

L'ozone atmosphérique et son évolution

**Stratosphérique ou
troposphérique, plus
ou moins bien connu,
l'ozone a, c'est certain,
partie liée au
réchauffement
de la planète.**

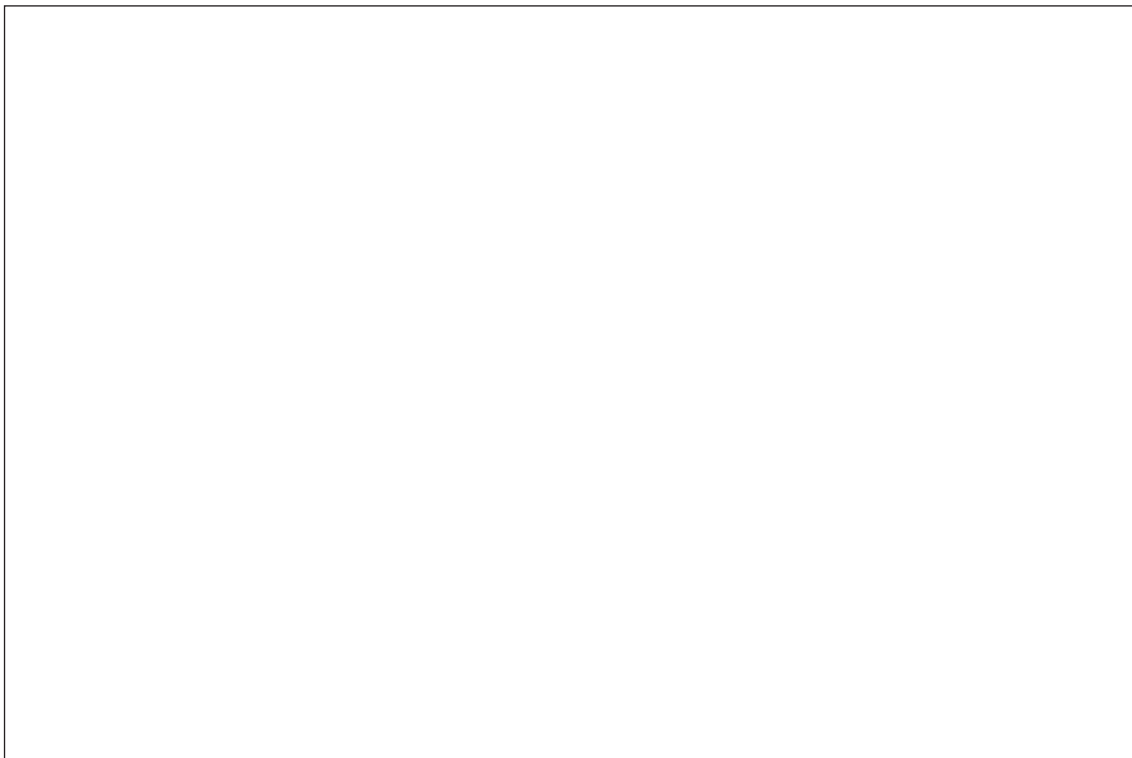
par Gérard Mégie
Professeur à l'Université
Pierre et Marie Curie

L'ozone joue dans les équilibres de l'environnement terrestre un rôle fondamental. 90 % de l'ozone atmosphérique sont contenus dans le domaine des altitudes comprises entre 20 et 50 km et constituent ainsi la « couche d'ozone stratosphérique ». Bien que constituant minoritaire de l'atmosphère, puisque la concentration relative maximum observée vers 25 km d'altitude ne dépasse pas 5 à 6 millièmes en volume (ppm), l'ozone est l'unique absorbant, entre le sol et 80 km d'altitude, du rayonnement solaire ultraviolet de longueurs d'onde comprises entre 240 et 300 nanomètres (nm). Cette absorption permet le maintien de la vie animale et végétale à la surface de la Terre, en éliminant les courtes

longueurs d'onde susceptibles de détruire les cellules de la matière vivante et d'inhiber la photosynthèse. Cette protection est assurée *in fine* par une épaisseur d'ozone extrêmement faible puisque, ramenée aux conditions normales de température et de pression qui règnent à la surface terrestre, elle ne mesurerait en moyenne que 3 millimètres. Cette épaisseur est toutefois loin d'être uniforme sur l'ensemble du globe. Elle varie de 2.4 mm dans les régions équatoriales et tropicales à plus de 4.5 mm dans les régions de haute latitude des deux hémisphères. D'un jour à l'autre, en un point donné du globe, sa variabilité peut être supérieure à 50 %.

La production d'ozone dans la stratosphère est directement liée à l'effet du rayonnement solaire sur les molécules d'oxygène. Il s'agit donc d'un mécanisme naturel qui ne peut être perturbé par les activités humaines. En revanche, l'équi-

libre qui conduit aux concentrations d'ozone observées dans la stratosphère préindustrielle est lié à l'action chimique de constituants très minoritaires, dont les concentrations ne dépassent pas quelques millièmes (ppb) de la concentration totale de l'atmosphère (oxydes d'azote, oxydes de chlore). Ces constituants trouvent leurs sources dans des gaz stables émis à la surface de la Terre et qui diffusent ensuite vers la stratosphère qu'ils atteignent en trois à cinq ans. Ils sont alors détruits par un rayonnement solaire plus intense qu'à la surface. Les concentrations d'ozone stratosphérique sont ainsi directement sensibles aux émissions de constituants comme les composés stables de l'azote, du chlore ou du brome. Or, depuis le début des années 1950, les émissions de chlorofluorocarbures, précurseurs des oxydes de chlore destructeurs potentiels de l'ozone stratosphérique, ont



Eliot Erwit/Magnum photos

Dans le domaine de la santé humaine, les UV-B ont, à la fois, un rôle physiologique positif conduisant à la synthèse de la vitamine D et un rôle thérapeutique naturel au niveau de la peau.

été multipliées par 8, les teneurs de ces constituants passant de 0,5 ppb à près de 4 ppb en 2000. L'ampleur de cette perturbation a été telle qu'elle a profondément modifié les équilibres stratosphériques entraînant des destructions importantes d'ozone, en particulier dans les régions de haute latitude des deux hémisphères.

Dans la troposphère, le contenu en ozone reste limité à 10 % du contenu atmosphérique total et les concentrations relatives sont de l'ordre de quelques dizaines de milliardièmes (ppb). L'origine de l'ozone troposphérique est

double. D'une part, les transferts de masse d'air entre la stratosphère, réservoir principal, et la troposphère. D'autre part, la photo-oxydation de constituants précurseurs - hydrocarbures, oxydes d'azote, monoxyde de carbone, méthane - dont les émissions sont aujourd'hui largement dominées par les sources anthropiques (industrie, transport, pratiques agricoles). L'existence de cette formation photochimique d'ozone a été depuis longtemps mise en évidence dans les atmosphères urbaines et péri-urbaines des grandes cités fortement polluées (Los Angeles, Milan, Athènes, Mexico, New-

York...). L'ozone ainsi formé à l'échelle locale constitue une source qui, alliée à la production directe d'ozone dans l'atmosphère libre hors des régions de pollution, contribue à l'augmentation des concentrations observées aux échelles régionales et globales. Ainsi, la comparaison avec les valeurs actuelles des concentrations d'ozone mesurées au début du XX^e siècle dans plusieurs stations de l'hémisphère Nord (Observatoire météorologique du Parc Montsouris à Paris, Observatoire du Pic du Midi, Observatoire de Montecalieri en Italie) et de l'hémisphère Sud (Montevideo en Uruguay,



Eliott Erwit/Manum photos

Ils ont cependant, à fortes doses, un rôle toxique, pouvant tuer les cellules, inhiber les défenses immunitaires cutanées et provoquer la genèse de cancers épithéliaux ou mélaniques.

Cordoba en Argentine) montre que le niveau d'ozone dans l'atmosphère libre a été multiplié par 4 dans l'hémisphère Nord et par près de 2 dans l'hémisphère Sud. L'influence des sources anthropiques est confirmée par les observations de la variation en latitude des concentrations d'ozone qui montrent des valeurs deux fois plus élevées dans l'hémisphère Nord (40-60 ppb) que dans l'hémisphère Sud (20-25 ppb), reflétant ainsi la dissymétrie dans la distribution des sources, plus de 80 % des précurseurs polluants étant émis dans l'hémisphère Nord et dans les régions tropicales (combustion de la biomasse).

Les enjeux pour l'environnement de l'augmentation de l'ozone troposphérique et des constituants photo-oxydants qui lui sont liés 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 la centaine de 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, du fait de ses propriétés d'absorption du rayonnement ultra-violet solaire, l'ozone peut être pho-

todissocié dans la basse atmosphère et produire ainsi le radical hydroxyle OH, espèce chimique particulièrement réactive. Celle-ci se comporte comme un véritable «détergent» de la basse atmosphère, oxydant principalement les hydrocarbures d'origine naturelle ou anthropique et initiant ainsi les processus chimiques dans la troposphère. Toute modification du contenu en ozone influe donc, à courte échelle de temps, sur les propriétés oxydantes de la troposphère. Enfin, l'ozone est un gaz à effet de serre, 1 200 fois plus actif radiativement, à masse égale dans l'atmosphère, que le gaz carbonique.

L'augmentation de sa concentration dans la troposphère conduit donc à un renforcement de l'effet de serre additionnel. Le problème de l'ozone troposphérique est ainsi étroitement lié au problème climatique. Il constitue, en fait, l'essentiel du couplage entre le climat et la chimie de l'atmosphère.

Ozone stratosphérique

Si de nombreuses incertitudes demeurent encore dans notre compréhension des équilibres d'une stratosphère terrestre en constante évolution sous l'influence des perturbations anthropiques, il n'en reste pas moins que certains faits doivent être considérés aujourd'hui comme scientifiquement fondés. Ils justifient largement les mesures réglementaires prises au niveau international dans le cadre du Protocole de Montréal et de ses différents amendements.

✓ Près de 85 % des composés chlorés mesurés dans la stratosphère sont d'origine anthropique. Cette affirmation se fonde sur un ensemble de données expérimentales qui conduisent à une quantification précise du bilan global des chlorofluorocarbures et des

halons (composés bromés) dans la troposphère et la stratosphère, et à la mise en évidence d'une augmentation constante des concentrations des composés chlorés, bromés et fluorés dans la stratosphère au cours des deux dernières décennies. Le rythme de croissance observé est parfaitement compatible avec la source anthropique. Les mesures effectuées après les éruptions volcaniques majeures du volcan El Chichon en 1982 et du Mont Pinatubo en 1991, montrent que l'apport direct de composés chlorés dans la stratosphère est négligeable à l'échelle globale.

✓ L'augmentation, liée aux activités humaines, des émissions vers l'atmosphère de ces composés, en particulier des composés organo-halogénés, induit un déséquilibre qui conduit à une destruction accrue de l'ozone dans la stratosphère. Ainsi, l'ensemble des observations de la quantité totale d'ozone dans l'atmosphère conduites depuis le sol à partir de 1957, et de plates-formes satellitaires depuis 1978, confirme que l'épaisseur de la couche d'ozone a diminué au cours des deux dernières décennies. Cette diminution est fonction de la latitude et de la saison .

✓ En Antarctique, la destruction massive de l'ozone entre 14 et 20 km d'altitude au dessus du continent antarctique au début du printemps austral, conduit à une réduction de plus de 60 % de l'épaisseur de la couche d'ozone au cours des mois de septembre et d'octobre. Il s'agit là d'une caractéristique pérenne de la stratosphère polaire de l'hémisphère sud, observée de façon régulière depuis le milieu des années 1980.

✓ En Arctique, du fait de la moins grande stabilité du vortex au cours de l'hiver, les destructions d'ozone observées sont, jusqu'à présent, restées plus faibles que dans l'hémisphère Sud. Toutefois, depuis le début des années 1990, l'occurrence d'hivers plus froids dans la stratosphère a conduit à des destructions d'ozone de l'ordre de 20 à 35 % suivant les années, sur des surfaces équivalentes à celles de l'hémisphère Sud .

✓ Toutes les analyses statistiques des données d'observation, au sol ou depuis l'espace, mettent en évidence des diminutions significatives de la colonne d'ozone, de -4 % à -5 % par décennie aux moyennes latitudes, dans les deux hémisphères. Les valeurs sont plus élevées en hiver et au printemps (-6 % à -8 %) et aug-

mentent également avec la latitude. Les tendances évolutives observées en été sont également significatives. Les diminutions observées dans les régions tropicales, là où l'intensité du rayonnement solaire est maximale, restent plus faibles, à la limite des possibilités de détection.

✓ Du fait de leur très longue durée de vie dans la basse atmosphère, les composés organo-halogénés (chlorofluorocarbures, halons) sont les principaux responsables des diminutions observées de la couche d'ozone stratosphérique. Les mesures réglementaires prises dans le cadre du Protocole de Montréal et des amendements de Londres, Copenhague, Vienne, Montréal et Pékin conduisent, aujourd'hui, à un ralentissement de la croissance de ces composés dans la troposphère. Les mesures effectuées dans les réseaux d'observation qui couvrent l'ensemble du globe, montrent que la décroissance des concentrations troposphériques s'est amorcée en 1996. En raison du temps de transport vertical, de l'ordre de 3 à 5 ans, nécessaire pour que ces constituants atteignent la basse stratosphère, le maximum temporel dans les concentrations stratosphériques n'est atteint qu'aujourd'hui.

Ces diminutions observées de l'ozone stratosphérique ont plusieurs conséquences :

✓ elles conduisent, tout d'abord, à un refroidissement de la basse stratosphère de l'ordre de 0,25°C à 0,4°C par décennie. Elle induisent, également, un déficit d'énergie radiative de l'ordre de -0,1 W.m⁻² en moyenne globale à l'altitude de la tropopause qui, au cours des quinze dernières années, a compensé pour environ 20 % en valeur relative, l'apport d'énergie radiative due aux gaz à effet de serre ;

✓ elles induisent une augmentation du rayonnement UV-B à la surface de la Terre. En effet, le lien quantitatif entre les diminutions de l'épaisseur de la couche d'ozone stratosphérique et l'augmentation de ce rayonnement est aujourd'hui clairement confirmé. Des augmentations importantes de rayonnement UV-B sont ainsi observées en Antarctique, au printemps austral, dans les conditions particulières du « trou d'ozone ». Toutefois, le manque de données fiables sur une période de temps suffisamment longue,

ne permet pas de conclure quant à une augmentation du rayonnement UV-B à l'échelle globale au cours des deux dernières décennies.

Les risques potentiels d'une diminution de l'épaisseur de la couche d'ozone stratosphérique sur les biosphères animale et végétale sont essentiellement liés à l'augmentation du rayonnement solaire ultra-violet à la surface de la Terre. Dans le domaine de la santé humaine, les UV-B ont, à la fois, un rôle physiologique positif conduisant à la synthèse de la vitamine D et un rôle thérapeutique naturel au niveau de la peau. Ils ont cependant, à fortes doses, un rôle toxique, pouvant tuer les

cellules, inhiber les défenses immunitaires cutanées et provoquer la genèse de cancers épithéliaux ou mélaniques. Les mécanismes élémentaires des réponses physiologiques et les

modes d'altération principaux liés à une augmentation du rayonnement UV-B sont aujourd'hui identifiés et, dans une large mesure, quantifiés. Toutefois, la difficulté classique pour établir une relation dose/effet précise, l'hétérogé-

La couche d'ozone sera dans un état très vulnérable au cours de la prochaine décennie, et les non linéarités du système atmosphérique déjà mises en évidence par l'apparition du « trou d'ozone », ne nous mettent pas à l'abri des surprises, bonnes ou mauvaises.

néité de la réponse des populations humaines vis-à-vis du risque, les capacités d'adaptation de la peau et l'oeil aux variations de l'irradiation solaire, la limitation des diminutions attendues de l'épaisseur de la couche d'ozone du fait des mesures réglementaires prises au niveau international, laissent penser que l'augmentation limitée de l'irradiation UV-B à la surface n'entraînera pas de modification mesurable des effets aigus. En revanche, les effets toxiques chroniques, comme la cataracte, le vieillissement photo-induit et les cancers spino- et baso-cellulaires de la peau, liés à l'exposition UV-B moyenne et aux doses cumulatives reçues tout au long de l'existence, pourraient voir leur incidence augmenter, sans qu'il soit possible, dans l'état actuel des connaissances, d'être plus précis sur le plan quantitatif.

En ce qui concerne l'action sur la biosphère, les mécanismes d'action et les mécanismes de protection sont de mieux en mieux connus au niveau moléculaire. Au niveau des organismes et des biotopes, les connaissances se développent sur les effets à court terme, mais la question essentielle reste la quantification des interactions avec les autres contraintes d'environnement.

A une échelle plus globale, le niveau des connaissances reste très limité, ce qui rend impossible tout chiffrage quantitatif des effets possibles d'une augmentations des UV-B.

Concernant l'avenir, la charge en chlore dans la stratosphère continuera, au cours du siècle prochain, à être dominée par les émissions des chlorofluorocarbures émis dans les années 1960-1990. Le retour au niveau de concentration qui existait antérieurement à l'apparition des phénomènes de destruction de l'ozone dans les régions polaires, ne sera pas effectif avant les années 2040-2050, du fait, à nouveau, de la très longue durée de vie des chlorofluorocarbures. La contribution à la charge totale en chlore de la stratosphère des produits de substitution, hydrochlorofluorocarbures et hydrochlorofluorocarbures, restera limitée, compte tenu des mesures de réglementation déjà prises. L'impact des émissions des flottes aériennes subsoniques, existantes, et supersoniques, en projet, sur la couche d'ozone stratosphérique, devrait rester très limité. Les diminutions de l'épaisseur de la couche d'ozone calculées

pour une flotte de 500 avions supersoniques volant à 20 km d'altitude resteraient inférieures à -1 % à l'échelle globale. Toutefois, ces diminutions sont particulièrement sensibles à l'altitude et à la vitesse de vol en croisière, et les connaissances actuelles sur les équilibres physico-chimiques de la basse stratosphère ne permettent pas de conclure définitivement.

En trois décennies, le problème de l'ozone stratosphérique est ainsi passé de la simple hypothèse scientifique à la mise en évidence d'une atteinte de grande ampleur à l'environnement global. Si les conséquences sur l'équilibre de la vie de cette évolution restent encore aujourd'hui non quantifiables, les conséquences économiques de la prise de conscience de la réalité du problème sont particulièrement importantes puisqu'elles ont conduit à la suppression totale des émissions des composés organo-chlorés, jugés responsables de cette perturbation des équilibres globaux de l'atmosphère. L'ampleur de la perturbation anthropique a cependant été suffisamment importante pour modifier profondément les équilibres stratosphé-

En trois décennies, le problème de l'ozone stratosphérique est ainsi passé de la simple hypothèse scientifique à la mise en évidence d'une atteinte de grande ampleur à l'environnement global.

riques, faisant apparaître, du fait de la croissance rapide des concentrations du chlore dans la stratosphère, des processus chimiques entièrement nouveaux, qui ne pouvaient que difficilement être imaginés dans les conditions « naturelles » qui prévalaient au début des années 1950, avant la mise massive sur le marché des chlorofluorocarbures. On pourrait penser que du fait des mesures réglementaires prises dans le cadre du Protocole de Montréal, qui visent à l'élimination de la cause, en l'occurrence les émissions des composés organo-halogénés (CFC, halons), les efforts de recherche sur la couche d'ozone devraient être ralentis, dans l'attente d'un retour à l'équilibre de la stratosphère terrestre. Plusieurs faits scientifiques plaident contre une telle attitude attentiste. Indépendamment des incertitudes qui limitent fortement notre capacité à prédire l'évolution future de la couche d'ozone stratosphérique à l'échelle de la décennie, deux aspects majeurs doivent être pris en considération. D'une part, l'effet maximum des composés chlorés sur la couche d'ozone n'est atteint qu'en ce début du XXI^e siècle. La couche d'ozone sera donc dans un état très vulnérable au cours de la prochaine



Chaque été apparaissent, dans les grandes agglomérations, des pics de pollution dus à l'ozone. Lors de tels épisodes, les effets de la pollution oxydante sur la santé sont apparents, en particulier les affections du système respiratoire chez les personnes à risques.

décennie, et les non linéarités du système atmosphérique déjà mises en évidence par l'apparition du « trou d'ozone », ne nous mettent pas à l'abri des surprises, bonnes ou mauvaises. D'autre part, il n'est pas possible d'affirmer, de façon scientifiquement fon-

dée, que la diminution des concentrations en chlore dans la stratosphère, entraînera *de facto* un retour à l'équilibre qui prévalait au début des années 1970. La stratosphère, et plus généralement l'atmosphère terrestre, ont en effet évolué au cours des deux dernières

Paul Lowe/Magnum photos

décennies sous l'effet des perturbations anthropiques, et les contraintes globales d'environnement sont donc totalement différentes de celles des années « pré-industrielles ». C'est donc au cours de la présente décennie que l'on pourra effectivement mesurer l'impact réel des mesures réglementaires sur l'évolution de la couche d'ozone stratosphérique.

Ozone troposphérique

Dans la troposphère, les concentrations d'ozone, polluant secondaire produit par réaction chimique dans l'atmosphère, sont étroitement liées à celles de ses précurseurs, oxydes d'azote, méthane, monoxyde de carbone, hydrocarbures. Elles sont donc particulièrement sensibles à la part prise par les sources anthropiques dans les émissions de ces constituants, part qui atteint 65 % pour le méthane et le monoxyde de carbone et près de 75 % pour les oxydes d'azote. En revanche, à l'échelle planétaire, les émissions d'hydrocarbures non méthaniques par la végétation dominant, ramenant la part anthropique à seulement 20 à 25 % des émissions totales.

Aux échelles locales et régionales, la distribution de l'ozone et de ses précurseurs dans la troposphère résulte alors de la combinaison entre les processus chimiques de formation ou de destruction, et les processus de mélange qui conduisent au transport et à la dispersion des constituants atmosphériques. Chaque été apparaissent, dans les grandes agglomérations, des pics de pollution dus à l'ozone. Les causes premières en sont connues, qui impliquent conditions météorologiques propices et émissions de constituants chimiques. Par temps calme, avec un rayonnement solaire maximal, l'accumulation des polluants primaires - oxydes d'azote, monoxyde de carbone et hydrocarbures - conduit à la production d'ozone dans les basses couches. Les activités humaines liées aux combustions, associées aux modes de transport et de chauffage, font ainsi des zones urbaines et périurbaines un champ privilégié de la pollution par l'ozone. Depuis de nombreuses années, les grandes métropoles mondiales sont concernées et les grandes villes françaises ne sont plus épargnées. Ainsi, Paris et la région marseillaise enregistrent, pratiquement tous les étés, des pics de pollution pouvant atteindre des niveaux d'alerte,

à partir desquels des mesures restrictives doivent être mises en place par les pouvoirs publics. Lors de tels épisodes, les effets de la pollution oxydante sur la santé sont apparents, en particulier les affections du système respiratoire chez les personnes à risques.

Ces pollutions fortes et localisées agissent également comme révélateur d'une tendance continue de l'augmentation du pouvoir oxydant de l'atmosphère des basses couches observée à l'échelle globale. L'augmentation, déjà citée, d'un facteur 4, des concentrations d'ozone troposphérique dans l'hémisphère Nord depuis le début du siècle ne doit cependant pas être traduite sans précaution en termes de tendance annuelle, comme il est d'usage de le faire pour les constituants à durée de vie relativement longue tels que le dioxyde de carbone ou les chlorofluorocarbures. En effet, les temps caractéristiques des processus photochimiques qui régissent l'équilibre de l'ozone dans la troposphère sont de quelques mois au maximum, et les concentrations observées reflètent donc les variations à la fois spatiales et temporelles des constituants précurseurs. Il est ainsi probable que les mesures de réduction des émissions d'oxydes d'azote et

d'hydrocarbures prises dans les années 1970, aient conduit à une diminution du rythme annuel d'accroissement des concentrations d'ozone à la surface au cours de la dernière décennie. En revanche, si, au cours des dernières décennies, les augmentations maximales d'ozone ont été observées en Amérique du Nord et en Europe, il est vraisemblable que les régions de l'Asie du Sud-Est seront les plus sensibles, au cours de la première moitié du XXI^e siècle, en termes d'augmentation des concentrations d'ozone troposphérique. Mais la compréhension des mécanismes de couplage de la pollution oxydante aux différentes échelles de temps et d'espace concernées, reste encore un sujet de recherche.

Malgré ces incertitudes, l'analyse des données existantes conduit à considérer comme scientifiquement fondés les faits suivants :

✓ à l'échelle locale, les phénomènes de pollution oxydante ne sont plus seulement le fait de quelques grandes agglomérations, mais se généralisent à l'ensemble des pays développés ou en voie de développement, les concentrations maximales de photo-oxydants étant généralement observées sous le vent des sources de pollu-

tion, constituant ainsi, à leur tour, une source à l'échelle globale ;

✓ l'augmentation des concentrations d'ozone est directement liée à l'augmentation des émissions anthropiques des précurseurs principaux de l'ozone - oxydes d'azote, monoxyde de carbone, hydrocarbures et, plus généralement, composés organiques volatils. A l'échelle globale, les oxydes d'azote constituent actuellement le facteur limitant principal de la pollution photo-oxydante; toute stratégie de limitation de l'augmentation des concentrations d'ozone à cette échelle doit donc avoir pour objectif premier une réduction des émissions des oxydes d'azote (problème des transports en France) ;

✓ à l'échelle locale, les stratégies de limitation dépendent fortement des conditions spécifiques de chaque localisation, et peuvent concerner aussi bien les émissions d'oxydes d'azote que celles des composés organiques volatils, des hydrocarbures et du monoxyde de carbone.

Les conséquences de l'augmentation de l'ozone et des oxydants dans la troposphère sont multiples :

✓ l'ozone troposphérique joue un double rôle dans l'effet de

serre additionnel : rôle direct, lié à ses propriétés radiatives, et rôle indirect par son impact sur les équilibres chimiques de l'atmosphère. La part relative de l'ozone troposphérique dans l'effet de serre additionnel depuis le début du XX^e siècle est de l'ordre de 18 %, et pourrait s'accroître sensiblement au cours des prochaines décennies, si aucune mesure de régulation n'était prise ;

✓ dans le domaine des effets de l'ozone sur la végétation, les modes d'altération des processus physiologiques principaux et leurs répercussions sur la croissance et le rendement des cultures sont bien établis; les relations dose-effet montrent que les concentrations ambiantes se situent déjà dans le domaine des valeurs nocives sur certaines espèces et qu'une élévation modérée des teneurs conduirait, d'ores et déjà, à des effets d'ampleur notable ;

✓ dans le domaine des effets sur la santé, les conséquences de la persistance de concentrations élevées d'ozone et de photo-oxydants dans les régions de forte pollution sont prouvées, notamment sur le plan des affections respiratoires pour les populations à risques; les effets à plus long terme, en particulier cancérogènes et mutagènes, restent incertains.

A partir de ces faits établis, la mise en place de politiques de prévention et de réglementation efficaces reste toutefois difficile, tant les paramètres à prendre en compte sont nombreux. En effet, les mécanismes qui régissent la capacité d'oxydation de l'atmosphère sont complexes. Des régimes très différents sont observés suivant les concentrations des espèces primaires impliquées, oxyde d'azote et hydrocarbures en particulier, et les effets peuvent être non-linéaires. Ainsi, à proximité de sources d'émissions intenses d'oxyde d'azote, l'ozone peut, dans un premier temps, être détruit, avant que le transport et la dilution des masses d'air ne provoquent une augmentation rapide de sa concentration dans l'atmosphère. C'est ainsi qu'en région parisienne, l'on observe parfois des concentrations en ozone bien plus élevées dans la grande banlieue qu'au centre-ville, et qu'une diminution du trafic automobile pourrait s'accompagner d'une augmentation rapide des concentrations d'ozone sur Paris et d'une baisse de ces mêmes concentrations, le lendemain, en ban-

lieue. De plus, on a trop souvent tendance à considérer que l'échelle locale est la mieux adaptée à la description des épisodes de forte pollution. De nombreuses observations montrent que l'extension horizontale des épisodes de pollution peut atteindre des centaines de kilomètres et toucher de larges parties de l'Europe. Le transport à grande échelle doit donc impérativement être pris en compte et associé à un cadastre précis des émissions des polluants primaires.

La complexité des mécanismes et l'imbrication des échelles spatiales et temporelles mises en jeu impliquent de mettre en œuvre une politique de recherche combinant étude amont des processus, moyens d'observation (réseaux, campagnes coordonnées) et modélisation. La collecte de données de qualité reste une étape indispensable pour décrire, le plus précisément possible, les différents types de pollution. Elle se fonde, d'une part, sur les réseaux des associations de mesure de la pollution et, d'autre part, sur l'organisation de campagnes

coordonnées qui permettent d'étendre le domaine spatial étudié. La modélisation numérique reste, enfin, l'outil intégrateur par excellence de ces données recueillies de façon éparsée dans l'espace et le temps. Elle nécessite, notamment, le développement de modèles de grande échelle, qui combinent processus de transport et mécanismes photochimiques pour reproduire la climatologie des phénomènes de pollution aux échelles continentale et régionale, quantifier l'influence des émissions globales sur les tendances observées aux échelles saisonnières, et fournir les conditions aux limites des modèles d'échelle plus fine. C'est, en effet, aux modèles locaux que revient *in fine* la tâche de reproduire, à l'échelle des agglomérations, la distribution des polluants et leur évolution. Une fois validés, grâce aux jeux de données obtenus par les réseaux sol et lors des campagnes coordonnées, ces modèles peuvent être utilisés pour évaluer l'efficacité des mesures de prévention et de réduction des pics de pollution.

L'objectif ultime des études sur la pollution atmosphérique est de rendre ces modèles numériques opérationnels. Ceci demandera une coordination accrue de l'ensemble des acteurs.

La complexité des mécanismes et l'imbrication des échelles spatiales et temporelles mises en jeu impliquent de mettre en œuvre une politique de recherche combinant étude amont des processus, moyens d'observation (réseaux, campagnes coordonnées) et modélisation.

En effet, pour la prévision à quelques jours, il faudra certainement se placer dans un cadre européen, voire mondial, et interconnecter les réseaux de mesure de manière à disposer, en temps réel, de données pouvant être assimilées et utilisées pour initialiser les modèles chimiques. À l'échelle locale, les modèles devront être utilisés pour décrire de manière plus détaillée la pollution des agglomérations. Il s'agit donc de bâtir une chaîne opérationnelle, telle qu'on a déjà pu le faire en météorologie. Toutefois, un certain nombre d'actions pourraient être mises en oeuvre dès-à-présent, qui concernent notamment :

✓ la prise en compte, dans la définition des normes réglementaires, de la spécificité de chaque site à l'échelle locale - les stratégies de réduction des émissions ne peuvent être généralisées - et du lien entre pollution locale et pollution globale - afin de préserver une marge de manoeuvre suffisante à l'échelle locale pour le respect des normes ;

✓ la définition d'une politique de réduction complémentaire des émissions d'oxydes d'azote et des autres précurseurs, hydrocarbures, monoxyde de carbone ;

Notre compréhension actuelle des mécanismes qui régissent le comportement de l'ozone atmosphérique montre, qu'au-delà des problèmes spécifiques posés par la destruction de la couche d'ozone stratosphérique et l'augmentation des propriétés oxydantes de la troposphère, cette problématique rejoint celle du changement climatique dû aux émissions de gaz à effet de serre.

✓ la prise en compte dans la politique de lutte contre l'effet de serre additionnel du rôle de l'ozone troposphérique et des constituants qui lui sont liés. Ceci est d'autant plus important que ces composés augmentent relativement plus vite que le gaz carbonique, et qu'ils sont différents de ceux pris en compte jusqu'à présent dans les problèmes de réchauffement global.

Conclusion

Notre compréhension actuelle des mécanismes qui régissent le comportement de l'ozone atmosphérique montre, qu'au-delà des problèmes spécifiques posés par la destruction de la couche d'ozone stratosphérique et l'augmentation des propriétés oxydantes de la troposphère, cette problématique rejoint celle du change-

ment climatique dû aux émissions de gaz à effet de serre. Plusieurs faits scientifiques confortent ce lien :

✓ la diminution de l'ozone stratosphérique influence directement sur le bilan d'énergie de la basse atmosphère ;

✓ l'ozone troposphérique est un gaz à effet de serre dont la contribution au réchauffement de la planète est, à masse égale, 1 200 fois plus importante que celle du gaz carbonique ;

✓ les agents destructeurs de la couche d'ozone stratosphérique, mais aussi les constituants amenés à les remplacer dans leurs principales utilisations, sont des gaz à effet de serre particulièrement actifs ;

✓ certains précurseurs de l'ozone troposphérique, et notamment le méthane, sont des gaz à effet de serre ;

✓ les oxydes d'azote qui influent directement sur les concentrations d'ozone et des oxydants dans l'atmosphère ont, de ce fait, un effet indirect sur le réchauffement global ;

✓ si l'augmentation du gaz carbonique induit un réchauffement de la surface terrestre, elle refroidit la stratosphère et, de ce fait, favorise la destruc-

tion d'ozone dans les régions polaires.

Ces faits scientifiquement établis influent d'ailleurs déjà sur les négociations internationales. Ainsi, un groupe de réflexion commun aux Parties aux Protocoles de Kyoto et de Montréal a été mis en place pour essayer de résoudre le problème posé par le fait que les hydrofluorocarbures (HFC) qui, à terme, doivent remplacer les CFC pour assurer la protection de la couche d'ozone, font partie des gaz à effet de serre réglementés dans le cadre des mesures prise à Kyoto pour lutter contre l'effet de serre additionnel.

Cette complexité des problèmes d'environnement global implique une prise en compte rapide, au niveau de la décision politique et économique, de l'avancée des connaissances scientifiques dans un domaine où l'incertitude domine, et dominera encore au cours des prochaines décennies, les rapports science-expertise-décision publique. De ce fait, les négociations internationales

sur les questions globales et l'environnement et les débats sur le développement durable mettent en évidence la nécessité d'intégrer, dans les processus de décisions publiques, des expertises scientifiques de différents domaines, ainsi que

La complexité des problèmes d'environnement global implique une prise en compte rapide, au niveau de la décision politique et économique, de l'avancée des connaissances scientifiques dans un domaine où l'incertitude domine, et dominera encore au cours des prochaines décennies, les rapports science-expertise-décision publique.

des contributions venant des différents acteurs privés ou associatifs. Ces nouvelles thématiques réclament un effort constant de recherches et d'analyses, une information, une mise en perspective et un niveau d'expertise technique qui ne peuvent être assurés par l'administration « gouvernante ». Réciproquement, les institutions scientifiques, les universités et les différentes structures de recherche ont de grandes difficultés à s'insérer dans le dispositif de décision publique. Elles peinent aussi à participer, à la mesure de leurs compétences et des attentes du public, aux débats collectifs sur les questions d'environnement et de développement durable. De plus, force est de constater que la présence française dans le champ international, notamment économique et juridique, de l'environnement et du développe-

ment durable reste faible. Ces réflexions montrent la nécessité de créer rapidement un lieu d'interface, appuyant un réseau autour des structures de la recherche et des autres lieux d'accumulation des compétences, qui rassemble acteurs de la décision publique, scientifiques mais, aussi, acteurs privés ou associatifs, afin de faire émerger les questions stratégiques pertinentes.