « contents », puis menu « list of species »).

<i>Abies cephalonica</i>	<i>Fagus sylvatica</i>	<i>Pistacia lentiscus</i>	<i>Sorbus aria</i>
<i>Acer campestre</i>	<i>Filipendula ulmaria</i>	<i>Pistacia terebinthus</i>	<i>Sorbus aucuparia</i>
<i>Acer granatense</i>	<i>Frangula alnus</i>	<i>Plantago lanceolata</i>	<i>Sorbus chamaemespilus</i>
<i>Acer platanoides</i>	<i>Fraxinus angustifolia</i>	<i>Plantago major</i>	<i>Sorbus domestica</i>
<i>Acer pseudoplatanus</i>	<i>Fraxinus excelsior</i>	<i>Polygonum bistorta</i>	<i>Sorbus mugeotii</i>
<i>Acer saccharinum</i>	<i>Fraxinus ornus</i>	<i>Populus alba</i>	<i>Stachys officinalis</i>
<i>Agrimonia eupatoria</i>	<i>Fraxinus pennsylvanica</i>	<i>Populus nigra</i>	<i>Succisa pratensis</i>
<i>Ailanthus altissima</i>	<i>Fraxinus spp.</i>	<i>Populus tremula</i>	<i>Symphoricarpos albus</i>
<i>Alchemilla xanthochlora</i>	<i>Geranium sylvaticum</i>	<i>Prunus armeniaca</i>	<i>Syringa vulgaris</i>
<i>Alnus glutinosa</i>	<i>Helleborus niger</i>	<i>Prunus avium</i>	<i>Taxus baccata</i>
<i>Alnus incana</i>	<i>Heracleum sphondylium</i>	<i>Prunus dulcis</i>	<i>Thalictrum minus</i>
<i>Alnus viridis</i>	<i>juranium</i>	<i>Prunus persica</i>	<i>Tilia cordata</i>
<i>Anthyllis cytisoides</i>	<i>Hippophae rhamnoides</i>	<i>Prunus serotina</i>	<i>Tilia platyphyllos</i>
<i>Aquilegia vulgaris</i>	<i>Impatiens parviflora</i>	<i>Prunus spinosa</i>	<i>Trifolium pratense</i>
<i>Arbutus unedo</i>	<i>Ipomoea indica</i>	<i>Prunus virginiana</i>	<i>Tsuga canadensis</i>
<i>Artemisia campestris</i>	<i>Juglans nigra</i>	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	<i>Tsuga heterophylla</i>
<i>Artemisia vulgaris</i>	<i>Juglans regia</i>	<i>Pyrus malus</i> subsp.	<i>Ulmus glabra</i>
<i>Aruncus dioecus</i>	<i>Laburnum alpinum</i>	<i>malus</i>	<i>Ulmus minor</i>
<i>Asclepias syriaca</i>	<i>Lamiumstrum galeobdolon</i>	<i>Quercus robur</i>	<i>Vaccinium myrtillus</i>
<i>Astrantia major</i>	<i>Lapsana communis</i>	<i>Reseda odorata</i>	<i>Vaccinium uliginosum</i>
<i>Atropa bella-donna</i>	<i>Larix decidua</i>	<i>Reynoutria japonica</i>	<i>gaultherioides</i>
<i>Berberis vulgaris</i>	<i>Ligustrum ovalifolium</i>	<i>Rhamnus alaternus</i>	<i>Valeriana montana</i>
<i>Betula pendula</i>	<i>Ligustrum vulgare</i>	<i>Rhamnus catharticus</i>	<i>Verbascum sinuatum</i>
<i>Buxus sempervirens</i>	<i>Liriodendron tulipifera</i>	<i>Ribes alpinum</i>	<i>Veronica urticifolia</i>
<i>Calamintha grandiflora</i>	<i>Lonicera caprifolium</i>	<i>Ricinus communis</i>	<i>Viburnum lantana</i>
<i>Calystegia sepium</i>	<i>Lonicera etrusca</i>	<i>Robinia pseudoacacia</i>	<i>Viburnum opulus</i>
<i>Carpinus betulus</i>	<i>Lonicera implexa</i>	<i>Rosa canina</i>	<i>Viburnum tinus</i>
<i>Centaurea nigra</i>	<i>Lonicera nigra</i>	<i>Rubia peregrina</i>	<i>Viburnum x bodnantense</i>
<i>Centaurea nigrescens</i>	<i>Lonicera xylosteum</i>	<i>Rubus fruticosus</i>	<i>Vinca difformis</i>
<i>Centaurea paniculata</i>	<i>Morus alba</i>	<i>Rubus idaeus</i>	<i>Vitis vinifera</i>
<i>Cirsium helenioides</i>	<i>Morus nigra</i>	<i>Rubus spectabilis</i>	
<i>Cistus salvifolius</i>	<i>Mycelis muralis</i>	<i>Rubus ulmifolius</i>	Indépendamment des
<i>Clematis flammula</i>	<i>Myrtus communis</i>	<i>Rudbeckia lacinata</i>	espèces mentionnées
<i>Clematis spp.</i>	<i>Oenothera biennis</i>	<i>Rumex obtusifolius</i>	ci-dessus, d'autres
<i>Clematis vitalba</i>	<i>Oenothera rosea</i>	<i>Rumex pulcher</i>	genres contiennent des
<i>Colutea arborescens</i>	<i>Onobrychis viciifolia</i>	<i>Salix alba</i>	espèces sensibles
<i>Convolvulus arvensis</i>	<i>Ostrya carpinifolia</i>	<i>Salix caprea</i>	<i>Agrostis</i> , <i>Aquilegia</i> ,
<i>Cornus alba</i>	<i>Parthenocissus quinque-</i>	<i>Salix daphnoides</i>	<i>Betula</i> , <i>Calystegia</i> ,
<i>Cornus mas</i>	<i>folia</i>	<i>Salix glabra</i>	<i>panula</i> , <i>Carya</i> , <i>Forsythia</i> ,
<i>Cornus sanguinea</i>	<i>Picea abies</i>	<i>Salix pentandra</i>	<i>Hieracium</i> , <i>Lamium</i> ,
<i>Corylus avellana</i>	<i>Picea glauca</i>	<i>Salix purpurea</i>	<i>Myosotis</i> , <i>Populus</i> (clo-
<i>Crataegus laevigata</i>	<i>Pinus banksiana</i>	<i>Salix viminalis</i>	nes), <i>Ribes</i> , <i>Rosa</i> , <i>Rubus</i> ,
<i>Crataegus monogyna</i>	<i>Pinus cembra</i>	<i>Sambucus ebulus</i>	<i>Salix sp.</i> , <i>Sambucus</i> ,
<i>Crataegus oxyacantha</i>	<i>Pinus contorta v. latifolia</i>	<i>Sambucus nigra</i>	<i>Spiraea</i> , <i>Trifolium</i> .
<i>Cystisus heterochrous</i>	<i>Pinus halepensis</i>	<i>Sambucus racemosa</i>	
<i>Dittrichia viscosa</i>	<i>Pinus nigra</i>	<i>Senecio nemorensis</i>	
<i>Epilobium angustifolium</i>	<i>Pinus pinaster</i>	<i>Senecio ovatus</i>	
<i>Epilobium collium</i>	<i>Pinus pinea</i>	<i>Sequoiadendron gigan-</i>	
<i>Epilobium hirsutum</i>	<i>Pinus ponderosa</i>	<i>teum</i>	
<i>Euonymus europaeus</i>	<i>Pinus strobus</i>	<i>Solanum sodomium</i>	
<i>Euphorbia dulcis</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Solidago canadensis</i>	

etc.) et biotiques (insectes, champignons, bactéries, etc.). Actuellement, plusieurs centaines de problèmes potentiels sont dénombrées, dont seulement plusieurs dizaines ont un impact économique (L.M. NAGELEISEN, communication personnelle). Les observations des vingt dernières années nous permettent de dire que ces problèmes prévalent actuellement largement et couvrent parfois de très grandes surfaces (cf. tempêtes de 1999, feux de forêt, attaques parasitaires, etc.).

Dans cette perspective, l'ozone n'est qu'un problème de plus. Mais il se peut, à condition que les concentrations d'ozone continuent à monter, que l'effet de sélectivité sur les plantes sensibles à très sensibles et surtout l'effet d'affaiblissement des plantes, les prédisposent aux attaques parasitaires. L'ozone pourra alors être à long terme un « grand » problème. ■

BIBLIOGRAPHIE

- ¹ VDI [2002]. *Maximum immission values protect vegetation, maximum immission concentrations for ozone*. Verein Deutscher Ingenieure Richtlinien 2310, 6, 137 p.
- ² VANDER HEYDEN D., SKELLY J., INNES J., HUG C., ZHANG J., LANDOLT W., BLEULER P. [2001]. Ozone exposure thresholds and foliar injury on forest plants in Switzerland. *Environmental Pollution* **111** : 321-331.
- ³ LEVY J.I., CARROTHERS T.J., TUOMISTI J.T., HAMMITT J.K., EVANS J.S. [2001]. Assessing the public health benefits of reduced ozone concentrations. *Environmental Health Perspectives* **109**(12) : 9-20.
- ⁴ LOPEZ A., BARTHOMIEUF O., HUERTAS M.L. [1989]. Simulation of chemical processes occurring in an atmospheric boundary layer. Influence of light and biogenic hydrocarbons on the formation of oxidants. *Atmospheric Environment* **23**(7) : 1 465-1 478.
- ⁵ JAY K., STIEGLITZ L. [1989]. *Identifizierung chemischer-photochemischer Umsetzungsprodukte von biogenen Kohlenwasserstoffen mit anthropogenen Luftschadstoffen*. Projekt Europäisches Forschungszentrum für Maßnahmen zur Luftreinhaltung (PEF), KfK-PEF, 53, 123 p.
- ⁶ KOTZIAS D., NICOLLIN B., DUANE M., DAIBER R., EIJEK J.V., ROGORA L., SCHLITT H. [1991]. Carbonyls in the forest atmosphere – evidence for monoterpene/ozone reaction. Springer Verlag. *Naturwissenschaften* **78** : 38-40.
- ⁷ PANDIS S.N., PAULSON S.E., SEINFELD J.H., FLAGAN R.C. [1991]. Aerosol formation in the photooxidation of isoprene and β -pinene. *Atmospheric Environment* **25A**(5/6) : 997-1 008.
- ⁸ AGRESTE [2000]. *La forêt et les industries du bois 2000*. Collection GraphAgri du service central des enquêtes et études statistiques, 157 p.
- ⁹ COLLINS W.J., STEVENSON D.S., JOHNSON C.E., DERWENT R.G. [2000]. The European regional ozone distribution and its links with the global scale for the years 1992 and 2015. *Atmospheric Environment (Western Europe)* **34** : 255-267.
- ¹⁰ KATO S., POCHANART P., KAJII Y. [2001]. Measurements of ozone and nonmethane hydrocarbons at the Chichi-jima island, a remote island in the western Pacific : long-range transport of polluted air from the Pacific rim region. *Atmospheric Environment, Australasia* **35** : 6 021-6 029.
- ¹¹ POCHANART P., AKIMOTO H. [2003]. Regional background ozone and carbon monoxide variations in remote Siberia/East Asia. *Journal of Geophysical Research* **108**(D1) : 4028, doi :10.1029/2001JD001412.
- ¹² BOJKOV R.D. [1988]. *Ozone changes at the surface and in the free troposphere*. In *Troposhe-*

- ric ozone. Ed. Isaksen I.S.A.. D. rediel, Dordrecht : 83-96.
- ¹³ PENKETT S.A. [1988]. *Indications and cause of ozone increase in the troposphere*. In *The Changing Atmosphere*. Ed. : Roawland F.C. et Isaksen I.S.A., John Wiley, New York : 38-48.
- ¹⁴ SMIDT S., GRABLER K. [1994]. Entwicklung von SO₂-, NO₂- und Ozone-Jahresmittelwerten in Österreich. *Centralblatt für das Gesamte Forstwesen* 3 : 183-196.
- ¹⁵ ADEME [2003]. *Atlas de la surveillance de la qualité de l'air en France au 30 septembre 2002. Données et références*. Édition ADEME, 78 p.
- ¹⁶ VOLZ A., KLEY D. [1988]. Evaluation of the Montsouris series of ozone measurements made in the nineteenth century. *Nature* 332 : 240-242.
- ¹⁷ LÜTTGE U., KLUGE M., BAUER G. [1996]. *Botanique*. Lavoisier Tec et Doc, 588 p.
- ¹⁸ GÜNTHARDT-GOERG M.S. [1996]. Different Responses to Ozone of Tobacco, Poplar, Birch, and Alder. *Journal of Plant Physiology* 148 : 207-214.
- ¹⁹ GÜNTHARDT-GOERG M.S., MCQUATTIE C.J., MAURER S., FREY B. [2000]. Visible and microscopic injury in leaves of five deciduous tree species related to current critical ozone levels. *Environmental Pollution* 109 : 489-500.
- ²⁰ INNES J.L., SKELLY J.M., SCHAUB M. [2001]. *Ozone and broadleaved species - a guide to the identification of ozone-induced foliar injury*. Editeurs : Haupt, WSL, 136 p.
- ²¹ NOVAK K., SKELLY J.M., SCHAUB M., KRÄUCHI N., HUG C., LANDOLT W., BLEULER P. [2003]. Ozone air pollution and foliar injury development on native plants in Switzerland. *Environmental Pollution* 125 : 41-52.
- ²² SANZ SÁNCHEZ M., SÁNCHEZ PENA G., CALATAYUD LORENTE V., MINAYA GALLEGO M.T., CERVERO ALBERT J. [2001]. *La contaminación Atmosférica en los bosques : guía para la identificación de danos visibles causados por ozono*. Ministerio de medio ambiente, Organismo Autonomo de Parques Nacionales, 163 p.
- ²³ SKELLY J.M., DAVIS D.D., MERRIL W., CAMERON E.A., The Pennsylvania State University, BROWN H.D., DRUMMOND D.B., DOCHINGER L.S. [1987]. *Diagnosing injury to Eastern forest trees*. PennState, College of Agricultural Sciences, 122 p.
- ²⁴ UTRIAINEN J., HOLOPAINEN T., IZUTA T. [2002]. European perspectives on ozone stress of Northern conifers. *Environmental Sciences* 9(5) : 369-392.
- ²⁵ VOLLENWEIDER P., OTTIGER M., GÜNTHARDT-GOERG M.S. [2003]. Validation of leaf ozone symptoms in natural vegetation using microscopical methods. *Environmental Pollution* 124(1) : 101-118.
- ²⁶ BRAUN S., FLÜCKIGER W. [1995]. Effects of ambient ozone on seedlings of *Fagus sylvatica* L., and *Picea abies* (L.) KARST. *New Phytol.* 129 : 33-44.
- ²⁷ GÜNTHARDT-GOERG M.S., MAURER S., BOLLIGER J., CLARK A.J., LANDOLT W., BUCHER J.B. [1999]. Responses of young trees (five species in chamber exposure) to near-ambient ozone concentrations. *Water, Air and Soil Pollution* 116 : 323-332.
- ²⁸ KOLB T.E., MATYSSEK R. [2001]. Limitations and perspectives about scaling ozone impacts in trees. *Environmental Pollution* 115 : 373-393.
- ²⁹ UTRIAINEN J., HOLOPAINEN T. [2001]. Influence of nitrogen and phosphorus availability and ozone stress on Norway spruce seedlings. *Tree physiology* 21 : 447-456.
- ³⁰ VOLLENWEIDER P., KELTY M.J., HOFER R.-M., WOODCOCK H. [2003]. Reduction of stem growth and site dependency of leaf injury in Massachusetts black cherries exhibiting ozone symptoms. *Environmental Pollution* 125 : 467-480 (available online www.elsevier.com/locate/envpol).
- ³¹ BENTON J., FUHRER J., GIMENO B.S., SKÄRBY L., PALMER-BROWN D., BALL G., ROADKNIGHT C., MILLS G. [2000]. An international cooperative programme indicates the

- widespread occurrence of ozone injury on crops. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **78** : 19-30.
- ³² FUHRER J., EGGER A., LEHNHERR B., GRANDJEAN A., TSCHANNEN W. [1989]. Effects of ozone on the yield of spring wheat (*Triticum aestivum* L., cv. *Albis*) grown in open-top field chambers. *Environmental Pollution* **60** : 273-289.
- ³³ HEAGLE A.S. [1989]. Ozone and crops. *Annu. Rev. Phytopathol.* **27** : 397-423.
- ³⁴ KÖLLNER B., KRAUSE G.H.M. [2000]. Changes in carbohydrates, leaf pigments and yield in potatoes induced by different ozone exposure regimes. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **78** : 149-158.
- ³⁵ LEHNHERR B., GRANDJEAN A., MÄCHLER F., FUHRER J. [1987]. The effects of ozone in ambient air on ribulosebiphosphate carboxylase/oxygenase activity decreases photosynthesis and grain yield in wheat. *Journal of Plant Physiology* **130** : 189-200.
- ³⁶ MEYER U., KÖLLNER B., WILLENBRINK J., KRAUSE G.H.M. [2000]. Effects of different ozone exposure regimes on photosynthesis, assimilates and thousand grain weight in spring wheat. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **78** : 49-55.
- ³⁷ MILLER J.E., HEAGLE A.S., VOZZO S.F., PHILBECK R.B., HECK W.W. [1989]. Effects of ozone and water stress, seperately and in combination, on soybean yield. *Journal of Environmental Quality* **18**(3) : 330-336.
- ³⁸ MILLS G., BALL G., HAYES F., FUHRER J., SKÄRBY L., GIMENO B., DE TEMMERMAN L., HEAGLE A., members of the ICP Vegetation programme [2000]. Development of a multi-factor model for predicting the effects of ambient ozone on the biomass of white clover. *Environmental Pollution* **109** : 533-542.
- ³⁹ SANDERMANN H.J., ERNST D., HELLER W., LANGEBAEELS C. [1998]. Ozone : an abiotic elicitor of plant defence reactions. *Trends in Plant Science - Reviews* **3** : 47-50.
- ⁴⁰ ENDERS G., TEICHMANN U. [1989]. Ozonprofil über einem Fichtenbestand im Nationalpark « Bayrischer Wald ». *Forstwissenschaftliches Centralblatt* **108** : 197-203.
- ⁴¹ GASCH J., KRAPPENBAUER A. [1990]. Beiträge zur Ozondynamik in Waldbeständen. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* **161**(10/11) : 198-204.
- ⁴² GASCH J., KRAPPENBAUER A. [1991]. Vertikale Verteilung von Ozone in Waldbeständen. *Centralblatt für das Gesamte Forstwesen* **108** : 93-106.
- ⁴³ ULRICH E., ELICHEGARAY C., TARGET A., FIEGEL G., KLEINPETER J. [1993]. Quelques considérations sur la composition de l'air dans les Vosges ; les mesures réalisées à la « Tour du Donon ». *Revue Forestière Française* **45**(6) : 621-638.
- ⁴⁴ Département de la santé des Forêts [2002]. *Les Cahiers du DSF, 1-2002 (La Santé des Forêts [France] en 2000 et 2001)*. Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation, de la Pêche et des Affaires Rurales (DERF), Paris, 132 p. + annexes.

Cet article est paru précédemment dans le numéro 9 des Rendez-Vous techniques. Il est reproduit ici avec l'aimable autorisation de la rédaction.

ERWIN ULRICH

ONF, Direction technique,
Département recherche,
Réseau Renécofor
erwin.ulrich@onf.fr