

# Le trou d'ozone de l'Antarctique

par Christian Muller\*

### Abstract

We review the measurements of the springtime Antarctic ozone decrease and the theories which have been proposed in order to explain the observations.

### Résumé

Depuis environ 1980, on observe chaque année une décroissance importante de la quantité d'ozone au dessus de l'Antarctique au retour du soleil, vers le mois d'octobre, avec un minimum absolu en 1987. Ce phénomène, appelé «trou d'ozone», pourrait être lié à des modifications de la composition atmosphérique et en particulier à l'augmentation du chlore due à l'injection de dérivés fluorocarbonés dans l'atmosphère. Les observations sont présentées de même que les aspects dynamiques et chimiques, ainsi que les possibilités de vérifications des théories avancées.

### Historique : 30 années de présence scientifique en Antarctique.

Les premières explorations de l'Antarctique s'étaient limitées à des circumnavigations et à quelques raids nécessairement accompagnés d'hivernages où les Belges se sont illustrés, notamment par les voyages de la Belgica en 1897-1899 (figure 1). Dès le début, cependant, l'intention scientifique était présente: observations des aurores polaires, des nuages noctilucents, des nuages nacrés et relevés météorologiques au sol. Le caractère particulier du comportement de l'atmosphère polaire devait amener les promoteurs de l'Année Géophysique Internationale à donner la priorité à des programmes de mesure permanente à partir de stations arctiques et antarctiques. L'insistance du Professeur Nicolet, à l'époque secrétaire général de l'Année Géophysique Internationale, devait amener à inclure la mesure de l'ozone dans ce programme contre l'avis d'une partie de la communauté météorologique opérationnelle. De plus, la signature du traité de l'Antarctique réservait tout le continent à la science. Les quatre grandes puissances ainsi que le Japon, la Belgique et les grands pays de l'hémisphère Sud décidèrent d'installer alors un réseau de bases coordonnées pour l'étude du continent et notamment pour des recherches météorologiques dont l'étude de l'ozone.

La carte de l'Antarctique (figure 2) montre la disposition des stations: les stations du British Antarctic Survey à Halley Bay et à Faraday mesurent depuis 1957 la quantité totale d'ozone par le spectrophotomètre Dobson (voir encadré et figure 3), de même que les stations américaines de Mc Murdo et du Pôle Sud; la station japonaise de Syowa a com-

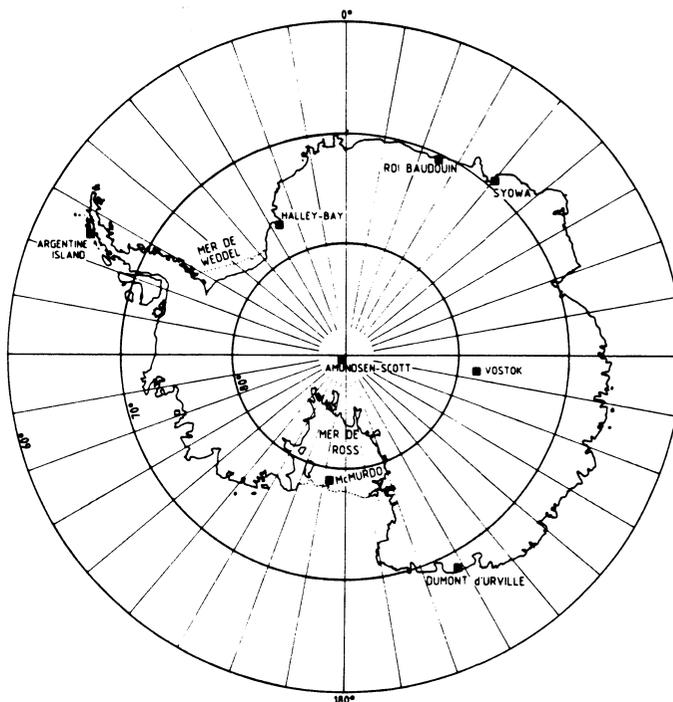


Figure 1: La Belgica photographiée à la lumière du clair de Lune lors de son hivernage en 1898.

mencé les observations Dobson vers 1966, tandis que des mesures ont été effectuées à la base Roi Baudouin lors de la campagne belgo-néerlandaise de 1965-1966. Ces dernières observations, effectuées par des météorologues du Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, sont représentatives de la situation des années soixante en Antarctique, on y voit une stabilité de l'ozone en octobre suivie par un pic au début novembre. L'explication de ce pic par des processus dynamiques prend d'ailleurs la

plus grande partie de la publication. Ces valeurs faibles d'octobre sont inférieures aux observations printanières effectuées dans l'hémisphère Nord à la station du Spitzberg et préfigurent les conditions du trou d'ozone, ce résultat avait déjà été observé précédemment à Halley Bay en 1957 et noté par Dobson lui-même. La réinterprétation de toutes les données antérieures à 1980 serait d'ailleurs absolument nécessaire pour comprendre l'apparition du trou observé actuellement.

Figure 2: Carte de l'Antarctique montrant les principales stations scientifiques. Les bases de Halley Bay, Syowa et McMurdo sont indiquées.



(\*) Institut d' Aéronomie Spatiale de Belgique.

Les observations françaises et soviétiques ont malheureusement été effectuées au moyen d'instruments non-standards ou expérimentaux et sont difficilement comparables avec les résultats Dobson; là encore, des données brutes sont encore disponibles et pourraient être retraitées en utilisant les connaissances modernes de la spectroscopie de l'ozone et des propriétés radiatives des aérosols antarctiques (voir encadré).

### La découverte du trou d'ozone

La mesure de l'ozone en Antarctique est particulièrement difficile en raison de la faible hauteur du soleil, de la nuit polaire et des conditions météorologiques souvent extrêmes. Les observateurs de Syowa et des stations britanniques ont pu, au cours des années, développer leurs techniques de manière à mesurer même par soleil très bas ou en utilisant la Lune comme source. Les mesures effectuées à Halley Bay et à Syowa (respectivement 76 et 69 degrés Sud) montrent une relative stabilité de l'ozone jusque vers 1976, suivie ensuite d'une décroissance des valeurs moyennes d'octobre d'une année à l'autre (figure 4) pour atteindre un minimum en 1985 et 1987.

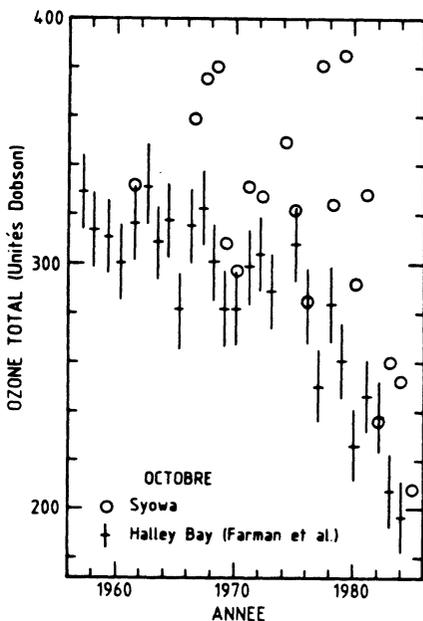


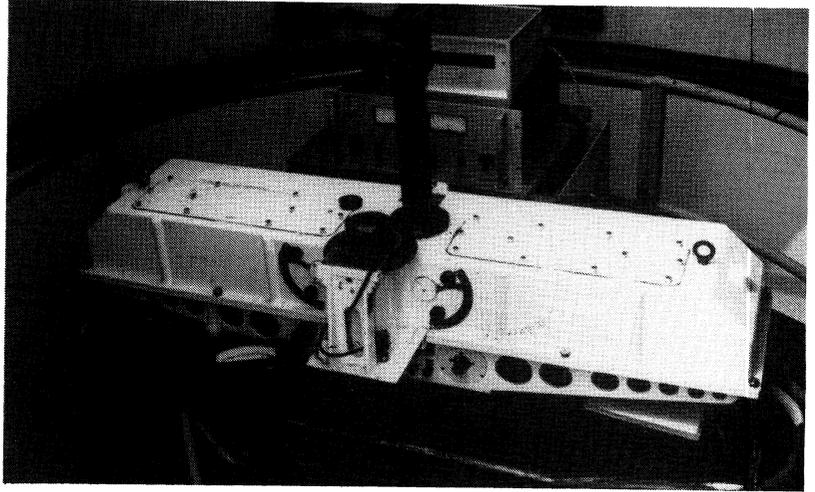
Figure 4: Décroissance de la moyenne d'octobre de l'ozone total observée aux bases de Syowa et Halley Bay de 1957 à 1985.

Ce résultat, publié d'abord dans des revues géophysiques japonaises, était présenté pour la première fois devant une audience internationale à la conférence quadriennale de l'ozone organisée en 1984 à Salonique. Cependant, le public spécialisé ne devait prendre conscience du problème qu'en 1985 lorsque les résultats britanniques publiés dans la revue «Nature» furent mis en corrélation avec la croissance du chlore dans l'atmosphère. Le crédit de la découverte est donc actuellement attribué à ces auteurs, cette

### Spectrophotomètre Dobson

Le spectrophotomètre Dobson mesure le rayonnement solaire direct, le rayonnement diffusé par le ciel ou le rayonnement réfléchi par la lune à plusieurs longueurs d'onde de l'ultraviolet dans les bandes d'absorption de l'ozone. Son usage, depuis maintenant plus de 80 ans à plusieurs stations, permet de déterminer des séries temporelles du total d'ozone au-dessus de lieux donnés. Son utilisation demande beaucoup de soins

Figure 3: Spectrophotomètre Dobson de l'Institut Royal Météorologique.



et d'expérience et n'est possible qu'à des institutions comme l'Institut Royal Météorologique qui peuvent en assurer la continuité. Les instruments font l'objet d'inter-calibrations par la Commission Internationale de l'Ozone et celle-ci se charge également de réviser périodiquement les procédures d'interprétations des données.

situation devrait changer si la réinterprétation des données précédentes montrait un jour que le trou d'ozone n'est qu'une périépie dans une longue suite d'anomalies antarctiques. Simultanément, les résultats obtenus depuis 1978 par le satellite Nimbus 7 de la Nasa (instrument BUV de mesure du rayonnement rétrodiffusé par la terre) apportaient une confirmation des mesures de Halley Bay. Le fait que la découverte appartienne entièrement aux observateurs au sol est due à une faiblesse de l'algorithme d'inversion utilisé: les valeurs trop faibles de l'ozone étaient éliminées automatiquement comme impossibles et n'apparaissaient pas dans les résultats finaux. Depuis, ces mesures satellitaires sont devenues le principal moyen d'observation (figure 5). Les cartes produites par cet instrument (BUV ou TOMS, cartographe thématique de l'ozone) montrent en octobre 1985 une zone de la surface des Etats-Unis où l'ozone a une épaisseur d'un facteur 2 inférieure à la moyenne. Le rejet initial de ces valeurs ne constitue évidemment pas une marque d'incompétence des équipes concernées, le rayonnement reçu au niveau du satellite contient des informations sur un grand nombre de phénomènes géophysiques différents et les résultats obtenus doivent être validés périodiquement par des campagnes en ballon et à partir du sol, celles-ci, conduites aux latitudes moyennes de l'hémisphère Nord, ne donnent jamais les valeurs faibles des minima antarctiques.

Le radiomètre TOMS sur NIMBUS 7 arrive en fin de carrière et sera remplacé par un instrument américain quasi-identique embarqué sur un satellite soviétique de la série METEOR, le traitement d'images et de données s'effectuera simultanément en Union Soviétique et aux Etats-Unis. Les instruments de mesure du rayonnement rétrodiffusé comme TOMS n'ont malheureusement pas été conçus à l'origine pour des mesures à long terme et de nombreux composants optiques y souffrent de dégradation suite à l'exposition au milieu spatial. La prochaine génération d'instruments est développée actuellement en donnant une priorité à ce problème de stabilité et les textes rédigés sur ce sujet prennent déjà plusieurs volumes.

### Conséquences directes du phénomène

Le continent antarctique est essentiellement un haut plateau dont des zones importantes sont recouvertes de glaces atteignant parfois des épaisseurs kilométriques, quelques vallées sèches existent en altitude et l'activité biologique y est tellement faible que des scientifiques ont envisagé d'y essayer les équipements destinés à mesurer la vie sur Mars. Dans ces conditions, le danger d'une catastrophe écologique est nul, la situation serait différente si la zone de minimum s'étendait aux latitudes moyennes de l'hémisphère Sud mais les mesures effectuées à Faraday, sur la péninsule antarctique, face à la

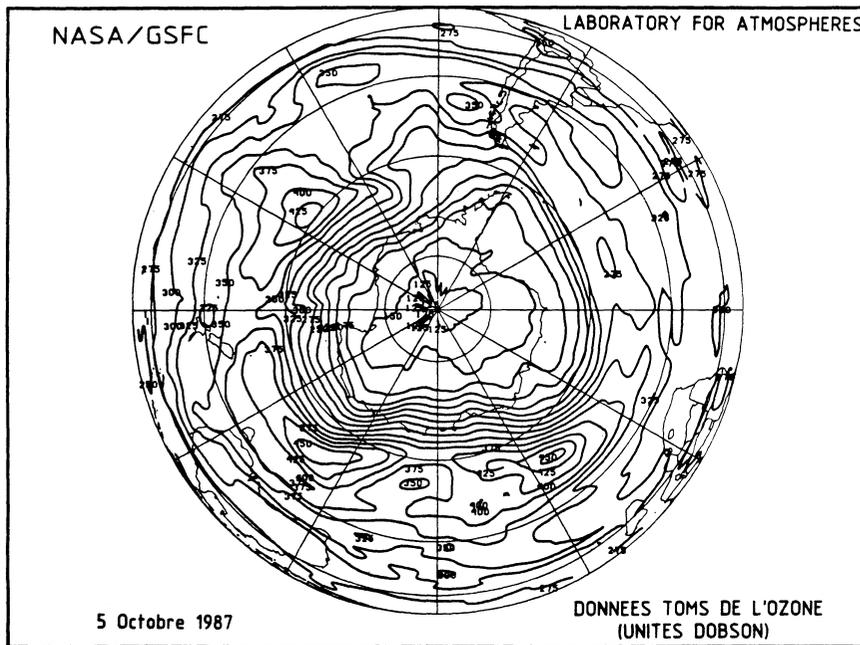


Figure 5: Résultats de l'instrument BUV-TOMS à la date du 5 octobre 1987, les valeurs de l'ozone total sont les plus basses jamais publiées, on y voit des valeurs de l'ozone total inférieures à 125 unités Dobson alors que la moyenne habituelle est supérieure à 300 unités. L'unité Dobson d'ozone total correspond à 10 microns d'ozone réduits au niveau de la mer; autrement dit, une valeur de 300 unités Dobson correspond à 3 millimètres d'ozone.

pointe de l'Amérique du Sud, ne montrent en aucun cas de modifications depuis 1957; de plus, les mesures satellitaires montrent que l'Antarctique est entouré d'une ceinture d'ozone correspondant à un maximum vers 50 degrés Sud. Cette région correspond à celle accessible par circumnavigation autour du continent et son comportement est conforme aux théories simples de la circulation de l'ozone donnant un maximum polaire et un minimum équatorial.

Des conséquences climatiques sont cependant possibles: durant la nuit polaire, il se crée au sol des régions extrêmement froides (record absolu de froid à la station Vostok, au pôle géomagnétique: -70 degrés C), la convection dans la troposphère se ralentit alors fortement, et en simplifiant à l'extrême, on peut dire que la stratosphère commence au niveau du plateau. La zone ainsi créée est séparée de l'atmosphère convective normale par un tourbillon stable qu'on appelle le vortex antarctique et qui englobe la quasi-totalité du continent. Cette structure se brise à la fin de la nuit polaire lorsque les premiers rayons du soleil redonnent de la chaleur au sol. L'absence d'ozone, en ralentissant le rétablissement des gradients troposphère-stratosphère, peut augmenter la durée de vie du vortex et, plus d'énergie solaire étant déposée dans la troposphère que si l'ozone stratosphérique intervenait, on peut s'attendre à un réchauffement plus rapide au printemps. La répercussion de cet effet sur les côtes pourrait à long terme modifier l'équilibre des glaces et perturber tout le climat de

l'hémisphère Sud. La campagne de mesures de 1987 a conduit à estimer l'accroissement de la stabilité du vortex d'environ 3 semaines. Il ne se crée pas de vortex arctique comparable en raison d'abord des températures plus élevées de la nuit polaire (alors au périhélie) et ensuite parce que les masses continentales autour du pôle Nord interdisent l'établissement de structures stables. Le vortex antarctique était d'ailleurs déjà proposé par Dobson lui-même dans son article de 1968 pour expliquer la dissymétrie observée entre les résultats d'ozone du Spitzberg et ceux de Halley Bay (figure 6).

La propagation du trou d'ozone aux autres latitudes est encore discutée, deux modèles récents semblent l'indiquer. Selon le groupe constitué par la NASA pour la détermination des tendances de l'ozone, les observations aux autres latitudes convergent vers une décroissance de l'ozone stratosphérique maximale vers 40 kilomètres avec même une décroissance de l'ozone total de l'ordre de 1 à 2% par an. Cette opinion majoritaire n'est cependant pas confirmée par toutes les stations et en particulier, la station d'Uccle n'observe pas de tendances particulières sur l'ozone total.

### Théories en présence

La dynamique introduite dans le paragraphe précédent constitue certainement un des éléments car le phénomène est spécifique au vortex polaire, mais elle ne peut malheureusement pas tout expliquer, sinon il aurait été

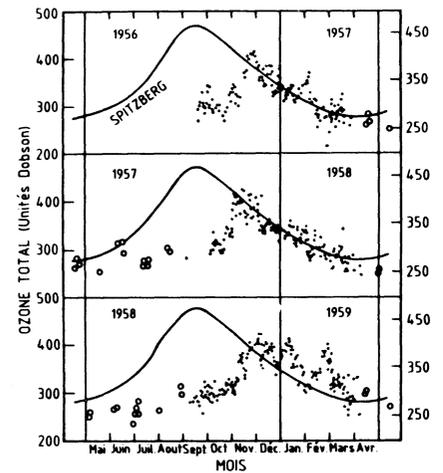


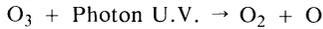
Figure 6: Les trois premières années d'observation de l'ozone en Antarctique, telles que Dobson les a publiées en 1968 (Applied Optics, vol 7, pp 387-405, 1968). La courbe en trait plein, tracée par Dobson, donne les observations moyennes du Spitzberg décalées de six mois, les latitudes des deux stations sont comparables et en l'absence d'une dynamique particulière devraient être identiques. On y observe nettement de faibles valeurs au printemps austral suivies d'un maximum en novembre. Les observations représentées par des points sont obtenues en utilisant le rayonnement solaire tandis que les cercles sont obtenus en visant la Lune pendant la nuit polaire.

observé avec la même intensité depuis les premières mesures et les modélistes l'auraient certainement prédit. Il faut donc rechercher les changements de la composition atmosphérique survenus depuis 1957, le principal est certainement l'accroissement de la quantité de chlore stable introduite par les chlorofluorométhanes (les fréons:  $\text{CFCl}_3$  et  $\text{CF}_2\text{Cl}_2$ ), comme on le sait, ces composés quand ils arrivent dans la stratosphère se dissocient sous l'influence du rayonnement ultraviolet non filtré par l'ozone et libèrent du chlore très réactif, ces atomes de chlore se retrouvent après avoir participé à des chaînes catalytiques de destruction d'ozone sous la forme plus bénigne d'acide chlorhydrique  $\text{HCl}$  finalement éliminé à la tropopause dans les nuages de pluie. De même, le monoxyde d'azote  $\text{NO}$ , destructeur d'ozone lui-aussi, a pour perte l'acide nitrique  $\text{HNO}_3$ . Ces deux composés ont l'intéressante propriété de se condenser aux températures du vortex antarctique et de s'y trouver piégés dans des aérosols (gouttelettes en suspension) durant la nuit polaire.

Il peut alors se produire des réactions en phase hétérogène amenant déjà la destruction de l'ozone avant le retour du soleil et lors du printemps, d'importantes quantités de composés réactifs sont renvoyées à l'atmosphère et plusieurs théories chimiques trop complexes pour être décrites ici expliquent la disparition partielle de l'ozone. Un résumé de la chimie élémentaire impliquée dans l'équilibre de l'ozone est néanmoins donné en encadré.

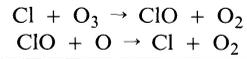
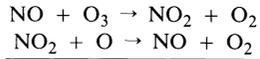
### Chimie de l'ozone stratosphérique

L'ozone est produit par dissociation de l'oxygène  $O_2$  en atomes d'oxygène  $O$ :

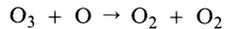


Ce mécanisme simple suffit à expliquer la couche d'ozone stratosphérique et est connu depuis Chapman en 1930, l'introduction de l'hydrogène par Bates et Nicolet en 1950 et de l'azote, notamment par Nicolet dans les années 60 devait raffiner considérablement ce modèle.

Deux chaînes catalytiques importantes ont été mises en évidence dans les années 70 pour la destruction de l'ozone:



BILAN :



Les mécanismes impliqués dans le vortex antarctique sont beaucoup plus compliqués et se rapprochent plus des chimies de pollution troposphérique que de la chimie stratosphérique habituelle; en effet, l'atome d'oxygène  $O$  ne peut subsister de manière stable dans la stratosphère inférieure et comme dans le SMOG des villes, il faut passer par des chaînes bien plus compliquées sur lesquelles il y a encore des désaccords entre modélistes.

Une seule des nombreuses théories avancées peut être rejetée avec certitude: la théorie du cycle solaire, celle-ci propose que l'ozone subisse l'influence d'oxydes d'azote produits par photochimie dans l'atmosphère supérieure et transportés vers le maximum d'ozone dans la stratosphère. Le minimum observé en 1987 après la légère recroissance de 1986 la contredit absolument; de même, l'étude des anciennes données d'ozone ne permet pas jusqu'à maintenant de mettre en évidence des minima antérieurs.

De nombreuses explications fantaisistes sont avancées dans la presse, une des plus récentes met en jeu un afflux de petites comètes dans l'atmosphère polaire, celle-ci peut être aisément réfutée par les observations spatiales de la vapeur d'eau mésosphérique pour laquelle aucune source extraterrestre n'a jamais pu être mise en évidence. De même, des solutions irréalistes sont parfois avancées et tournent autour de la production d'ozone ou de la destruction de chlore actif au moyen de réactifs, l'échec constant de propositions semblables vis-à-vis de problèmes de SMOG urbain suffit à démontrer l'impossibilité de leur extension à tout un continent.

### Les campagnes d'observations

Deux campagnes essentiellement américaines ont été conduites en octobre 1986 et 1987 à l'initiative de la National Science Foundation des Etats-Unis, elles ont mis en oeuvre en 1986 des missions scientifiques importantes en personnel et en instruments; en 1987, en plus deux avions stratosphériques ont été utilisés à partir d'une base située à la pointe australe du Chili. Les résultats n'en sont encore que partiellement publiés, on peut cependant déjà affirmer que le trou est essentiellement un phénomène de basse stratosphère (entre

10 et 25 km d'altitude) et qu'on n'observe pas d'enrichissement particulier en composés azotés; par contre, les composés chlorés ont des concentrations en accord avec les théories leur donnant un rôle majeur. Notamment, la corrélation entre la chute de la valeur totale de l'ozone et l'augmentation des concentrations de composés chlorés réactifs lorsque le DC 8 traverse la limite du vortex est extrêmement convaincante. Comme toujours en géophysique, l'observation n'est pas définitive et demandera à être répétée de plus de stations avec plus de précision et pendant plusieurs années.

Les mesures satellitaires nécessitent, par définition, l'orbite polaire, celle-ci n'est malheureusement pas accessible à toutes les charges utiles et en particulier, la navette spatiale américaine ne l'a jamais utilisée. Le vol d'un Spacelab spécialisé dans la mesure de la composition atmosphérique est, de fait, prévu en orbite polaire avec des instruments européens et américains, les dates n'en sont malheureusement pas encore fixées, ni la composition de la charge utile. Lors de la mission SPACELAB ATLAS 1, inclinée à 57 degrés, des tentatives seront effectuées par l'interféromètre ATMOS de la NASA et le spectromètre à grille franco-belge pour effectuer une mesure aux limites du vortex. Le satellite U.A.R.S. d'observation de l'atmosphère de la Nasa aura également une orbite inclinée à 57° qui rend difficile l'observation des pôles et ne permet pas, à ce point de vue, d'arriver à égaliser les performances du satellite Nimbus 7 lancé en octobre 1978 et dont beaucoup d'instruments ont déjà cessé de fonctionner. Du côté soviétique, la capacité existe de mettre des charges de 20 tonnes en orbite polaire et les accords de coopération actuellement initiés avec divers centres européens dont l'Institut d'Aéronomie Spatiale

de Belgique devraient permettre des missions scientifiques communes, malheureusement, aucun projet spécifique à l'Antarctique n'est pour le moment décidé. Un module KVANT de la station MIR est prévu prochainement pour des observations de l'atmosphère mais l'orbite de MIR est inclinée à 58°, ce qui lui donne les mêmes difficultés que U.A.R.S.

L'espoir principal vient alors de l'Agence Spatiale Européenne où deux projets en cours de définition viennent répondre aux demandes de mesures polaires: le projet P.O.P.E (polar orbiting platform) et un paquet d'instruments scientifiques de METEOSAT 2, les deux permettent des études de l'aéronomie des régions polaires et donc du trou d'ozone. Le programme américain EOS est équivalent à POPE et des propositions ont été remises aux agences spatiales par les scientifiques le premier août de cette année dont notamment des propositions de l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique portant sur des observations de la composition atmosphérique par télédétection dans les domaines millimétriques, microondes, infrarouges, visibles et ultraviolets. Les instruments proposés devraient notamment être très supérieurs aux instruments TOMS et BUV actuellement utilisés.

La création de bases antarctiques spécialisées dans la mesure de l'ozone n'a été envisagée jusqu'à maintenant que par les Etats-Unis, notamment dans le cadre d'une coopération avec l'U.R.S.S. Dans le cas européen, le trou d'ozone aura contribué à maintenir l'effort britannique et à rétablir un programme de mesures d'ozone à la base française de Dumont d'Urville, en Terre-Adélie; en 1988, une équipe scientifique espagnole de l'Instituto Nacional de Tecnica Aeroespacial se rend à la plus australe des bases argentines pour y observer  $O_3$ ,  $NO_2$  et  $ClO$ . La base Roi Baudouin n'a plus été occupée depuis février 1967 et demanderait une reconstruction pour être réouverte, les moyens n'en sont actuellement pas disponibles et les efforts belges se limitent à des travaux de modélisation et à des préparations d'observations satellitaires.

En conclusion, la découverte du trou d'ozone a contribué à mettre en évidence une importante région de notre atmosphère qui cesse de se comporter en système ouvert pendant plusieurs semaines, et où une inversion permanente permet à une chimie différente de l'atmosphère libre de se développer. Le phénomène quoique limité est inquiétant car c'est la première fois qu'un tel effet est si étendu en espace et en durée et entièrement indépendant de la pollution locale. Si, de plus, par des séries de mesures plus précises, la diminution de l'ozone global devait être établie dans d'autres régions de la planète, il y aurait alors certainement lieu de s'inquiéter car ce serait tout l'équilibre vital qui pourrait être menacé. ■