

L'HOMME ET LA STRATOSPHERE

«Um estranho buraco de ozono do tamanho dos Estados Unidos vai ser objecto de estudos por parte de 13 cientistas, que se deslocarão à base de McMurdo, na Antárctida, naquela zona.

O buraco foi descoberto por cientistas britânicos, em Março de 1985, e os satélites mostram que a misteriosa cavidade alcança proporções alarmantes no centro de Pólo Sul, situada nos extremos da Austrália, África e América do Sul...».

(*Diário de Notícias*, 31/07/1986)

Cette nouvelle laconique reléguée dans un coin d'une page intérieure du journal, en période de vacances, n'a certainement pas attiré l'attention de beaucoup de gens. En octobre, la brèche dans la couche d'ozone, confirmée, fut amplement divulguée par la presse. Si elle persiste, elle représente un danger encore incommensurable menaçant l'Humanité. *Les Journées de la Stratosphère*, conférence tenue à Paris du 17 au 19 octobre 1985, dont on présente ici quelques travaux ⁽¹⁾, ont été la preuve que le problème de l'ozone est un sujet d'actualité envisagé avec beaucoup de sérieux par la communauté scientifique. Sur la trentaine de communications présentées, plus du tiers s'est attaché à montrer qu'à quelques dizaines de kilomètres seulement au-dessus de nos têtes (entre 15 km et 35 km), dans la stratosphère, se joue l'existence de la biosphère. Ce rôle de la stratosphère tient à la présence en son sein de la couche principale de l'ozone atmosphérique, écran vital contre le rayonnement ultra-violet et autres rayonnements cosmiques dangereux, destructeurs de la cellule biologique. De ce fait, la stratosphère a été classée comme une zone «à haut risque» pour l'équilibre climatique et de la vie du Globe.

LA CLIMATOLOGIE DE LA STRATOSPHERE

«Milieu aux conditions extrêmes, où le rayonnement extérieur interagit avec la matière diluée, pour créer une multiplicité d'espèces chimiques inédites», «un nouveau monde entre l'air et l'espace» (A. VILLE-VIEILLE, p. 11), c'est ainsi qu'est présentée la stratosphère, un milieu

(¹) *Les Enjeux de la Stratosphère, Actes de la conférence «Journées rologique de France, Paris, 1985, 184 p. Les communications sur lesquelles de la Stratosphère», 17, 18 et 19 octobre 1985, Paris. Edit. Société Météo-on s'est appuyé, indiquées dans le texte par le nom de leur auteur, ont leur référence complète dans la bibliographie à la fin de cette note.*

encore peu connu de l'Homme bien que fréquenté depuis plus de 20 ans par l'aviation militaire, et de plus en plus maintenant, par l'aviation civile à réaction. Des communications présentées, on peut faire le point des idées actuelles et des faits acquis sur le climat de la **stratosphère** dont le rythme et la variabilité sont très différents de ceux de la troposphère.

Tout d'abord, les lois régissant la physique de la troposphère s'appliquent mal à la stratosphère. Le profil vertical des températures est l'inverse de celui de la troposphère. Associées à l'absorption des ultraviolets, les températures de la couche vers 50 km d'altitude, à proximité de la stratopause, sont semblables à celles qu'on connaît au sol, alors qu'à la tropopause, plancher de la stratosphère, elles varient entre -40°C et -80°C .

Les perturbations n'existent pas dans la stratosphère sous la forme nuageuse et pluvieuse. L'écoulement est laminaire mais il peut présenter de puissants mouvements verticaux liés à des ondes de gravité du type de celles qui naissent au passage des échines montagneuses (A. VILLEVIEILLE, p. 18; P. BIKLE, p. 70). Du fait de la sécheresse de l'air, ces mouvements restent invisibles. C'est le phénomène de turbulence en ciel clair redouté des vols stratosphériques (A. TURCAT, p. 80; G. WEISHAUP, p. 86; J. BARAT, p. 117).

Les flux s'organisent autour de grands centres d'action dont les plus remarquables sont les deux tourbillons polaires tournant dans le sens cyclonique en hiver et anticyclonique en été. Aux latitudes moyennes, lors du renversement, il existe une zone intermédiaire entre les flux d'ouest inférieurs et ceux à composante est supérieurs. C'est une région de calmes atmosphériques entre 15 km et 20 km, que A. VILLEVIEILLE (p. 16) compare à la Mer des Sargasses de l'Atlantique. Toutefois, ce sont ici des aérosols variés, en provenance de la troposphère, qui sont piégés en une couche se transformant en nuages nacrés parfaitement immobiles au creux des ondes de gravité.

Des changements saisonniers brutaux de la température existent dans la stratosphère (M. L. CHANIN, p. 130). A la nuit polaire glacée succède au début du printemps un échauffement brutal. Vers 25 km d'altitude, au niveau où la densité d'ozone est maximum, d'un jour à l'autre, au début d'avril, la température peut donner un saut de 40° . En automne, le refoldissement est plus graduel.

On connaît mal la stratosphère tropicale. Les recherches activées à partir de 1970 ont permis l'identification d'un mouvement quasi-biennal des vents (R. G. BARRY, R. J. CHORLEY, 1976; G. DHONNEUR, 1985).

Entre 18 km et 30 km d'altitude, un régime d'est s'installe pour 12 ou 13 mois puis il est remplacé par un flux d'ouest pour une période équivalente. Le renversement de direction commence par le haut et met environ un an à descendre de 30 km à 18 km d'altitude.

La teneur en ozone est faible dans la stratosphère intertropicale et maximum aux hautes latitudes, avec une concentration élevée au début du printemps et basse en automne. Dans l'hémisphère nord, des noyaux de concentration maximum se situent sur le Canada et la

Sibérie par 60° de latitude nord. Dans l'hémisphère sud, le noyau s'étire sur le parallèle 60° S, en bordure de l'antarctide, entre les méridiens 30° E et 150° E (D. CARIOLLE, p. 179) (fig. 1). Une distribution résultant des seuls processus photochimiques liés à l'intensité de la radiation solaire montrerait une région de production maximum d'ozone dans la zone équatoriale et sur sa bordure, du côté de l'hémisphère en été. La distribution observée, très différente, implique des phénomènes d'advection, c'est à dire des transports méridiens de l'ozone des régions de production tropicales vers les régions-réservoirs polaires. L'ozone est

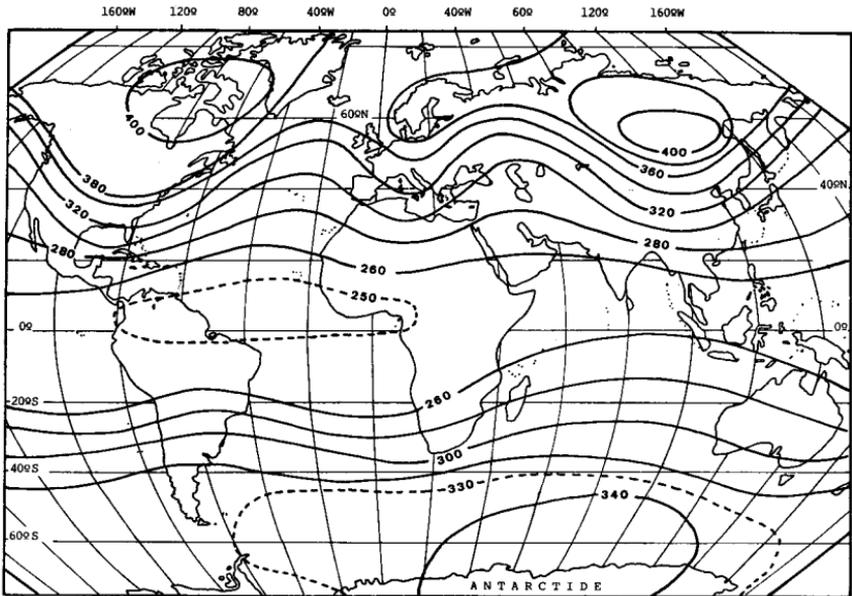


Fig. 1 — Distribution moyenne de l'ozone atmosphérique mesuré par satellite pour le mois de janvier (adapté de M. CARIOLLE, 1985). Remarquer la richesse des régions polaires et, dans l'hémisphère Nord, la localisation des réservoirs au-dessus des continents correspondant à la position moyenne des vallées des grandes ondes planétaires. (Les valeurs numériques des isolignes représentent des unités de concentration).

accumulé dans le tourbillon polaire cyclonique durant tout l'hiver. Le diamètre de ce tourbillon atteint les 3000 km vers 25 000 m d'altitude. La vitesse du vent enregistré à sa périphérie dépasse parfois les 200 km/h. Comme le tourbillon cyclonique polaire de la troposphère supérieure auquel il est connecté, il peut fléchir d'intensité et se lobar en deux ou trois talwegs poussant vers le sud. Ainsi naissent, comme dans la troposphère, des gouttes froides et des «lacs» chauds... (W. M. O., 1965; M. M. YOSHINO, 1969; K. LABITZKE, 1977).

Il manque encore de nombreux maillons dans la chaîne des mécanismes qui régissent le climat de la stratosphère. Tout n'est encore qu'un jeu d'hypothèses qu'il faudra vérifier. Une chose est toutefois certaine: le calme de la structure feuilletée de la stratosphère est un mythe. La stratosphère est un milieu extrêmement dynamique et tout aussi perturbé que la troposphère. Il existe d'ailleurs beaucoup plus d'interactions entre la troposphère et la stratosphère qu'on n'aurait pu le penser. La tropopause n'est pas une frontière étanche, la stratopause non plus. Rappelons que la tropopause polaire se situe vers 6000 m d'altitude et celle des tropiques apparaît entre 16 000 m et 18 000 m. De ce fait, le taux moyen du gradient thermique de la troposphère étant de 6° C pour 1000 m, la température de la tropopause polaire est de l'ordre de -50° C à -60° C au pôle et de -70° C à -80° C à l'équateur. Ce décrochement altitudinal et thermique des deux tropopauses se traduit par une rupture dans le plancher stratosphérique aux latitudes moyennes. Les sondages aérologiques publiés dans les bulletins météorologiques portugais portent souvent l'indication de la présence d'une double tropopause au-dessus de Funchal et de Lisbonne durant la moitié froide de l'année. La fréquence atteint un jour sur deux durant les mois les plus cycloniques. A Lajes, au milieu du bassin atlantique, cette proportion est moindre. Au niveau de la rupture, s'installent de forts courants aériens d'ouest dans l'hémisphère nord: ce sont les jets. L'examen des bandes nuageuses cirriformes soulignant les courants jets sur les images de satellite a confirmé le mouvement hélicoïdal de l'air humide transporté à grande vitesse vers l'ouest. Coupées à l'emporte-pièce sur la bordure nord du jet, les masses nuageuses dénoncent un mouvement subsident de l'air; floues et effilochées du côté sud, elles révèlent un mouvement ascendant. Ainsi ces courants, qui n'appartiennent pas encore à la stratosphère, en constituent les portes au travers desquelles se réalisent les échanges de masse entre la stratosphère et la troposphère. En particulier, pour ce qui nous intéresse ici, les fortes teneurs en ozone de la troposphère sont corrélées aux dépressions et vallées d'altitude et les faibles concentrations aux anticyclones (S. MULLER, F. R. CAYLA et J. P. JULLIEN, p. 155). La corrélation est si grande qu'on envisage déjà d'utiliser la concentration en ozone repérée par satellite comme information complémentaire sur le champ de vent au niveau de la tropopause.

On ne sait pas encore très bien comment s'effectue le transfert d'ozone des sources aux puits dans la stratosphère mais on ne peut pas s'empêcher de remarquer la similitude qui existe avec les transferts méridiens d'énergie et de masse dans le système Terre-troposphère et de faire participer la branche d'altitude de la cellule de Hadley au transport durant la saison fraîche de chaque hémisphère. Le rôle de vecteur que constituent les jets troposphériques proches du plancher de la stratosphère comme de ceux qui apparaissent vers 25 km d'altitude ne doit pas être non plus négligeable (D. G. VINCENT, 1968; E. PALMÉN, C. NEWTON, 1969).

L'OZONE: SON RÔLE DANS LA STRATOSPHERE

Tout d'abord, sa concentration et la température stratosphérique sont étroitement corrélées. L'ozone possède, en effet, une forte absorption dans l'infrarouge vers 10 microns. Or, le rayonnement terrestre est maximum dans cette fenêtre et c'est donc l'effet de serre de l'ozone qui réchauffe la stratosphère (P. JOUVE, p. 133). Ce réchauffement agit à son tour sur les réactions chimiques stratosphériques en facilitant la photodissociation de l'oxygène et de l'ozone lui-même. L'équilibre photochimique de l'ozone est très sensible aux variations de température et de l'activité solaire.

L'ozone possède également une forte absorption dans l'ultra-violet (U. V.) et, par conséquent, il se comporte comme un bouclier empêchant ou plutôt filtrant la pénétration des U. V. dans la troposphère. Les rayons U. V. les plus courts (< 290 nm), les plus nocifs pour les organismes vivants (dits U. V. «B», abiotiques) sont totalement arrêtés par la couche d'ozone, les autres dont le spectre est situé entre 290 nm et 330 nm sont absorbés sélectivement. Les fonctions de ce gaz minoritaire de l'atmosphère sont donc fondamentales, pourtant l'épaisseur de l'écran est bien modeste ramenée à la pression normale. Si l'on comprimait toute l'atmosphère à la pression normale au niveau de la mer, elle se réduirait à une couche de 8000 m d'épaisseur et la couche d'ozone n'en représenterait que 3 mm! (R. G. BARRY, R. J. CHORLEY, 1976, p. 26). Ceci montre combien doit être fragile l'équilibre de cette précieuse pellicule. En fait, la concentration en ozone de la stratosphère, surtout importante vers 20-25 km, n'est pas le seul paramètre à utiliser pour juger de l'efficacité de l'écran; il faut aussi connaître le profil vertical de distribution dès le sol jusque vers 80 km d'altitude, c'est à dire jusqu'au niveau où se dissocient les premières molécules d'oxygène dans la mésosphère.

LA CONTAMINATION DE LA STRATOSPHERE

Puisque la tropopause n'est pas un plancher étanche, toute pollution troposphérique peut atteindre la stratosphère. De la même manière, toute contamination éventuelle de la mésosphère pourra pénétrer dans la stratosphère à travers les brèches de la stratopause. Comme l'Homme colonise chaque jour davantage l'Espace, il faut commencer à poser cette éventualité. Pour l'instant, le danger vient d'en bas. Les inquiétudes surgissent il y a une quinzaine d'années. La couche d'ozone peut-elle être endommagée par les polluants provenant des activités humaines et rejetés de manière indiscriminée dans la troposphère et dans la stratosphère? En cas de réponse affirmative, un danger anthropique constant viendrait s'ajouter à celui plus sporadique des éruptions volcaniques.

1 — *La contamination naturelle par les éruptions volcaniques*

Lors d'une éruption, la force de projection et l'ampleur de la masse de produits rejetés sont telles que le panache, en forme de cumulonimbus, crève la tropopause et peut pénétrer ainsi dans la stratosphère jusqu'à 20 000 m d'altitude. La contamination se traduit d'abord par une forte injection de poussières. Les plus fines s'étalent, entre 15 km et 20 km, dans la zone de calmes qui fonctionne comme un véritable piège. En avril 1982, l'éruption du volcan mexicain El Chichon a fourni une fois de plus la preuve que les aérosols pouvaient rester pendant de longues périodes en suspension dans la stratosphère. Le bulletin n° 6 du Programme Climatologique Mondial publié par l'O. M. M. (1984) fournit des renseignements intéressants sur le mouvement des poussières de El Chichon. En avril 1982, sitôt après l'éruption, et jusqu'en décembre, les aérosols se sont concentrés dans la stratosphère tropicale entre 10° S et 30° N. Tout au long de l'année 1983, la concentration a diminué en zone tropicale pour augmenter aux latitudes moyennes de l'hémisphère Nord; durant l'hiver 1983/84, les poussières occupent toute la zone de calmes jusqu'à 20 km d'altitude et les plus fortes concentrations recouvrent la calotte polaire. Au printemps 1984, les aérosols avaient reflué vers le sud et les mesures *lidar* (procédé laser) les détectaient encore au-dessus des Hawaï. M. L. CHANIN (p. 130), de son côté, précise que les mesures *lidar* ont détecté les poussières de El Chichon pendant 18 mois consécutifs au-dessus de l'Observatoire de Haute Provence. Ce n'est donc qu'en octobre 1983 que la stratosphère a retrouvé son état normal. L'opacité accrue de la stratosphère chargée en aérosols modifie le bilan radiatif dans la couche d'ozone puis de la troposphère. Par ce biais, les éruptions volcaniques ont été maintes fois accusées de provoquer des fluctuations climatiques. Il semble que le plus grand danger pour l'ozone provienne de la grande quantité de produits chlorés libérés brusquement dans la stratosphère et qui attaque la stabilité de l'ozone par catalyse. Le bulletin de l'O. M. M. déjà cité, réfère encore que des modèles tenant compte de la quantité de produits chlorés injectés par El Chichon dans la stratosphère prévoient une diminution de la quantité d'ozone de 2% à 5% au cours de la première année pour revenir lentement à la normale. Les éruptions volcaniques seraient donc nocives pour l'équilibre thermique et chimique de la stratosphère. Heureusement, elles sont sporadiques et ponctuelles, ce qui donne le temps à la stratosphère de retrouver son état normal. Mais qu'en est-il de la pollution anthropique?

2 — *La contamination anthropique*

a. — *Les méfaits des vols stratosphériques.* L'aviation stratosphérique existe il y a plus de 20 ans déjà. Les premiers coupables cités furent donc les moteurs des avions à réaction. Les réacteurs rejettent une grande quantité d'oxydes d'azote dans la basse stratosphère, qui peut migrer vers le haut à la faveur d'ondes, et attaquer la couche de

plus grande concentration en ozone, entre 20 km et 25 km d'altitude. H. JOHNSTON (1971), un des premiers à dénoncer ces méfaits, avait prédit une réduction de 10 % de l'épaisseur de la couche d'ozone par les seules conséquences d'une période de 10 ans d'utilisation de l'aviation supersonique. Ce qui se traduirait par une perte considérable de l'efficacité de l'écran. En 1974, pour vérifier l'hypothèse fut constitué un groupe d'étude international (U. S. A., Grande Bretagne et France). Les études théoriques portèrent sur les rejets d'oxydes d'azote d'une flotte de 200 avions supersoniques de la dimension du Concorde. Les conclusions confirmèrent la «possibilité» pour certaines activités humaines de perturber l'équilibre de l'ozonosphère par injection répété de polluants divers mais, en ce qui concerne les réacteurs d'avion, les valeurs obtenues restaient au-dessous du seuil de nocivité et même de sensibilité des instruments de mesure. Les années suivantes, d'autres rapports venaient rassurer l'opinion publique. «En raffinant sur la connaissance des vitesses de réaction de certains composants, on en arriva même à trouver que l'aviation stratosphérique... et Concorde, produisaient de l'ozone» (A. VILLEVIELLE, p. 25). Aux dernières nouvelles, les rapports sont moins optimistes. Une part de l'ozone serait réellement détruite, mais ce risque n'a été classé que comme «potentiel». La communication de N. NICOLET va dans ce sens puisqu'il assure que le monoxyde d'azote rejeté en excès dans la basse stratosphère «conduit plutôt à» une production d'ozone tandis que plus haut au-dessus de 25 km d'altitude, il provoquerait la destruction, tout dépendrait de la chaîne de réactions chimiques avec les autres constituants minoritaires présents au même moment dans la stratosphère.

b — *Les polluants agricoles et industriels.* D'intérêt économique et stratégique évidents, personne ne peut remettre en cause l'aviation stratosphérique et, ses méfaits, même s'ils sont quantifiables, ont été mis en sourdine. L'opinion publique a été invitée à regarder plus bas et à trouver d'autres coupables. Vers 1974, les soupçons se tournèrent alors vers d'autres oxydes d'azote, troposphériques cette fois, résultant de l'utilisation croissante des engrais azotés, et vers la production industrielle des halocarbones.

L'augmentation des aires cultivées et l'utilisation croissante des engrais azotés ont provoqué une hausse de la charge atmosphérique en protoxyde d'azote, gaz chimiquement presque inactif, c'est à dire quasi indestructible. Il envahit peu à peu la troposphère et il passe dans la stratosphère par les brèches de la tropopause (jets, fortes dépressions...). N. NICOLET (p. 112) affirme que, «comme le contenu total de l'atmosphère en hémioxyde d'azote est d'environ 1,5 Gigatonnes, et que la quantité produite annuellement est de 10 à 15 Mégatonnes, il faudra moins de 100 ans pour arriver à un tel total, ce qui est de l'ordre de grandeur de la vie de l'hémioxyde d'azote dans le champ de radiation du soleil dans la stratosphère. Ainsi, l'équilibre stratosphérique pourrait être perturbé si la fixation industrielle de l'azote (nitrate du sol) augmentait au-delà de certaines limites».

Le cas des halocarbones et composés halogènes est semblable. Les composés halogènes introduits par les effets du chlore ont été repérés pour la première fois dans la stratosphère, il y a une dizaine d'années. Leur réaction avec l'ozone provoque à coup sûr sa destruction. Tous les travaux sont clairs sur le sujet. Le tétrachlorure de carbone et ses dérivés, les halocarbones, sont produits industriellement en grande quantité. D'utilisation courante comme décapants partout dans le monde, ils ne sont pas toujours récupérés. Ils peuvent engendrer des conséquences très diverses mais toujours négatives. En citant encore M. NICOLET (p. 114), il faut savoir que «le chlorure de méthylène, le chlorofluorométhane et le dichlorométhane ont des durées de vie troposphérique respectives de 1, 2 et 4 ans... Leur pénétration dans la stratosphère est liée à cette durée de vie troposphérique. Les halocarbones qui ne sont pas détruits complètement dans la troposphère par leur réaction avec l'hydroxyle, passent dans la stratosphère où ils sont photodissociés par la radiation solaire pénétrante du domaine spectral situé aux environs de 200 nm comm dans le cas de l'hémioxyde d'azote... Néanmoins, on peut conclure que l'action du chlore sur le comportement de l'ozone dépend des limites imposées ou acceptées de la production industrielle des halocarbones...». Conclusion qui laisse entendre que la résolution du problème est dans la main de l'Homme. Les estimations de réduction de l'ozone au taux d'émission d'halocarbones industriels de 1974 dépassaient déjà les 10 % d'après R. MOLINA et S. ROWLAND (1974). Depuis lors, comme pour les oxydes d'azote produits par les avions, les valeurs ont été de plus en plus minimisées au point de descendre au-dessous du seuil de détectabilité. Les modèles les plus récents, postérieurs à 1980, déjà très affinés, ont conclu que les émissions d'halocarbones industriels lancés pendant la décennie de 1970 devraient avoir comme conséquence une diminution de 5 à 10 % des concentrations d'ozone entre 30 km et 45 km d'altitude vers la fin des années 80 (P. JOUVE, p. 134). La gravité du problème a finalement été reconnue et dans la plupart des pays industrialisés, des mesures ont été prises pour limiter les émissions d'halocarbones.

c — ...*et les explosions nucléaires?* Au cours de la conférence, le sujet a été effleuré par A. VILLEVIELLE. Outre l'émission radioactive, une explosion nucléaire au sol agit à la manière d'une éruption volcanique. Une «petite» bombe de la taille de celle d'Hiroshima (12 kilotonnes en équivalent TNT) a une force suffisante pour former un bulbe nuageux qui transperce le plafond troposphérique. Vapeur, poussières, matières radioactives viennent échouer dans cette zone de calmes dont on a déjà parlé ultérieurement. Comme les particules les plus fines sont de taille micronique, elles retombent à des vitesses si petites qu'elles restent dans la stratosphère pendant des mois, voire des années. Ces nouveaux constituants en circulation dans la stratosphère entrent sans aucun doute en réaction avec l'ozone. En l'absence de renseignements précis, on en est réduit aux scénarios théoriques. A. VILLEVIELLE (p. 27) pose

celui d'une guerre nucléaire totale. Il ne s'agit plus de l'explosion ponctuelle d'une bombe de quelques kilotonnes mais de 10 000 mégatonnes échangés sur une surface d'un million de kilomètres carrés. La masse énorme de poussières, de fumées et de suie résultant des incendies provoqués par les explosions s'étendraient à toute l'épaisseur de la troposphère et 30 % passeraient dans la stratosphère. L'opacité du ciel serait telle que le rayonnement solaire ne pourrait plus atteindre que faiblement le sol pendant des mois. La chute de température serait brutale au sol (on parle d'une baisse de 20°) et provoquerait l'effondrement de la stratosphère: «l'hiver nucléaire» commencerait...

Reste à envisager le cas d'explosions nucléaires à très haute altitude, à partir de l'espace. C'est le scénario de la «guerre des étoiles». La stratosphère serait polluée par le dessus et la stratopause ne fournit aucun plafond efficace. Une telle explosion nucléaire émet des rayons gamma qui atteignent la stratosphère en une fraction de seconde et à l'altitude 20-40 km où se concentre l'ozone, ils agissent en arrachant des électrons aux molécules d'air. Inutile de poser le problème du devenir de l'écran d'ozone dans un cas aussi extrême. Les conséquences ne s'arrêtent pas là. Entrant en connection avec le champ magnétique terrestre, les électrons provoquent une impulsion électromagnétique telle qu'elle pourrait engendrer de fortes perturbations acoustiques et électriques qui mettraient hors de service, en quelques minutes, une grande partie des équipements de télécommunication en fonctionnement sur l'ensemble du Globe, y compris les lignes de haute tension, les avions... Arrivé à ce point, au terme de ce que A. VILLEVIEILLE qualifie de «scénarios de l'impossible», le sort de la couche d'ozone devient un problème secondaire puisqu'il n'y aurait plus rien à protéger.

Restons hors de ces hypothèses terrifiantes sans oublier toutefois que les essais nucléaires ponctuels sont une réalité et qu'il ne faut certainement pas minimiser leur impact sur la troposphère et la stratosphère. La revue *Science & Vie* dans son numéro de septembre 1986 (p. 35) avance quelques chiffres sur le nombre d'explosions (connues) effectuées par quelques grandes puissances nucléaires. Depuis 1951, dans le périmètre du Centre d'essais nucléaires du Nevada (U. S. A.), 750 bombes environs auraient déjà explosé, leur puissance variant de 1 à 1300 kilotonnes. Depuis 1963, l'U. R. S. S. en aurait fait exploser 400 dans le Kazakhstan, et la France 85 rien que dans le désert du Sahara.

LES DANGERS QUI NOUS GUETTENT

L'ozone se forme et se dissocie en un équilibre fragile. Par ce qui vient d'être présenté, on prend conscience que le danger de destruction de l'ozone par les produits de l'activité humaine est réel. Sans aucun doute, des effets nocifs ont déjà fait leur œuvre puisque, finalement, des mesures ont été prises pour limiter la production de certains produits chimiques. Quelles sont les conséquences de la destruction de l'ozone atmosphérique ?

1 — *Les conséquences biologiques*

C'est évidemment à elles qu'on pense en premier lieu. La communication de R. LATARJET et J. CHAUDAUDRA (p. 29-34) permet de faire le point sur la question. Le rayonnement U. V. filtré parvenant au sol est nécessaire puisqu'il conditionne un certain nombre d'effets biologiques. Par contre, les émissions les plus courtes du spectre U. V. ont une action nocive sur les acides nucléiques entraînant des mutations, des croissances désordonnées, voire la mort cellulaire. Les longueurs d'ondes du spectre solaire les plus absorbées par les acides nucléiques et les protéines sont celles qui sont les plus sensibles aux variations du taux d'ozone atmosphérique, soit celles situées entre 290 nm et 320 nm. La figure 2 résume les effets biologiques les plus importants du rayonnement ultraviolet. La zone soulignée en grisé correspond au spectre de radiation U. V. qui ne parvient pas au sol dans les conditions d'abri actuel fourni par l'écran d'ozone.

Même en considérant l'hypothèse la plus optimiste, c'est-à-dire celle d'une réduction de la concentration de l'ozone de quelques pour cent seulement, les conséquences biologiques sont déjà graves. C'est R. LATARJET qui l'affirme. Voix digne de crédit puisqu'il fut l'un des premiers, il y a 50 ans (1935), à établir une relation quantitative entre les variations de l'ozone atmosphérique et l'effet de «coup de soleil» (appelé encore érythémal) sur la peau de l'homme blanc. La dose érythémal et cancérogène des U. V. dépend bien sûr de l'intensité de la radiation solaire donc du lieu (latitude, altitude) et de la saison. Les dangers sont maximaux sous les tropiques, nuls aux pôles, et croissent de l'hiver à l'été sous nos latitudes. Selon R. LATARJET *et al.* (p. 33) pour les latitudes moyennes, une diminution de l'ozone de 5 % doit entraîner un accroissement de la dose cancérogène de l'ordre de 10 %. Ce qui montre que toute réduction d'une fraction d'ozone doit se traduire par une augmentation d'une fraction double de taux de cancers cutanés.

L'effet abiotique des U. V. «B» sur les micro-organismes est encore difficile à évaluer car on connaît mal les facteurs d'équilibre des populations. On peut supposer que si l'équilibre actuel était rompu, la conservation de la vie terrestre et marine serait difficile à maintenir puisque c'est la chaîne alimentaire elle-même qui serait coupée à la base. Plus de 30 % de la productivité annuelle de la biomasse du Globe provient des océans qui représentent 71 % de la surface de la Planète et les U. V. ont un effet inhibiteur sur la photosynthèse. Là encore, les estimations des conséquences d'une variation de l'épaisseur de la couche d'ozone sont difficiles à établir et le degré de danger est différent selon la région en fonction de l'abondance végétale. R. LATARJET suppose que la réponse de la biosphère se traduirait par une nouvelle sélection génétique pour les végétaux supérieurs, une nécessité de réorganisation complète des zones de cultures et par la recherche d'une adaptation des végétaux aquatiques où entreraient des déplacements régionaux et probablement une migration vers les grandes profondeurs.

spectres d'action

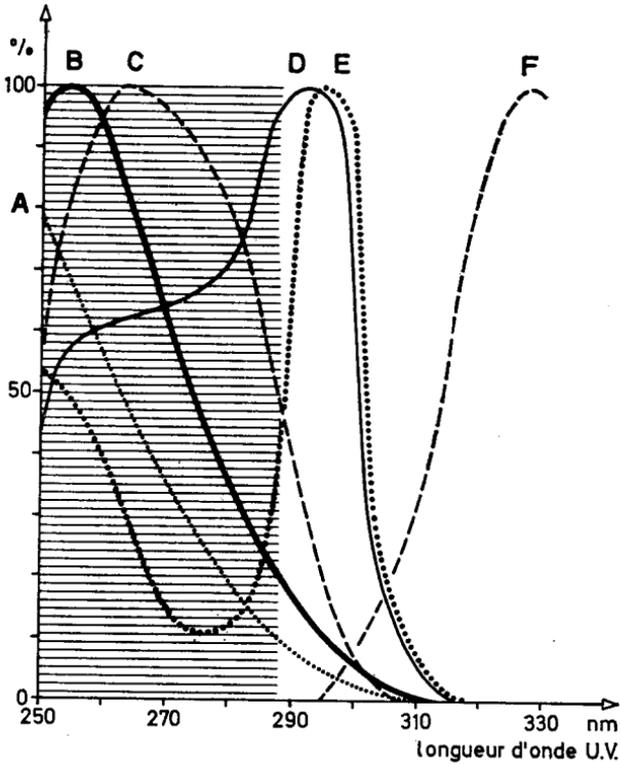


Fig. 2 — Variation de l'efficacité biologique (en %) des différentes longueurs d'onde du spectre ultra-violet (d'après divers auteurs, in R. LATARJET *et al.*, 1985). Légende: A, effet inflammatoire sur l'œil (conjonctivite); B, effet létal et mutagène sur les micro-organismes; C, inhibition de la croissance photosynthétique des micro-organismes; D, effet antirachitique; E, effet érythémal et cancérogène (les 2 spectres d'action sont si proches l'un de l'autre qu'ils ont été confondus); F, pigmentation de la peau (chez l'homme blanc). En grisé a été représentée la partie du spectre U. V. intégralement coupée par l'écran d'ozone stratosphérique.

2 — Les conséquences climatiques

Elles ne peuvent pas être séparées des conséquences biologiques et le problème est très complexe car il contient de nombreuses inconnues. Nous savons peu de choses sur le fonctionnement de la stratosphère. Les hypothèses doivent être confirmées. Encore peu d'études ont été

entreprises sur les mécanismes du système couplé stratosphère-troposphère. Quel est, par exemple, le type de réponse de la stratosphère à une perturbation en son sein (S. FELS *et al.*, 1980)? De même, comment réagit la troposphère à une perturbation de la stratosphère (V. RAMANATHAN, 1977)? Bref, quels sont les phénomènes de rétroactions qui déterminent l'équilibre climatique du système couplé? Il faut s'attendre à une réponse quasi-immédiate dans la stratosphère puisque l'ozone est le facteur principal de son équilibre thermique. La stratosphère devrait se refroidir. Cette réponse sera-t-elle régionale ou globale? Est-ce que ce sera l'effondrement de la stratosphère, la destruction de la tropopause? Qu'advient-il alors des mouvements cellulaires de l'air dans la troposphère, des jets? Sans aller aussi loin dans cette vision de l'apocalypse, une mobilité importante des zones de végétation, à elle seule, entraînerait un changement climatique drastique avec l'altération de l'albédo et de la disposition des régions-sources de vapeur d'eau des continents. D'ailleurs, le cycle de l'eau serait-il encore entretenu? A coup sûr, une variation importante de l'épaisseur de la couche d'ozone atmosphérique serait la fin de la vie sur la Terre. L'importance vitale de l'écran a été comprise très tard. Espérons qu'elle n'ait pas été comprise trop tard. Elle appelle une surveillance aussi continue et précise que possible.

LA SURVEILLANCE DE LA COUCHE D'OZONE

Au long de l'exposé, on a cité des évaluations de risques élaborés ou acceptés par les divers auteurs et on peut rester étonné par leur manque de précision et leur fluctuation. Pour un même jeu de données, les changements dans l'épaisseur de la couche d'ozone peuvent être évalués à plus de 10 % ou devenir indétectables. Cette indéfinition révèle les différentes facettes du problème. Tout d'abord, si les dangers de la pollution anthropique sur l'équilibre thermique et chimique de la stratosphère sont maintenant admis, des intérêts économiques puissants sont en jeu et une reconversion des méthodes de fabrication n'est pas réalisable du jour au lendemain. Ensuite, elle souligne la difficulté technique de détecter une variation dans la concentration des constituants minoritaires de l'atmosphère. Malgré tous les progrès technologiques actuels dans les moyens d'observation directs ou par télé-détection, dans les méthodes de quantification, malgré les modèles les plus sophistiqués, le seuil de détection d'une variation n'est pas inférieur à quelques pour cent. Ce qui est encore trop grossier si l'on prend en compte les dangers que représente toute réduction d'une fraction d'ozone. Elle souligne, enfin, notre difficulté à appréhender le climat de la stratosphère d'une manière intégrée. L'idéal serait de pouvoir prédire le comportement de la couche d'ozone avec assez d'avance pour que des mesures puissent être prises par les entités responsables. De gros efforts ont été faits dans ce sens depuis une dizaine d'années: effort législatif et d'information; effort dans la recherche de la dynamique de la stratosphère, de modélisation, de surveillance en continu de l'ozonosphère.

Au sol, la surveillance est assurée par un réseau mondial de 90 stations spectrométriques installées dans les années 70. Il a été complété en 1983 par un réseau de 7 stations utilisant le faisceau laser. Sur cette centaine de stations, 90 se situent dans l'hémisphère nord, surtout aux latitudes moyennes de l'Amérique du Nord, de l'Europe (dont une portugaise) et de l'Asie. Celles d'Islande, du Grand Nord canadien et de Sibérie surveillent le grand tourbillon polaire boréal. L'hémisphère sud, essentiellement marin, n'est que très faiblement contrôlé en continu: 3 stations en Australie, 2 en Amérique du Sud, aucune sur l'Afrique australe, aucune sur l'Antarctique. Les sondages sur ballons réalisés avec régularité dans beaucoup de ces stations ont apporté une aide précieuse. C'est que la couche d'ozone dépend très fortement de tout un cortège d'espèces chimiques de la stratosphère (N. NICOLET, p. 115). C'est justement dans cette dépendance que résident les inquiétudes sur la stabilité de l'ozone. Aussi faut-il multiplier les mesures sur des éléments qui n'existent qu'à l'état de trace. A Aire sur Adour, par exemple, grand centre de recherches stratosphériques, on mesure NO, H₂O, CH₄, HNO₃, C₁₀, HCL, CO, OH dont les profils verticaux de distribution étaient tout à fait inconnus avant 1973 (A. GIRARD, p. 145). Les instruments sont embarqués à bord d'énormes ballons (500 000 m³) qui atteignent les 40 km d'altitude. C'est sur ces précieuses mesures qu'est diagnostiquée la santé de l'ozone. Ponctuelles cependant, elles ne suffisent plus. De plus en plus, ce sont les satellites météorologiques qui effectuent la relève dans cette fonction de vigilance, avec des mesures homogènes dans l'infrarouge (satellites des séries NOAA et NIMBUS). Le suivi satellitaire permet de replacer la distribution de l'ozone dans son contexte climatique aussi bien à l'échelle planétaire que régionale et synoptique, avec une finesse jamais atteinte auparavant. Ce sont d'ailleurs les satellites qui ont repéré, les premiers, ce «trou» dans l'ozone au-dessus de l'Antarctide.

QUE DOIT-ON PENSER DE L'ANOMALIE AU-DESSUS DE L'ANTARCTIDE?

D'après les quelques informations contenues dans la nouvelle du 31 juillet, il ne faisait déjà aucun doute que le «réservoir» polaire d'ozone de l'hémisphère sud avait de sérieux problèmes de fonctionnement. Des informations supplémentaires publiées depuis, dans le numéro d'octobre de la revue française *Science & Vie*, permettent d'en savoir plus.

En mars 1985, quand les chercheurs anglais ont divulgué leurs soupçons, personne ne leur aurait prêté attention car les américains n'avaient pas confirmé leurs conclusions. La distribution d'ozone donnée par les ordinateurs de la NASA soulignait bien une diminution de concentration au-dessus de l'Antarctide mais celle-ci était si excessive que, faute de la croire possible, les chercheurs en avaient conclu à une erreur du modèle utilisé. On doit à des biologistes la reconnaissance de la thèse anglaise après consultation des archives satellitaires depuis 1979. Le «trou» serait localisé au-dessus du pôle, entre 16 km et 25 km d'altitude. C'est donc bien la zone de plus grande concentration d'ozone qui est

affectée. L'anomalie présenterait un rythme saisonnier puisque, marquée à la fin de l'hiver, elle s'estomperait en automne. En début de printemps austral, les concentrations moyennes d'octobre, calculées entre 1979 et 1985 (fig. 3), montrent clairement non seulement que l'anomalie se préfigurait déjà en 1979 mais aussi qu'elle augmente d'année en année à un rythme alarmant, en affectant de plus en plus le réservoir antarctique. Beaucoup de questions surgissent.

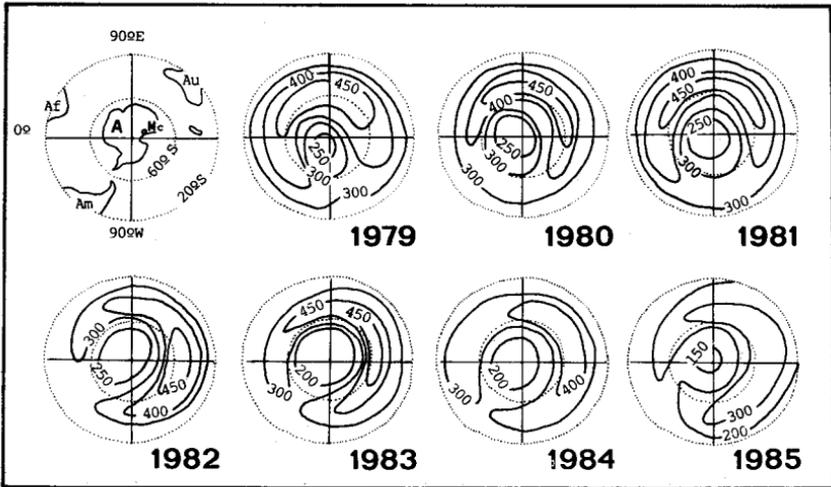


Fig. 3 — L'évolution du «trou» dans la couche d'ozone antarctique estimée à partir de la concentration moyenne d'octobre (adapté des travaux de M. R. SCHOEBERL et A. J. KRUEGER cités dans *Science & Vie*, 1986, n.° 829, p. 104). Les valeurs numériques sont les mêmes unités de concentration que sur la figure 2. A, Antarctide; Mc, McMurdo; Au, Australie; Af, Afrique; Am, Amérique du Sud.

Quelle est la cause du phénomène?

a — Est-elle liée à la dynamique de la stratosphère dont on ne possède qu'un échaffaudage d'hypothèses? En particulier, le transport méridien stratosphérique de l'ozone qui est, semble-t-il, une acquisition définitive, peut-il connaître des défaillances? S'il est connecté au fonctionnement de la cellule de Hadley troposphérique, celui-ci est très déficient dans l'hémisphère sud depuis de nombreuses années (début des années 1970) avec de rares répités (l'année 1979 en particulier en est un). Mais alors, pourquoi les effets ne se feraient-ils sentir que maintenant? L'anomalie, antérieure à 1979, serait-elle restée inaperçue ou y a-t-il eu, d'année en année, une déficience cumulative de l'ozone dans l'hémisphère sud? Le fait est que la base de la reconstitution annuelle du réservoir polaire d'ozone dans les conditions actuelles doit être revue. Également, l'oscillation biennale de la stratosphère tropicale ne paraît pas la régir.

b — est-elle liée aux effets d'une contamination? de quel type? Y a-t-il eu une activité volcanique particulièrement forte ces dernières années dans l'hémisphère sud? C'est une hypothèse à étudier. Les résultats des récents travaux du *Scientific Committee on Solar-Terrestrial Physics* publiés à l'issue du symposium de Kyoto (Japon) en novembre 1984 invitent à chercher dans cette direction (S. KATO, 1985). Depuis 1970, la stratosphère polaire est caractérisée par une grande instabilité thermique et la tendance générale actuelle est au refroidissement, surtout entre les niveaux 100 et 10 hectopascals. La cause la plus régulièrement évoquée est l'accroissement de la charge stratosphérique en aérosols après les grandes explosions volcaniques de l'Agung, de El Chichon et du Mont St Hélène, qui ne serait pas encore entièrement résorbée. Non seulement aurait diminué la température stratosphérique de l'Antarctique mais aussi de l'Arctique. Le réchauffement polaire boréal aurait lieu actuellement en février et non en janvier comme au début des années 1970 et, de ce fait, la concentration en ozone aurait également tendance à diminuer au-dessus de l'Arctique sans toutefois atteindre l'ampleur du phénomène antarctique. Cette charge anormale en aérosols volcaniques accrue d'effets cumulatifs croissants des polluants industriels est une autre voie de recherches. La pollution agricole et industrielle de l'hémisphère sud ne constitue pas encore un problème sérieux. Par contre, en faisant intervenir les courants transéquatoriaux, un danger certain viendrait de l'émission croissante de CO₂ et d'halocarbones dans les pays industrialisés de l'hémisphère nord... Est-il permis de poser l'hypothèse de l'un de ces «scénarios de l'impossible»? Est-ce le résultat de tout cela à la fois?

Quelles pourront être les conséquences?

Comme nous n'avons jamais été confrontés avec le problème, nous allons les apprendre à nos dépens. Tout d'abord, est-ce un accident passager de la couche d'ozone qui restera localisé en région polaire australe? Y a-t-il un moyen de «raccomoder» ce trou avant qu'il devienne trop important? Il avait déjà près d'un million de kilomètres carrés en 1985! Est-ce un dommage permanent qui va se propager? Bref, pendant combien de temps sera-t-on soumis à une dose maximum d'U. V. et d'autres rayonnements dangereux? Les conséquences ne peuvent pas être examinées sans connaître ces prémisses. Sans entrer trop dans la fiction, on pourrait aussi essayer de dresser quelques scénarios possibles.

Voyons la version optimiste. C'est la région antarctique qui est affectée. Or, les pôles, de par leur position, ne reçoivent que des quantités minimales d'U. V. dangereux. Terres glacées, sans occupation humaine permanente significative, sans biosphère terrestre, les risques biologiques sont donc très réduits sur le continent lui-même. Cette prévision repose sur la reconnaissance d'une baisse de l'efficacité de l'écran par les effets de l'activité humaine mais qui sait si, en fin de compte, l'anomalie découverte seulement maintenant n'est pas dans l'ordre naturel des

choses? Les préoccupations ne reflèteraient que la mauvaise conscience des Hommes et l'ignorance du fonctionnement de la stratosphère.

Le revers de la médaille est moins rassurant surtout si le «trou» continue à grandir au rythme actuel. La zone périantarctique, bientôt affectée, déjà plus sujette à recevoir la radiation solaire, est une région marine encore peu connue du point de vue de l'océanographie physique mais elle est réputée pour sa richesse biologique. Au long de fronts océaniques, soulignant la bordure externe du courant périantarctique, pullule de krill, ou essaims de petites crevettes, qui s'alimentent d'un phytoplancton particulièrement abondant (D. SAHRHAGE, 1984). C'est une niche écologique privilégiée pour des poissons de toutes espèces et de nombreux mammifères, la plupart d'entre eux migrants. Qu'advient-il de ces prairies de la mer et de toute la faune qui en vit? Quel sera l'effet sur les pêcheries traditionnelles de l'Afrique du Sud et de l'Argentine, et, d'une manière générale, sur tout l'écosystème de l'hémisphère marin?

Côté climat, on ignore encore beaucoup de choses sur le système climatique de l'Antarctique, sur le mouvement des glaces dans le courant périantarctique et leur rôle sur l'équilibre du Climat du Globe; les conséquences sont imprévisibles si l'anomalie persiste en s'agrandissant puisque une fonte des glaces de l'inlandsis est une hypothèse ultime à poser quoique encore lointaine.

Comment finira cette histoire?...

DENISE DE BRUM FERREIRA

BIBLIOGRAPHIE

Actes de la Conférence «Journées de la Stratosphère», Paris, 17, 18, 19 octobre 1985.

Communications citées dans le texte:

- BARAT, J. — «Le sondage différentiel dans la stratosphère», p. 175-178.
 CARIOLLE, D. — «La modélisation de la stratosphère: photochimie et dynamique», p. 179-183.
 CHANIN, M. L. — «Le sondage de la stratosphère par *lidar*», p. 128-132.
 CROCHET, M. — «Observations de la dynamique stratosphérique par radar TS», p. 169-174.
 GIRARD, A. — «Mesures satellitaires de constituants stratosphériques à l'état de trace», p. 144-152.
 JOUVE, P. — «Surveillance de la couche d'ozone stratosphérique par des moyens optiques», p. 133-136.
 LATARJET, R.; CHAVALAUDRA, J. — «Stratosphère et biosphère», p. 29-34.
 MULLER, S.; CAYLA, F.; JULLIEN, J. — «Mesures satellitaires de l'ozone et dynamique de l'atmosphère», p. 153-159.
 NICOLET, M. — «Introduction à l'aéronomie de la stratosphère», p. 103-117.
 TURCAT, A. — «Les vols stratosphériques de Concorde», p. 78-82.

- VILLEVIEILLE, A. — «La stratosphère: un Nouveau Monde entre l'Air et l'Espace», p. 11-28.
- WEISHAUP, G. — «Le transport stratosphérique», p. 83-88.

Autres documents consultés:

- BARRY, R. G.; CHORLEY, R. J. — *Atmosphere, Weather and Climate*, Methuen Edit., 1976.
- DHONNEUR, G. — *Traité de Météorologie Tropicale*, Météo. Nat. Edit., Paris, 1985.
- DORIZE, L. — «L'oscillation pluviométrique récente sur le bassin du lac Tchad», *Rev. Geog. Phys. Geol. Dyn.*, 1974, Vol. XVI, p. 393-420.
- «L'oscillation climatique actuelle au Sahara», *Rev. geog. Phys. Geol. Dyn.*, 1976, Vol. XVIII, p. 217-228.
- FELS, S.; MAHLMAN, J. D.; SCHWARTZKOPF, D.; SINCLAIR, R. — «Stratospheric sensitivity to perturbations in ozone and carbone dioxide: radiative and dynamical response», *J. Atm. Sc.*, 1980, Vol. 37, p. 2265-2297.
- HOLTON, J. R. — «Stratospheric Dynamics», *An Introduction to Dynamic Meteorology*, Academic Press, 1979, p. 295-322.
- KATO, S. (édit.) — *Middle Atmosphere Program*, Handbook for M. A. P., ICSU/SOSTEP, Japan, 1985, Vol. 18.
- KRAUS, E. B. — «Subtropical droughts and cross-equatorial energy transport», *Mon. Wea. Rev.*, 1977, Vol. 105, p. 1009-1018.
- LABITZKE, K. — «Interannual variability of the winter stratosphere in the Northern Hemisphere», *Mon. Wea. Rev.*, 1977, Vol. 105, p. 762-770.
- MESSADIE, G. — «Alerte au trou d'ozone sur l'Antarctique», *Science & Vie*, 1986, n° 829, p. 104-105.
- MOLINA, M. J.; ROWLAND, F. S. — «Stratospheric sink for chlorofluoromethane: Chlorine atom-catalysed destruction of ozone», *Nature*, 1974, Vol. 249, n° 810, p. 810-812.
- PALMÉN, E.; NEWTON, C. — *Atmospheric Circulation Systems*, Academic Press, 1969.
- RAMANATHAN, V. — «Troposphere-stratosphere feedback mechanisms: stratosphere warming and its effect on the polar energy budget and the tropospheric circulation», *J. Atm. Sc.*, 1977, Vol. 34, p. 439-447.
- SAHRHAGE, D. — «Biomass — FIBEX — SIBEX, Internationale Zusammenarbeit zur Erforschung der lebenden Meeresschätze der Antarktis», *Geowissenschaften in unserer Zeit*, 1984, Vol. 2, p. 109-116.
- VINCENT, D. G. — «Mean meridional circulation in the Northern Hemisphere lower stratosphere during 1964 and 1965», *Quart. J. Royal Met. Soc.*, 1968, Vol. 94, p. 333-349.
- YOSHINO, M. M. — «Maps of monthly mean absolute topography of the 50 mb level in the Northern Hemisphere», *Climatological Notes*, 1969, n° 4, p. 1-120.
- W. M. O. — *Circulation in the stratosphere, mesosphere and lower thermosphere*, Technical Notes n° 70, Genève, 1965.