

*Photo 1 : deux bâtiments de l'Observatoire de Haute Provence abritent les instruments de la station Géophysique : dans le bâtiment principal sont installés les lidars (trappes et cimier de coupole ouverts), dans le petit bâtiment voisin est installé le spectrophotomètre Dobson. Au fond la coupole abritant le télescope de 152 cm.*

# LA SURVEILLANCE DE L'ATMOSPHÈRE À L'OBSERVATOIRE DE HAUTE-PROVENCE

Claude VIALLE\*

## RÉSUMÉ

Après une présentation sommaire de l'histoire des installations de surveillance de l'atmosphère à Saint-Michel l'Observatoire dans le cadre des réseaux internationaux, l'auteur rappelle la place importante, le processus de formation et l'évolution des masses d'ozone dans l'atmosphère. Sont ensuite présentés les outils de mesure mis en œuvre dans le cadre du suivi de ces évolutions, notamment à l'Observatoire de Haute-Provence, ainsi que l'état d'avancement de la modélisation en cours de la dynamique de l'ozone atmosphérique. L'auteur conclut par quelques exemples de résultats issus des travaux conduits à l'Observatoire de Haute-Provence.

## ABSTRACT

### ***The monitoring of the atmosphere in the Haute-Provence Observatory.***

*Following a brief description of the successive atmosphere surveillance infrastructures based in St-Michel l'Observatoire within the scope of the international networks, the author recalls the important place, formation process and evolution of ozone masses within the atmosphere. Follows a presentation of the measuring tools set up for the follow-up of these evolutions, notably at the Haute-Provence Observatory, as well as the state of advancement of the stratospheric ozone dynamics modeling. The author concludes by a few examples stemming from the works carried out at the Haute-Provence Observatory.*

## LA STATION GÉOPHYSIQUE

Sous l'impulsion du professeur Jacques Blamont et du service d'aéronomie du CNRS, les recherches sur l'atmosphère ont démarré dans les années 1970 à l'Observatoire de Haute-Provence (OHP). Des mesures régulières ont été réalisées avec de nouveaux instruments dans les années 1980 contribuant ainsi à l'amélioration de nos connaissances de la stratosphère. La constitution de plus longues séries de ce type a permis de montrer l'intérêt de mesures régulières depuis le sol. En 1991, la communauté scientifique internationale, sous l'impulsion du professeur Gérard Mégie, décide la création d'un réseau mondial (Network for detection of stratospheric change) conçu à partir de plusieurs stations primaires semblables à celle de l'OHP et d'un certain nombre de stations secondaires moins bien équipées mais complétant l'extension spatiale de ce réseau. Les services d'observation de l'Institut Pierre-Simon Laplace assurent la coordination scientifique des opérations françaises à l'OHP mais également celles de la station antarctique de Dumont d'Urville, celles de la station de La Réunion et celles de plusieurs stations secondaires. La problématique de la dynamique et de la chimie de l'atmosphère se posant à l'échelle planétaire, toutes ces stations opèrent dans le cadre d'un réseau international.

---

\* CNRS, Institut Pierre-Simon Laplace - Sciences de l'environnement.

## LE RÉSEAU NDSC

Le réseau international « Network for the detection of stratospheric change » (NDSC) ou « Réseau de détection des changements de la stratosphère » a été officiellement mis en place en janvier 1991. Depuis, il n'a cessé de se développer de par le monde, et regroupe aujourd'hui un ensemble de stations d'observation de l'atmosphère à partir du sol. Celles-ci effectuent des mesures de grande qualité pour l'observation et la compréhension des états physiques et chimiques de la stratosphère.

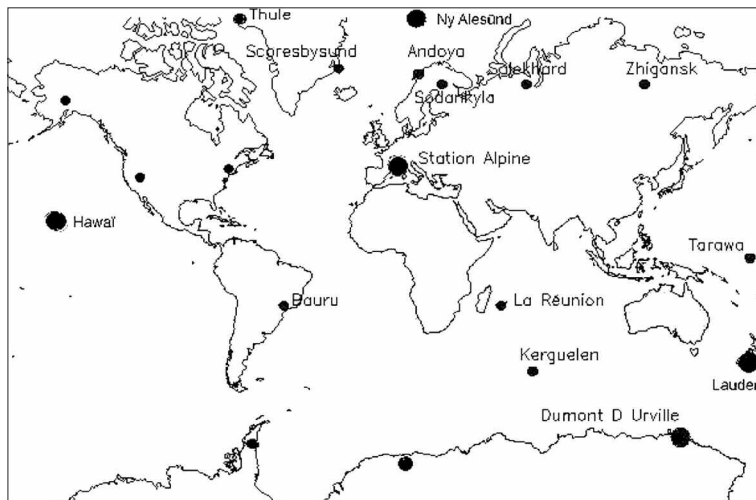
Le réseau NDSC est la composante principale de l'effort international de recherche sur l'atmosphère, c'est pourquoi il est placé sous l'égide d'agences scientifiques internationales dont la Commission internationale de l'ozone (IOC), le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE), et l'Organisation météorologique mondiale (WMO). Il a pour tâche de mesurer, dans la moyenne atmosphère, les concentrations d'ozone et d'espèces chimiques clés, jouant un rôle dans la chimie de l'ozone ainsi que divers paramètres physiques concernant la dynamique de l'atmosphère.

Le réseau NDSC utilise différents instruments de précision qui permettent de sonder l'atmosphère terrestre. Citons les lidars, les spectrographes ultraviolets et infrarouges ou encore les radiomètres micro-ondes. Ces instruments sont répartis sur l'ensemble du globe dans un grand nombre de stations indiquées sur la carte, formant ainsi un réseau de surveillance dense et efficace.

## LA SURVEILLANCE DE L'OZONE

### L'ozone

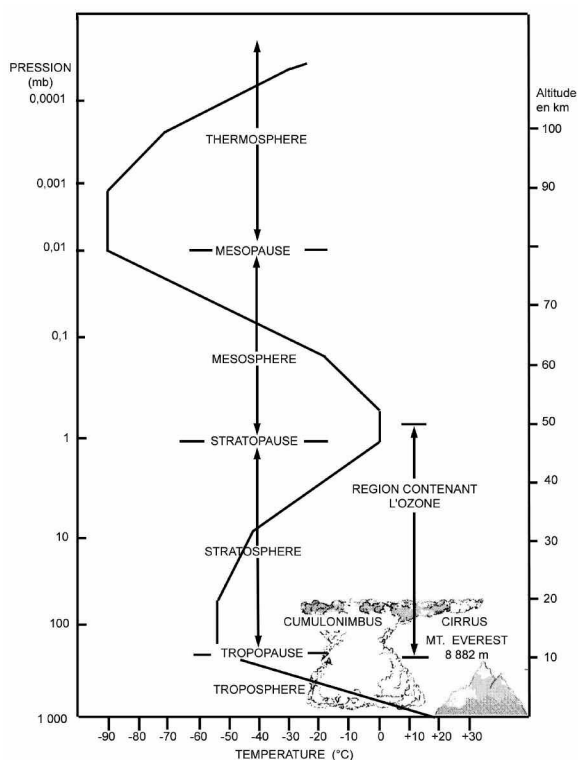
L'ozone, molécule composée de trois atomes d'oxygène ( $O_3$ ), joue dans les équilibres de l'environnement terrestre un rôle fondamental. 90 % de l'ozone atmosphérique est contenu dans le domaine des altitudes comprises entre 20 et 50 km. Il constitue ainsi une « couche » qui est l'unique absorbant du rayonnement



Carte des principales stations du réseau mondial NDSC, les stations primaires sont représentées par les plus grands cercles. La station de l'Observatoire de Haute-Provence, l'une des plus anciennes de ce type, est la base de la Station Alpine.

solaire ultraviolet entre le sol et 80 km d'altitude. Cette absorption permet le maintien de la vie animale et végétale à la surface de la Terre. Cette « couche » représente une quantité d'ozone extrêmement faible puisque, ramenée aux conditions normales de température et de pression qui règnent à la surface terrestre, elle ne représente en moyenne que 3 millimètres d'épaisseur. La répartition de l'ozone est toutefois loin d'être uniforme dans le temps comme dans l'espace.

L'équilibre de l'ozone dans l'atmosphère terrestre, résulte d'un grand nombre d'interactions chimiques mettant en jeu, outre le rayonnement solaire, de nombreux constituants minoritaires de l'atmosphère représentant, pour certains, moins d'un milliardième en volume (ppbv soit  $10^{-9}$ ) de la concentration totale. Ils sont émis dans l'atmosphère par des processus physiques ou biologiques, et diffusent vers les altitudes supérieures, conséquence du brassage permanent horizontal et vertical des masses d'air. Tout constituant, même de masse supérieure à la masse molaire moyenne du gaz atmosphérique, diffuse depuis la surface de la Terre vers les altitudes supérieures et parvient ainsi en 7 à 10 ans dans la stratosphère. Sous l'influence du rayonnement solaire, de plus en plus intense au fur et à mesure que l'altitude augmente, se produisent alors des interactions.



Structure de l'atmosphère.

La courbe représente la variation de température en fonction de l'altitude.

Jusqu'au début du XX<sup>e</sup> siècle, cette évolution de la composition chimique, que les archives glaciaires et sédimentaires permettent de relier aux grandes oscillations climatiques, trouve son origine dans des phénomènes naturels. Aujourd'hui, par une brusque accélération du progrès technologique, l'emprise de l'homme sur la nature a changé d'échelle. L'explosion démographique, le développement des activités industrielles et agricoles, la multiplication des moyens de transport ont entraîné au cours des cinquante dernières années un changement profond de notre environnement, traduit notamment par une modification de la composition chimique de l'atmosphère. Elle concerne principalement la concentration de constituants essentiels au maintien de la vie sur la Terre et dont l'abondance cumulée ne dépasse pourtant pas un pour mille du total des composants du gaz atmosphérique. Les concentrations de ces constituants augmentent à des rythmes annuels très rapides à l'échelle habituelle des temps caractéristiques des évolutions clima-

tiques 0,4 % par an pour le dioxyde de carbone CO<sub>2</sub>, 0,8 % par an pour le méthane CH<sub>4</sub>, 0,4 % par an pour les oxydes d'azote, 5 à 6 % par an pour les composés organo-halogénés. Dans moins de cent ans, leur contenu atmosphérique aura, au rythme actuel, plus que doublé. Les constituants-sources évoqués ci-dessus, peuvent être considérés comme des constituants primaires, dont la décomposition à différentes altitudes sous l'influence du rayonnement solaire, va conduire à la modification de l'équilibre d'autres constituants, dont l'ozone est probablement le plus connu et le plus largement étudié, du fait de ses propriétés oxydantes et de son rôle primordial en tant qu'absorbant du rayonnement solaire.

Dès le début des années 1970, des inquiétudes ont ainsi été exprimées par la communauté scientifique concernant le fait que l'augmentation des émissions anthropiques de composés chlorés, les chlorofluorocarbures (CFC), pouvait conduire à la destruction partielle de la couche d'ozone stratosphérique. En effet, les CFC, utilisés largement depuis les années 1950 dans l'industrie du froid, des aérosols et des mousses synthétiques, ont une très grande stabilité chimique dans la basse atmosphère, ce qui assure leur transfert à un terme de 7 à 10 ans vers la stratosphère. Là, sous l'influence d'un rayonnement solaire beaucoup plus intense qu'au niveau du sol, en particulier dans le domaine des courtes longueurs d'onde, ils se photodissocient et libèrent ainsi du chlore chimiquement actif susceptible de détruire l'ozone stratosphérique. Les diminutions prédites restent toutefois de l'ordre de quelques pourcent et leur mise en évidence est donc difficile du fait de la très grande variabilité naturelle déjà évoquée de la couche d'ozone.

Les résultats scientifiques les plus récents marquent cependant une avancée notable dans notre connaissance quantitative des processus chimiques, dynamiques et radiatifs qui régissent le comportement des constituants-traces de l'atmosphère de la Terre. Les premières évidences expérimentales d'une diminution de l'ozone dans la stratosphère à l'échelle de la Terre entière, sont autant d'indications de ces perturbations anthropiques. Elles contribuent ainsi à fonder les craintes exprimées depuis une vingtaine d'années d'une atteinte directe de l'homme à l'équilibre de l'ozone dans la stratosphère.

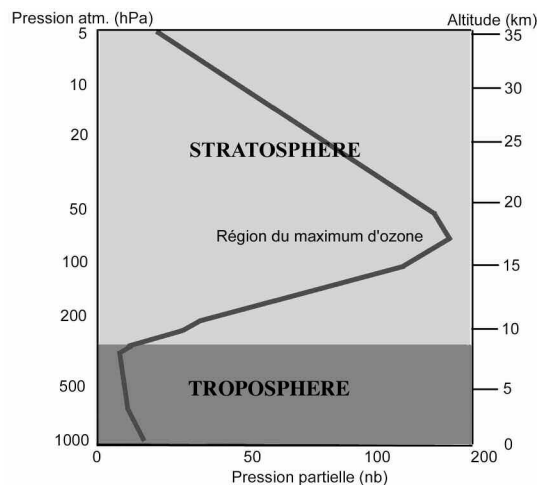
## Les mécanismes physico-chimiques

La répartition verticale de l'ozone dans l'atmosphère se caractérise par un maximum de concentration situé entre 25 et 30 km d'altitude, cette concentration relative en volume pouvant être plus de 100 fois supérieure à celle observée dans la troposphère. À la différence d'autres constituants atmosphériques comme l'azote, l'oxygène moléculaire ou le gaz carbonique, l'ozone ne présente donc pas un profil vertical caractérisé, en termes de concentration absolue, par une abondance maximum au niveau du sol et une décroissance exponentielle avec l'altitude. Ceci traduit l'existence d'une source située dans la haute atmosphère, et non à la surface de la Terre.

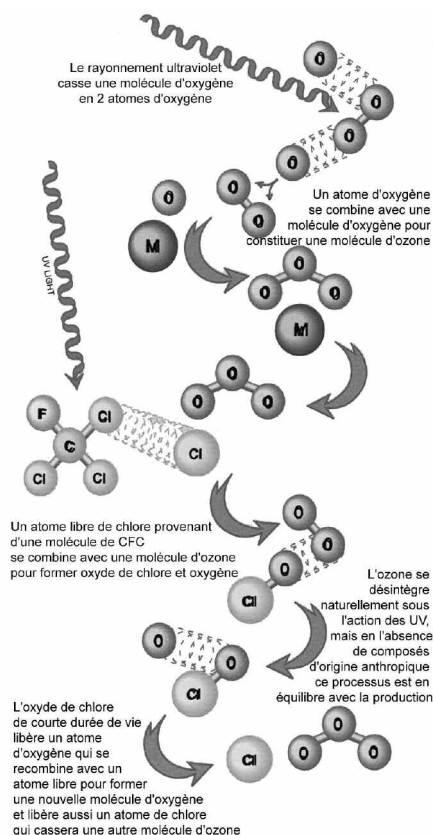
Dans la stratosphère, aux altitudes supérieures à 30 km, les atomes d'oxygène nécessaires à la formation de l'ozone sont produits par la photodissociation de l'oxygène moléculaire sous l'action des photons du rayonnement solaire de longueurs d'onde inférieures à 240 nm. L'ozone ainsi formé est à son tour photodissocié dans toute la stratosphère par le rayonnement solaire ultraviolet et visible.

Les deux réactions sont particulièrement rapides et conduisent de fait à un équilibre, le bilan net du cycle correspondant à ces deux réactions est nul chimiquement. Il ne l'est pas en revanche en ce qui concerne le dépôt d'énergie dans l'atmosphère. En effet, l'énergie solaire radiative absorbée par l'ozone est transformée en énergie cinétique lors du processus de recombinaison et conduit ainsi à une élévation de température. Ceci explique le gradient positif de température observé dans la stratosphère.

La destruction des oxygènes impairs a été tout d'abord attribuée à la réaction de recombinaison. Mais cette réaction est trop lente et n'explique en fait que 20 % de la perte des oxygènes impairs dans la stratosphère. Les concentrations observées d'ozone résultent alors d'autres processus de destruction qui font intervenir les constituants azotés ( $\text{NO}_x$ ), hydrogénés ( $\text{HO}_x$ ) et chlorés ( $\text{ClO}_x$ ) par l'intermédiaire de **cycles catalytiques**. Le bilan de ces cycles, dans lesquels le constituant qui attaque l'ozone est régénéré en fin de chaîne, est équivalent à la destruction simultanée d'un atome d'oxygène O et d'une molécule d'ozone  $\text{O}_3$ . La longueur des chaînes catalytiques est égale au nombre de



*Courbe de répartition moyenne montrant que l'ozone est essentiellement présent dans la stratosphère entre 12 et 25 km.*



*Mécanisme du cycle catalytique ClO.*

fois où un tel cycle peut se produire et peut atteindre plusieurs milliers. L'on comprend alors aisément que des constituants dont l'abondance relative se chiffre en milliardièmes puissent contrôler chimiquement l'équilibre de l'ozone, dont l'abondance relative est pourtant supérieure d'un facteur mille. Ainsi les composés nitrés, monoxyde ou dioxyde d'azote, sont responsables de 70 % de la destruction naturelle de l'ozone entre 25 et 45 km d'altitude, les composés hydrogénés, radical hydroxyle OH et perhydroxyle HO<sub>2</sub>, devenant prépondérants aux altitudes supérieures. Quant aux composés chlorés ClO<sub>x</sub>, chlore atomique Cl et monoxyde de chlore ClO, ils sont d'ores et déjà responsables pour 15 % de cette destruction entre 30 et 40 km.

L'origine des constituants HO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, ClO<sub>x</sub> est directement liée à l'émission dans l'atmosphère, au niveau du sol, de constituants comme le méthane CH<sub>4</sub>, l'oxyde nitreux N<sub>2</sub>O et les composés organohalogénés, parmi lesquels les chlorofluorocarbures (CFC). Ceux-ci constituent la principale source de chlore pour la stratosphère, bien que leur émission annuelle, de l'ordre de 1 million de tonnes (1 MT, pour mégatonne), reste très inférieure aux émissions naturelles de chlore inorganique à la surface de la Terre. En effet, les océans émettent annuellement environ 250 MT de chlore sous forme de chlorure de sodium ou d'acide chlorhydrique et les panaches des volcans émettent continûment, en dehors des éruptions intenses, 10 MT de chlore sous forme également d'acide chlorhydrique. Mais ces émissions naturelles de chlore inorganique se font sous la forme de constituants solubles dans l'eau. Leur temps de résidence ne dépasse pas 8 à 10 jours dans la basse atmosphère, empêchant ainsi leur diffusion en quantité appréciable vers la stratosphère. La seule source naturelle de chlore pour la stratosphère reste alors le chlorure de méthyle CH<sub>3</sub>Cl, produit dans les océans par les micro-organismes, dont la concentration relative ne dépasse pas 0,6 ppb. Les émissions de CFC, principalement sous forme de trichlorofluorométhane CFCl<sub>3</sub>, de dichlorodifluorométhane CF<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>, et d'autres constituants chlorés comme le tétrachlorure de carbone CCl<sub>4</sub> et le trichloroéthane CH<sub>3</sub>CCl<sub>3</sub>, ont ainsi conduit à une augmentation du contenu total moyen en chlore de la stratosphère de 0,6 ppb dans les années 1950 à 3,8 ppb en 1993.

## L'ozone troposphérique

À nos latitudes, dans la partie plus basse de l'atmosphère, c'est-à-dire la troposphère libre, la teneur moyenne en ozone à l'écart des régions de forte pollution, a plus que doublé depuis le début du siècle, et croît d'environ un quart tous les dix ans. Dans les zones polluées, cette teneur dépasse fréquemment les normes recommandées, et les épisodes de pollution se multiplient dans les grandes agglomérations, en particulier en été. Ils atteignent aussi des zones plus éloignées des sources de pollution, en particulier en altitude. En Provence, les régions sommitales des massifs de la Sainte-Baume et du Luberon sont notamment touchées. Cette augmentation des concentrations d'ozone résulte de processus chimiques complexes qui mettent en jeu constituants précurseurs (oxydes d'azote et composés organiques volatils) et rayonnement solaire.

La formation photochimique d'ozone dans la troposphère est fortement dépendante des conditions locales, et en particulier de l'intensité et de la nature des émissions des gaz précurseurs. Il importe donc, dans un premier temps, d'établir un bilan quantitatif des sources d'émissions de ces différents constituants, afin de mettre en évidence l'importance de la composante anthropique. Ceci conduit alors à distinguer en termes de mécanismes photochimiques, les régions de forte dilution ou troposphère libre et les régions polluées, caractérisées par des concentrations élevées des gaz précurseurs. Les enjeux pour l'environnement de l'augmentation de l'ozone troposphérique et des constituants photo-oxydants sont particulièrement importants. Oxydant puissant, l'ozone constitue un danger pour la santé des populations lorsque les teneurs relatives dépassent des seuils de l'ordre de 100 à 120 ppb. Cet effet oxydant est également néfaste pour la croissance des végétaux, et constitue une cause supplémentaire du dépérissement des forêts et de la dégradation des matériaux. Par ailleurs, l'ozone est un gaz à effet de serre, 1 200 fois plus actif que le gaz carbonique. L'augmentation de sa concentration dans la troposphère peut donc conduire, à l'échéance de quelques décennies, à une contribution importante au réchauffement global de la planète. Le problème de l'ozone troposphérique est ainsi étroitement lié au pro-

blème climatique. Il constitue en fait l'essentiel du couplage entre le climat et la chimie de l'atmosphère.

Les différents précurseurs de l'ozone troposphérique (méthane, monoxyde de carbone, composés organiques volatils et oxydes d'azote) ont des sources d'émission à la fois naturelles et anthropiques, directes ou indirectes.

- **Le méthane** est essentiellement produit par la décomposition bactérienne de la matière organique dans des conditions anaérobies: surfaces inondées ou inondables, ruminants, couverts de déchets. Les autres sources importantes sont les pertes et dégazages des installations charbonnières, pétrolières et gazières, et la combustion de la biomasse. On estime à environ 530 MT par an la source actuelle globale de méthane, dont près des 2/3 sont liés aux activités humaines, principalement agricoles<sup>1</sup>.

- **Le monoxyde de carbone** provient principalement de la combustion incomplète des matières organiques et des combustibles fossiles (hydrocarbures, charbon, bois), et de l'oxydation du méthane et des hydrocarbures présents dans l'air. On estime à 2 650 MT par an la source actuelle globale de monoxyde de carbone, dont 62 % sont liés à l'activité humaine. La plus grande part des sources directes se situe dans l'hémisphère nord et les régions tropicales.

- **Les composés organiques volatils (COV)** ont des sources très diverses. Ce terme désigne des constituants à tension de vapeur et à réactivité chimique suffisamment élevées pour pouvoir participer à des réactions chimiques. Cette dénomination regroupe ainsi les hydrocarbures (alcanes, alcènes, alcynes, aromatiques) et certains composés oxygénés. On estime à environ 1 050 MT par an la source actuelle globale des COV, dont 10 % sont liés aux activités humaines. Les sources naturelles sont donc particulièrement importantes, et correspondent

principalement aux émissions d'isoprène et de terpènes par la végétation. Leur estimation reste encore imprécise et peut varier d'un facteur 2 selon les auteurs. En ce qui concerne les émissions anthropiques, on constate, à partir des données d'inventaires disponibles, que dans la plupart des pays européens, elles se répartissent approximativement de la façon suivante: 40 % proviennent de l'utilisation des solvants, 40 % des transports, en particulier du transport routier, et 20 % de sources diverses (combustion, agriculture...). À l'échelle globale, les émissions anthropiques de COV sont estimées à environ 110 MT par an.

- **Les oxydes d'azote** ont également des sources d'émission multiples. Pour l'ensemble du globe, les émissions dues à la combustion des combustibles fossiles étaient estimées pour l'année 1983 à  $21 \pm 8$  MT par an. Elles ont augmenté de 2 à 21 MT par an entre 1900 et 1983. Dix ans plus tard, les émissions totales des oxydes d'azote ont été estimées à 47 MT par an, dont plus de 75 % sont d'origine anthropique. La majeure partie de ces émissions a lieu dans l'hémisphère nord par pollution, et dans les régions tropicales par brûlage de la biomasse.

En conclusion, les valeurs relatives des sources anthropiques et naturelles des différents précurseurs de l'ozone sont résumées dans le tableau ci-après. Il importe également de prendre en compte la grande hétérogénéité spatiale de ces différentes sources d'émission, qui se reflète directement dans les mécanismes de production de l'ozone troposphérique et conduit à la distinction déjà mise en évidence entre troposphère libre et régions polluées.

	Source naturelle (MT par an)	Source anthropique (MT par an)	Intensité relative de la source anthropique
Méthane	185 (135-200)	350 (210-540)	65 %
Monoxyde de carbone	1 010 (530-1920)	1 650 (1040-3250)	62 %
COV	950 (860-1010)	100 (80-150)	9,5 %
Oxydes d'azote	11 (3-19)	36 (20-50)	76 %

Tableau des intensités absolues et relatives des sources naturelles et anthropiques des précurseurs de l'ozone. (Source: Académie des Sciences, 1993).

1. Les données chiffrées citées ici sont le résultat d'un travail collectif qui a conduit au rapport n° 30 de l'Académie des Sciences.

## LES INSTRUMENTS

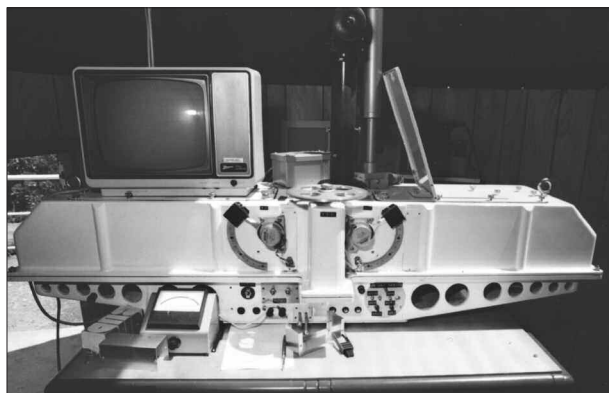
Les résultats portant sur l'évolution des paramètres atmosphériques n'ont pu être obtenus que grâce à des séries de mesures suffisamment longues obtenues par des instruments mis en place dans le cadre de réseaux déployés à l'échelle du globe. Pour la station géophysique de l'OHP ces séries de mesures s'étendent maintenant sur presque deux décennies et sur au moins une décennie pour certaines stations polaires ou complémentaires. Rappelons qu'à Saint-Michel-l'Observatoire ont été mises en place les mesures portant sur les paramètres suivants.

### **Le contenu intégré d'ozone mesuré par spectrophotomètre « Dobson »**

La quantité totale d'ozone présent dans l'atmosphère au-dessus du point de mesure peut être calculée à partir d'une mesure de l'absorption de certaines raies solaires. Un appareil de ce type a été installé en 1983 à l'Observatoire de Haute-Provence et opère également dans le cadre du sous-réseau « Dobson automatisés ». En France, un autre instrument de ce type a fonctionné de 1976 à 1983 à la station du Centre d'essais des Landes, à Biscarosse, avant d'être installé depuis 1985 à l'Observatoire de Bordeaux. Les instruments de ce type ont été les premiers mis en service pour une mesure fiable de l'ozone. Bien que de technologie ancienne, il en subsiste un certain nombre en services afin de permettre un « raccordement » des mesures avec celles effectuées par des appareils plus récents.

### **Le contenu intégré d'ozone et de dioxyde d'azote mesuré par le spectromètre « SAOZ »**

Les spectromètres du type « SAOZ » utilisent un réseau holographique et une barrette de photodiodes associée à un micro-ordinateur qui effectue une analyse spectrale en temps réel. Ce sont des appareils très performants lorsque le soleil n'est pas très haut sur l'horizon et ils ont donc été tout d'abord installés dans les régions polaires. À l'OHP un instrument de ce type fonctionne continûment depuis 1992. Il présente l'avantage d'être entièrement automatique donc de fournir aisément de longues séries de mesures.



*Dobson : Spectrophotomètre « Dobson » utilisé pour déterminer la quantité totale d'ozone présent dans l'atmosphère au-dessus du point de mesure.*

### **Les profils verticaux de température et d'aérosols mesurés par lidar**

Les premières mesures de température par lidar à l'OHP datent de 1978 mais c'est seulement en 1981 qu'un système spécifique a été construit. Cet instrument utilise la transposition directe aux longueurs d'onde optique du principe du Radar. Plusieurs paramètres de nature géophysique peuvent alors être restitués : densité moléculaire, température et concentration de certains constituants. On peut également observer l'injection d'aérosols dans la stratosphère à la suite d'éruptions volcaniques telles que celles des volcans du Mont Saint-Helens (N-W des USA), d'El Chichon (Mexique) et du Mont Pinatubo (Philippines).

### **Le profil vertical d'ozone stratosphérique mesuré par le lidar DIAL**

Cette technique, dérivée de la précédente, est maintenant largement utilisée pour l'obtention de profils verticaux d'ozone. Elle nécessite l'émission de deux faisceaux laser dont l'un utilise une longueur d'onde à laquelle l'absorption par l'ozone est forte. Les premières mesures d'ozone par lidar en France datent de 1977 et utilisaient des lasers à colorant. Depuis, des mesures systématiques sont obtenues à l'OHP avec une cadence grandissante et la qualité des mesures s'est considérablement améliorée.



## Les profils verticaux d'ozone et de température mesurés par sondages ballon

Des sondages d'ozone réguliers (une fois par semaine) à partir de sondes embarquées sous ballons météorologiques sont réalisés à l'Observatoire de Haute-Provence depuis 1984 avec un changement du type de sonde en 1991. Ces sondes utilisent un principe électrochimique et ont été mises au point pour les organismes météorologiques.

## Le profil vertical de vent horizontal mesuré avec le lidar Doppler

Les mesures de vent stratosphérique réalisées en France depuis 1988 reposent sur la détection du décalage Doppler induit par le déplacement moyen des molécules. L'émission laser est dirigée suivant un angle de 45° avec la verticale dans deux directions perpendiculaires pour être sensible aux composantes nord-sud et est-ouest du vent horizontal.

À côté de ce type de mesures répétées sur de longues périodes ayant pour objectif la connaissance de l'évolution des paramètres atmosphériques au cours du temps (évolutions désignées sous le terme de « tendances »), les scientifiques mettent en œuvre sur de courtes périodes et de manière intensive des mesures nettement plus nombreuses avec pour objectifs de mieux comprendre les mécanismes physico-chimiques qui gouvernent les comportements de l'atmosphère (travaux désignés sous le terme de « campagne »). Une importante campagne de ce type a été effectuée récemment en Provence.

## LA CAMPAGNE ESCOMPTE

### (Expérience sur Site pour CONtraindre les Modèles de Pollution atmosphérique et de Transport d'Émissions)

La pollution atmosphérique constitue une menace pour la santé de l'homme et pour l'environnement. La loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie du 30 décembre 1996 a permis de renforcer de manière très importante le dispositif de surveillance et d'évaluation de la qualité de l'air en France et toutes les grandes agglomérations sont dotées de sites de mesure. Elle a aussi permis de renforcer les obligations réglementaires en vue de diminuer les émissions polluantes liées à l'usage de l'automobile ou aux sources fixes.



*L'ARAT (Avion de Recherches Atmosphériques) prend son envol en direction de la vallée de la Durance où il va effectuer des mesures. Cet avion possède une instrumentation très complète, particulièrement en ce qui concerne les constituants chimiques gazeux, dont l'ozone et les oxydes d'azote. Cet appareil a fourni pendant douze ans une importante quantité de mesures scientifiques. Il effectue ses derniers vols dans le cadre d'ESCOMPTE.*

Dans un article paru en 2000 dans la présente publication, S. Mathiot et A. Léopold exposaient les objectifs de cette campagne. On peut rappeler qu'elle vise à améliorer ou mettre au point des outils et à développer des moyens permettant de mieux caractériser les phénomènes de pollution en constituant une base de données très détaillée pour contribuer au développement et à la validation des modèles.

Après la phase préparatoire de 2000, la phase d'exécution d'ESCOMPTE s'est traduite par une grande campagne du 5 juin au 16 juillet 2001. La phase d'analyse et de présentation des résultats est prévue à partir de 2002 et s'étendra sur plusieurs années.

Une centaine d'instruments ont été déployés sur une surface au sol de 200 km<sup>2</sup> centrée sur le triangle Aix-Marseille-Berre, utilisant 3 types de moyens :

## DES MOYENS AU SOL

- Cinq radars profileurs de vent UHF (profil entre 100 et 2000 m) ou VHF (profil entre 1 et 10 km) ont été déployés en réseau. Des sodars (sondeurs acoustiques) complétaient ces profils dans les basses couches de l'atmosphère, entre 20 et 500 m.

- Un « Lidar vent transportable » (LVT) a permis l'exploration volumique du vent autour de l'instrument jusqu'à une distance d'une dizaine de kilomètres.

- Des radiosondages ont mesuré les profils de vent, température et humidité jusqu'à une vingtaine de kilomètres d'altitude. Ils ont été réalisés deux fois par jour par les stations opérationnelles de Météo-France de Nîmes et Ajaccio. La station mobile installée à Aix-en-Provence a offert en outre la possibilité de mesurer le profil d'ozone pendant les POI (Période d'observation intensive).

- La surveillance de la qualité de l'air (mesure en continu de l'ozone, des oxydes d'azote, du dioxyde de soufre, du carbone-suie, des acides nitreux et nitriques, des COV, etc...) a été assurée par une vingtaine de stations de mesures chimiques.

## DES MOYENS AÉROPORTÉS

- Trois avions français ont participé à l'expérience, le Merlin IV et le Piper-Aztec de Météo-France mesurant les paramètres météorologiques et les principaux composés chimiques. L'ARAT (Fokker 27 du CNRS-CNES-Météo-France) a effectué des mesures thermodynamiques, radiatives et chimiques.

- Trois aéronefs allemands ont réalisé des mesures de physique et de chimie, le Falcon 20 du DLR qui embarque un Lidar Doppler mesurant le vent en ciel clair, un Dornier 128 et un ULM.

- Une flottille d'une trentaine de petits ballons plafonnants (volant à altitude constante) a été utilisée pendant les POI. Lâchés dans une brise mer-terre apparaissant pendant la journée, ils permettent de connaître en détail la profondeur de pénétration de la brise à l'intérieur des terres et les zones affectées par les panaches provenant de l'agglomération de Marseille et du bassin industriel de Fos-Berre.

## DES MOYENS MARITIMES

- Deux navires, un ferry instrumenté avec des mesures de chimie ainsi qu'un bateau de l'INSU/CNRS embarquant un camion-laboratoire équipé pour les mesures de chimie, font également partie des outils mis en place pour ESCOMPTE.

- Un site sur l'île du Planier située au large de Marseille a été équipé pour la mesure des principaux paramètres météorologiques et composés chimiques.

Par la validation des modèles de pollution urbaine et régionale permettant d'améliorer nos connaissances sur les processus dynamiques et chimiques qui entrent en jeu pendant les périodes de pollution, les scientifiques espèrent ainsi apporter des éléments de réponse aux questions suivantes :

- Quel est le rôle respectif des différents mécanismes dynamiques et chimiques dans l'apparition des épisodes de pollution ?

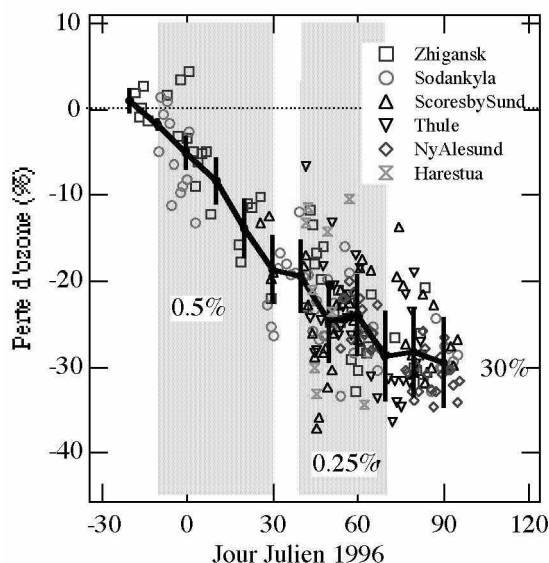
- Comment prendre en compte les émissions urbaines dans les modèles régionaux ou globaux ?

- Peut-on développer une prévision opérationnelle des épisodes de pollution ?

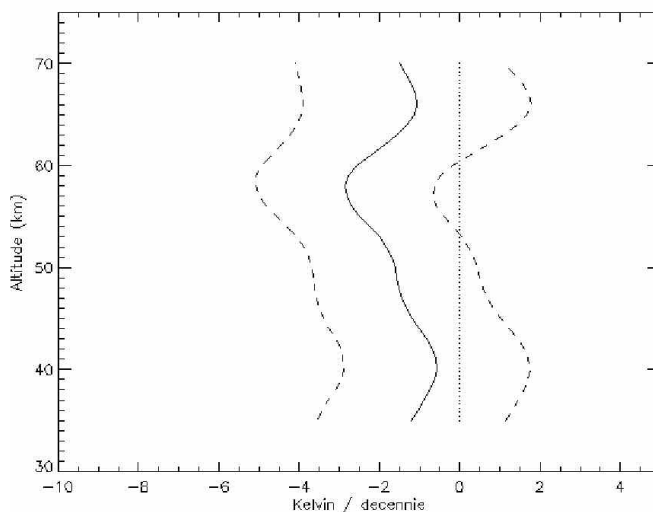
- Quelle stratégie faut-il développer pour réduire les concentrations de photo-oxydants et de particules ?

## EXEMPLES DE RÉSULTATS OBTENUS À L'OBSERVATOIRE DE HAUTE PROVENCE

L'observation de quelques paramètres significatifs susceptibles de varier sous l'effet de forçages anthropiques doit permettre de mieux comprendre les changements de la stratosphère et son rôle sur le climat. Le rôle radiatif et chimique de l'ozone et des aérosols stratosphériques en fait des constituants de première importance pour la stratosphère. La température joue un rôle important puisqu'elle intervient dans les processus radiatifs, chimiques et dynamiques. Les autres paramètres dynamiques importants sont le vent et les mouvements ondulatoires. Les mesures déjà acquises permettent d'espérer les premières échéances pour l'obtention de résultats significatifs d'ici à 3 décennies. Les premières estimations de tendances déjà entreprises sont proches des bornes supérieures des valeurs attendues. Cependant ces résultats doivent être considérés avec prudence, car seulement certaines séries de mesures s'étendent aujourd'hui sur des périodes de 1 à 2 décennies. C'est principalement le cas des séries ozone total par Dobson ou de profils d'ozone et de température par lidar et à partir des sondages ballon à l'OHP. Malgré toute la prudence nécessaire à l'utilisation de ces premières séries, des premières estimations de tendances ont été entreprises. Les variations de la colonne d'ozone dans le sud de la France sont de l'ordre de -5 % par décennie en considérant l'ensemble des données et de -10 % au printemps. Ces valeurs sont un peu plus fortes que d'autres estimations et devront être réactualisées principalement en prenant en compte des discontinuités instrumentales possibles. Entre 25 et 35 km, les mesures par lidar sont en bon accord avec la série de données issues de mesures spectrométriques au sol, notamment à l'OHP, et avec l'analyse des données du satellite SAGE. Elles détectent des changements de l'ordre de -4 à -10 % par décennie. Le profil de température montre des variations de 1 à 3 degrés Kelvin par décennie. Cette variation est à peine supérieure à la variabilité naturelle. Cependant ces résultats sont en assez bon accord avec les autres études et restent légèrement supérieurs aux prévisions issues de modèles numériques actuellement considérés comme pertinents.



Distribution verticale de la pression partielle d'ozone, mesurée par sondage ballon en août et en octobre 1987, à la station de Halley Bay (Antarctique), mettant en évidence la quasi-disparition de l'ozone entre 15 et 20 km d'altitude.



Refroidissement de la moyenne atmosphère (30-70 km) observée à partir des mesures lidar de températures réalisées depuis 1979 à la station géophysique de l'OHP. La tendance est exprimée en degrés par année. Les traits pointillés représentent le niveau d'incertitude à 95 %.

## REMERCIEMENTS

*L'auteur souhaite remercier les opérateurs des différentes stations d'observation et particulièrement ceux de l'OHP, lieu où les séries de mesures sont parmi les plus longues. De même, il souhaite remercier Ph. Keckhut, responsable de la partie française du réseau NDSC pour les judicieux conseils donnés lors de la rédaction de cet article.*

## BIBLIOGRAPHIE

Académie des sciences, 1993, *Ozone et propriétés oxydantes de la troposphère*, Rapport n° 30, Éditions Lavoisier, Paris.

KECKUTH Ph. Dir., 1998, *Détection des changements de la stratosphère*, Rapport quadriennal 1995-1998 du Comité national français de géodésie et de géophysique, CNFGG/Académie des sciences, Paris, pp. 199-218.

LIMA P., 2001, Escompte au cœur de la pollution atmosphérique, *Le journal du CNRS*, n° 141 (septembre 2001), pp. 20-23.

MATHIOT S. & LÉOPOLD A., 2000, La surveillance de la pollution photochimique par l'ozone dans le Luberon, *Courrier scientifique du Parc naturel régional du Luberon*, n° 4, pp. 146-150.

MÉGIE G., 1991, Les conséquences d'un changement de composition chimique de l'atmosphère sur l'équilibre de l'ozone, *La vie des sciences, Comptes-rendus, Série générale*, T. 8, n° 2, pp. 125-144.

MÉGIE G., 1995, Couche d'ozone : de l'équilibre naturel aux perturbations anthropiques, *Revue du Palais de la découverte*, n° 233, pp. 24-42.

MÉGIE G., 1995, L'ozone troposphérique : pollution locale et environnement global, *La vie des sciences, Actualité scientifique*, T. 12, n° 1, pp. 47-69.

WMO - International ozone assessments, 1985-1994, *Global ozone research and monitoring network reports*, n° 18, 20, 22, 37, World meteorological organization, Washington D.C.