

Analyse de l'atmosphère moyenne de la Terre :

L'Expérience Spectrométrie à Grille de la mission ATLAS 1 sur la navette Atlantis

par Martine De Mazière, Dominique Fonteyn, Carlos Lippens, Christian Muller, Jacques Vercheval et Marcel Ackerman IASB¹

André Girard, Jean Besson et Claude Camy-Peyret ONÉRA²

Abstract

A series of Space Shuttle-missions, named the Atmospheric Laboratory for Applications and Science (ATLAS), is planned in view of investigating specifically how Earth's atmosphere and climate are affected by the Sun and by the products of industrial complexes and agricultural activities.

The first mission of this series - ATLAS 1 - has been successfully performed end of March 1992.

Among the six atmospheric physics experiments onboard, there was the "grille spectrometer", an instrument conceived and developed in cooperation between ONÉRA (Office National d'Études et Recherches Aérospatiales, France) and IASB (Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique, Bruxelles).

This was in fact the second flight of this instrument, the first one having been performed during the Spacelab mission one, in November 1983.

The authors of this article briefly describe the "grille spectrometer", detail the scientific objectives, relate the main steps of the ground operations performed at Kennedy Space Center, and the organization of the ground support flight operations (payload operations control center at Marshall Space Flight Center, in Huntsville), then present a preliminary report on the mission implementation and the scientific results. The instrument operation has been a great success, producing a large number of basic informations which will highly contribute to a better knowledge and understanding of the upper atmosphere.

In other respects, it clearly appears that, during this mission, man on board has played a fundamental role.

Introduction

L'atmosphère dite «moyenne», c'est-à-dire la tranche d'altitude comprise entre la tropopause (15 km) et la basse thermosphère (100 km), a été longtemps relativement moins étudiée que la basse et la haute atmosphères.

Cet état de fait s'explique avant tout par des difficultés techniques. Trop haute pour les avions, trop basse pour les satellites, l'atmosphère moyenne ne peut être étudiée in situ qu'à partir de plates-formes (ballon, fusée-sonde) à temps de séjour très limités et difficilement répétitifs. Utilisés à partir du sol, les moyens de détection à distance sont gênés par la présence de la basse atmosphère, écran absorbant, diffusant et turbulent.

À ces difficultés s'ajoutait un intérêt scientifique peu évident : l'atmosphère moyenne est un milieu peu ionisé et les écarts à l'équilibre thermodynamique y sont faibles. Ces caractères en faisaient un milieu moins «attrayant» que l'ionosphère et la magnétosphère.

Enfin, jusqu'au début des années 1970, les motivations étaient réduites : peu ou pas de préoccupations concernant l'impact climatique d'activités humaines. Trop haute pour intéresser les météorologistes, l'atmosphère moyenne n'est pas non plus concernée par les phénomènes perturbateurs du rayonnement électromagnétique qui ont motivé très tôt les études ionosphériques en raison de retombées civiles et militaires de première importance.

La situation est aujourd'hui radicalement différente, et l'atmosphère moyenne ne mérite plus le nom d'«ignosphère» qui lui était parfois décerné, car de nombreuses expériences basées sur des méthodes d'analyse et de mesures variées, utilisant des appareils de principe souvent différent, ont été effectuées depuis ces quinze dernières années dans cette zone de l'atmosphère.

En donnant accès à une vision «plongeante» et synoptique du globe, les moyens satellites d'observation à distance, basés sur les propriétés radiatives du milieu étudié, ouvrent des possibilités d'étude de l'atmosphère moyenne dont on n'a pas encore fini de découvrir l'ampleur.

Parallèlement, des applications très prioritaires sont apparues :

On sait que l'équilibre biologique de la planète est sensible à la dose de rayonnement solaire qui parvient au sol. La pellicule d'ozone (épaisseur équivalente, ramenée à la température et à la pression ordinaires : 3 mm) en est le régulateur et il est, aujourd'hui, démontré que des espèces hydrogénées, nitrées, chlorées interviennent de façon majeure dans l'équilibre de la couche d'ozone par le jeu de réactions catalytiques. Or ces espèces sont très peu abondantes dans l'atmosphère naturelle (de l'ordre de la partie par milliard : ppbv³) de sorte qu'il existe des émanations d'origine humaine suffisantes pour troubler ce fragile équilibre naturel.

L'équilibre radiatif de la Terre dépend principalement de trois gaz : CO₂, H₂O, O₃; d'autres constituants tels que CH₄ et N₂O jouant un rôle non négligeable.

N.D.L.R

1 IASB : Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique

2 ONÉRA : Office National d'Études et de Recherches Aérospatiales (France);

3 ppbv : part per billion by volume = part par milliard en volume.

Or la teneur de l'atmosphère en CO_2 , CH_4 , N_2O augmente régulièrement. La tendance évolutive est ici clairement observée. L'évaluation de ses conséquences repose, là aussi, sur une meilleure connaissance du cycle de ces substances dont la durée de vie est limitée notamment par les phénomènes de photodissociation qu'elles subissent dans l'atmosphère moyenne.

L'expérience Spectromètre à grille, élément de la charge utile de la mission ATLAS 1

L'ensemble des moyens réunis dans le cadre de la mission ATLAS 1 (ATmospheric Laboratory for Applications and Science) constitue certainement la charge utile la plus puissante réalisée à ce jour pour collecter, sur une courte période (9 jours), une masse de renseignements scientifiques sans précédent sur l'environnement terrestre. De plus, l'intérêt de cette mission était renforcé par la présence en orbite de la plate-forme UARS (Upper Atmospheric Research Satellite), premier satellite de longue durée entièrement centré sur les études atmosphériques, lancé en 1991 par la NASA.

Principaux modules du «spectromètre à grille»

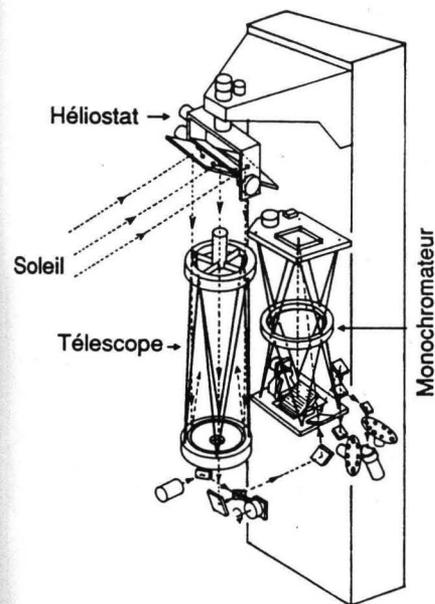


Fig. 1 : «écorché» des principaux modules du spectromètre à grille.

Les résultats des six expériences de la mission ATLAS, consacrées aux études atmosphériques, constitueront un maillon d'importance majeure du processus de validation des mesures faites à bord d'UARS, contribuant à une interaction forte entre équipes européennes et américaines.

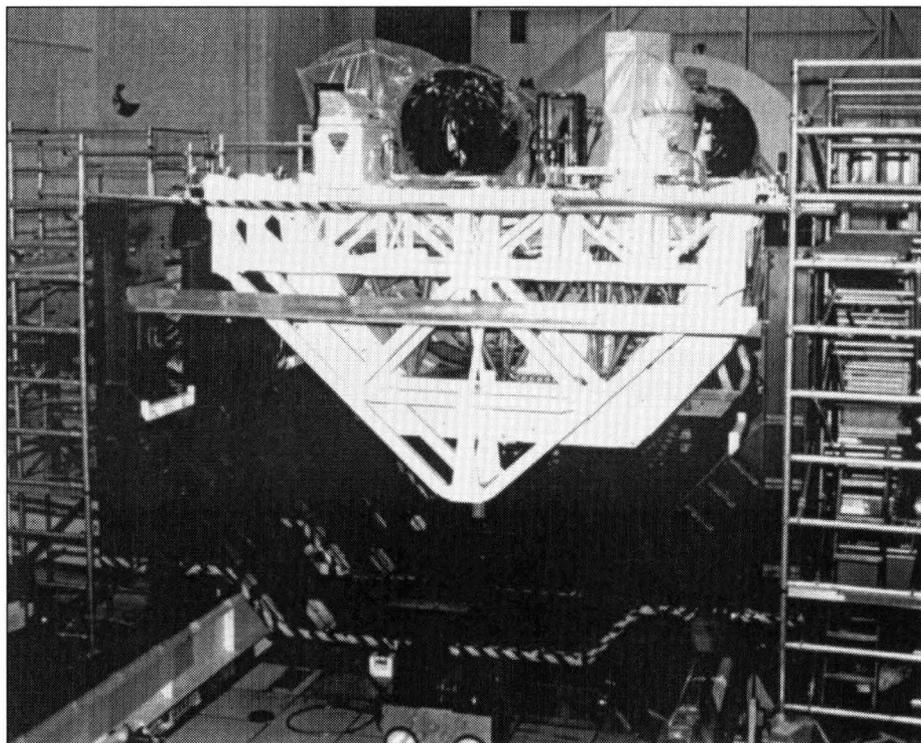


Fig. 2 : Photographie du spectromètre sur la palette à monter à l'arrière de la soute de la navette *Atlantis* de la NASA au Kennedy Space Center.

L'un de ces six instruments est le spectromètre à grille ONÉRA-IASB. L'instrument comprend (fig. 1) : un système de visée (miroir frontal orientable ou héliostat), un collecteur de rayonnement (télescope), un monochromateur avec optique de sortie et détecteurs, et des sous-ensembles électroniques de commande et de liaisons électriques avec la navette. La figure 2 est une photographie du spectromètre en place sur la palette avant montage dans la soute de la navette. Cet instrument a déjà volé une première fois à bord de la première charge utile Spacelab, en novembre 1983. Sans l'accident de *Challenger*, qui a bouleversé tous les plans de la NASA, il aurait été placé à bord de la mission EOM 1 (Earth Observation Mission) prévue en 1986. L'objectif visé est la détermination des profils verticaux de dix espèces chimiques dans l'atmosphère moyenne : ozone, vapeur d'eau, dioxyde de carbone, oxyde de carbone, méthane, protoxyde d'azote, monoxyde d'azote, dioxyde d'azote, acide chlorhydrique, acide fluorhydrique. Le principe de la mesure est la spectrométrie d'absorption, par observation du Soleil à travers le limbe terrestre soit au lever, soit au coucher. Le spectre solaire observé est modifié par la présence de raies d'absorption caractéristiques de l'espèce étudiée.

L'instrumentation a déjà fait l'objet de plusieurs descriptions sous différents aspects [Réf. 1 à 5]. Elle comporte deux particularités qui la caractérisent :

- Les paramètres instrumentaux qui commandent le pouvoir de résolution spectrale et le rapport signal sur bruit sont découplés, ce qui n'est pas le cas des spectromètres de conception classique qui comportent une fente d'entrée et une fente de sortie. Les fentes sont remplacées par une surface plane de contour carré constituée par un ensemble de zones alternativement opaques et transparentes (d'où le nom de grille) limitées par des hyperboles équilatères (fig. 3);

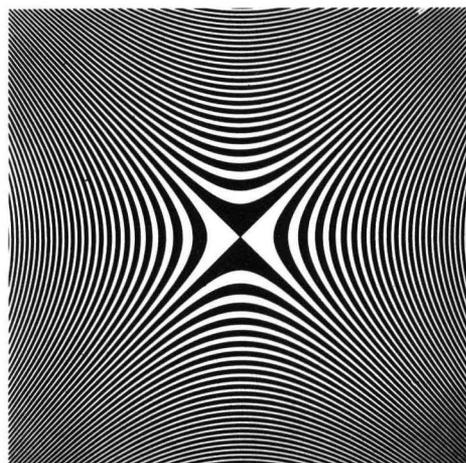


Fig. 3 : Grille à réseau d'hyperboles. Le gain en rapport signal/bruit, par rapport au spectromètre à fente, est : $G = L/2e$ avec : L : longueur du côté de la grille = 15mm, e : pas le plus fin de la grille (largeur de fente équivalente) = 0,2mm, d'où $G= 37$.

• L'organisation des mesures est adaptée à l'objectif prioritaire de l'expérience : la surveillance des dix espèces chimiques préalablement identifiées. Dans ce but, les intervalles spectraux balayés sont des zones étroites présélectionnées en raison de la présence de raies spectrales intenses des espèces à étudier. Ces zones se situent dans l'intervalle $2,5-10\mu\text{m}$ ($4000-1000\text{cm}^{-1}$) [Réf. 6]. Cette présélection optimise l'efficacité des mesures effectuées pendant la période d'occultation solaire, dont la durée unitaire est de quelques minutes.

Aucun dérèglement n'ayant été constaté sur l'appareil après le retour de la mission Spacelab à la fin de 1983, les travaux effectués entre les deux vols ont été pratiquement limités, sur le plan instrumental, à la vérification des performances et à la mise à niveau d'éléments électroniques réalisés par l'ETCA (Études Techniques et Constructions Aérospatiales) à Charleroi, en Belgique. Toutefois, l'autonomie de mesure a été multipliée par cinq, par rapport au vol Spacelab, grâce à l'accroissement du volume de la bouteille d'azote comprimé fournie par la NASA et utilisée pour le refroidissement des détecteurs. Enfin, un nouveau programme scientifique a été établi pour tenir compte de l'expérience acquise et de l'autonomie accrue de l'expérience [Réf. 6].

Les principales contraintes nouvelles sont venues de la NASA, qui a demandé, après l'accident de *Challenger*, de compléter les dossiers de qualification de l'appareil par des études de modélisation mécanique et thermique qui ont été effectuées sur la période 1988 à 1990.

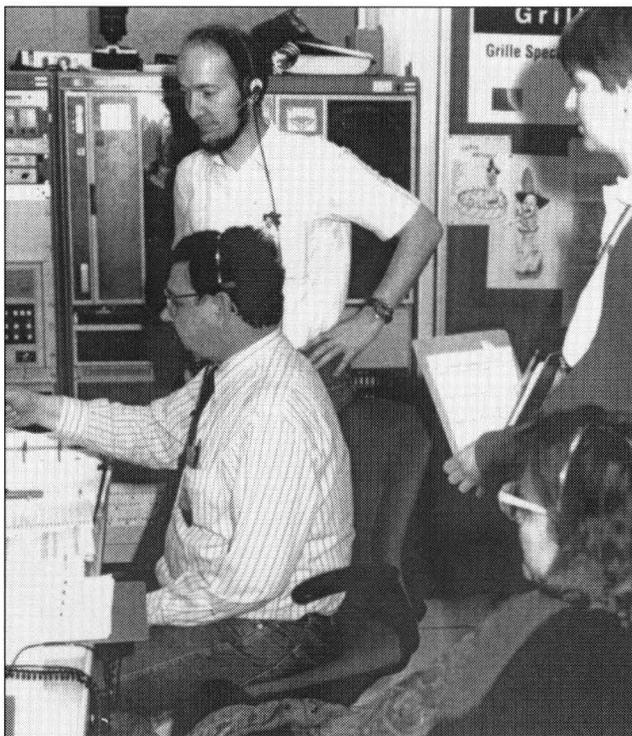


Fig. 4 :

Salle de contrôle des expériences au centre de la NASA à Huntsville : contact et réception des mesures en temps réel.

Debout : de gauche à droite, Ir Robert Hennecart, chef de département pour l'expérience MIRAS à ETCA (Charleroi), Dr Martine De Mazière, premier assistant à l'IASB; assis : à gauche Dr Ir Carlos Lippens, Chef de projet pour l'expérience GRILLE à l'IASB, à droite Dr Nicole Papineau (CNES)

L'appareil a été installé sur la palette en octobre 1990; puis se sont succédé, jusqu'au lancement en mars 1992, sept sessions d'entraînement pour la mission, où les équipes d'expérimentateurs étaient intégrées au personnel de la NASA et aux astronautes; ces séances de durée minimale d'une semaine se déroulaient soit au *Kennedy Space Center*, soit au *Marshall Space Flight Center* à Huntsville en Alabama, où était localisé le centre de contrôle de la mission Atlas (POCC : Payload Operation Control Center); le contrôle de la navette était assuré par la base de la NASA à Houston.

Pendant le vol, les expérimentateurs se trouvaient dans une vaste salle du POCC équipée de nombreuses consoles visualisant toutes les opérations se déroulant au sol et dans la navette (par exemple, le travail des astronautes) et donnant en temps réel ou légèrement différé le déroulement des expériences (fig. 4); chaque équipe possédait également du matériel spécifique pour faire l'analyse des résultats reçus et pour permettre, éventuellement, de modifier le programme de mesures.



Fig. 5 : Équipage de la navette *Atlantis* : à l'extrême droite : Dirk Frimout.

Déroulement de l'expérience et premier bilan

La mission ATLAS, sur la navette *Atlantis*, s'est déroulée du 24 mars au 2 avril 1992. La navette était placée sur orbite quasi circulaire à 300 km d'altitude, inclinée à 57°. Le lancement et le retour ont eu lieu au Kennedy Space Center.

L'équipage (fig. 5) était composé de sept personnes : le commandant de bord, le pilote, trois spécialistes de mission et deux spécialistes pour la charge utile, dont notre collègue belge Dirk Frimout, qui a participé à la conception de l'expérience [1].

La première mise en service de l'expérience, quelques heures après le lancement, a eu pour objet de tester son bon fonctionnement grâce à un spectre d'absorption dit de « calibration », obtenu à travers une cuve de méthane incorporée à l'instrument. Il appartenait à un spécialiste « charge utile » à bord d'*Atlantis*, en l'occurrence Dirk Frimout, d'assurer cette vérification dont le résultat conditionnait l'ensemble des observations. Cette opération a été pleinement réussie.

La manière dont a pu être surmontée la seule difficulté, d'ordre mécanique, rencontrée pour l'expérience au début de la mission, illustre l'importance d'une bonne interaction entre les responsables de l'expérience, ceux de la NASA et l'équipage à bord d'*Atlantis* : le miroir frontal de l'héliostat, asservi en orientation sur le Soleil, était freiné, en rotation, dans une certaine plage de fonctionnement, par un frottement dû à une légère déformation de l'extrémité de la couverture thermique recouvrant le capot de l'héliostat. Ce diagnostic a pu être établi grâce aux images vidéo transmises au Centre de contrôle. Deux décisions ont été prises avec les responsables de la NASA :

- les levers de soleil perturbés par cette anomalie de fonctionnement ont pu être en partie remplacés par des couchers de soleil;
- en fin de mission, un changement d'attitude¹ de la navette a permis de réaliser des observations au lever du soleil en évitant la plage de mauvais fonctionnement de l'héliostat. La modification de mission que cette manœuvre impliquait a pu être décidée par la NASA après concertation avec les responsables des autres expériences.

Le spectromètre a remarquablement bien fonctionné pendant toute la mission. Le nombre des observations réussies s'élève à 66 occultations (contre une dizaine en 1983 [4]) qui se répartissent entre 19 levers et 47 couchers de soleil. Plus de 4000 spectres ont été enregistrés. La figure 6 est

Soleil à plus basse altitude. Il semblerait y avoir une augmentation du chlore dans la haute stratosphère depuis 1985, de l'ordre de 25% à 40 km d'altitude. Cette conclusion importante doit être vérifiée en tenant compte des corrections sur les paramètres orbitaux que la NASA a fournis récem-

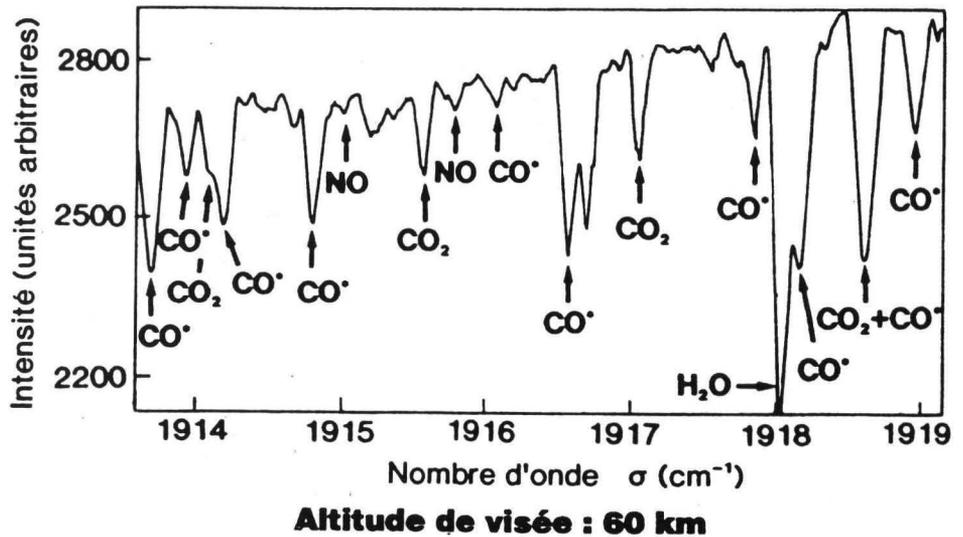


Fig. 6 : Exemple de spectre observé au cours de la mission Atlas. L'altitude de visée au point le plus proche de la Terre est d'environ 60 km (Cette valeur sera affinée en tenant compte des données orbitales définitives transmises par la NASA).

un exemple de spectre obtenu dans la zone spectrale d'étude du monoxyde d'azote. L'ensemble des zones géographiques où les observations ont été effectuées et réussies est indiqué pour les dix espèces étudiées sur les figures 7a et 7b. La répartition des zones visées au limbe terrestre dépend essentiellement de la direction du Soleil par rapport à la Terre et à la trajectoire de la navette, donc de l'inclinaison de l'orbite, de la date et de l'heure de lancement d'*Atlantis*. Les expériences de mission Atlas ayant le principe de visée du Soleil au lever et au coucher ont donc une répartition géographique identique des zones de mesures, ce qui permettra une comparaison significative des résultats. En ce qui concerne le spectromètre, compte tenu de la difficulté signalée sur le miroir frontal, il y a eu plus de mesures réussies au coucher (47) qu'au lever (19).

Un résultat typique de l'expérience est la détermination de la distribution verticale de HCl à 54° sud, qui a été faite immédiatement après le vol [Réf. 7]. Le profil obtenu ne s'étend pas en dessous de 30 km par le fait que la présence des aérosols provenant du volcan Pinatubo obscurcissait le

ment, et elle sera comparée aux résultats obtenus par d'autres expériences comme ATMOS ou HALOE à bord d'UARS. L'ensemble des résultats, après dépouillement des spectres, constituera une base de données expérimentales d'un grand intérêt dans le processus permanent de validation-invalidé des modèles atmosphériques.

Conclusions

L'expérience franco-belge «spectromètre à grille» de la mission Atlas atténue le contraste qui existe entre l'effort de la NASA et l'effort européen dans le domaine des mesures satellites de constituants atmosphériques à l'état de trace : ozone, oxydes d'azote, composés halogénés.

La sélection, comme spécialiste «charge utile» de Dirk Frimout, en concurrence avec des candidats de la NASA, montre que l'ensemble de la communauté scientifique des spécialistes de l'atmosphère apprécie les efforts et la réussite des équipes européennes à faible budget.

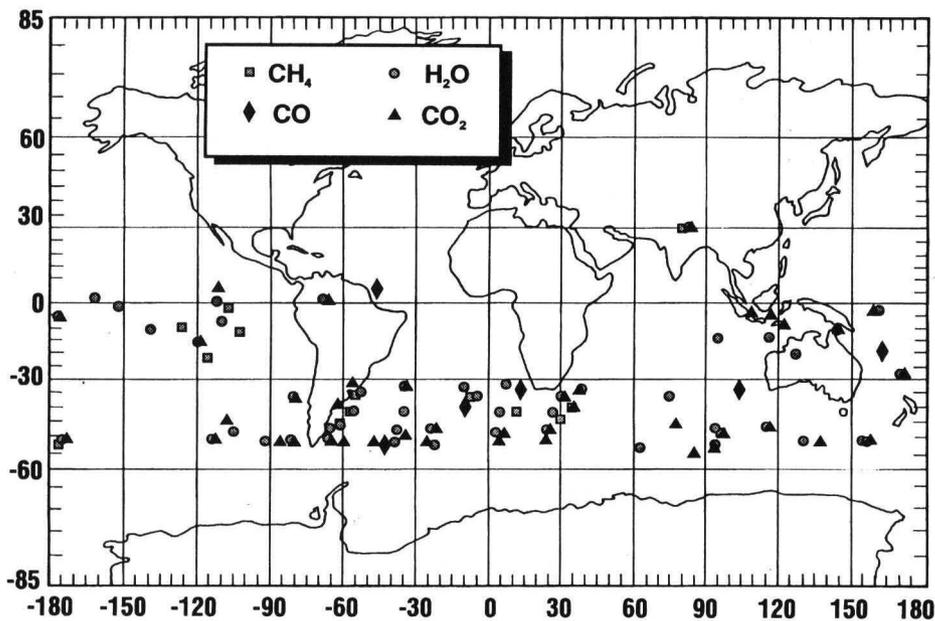


Fig. 7a

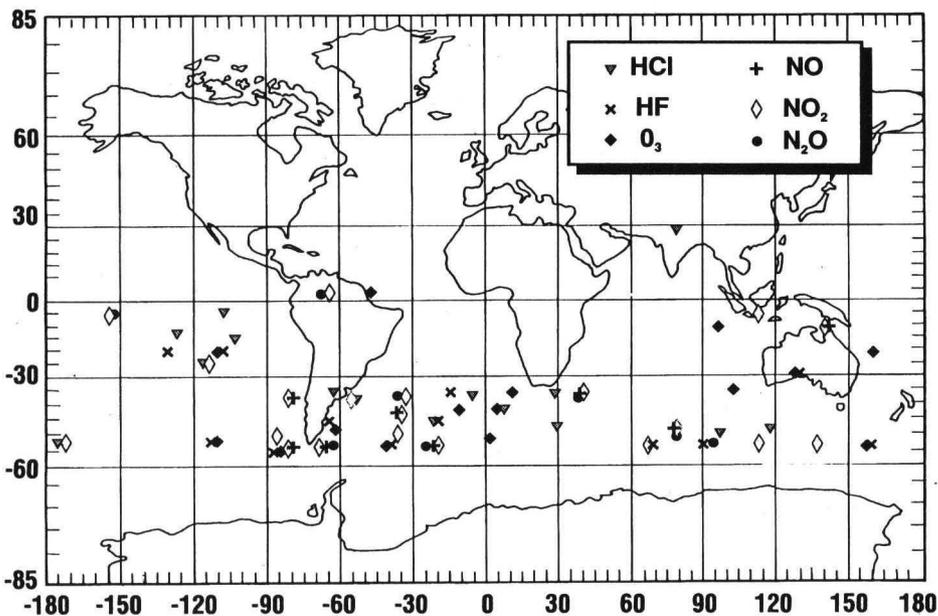


Fig. 7b

Fig. 7: Localisations des observations
 (a) pour CH_4 , H_2O , CO et CO_2 ;
 (b) pour HCl , HF , NO , NO_2 , N_2O et O_3 .

Sur le plan technique, l'expérience a confirmé, pour la seconde fois, la maniabilité et la relative simplicité de mise en œuvre, dans l'espace, de ce type de spectromètre. Il apparaît aujourd'hui que, contrairement à l'appareil aujourd'hui que, contrairement à l'appareil plus performant mais beaucoup plus complexe qu'est le spectromètre interférentiel Atmos du *Jet Propulsion Laboratory*, il est possible d'étendre le principe de l'instrument franco-belge au cas d'un satellite de longue durée de vie. Cette éventuali-

té est en train de se concrétiser grâce à une initiative de l'IASB dans le cadre d'une coopération avec la Russie. Le projet d'expérience MIRAS, à bord de la première charge utile de la station russe MIR 2, auquel l'IASB a tenu à associer l'ONÉRA, constituera en 1995 l'aboutissement d'une longue et fructueuse collaboration, commencée en 1972, entre deux laboratoires européens aux compétences complémentaires.

Références

- [1] BESSON, J., A. GIRARD, M. ACKERMAN, D. FRIMOUT, «Spectromètre pour la première mission Spacelab», Actes du Congrès International d'Astronautique, Dubrovnik, 1-8 octobre 1978, *Recherche Aérospatiale*, 6, 343-353; 1978.
- [2] MULLER, C., C. LIPPENS, J. VERCHEVAL, M. ACKERMAN, J. LAURENT, M.P. LEMAITRE, J. BESSON, A. GIRARD, «Expérience "spectromètre à grille" à bord de la première charge utile de Spacelab», *J. Optics*, 16, 155-168; 1985.
- [3] BESSON, J., «Conception mécanique et thermique d'une expérience embarquée sur la navette : le spectromètre Spacelab 1», *L'Aéronautique et l'Astronautique*, 113; 1985-1986.
- [4] GIRARD, A., J. BESSON, D. BRARD, J. LAURENT, M.P. LEMAITRE, C. LIPPENS, C. MULLER, J. VERCHEVAL, M. ACKERMAN, "Global results of grille spectrometer experiment on board Spacelab 1", *Planet. Space Sci.*, 36, 291-300; 1988.
- [5] GIRARD, A., «Spectromètre à grille», *Applied Optics*, 2, 79; 1963.
- [6] CAMY-PEYRET, C., N. PAPINEAU, R. ARMANTE, V. ACHARD, J. BESSON, C. MULLER, M. DE MAZIERE, C. LIPPENS, J. VERCHEVAL, M. ACKERMAN & D. FRIMOUT, "'Grille' spectrometer scientific programs for the ATLAS-1 Space Shuttle flight", *La Recherche Aérospatiale*, 3, 67-77; 1992.
- [7] DE MAZIERE, M., C. MULLER, C. LIPPENS, J. VERCHEVAL, D. FONTEYN, R. ARMANTE, C. CAMY-PEYRET, V. ACHARD, J. BESSON, J. MARCAULT, D. HENRY, N. PAPINEAU, J.P. MEYER & D. FRIMOUT, "Second flight of the Spacelab Grille spectrometer during the ATLAS-1 mission", *Geophys. Res. Lett.*, 20, 503-506; 1993.