



L'évolution de la couche d'ozone stratosphérique : faits et incertitudes

Evolution of stratospheric ozone layer : acts and doubts

Gérard MÉGIE (*)

RÉSUMÉ

Les résultats expérimentaux les plus récents mettent en évidence une perturbation importante de la couche d'ozone stratosphérique du fait des émissions anthropiques de composés halogénés, et notamment des chlorofluorocarbures. Les évaluations actuelles des tendances évolutives montrent que l'épaisseur de la couche d'ozone a diminué de 6 à 10 % en hiver et de 3 à 5 % en été dans les régions de moyenne latitude des deux hémisphères. Cette érosion, qui se produit principalement dans une zone comprise entre 20 km et 30 km d'altitude, peut être attribuée aux réactions catalytiques en phase hétérogène induites dans les composés chlorés chimiquement actifs, introduits dans la stratosphère par la destruction à haute altitude des chlorofluorocarbures. Par ailleurs, dans les régions polaires de l'hémisphère sud, la diminution de plus de 50 % de l'épaisseur de la couche d'ozone au cours du printemps austral, doit maintenant être considérée comme une caractéristique permanente de la stratosphère polaire antarctique. Un lien direct de cause à effet peut aujourd'hui être établi avec certitude entre ce phénomène de grande ampleur et le chlore d'origine anthropique. Des mécanismes analogues ont également été mis en évidence dans l'hémisphère nord, mais une plus grande variabilité dynamique au cours de l'hiver et du printemps a jusqu'à présent empêché que la destruction de l'ozone n'atteigne une amplitude comparable à celle mise en évidence au pôle sud. Enfin, une augmentation du rayonnement solaire ultra-violet mise en évidence au-dessus du continent antarctique lors de la diminution d'ozone au printemps, et plus récemment dans les régions de haute latitude de l'hémisphère nord du fait des diminutions importantes de la concentration d'ozone qui ont suivi l'éruption majeure du Mont Pinatubo en juin 1991.

ABSTRACT

Recent results demonstrate the present perturbation in the ozone layer due to massive accumulation of man-made chlorine in the stratosphere. For the first time during the last years, the most recent evaluations of the long term trends in the ozone layer show negative trends in the total ozone content, with the highest values being observed in the wintertime high latitudes of both hemispheres. These trends are mainly related to decreases in the ozone concentration between 20 and 25 km, and could not be explained by gas phase photochemistry related to chlorine catalytic cycles. In the high latitude regions of the southern hemisphere the springtime ozone deficit can now be considered as a permanent feature of the antarctic stratosphere. A direct link has been established between man-made chlorine and the large decrease in the ozone concentration, up to 90 %, observed between 15 km and 20 km. The 1993 ozone hole can be classified as the largest hole ever observed, with minimum ozone values lower than 100 Dobson Units (millicentimeter atmosphere) and an extended surface of more than 25 millions square kilometers. For the first time during the last years, evidence is also given for an increase of solar UV radiation during the springtime ozone hole over Antarctica, and more recently over the period 1989-1993 in the high latitude of the northern hemisphere over Canada. All these measurements serve as further observational evidences of the destructive effects of chlorofluorocarbons and halons on the stratospheric ozone layer.

1. Les faits scientifiquement établis

Les concentrations des chlorofluorocarbures, et plus généralement des composés organo-chlorés et organo-bromés d'origine anthropique, me-

surés dans la troposphère sont quantitativement en accord avec l'augmentation des émissions enregistrées au cours des trente dernières années. Celles-ci résultent de l'utilisation croissante au cours des dernières décennies, des chlorofluorocarbures et autres dérivés halogénés, dans les industries du froid, des mousses synthétiques, des solvants et des aérosols. Les concentrations mesurées, et les taux d'accroissement observés sont les mêmes en tout point de la Terre et correspon-

(*) Institut Pierre-Simon-Laplace, Service d'Aéronomie, Université Pierre-et-Marie-Curie, 4, place Jussieu, 75252 Paris cedex 05.

dent en moyenne sur les quinze dernières années à des augmentations de l'ordre de 5 % par an. Le bilan quantitatif du chlore total mesuré dans la stratosphère, et notamment le rapport d'abondance chlore/fluor, traduit directement l'influence dominante des sources anthropiques. Il correspond à un contenu total en équivalent égal à 3,8 ppbv (parties par milliard en volume) en 1993, dont 90 % sont d'origine anthropique. En effet, le chlore émis par les sources naturelles que sont les océans et les volcans, l'eau sous une forme soluble dans l'eau. Celle-ci est donc rapidement recyclée vers la surface par les précipitations et n'atteint pas la stratosphère, puisque le temps de transfert entre la surface et l'altitude de 25-30 km où les constituants halogénés sont détruits par le rayonnement solaire pour libérer le chlore actif est de 5 à 7 ans.

Le comportement naturel de la couche d'ozone stratosphérique, qui représente 90 % du contenu en ozone de l'atmosphère terrestre, est régi par un équilibre entre une production photochimique directement liée au rayonnement solaire et des réactions catalytiques de destruction en phase gazeuse induites par des constituants minoritaires de l'atmosphère. Ceux-ci sont formés par oxydation à haute altitude, à partir de 25 km, de constituants stables émis à la surface de la Terre par des mécanismes physiques, chimiques et biologiques : méthane, vapeur d'eau, protoxyde d'azote. Les radicaux hydrogénés ainsi formés, contrôlent cet équilibre dans la haute stratosphère et la mésosphère aux altitudes supérieures à 45 km. Dans la basse stratosphère, le contrôle en régime naturel est essentiellement dû aux réactions catalytiques faisant intervenir les oxydes d'azote.

L'augmentation du chlore d'origine anthropique dans la stratosphère a aujourd'hui perturbé cet équilibre naturel de deux façons. D'une part, elle entraîne dans la haute stratosphère, vers 40 km d'altitude, une diminution de la concentration d'ozone liée aux cycles catalytiques en phase gazeuse homogène induits par le monoxyde de chlore ClO. D'autre part, dans la basse stratosphère, les concentrations élevées en constituants chlorés induisent des réactions chimiques en phase hétérogène qui se développent à la surface des particules présentes dans la stratosphère. Ces réactions amplifient les effets de la perturbation liée aux émissions anthropiques de chlore, notamment dans les régions polaires. Les mesures effectuées à partir du sol ou de plates-formes satellitaires, montrent que la quantité intégrée d'ozone dans l'atmosphère terrestre a diminué de 6 à 10 % en hiver et de 3 à 5 % en été au cours de la dernière décennie, dans les régions de moyennes latitudes, entre 40° et 65°, dans les deux hémisphères. Aucune diminution significative n'est en revanche mise en évidence dans les régions équatoriales et tropicales entre 35°N et 35°S. De plus, les mesures de la distribution verticale d'ozone montrent

que ces diminutions se produisent préférentiellement dans la zone d'altitude du maximum de concentration d'ozone, entre 20 km et 30 km d'altitude, et qu'elles ne peuvent donc être expliquées que par les mécanismes de chimie hétérogène.

Au-dessus du continent arctique, un phénomène récurrent de grande ampleur se développe au cours du printemps austral, pendant les mois de septembre à novembre, depuis le début des années 1980. Il conduit à la destruction de plus de 65 % de la quantité totale d'ozone, sur une surface supérieure à 20 millions de km². Cette destruction, qui se produit pour plus de 90 % entre 18 km et 25 km est liée aux processus de chimie hétérogène se développant à la surface des nuages stratosphériques polaires, qui se forment à ces altitudes, compte tenu des conditions météorologiques particulières qui règnent dans la stratosphère polaire antarctique. En effet, la stabilité du tourbillon circumpolaire induit un refroidissement intense de la stratosphère, les températures moyennes pouvant au cours de l'hiver s'abaisser à des valeurs inférieures à -90° C. Elles entraînent alors la condensation de la vapeur d'eau et la formation de cristaux de glace contenant de l'acide nitrique dissous. Ces mécanismes conduisent à une dénitrification intense de la basse stratosphère et déplacent l'équilibre des constituants chlorés en faveur des composés chimiquement actifs susceptibles de détruire l'ozone, comme le chlore atomique et le monoxyde de chlore. L'ensemble des expériences effectuées depuis 1985, et les résultats récents obtenus à partir des expériences embarquées sur le satellite UARS (Upper Atmospheric Research Satellite) lancé en septembre 1991, ont démontré qu'un lien quantitatif direct de cause à effet entre la destruction de l'ozone et la présence de chlore d'origine anthropique pouvait être établi sans ambiguïté.

Dans la stratosphère polaire arctique, des processus analogues, conduisant à l'apparition de quantité importante de chlore destructeur de l'ozone ont également été mis en évidence au cours de plusieurs campagnes de mesures coordonnées ; associant expériences sol, embarquées sur avion, ballon et satellite, et notamment les campagnes européenne EASOE (European Arctic Stratospheric Ozone Experiment) et américaine AASE (Airborne Arctic Stratospheric Experiment) pendant l'hiver 1991-1992. Toutefois, les conditions météorologiques différentes qui règnent dans l'hémisphère nord, marquées par un échange constant de masses d'air entre les régions polaires et les régions de moyenne latitude, n'ont pas conduit à des phénomènes de même ampleur qu'au pôle sud, même si des destructions locales d'ozone ont été observées à plusieurs reprises au cours de ces dernières années.

La diminution de l'épaisseur de la couche d'ozone stratosphérique, liée à l'action destructrice de constituants organo-halogénés d'origine an-

thropique, entraîne une augmentation du rayonnement solaire dans le domaine de longueurs d'onde des UV-B (280-310 nm), essentiellement nocifs pour la vie végétale et animale à la surface de la Terre. Cet accroissement des doses de rayonnement UV pourrait conduire à terme à une augmentation des mélanomes, des cataractes, et à des mutations génétiques liées à la destruction des molécules constitutives de la matière vivante. Une telle augmentation du rayonnement UV-B a été mise en évidence expérimentalement sur le continent antarctique au cours de la diminution importante d'ozone au printemps. Ainsi à plusieurs reprises au cours des dernières années (1987-1993), le rayonnement solaire mesuré au début du mois de novembre était supérieur en intensité absolue à celui observé au moment du solstice d'été, au mois de décembre.

2. Les incertitudes

Ces faits scientifiquement établis sur la base des nombreuses expériences et campagnes coordonnées conduites depuis plus de vingt ans, confirment la responsabilité des composés chlorés, essentiellement d'origine anthropique, dans l'érosion de la couche d'ozone stratosphérique. Il n'en reste pas moins que de nombreuses incertitudes subsistent encore dans nos connaissances, concernant aussi bien les processus élémentaires que les bilans aux différentes échelles. Si un lien direct de cause à effet a pu être établi entre les diminutions importantes d'ozone observées au-dessus du continent antarctique et le chlore d'origine anthropique, la part relative des différents processus susceptibles d'expliquer les diminutions observées à l'échelle globale, notamment dans les régions de moyennes latitudes, reste à quantifier. Trois processus différents, mais tous liés à l'effet du chlore d'origine anthropique sont en effet envisagés aujourd'hui : destruction d'ozone dans les régions polaires et dilution par transport vers les moyennes latitudes, transport de masses d'air « chimiquement » perturbées du pôle vers les régions de moyenne latitude où le rayonnement solaire plus intense conduirait à une diminution locale de l'ozone, réactions de chimie hétérogène se développant à la surface des particules d'aérosols présentes dans la stratosphère de moyenne latitude. Devant cette incertitude qui subsiste quant à l'influence quantitative relative de ces différents processus, il reste impossible aujourd'hui de prédire avec précision l'effet de l'augmentation du contenu en chlore de la stratosphère. Celui-ci, malgré les mesures réglementaires prises dans le cadre du Protocole de Montréal et des amendements de Londres et de Copenhague, continuera à augmenter jusqu'en l'an 2000. Les mécanismes réactionnels mis en jeu aussi bien dans la troposphère que dans la stratosphère par les produits de substitution des chlorofluorocarbures, notamment les hydrochlorofluorocarbures, restent pour une large part incertains et diminuent encore notre capacité de prédiction.

L'éruption cataclysmale du Mont Pinatubo en juin 1991 a injecté dans la stratosphère 20 millions de tonnes de dioxyde de soufre, rapidement oxydé en particules de sulfates. Cette injection massive a largement perturbé les équilibres stratosphériques, essentiellement du fait de l'importance actuelle du contenu en chlore anthropique dans la stratosphère. Les quantités d'ozone observées dans un domaine de latitude compris entre 65°S et 65°N en 1993, sont inférieures de 20 % aux valeurs minimum observées au cours de la décennie 1980-1990. Ces diminutions importantes ont d'ailleurs entraîné une augmentation du rayonnement UV-B à la surface, mise en évidence expérimentalement dans les hautes latitudes de l'hémisphère nord. La capacité de réaction de la stratosphère à cette perturbation qui lie les effets naturels et anthropiques reste encore largement inconnue, même si les valeurs observées en 1994 semblent marquer un retour à la normale. A titre de comparaison, lors de l'éruption du volcan El Chichon en 1982, alors que le contenu en chlore de la stratosphère ne dépassait pas 2,5 ppbv, les variations observées de l'ozone stratosphérique restaient limitées en moyenne à 2 % à 3 %, soit un ordre de grandeur plus faible.

En ce qui concerne les effets attendus, les incertitudes sont encore plus importantes. Aucune relation quantitative directe entre une augmentation du rayonnement UV-B et la diminution de l'épaisseur intégrée d'ozone n'a été mise en évidence expérimentalement à l'échelle de la Terre, en dehors des régions antarctiques. Ceci tient essentiellement à l'inadéquation des réseaux de mesure actuellement existants, principalement installés au voisinage des grandes agglomérations où les causes de variation du rayonnement UV sont multiples, liées en particulier à l'augmentation de la turbidité du fait d'une pollution accrue. Enfin, il est difficile d'établir dans le domaine de la santé des relations dose-effet précises entre l'augmentation du rayonnement UV-B et les effets nocifs attendus.

Bibliographie

- KERR J.B., McELROY C.T. Evidence for large upward trends of ultra-violet radiation linked to ozone depletion, *Science*, 262, 1 032-1 034.
- MEGIE G. Stratosphère et couche d'ozone, *Cahiers du Bureau des longitudes*, ed. Masson, France, 1991.
- SOLOMON S. « The mystery of the antarctic ozone hole », *Rev. Geophys.*, 26, 131-151.
- WMO. Report of the International Ozone Trends Panel, 1988, World Meteorological Organization Global Ozone and Monitoring Network Report 18, WMO, Washington DC.
- WMO. WInternational Ozone Assessment, 1991, World Meteorological Organization Global Ozone and Monitoring Network Report 22, WMO, Washington DC.