

Analyse de l'atmosphère moyenne de la Terre : L'EXPERIENCE « SPECTROMETRE A GRILLE » de la mission Atlas 1 sur la navette Atlantis

par A. GIRARD, J. BESSON, C. CAMY-PEYRET (ONERA)
et M. ACKERMAN (IASB), C. MULLER ET C. LIPPENS (IASB)

A series of space Shuttle-Spacelab 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 in last March.

Among the six atmospheric physics experiments on-board, there was the « grille spectrometer », an instrument conceived and developed in cooperation between ONERA (Office National d'Etudes et Recherches Aéronautiques, 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 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 high 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.

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 atmosphère.

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.

A 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 « attractif » 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 satellitaires 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 se sont fait jour :

On sait que l'équilibre biologique de la planète est sensible à la dose de rayonnement ultraviolet 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



M. André Girard est Directeur Adjoint Scientifique de la direction de la Physique à l'ONERA.



M. Jean Besson est Directeur Adjoint Technique et Physique à l'ONERA.



M. Marcel Ackerman est Directeur de l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique.

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 : ppb) 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 : CO_2 , H_2O , O_3 , d'autres constituants tels que CH_4 et N_2O jouant un rôle non négligeable. 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.

Sur le plan des motivations liées à la défense, la maîtrise de moyens de détection satellitaires dans une vaste gamme du domaine électromagnétique est l'objectif majeur d'une défense moderne. Cette maîtrise doit aussi servir de base à une politique mondiale de surveillance des armements ; elle nécessite une connaissance approfondie des propriétés radiatives de l'atmosphère moyenne qui conditionnent, dans une large mesure, les performances ultimes des moyens de détection et d'identification embarqués à bord de satellites, notamment dans l'infrarouge.

L'EXPERIENCE

« SPECTROMETRE A GRILLE », ELEMENT 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 Sciences) 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.

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.

L'un de ces six instruments est le spectromètre à grille ONERA-IASB. L'instru-

Principaux modules du « spectromètre à grille ».

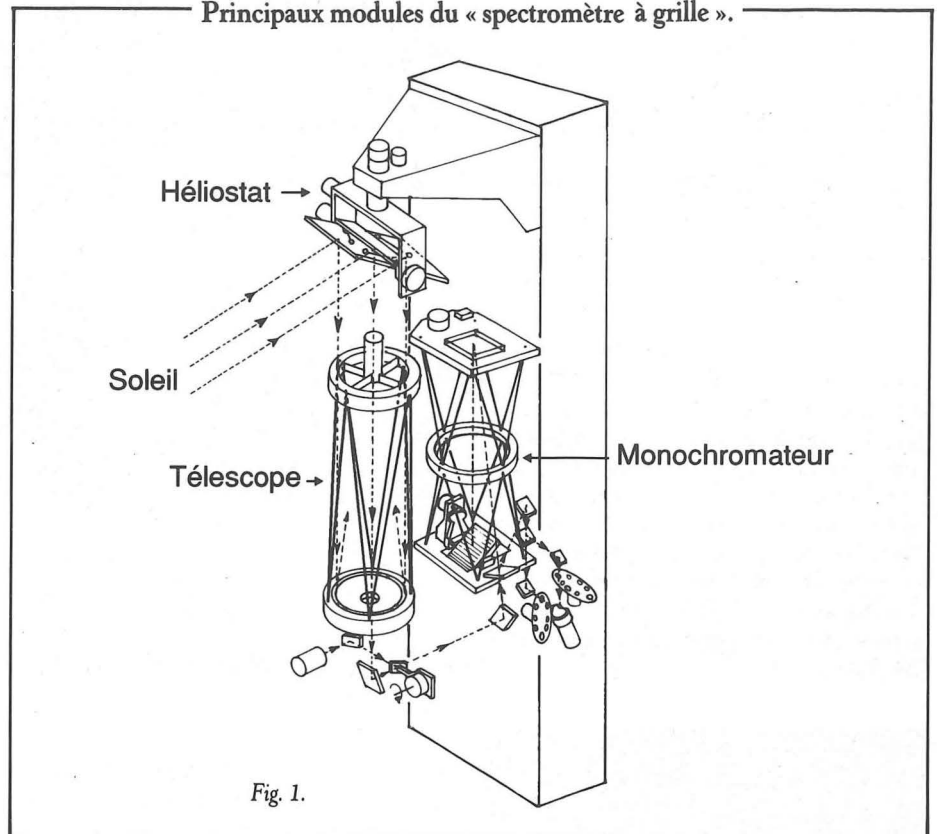


Fig. 1.

ment 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

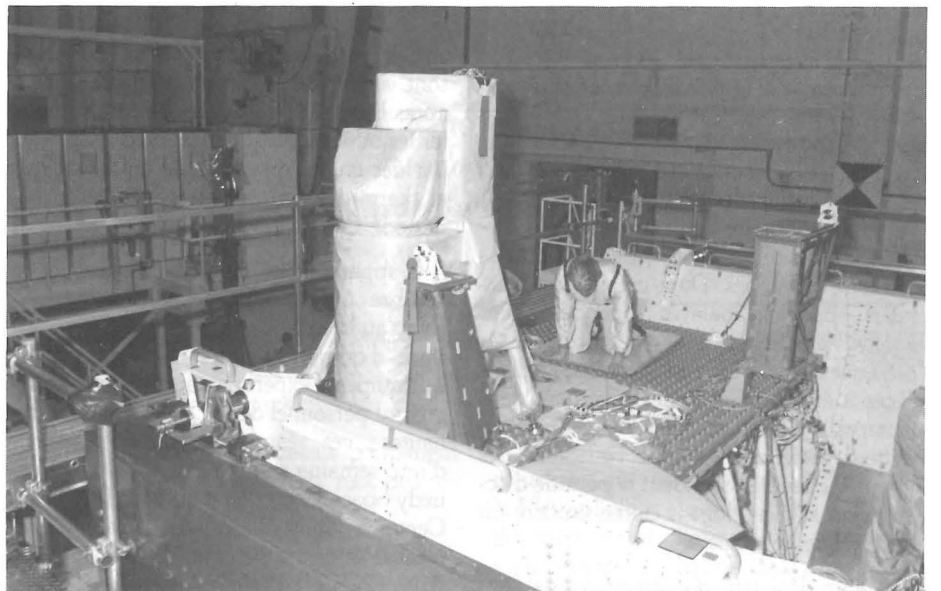


Fig. 2. - Photographie du spectromètre sur la palette à monter à l'arrière de la soute de la navette « Atlantis » de la NASA à Kennedy Space Center.

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) ;

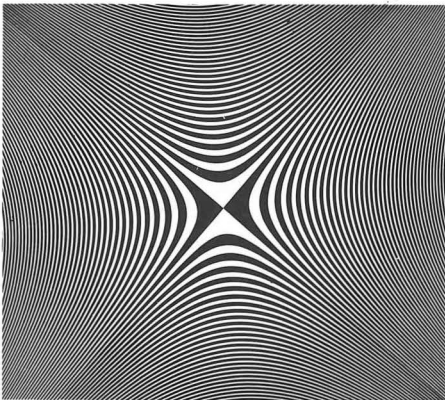


Fig. 3. – Grille à réseau d'hyperboles. Le gain en rapport signal/bruit, par rapport au spectromètre à fente, est : $G = L/2e$

avec :

L : longueur du côté de la grille = 15 mm

e : pas le plus fin de la grille (largeur de fente équivalente) = 0,2 mm, 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 μm (4 000-1 000 cm^{-1}). Cette présélection optimise l'efficacité des mesures effectuées pendant la période d'occultation solaire, dont la durée unitaire est de quelques minutes.

Aucun déréglage n'ayant été constaté sur l'appareil après le retour de la mission Spacelab fin 1983, les travaux effectués entre



Fig. 4. – Salle de contrôle des expériences au centre de la NASA à Huntsville : contact et réception des mesures en temps réel.

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 (Etablissement technique et constructions spatiales) 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.

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.

L'appareil a été installé sur la palette en octobre 1990 ; puis se sont succédées, jusqu'au lancement en mars 1992, sept sessions d'entraînement pour la mission, où les équipes d'expérimentateurs étaient intégrés 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 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 des matériels spécifiques pour faire l'analyse des résultats reçus et pour permettre, éventuellement, de modifier le programme de mesures.

DEROULEMENT DE L'EXPERIENCE 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 but 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 D. 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, pendant la première partie de la mission ;
- en fin de mission, un changement d'attitude 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 4 000 spectres ont été enregistrés. La figure 6 est 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 la mission Atlas ayant le principe de visée du Soleil au lever et au coucher de Soleil ont donc une répartition identique des zones de mesures dans l'hémisphère Sud, 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).

Les résultats escomptés du travail de dépouillement qui commence constitueront une base de données expérimentales d'un



Fig. 5. - Equipage de la navette Atlantis ; à l'extrême droite : Dr Dirk Frimout, ingénieur belge, représentant de l'ESA.

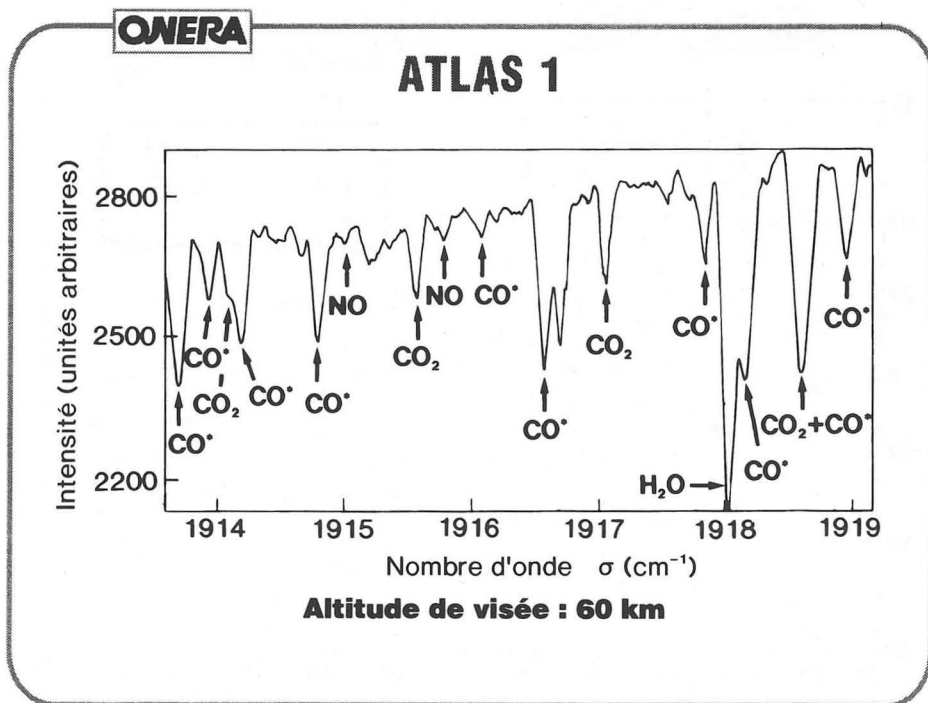


Fig. 6. - Exemple de spectre observé au cours de la mission Atlas. L'altitude de visée au point le plus proche de la Terre est d'environ 60 km. Cette valeur sera affinée lorsque les données orbitales définitives auront été transmises par la NASA).

grand intérêt dans le processus permanent de validation-invalidaiton 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 satellitaires de constituants atmosphériques à l'état de trace : ozone, oxydes d'azote, composés chlorés...

Sachant que le lancement de la mission

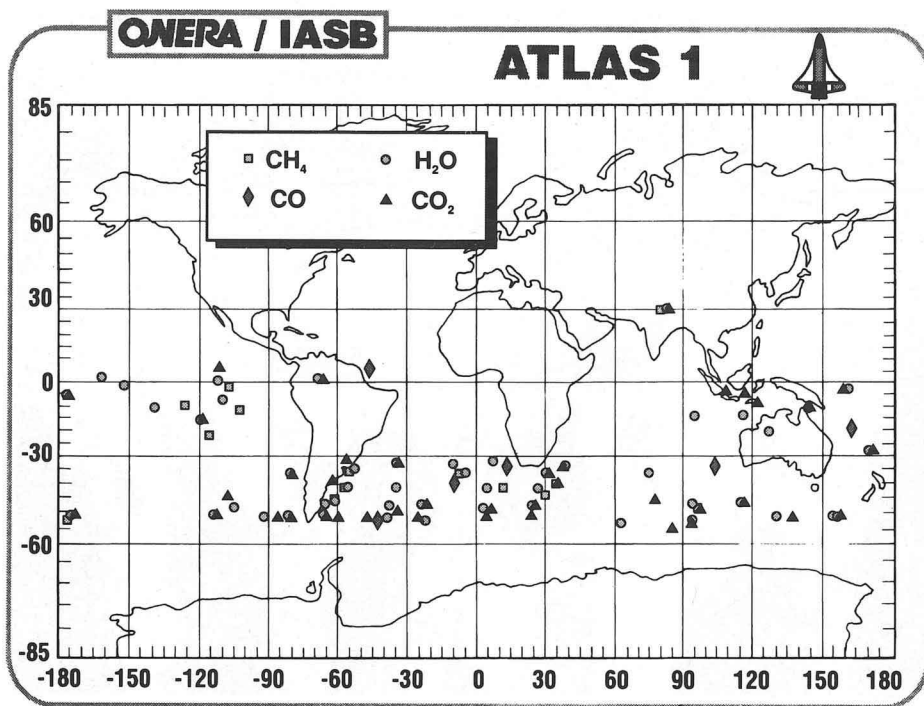


Fig. 7a. - Localisation des observations pour CH_4 , H_2O , CO , CO_2 .

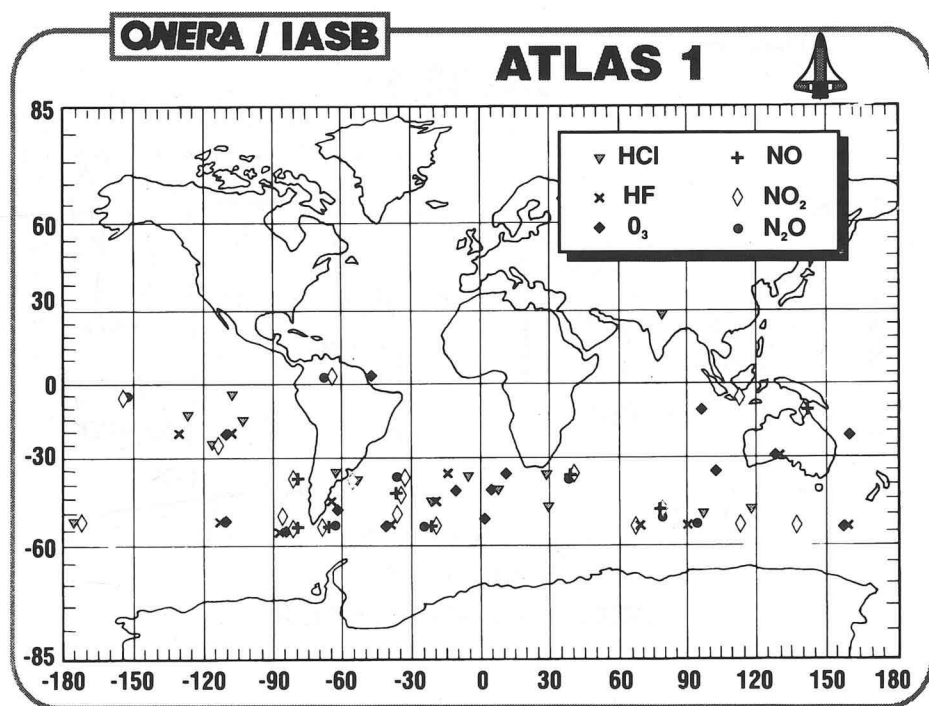


Fig. 7b. - Localisation des observations pour HCl , HF , NO , NO_2 , N_2O , O_3 .

Atlantis coûte environ deux milliards de francs à la NASA pour une charge utile d'environ 2 tonnes, la « rentabilité » des quelques millions de francs accordés au soutien de cette expérience d'une masse de 140 kg depuis son premier vol en 1983 apparaît particulièrement élevée. La même remarque s'applique d'ailleurs aux deux autres expériences franco-belges de la mission

Atlas conduites par l'IASB, du côté belge, et par le service d'aéronomie du CNRS, côté français, dont le fonctionnement a également été satisfaisant.

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.

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 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 éventualité 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'ONERA, constituera en 1995 l'aboutissement d'une longue et fructueuse collaboration, initiée en 1972, entre deux laboratoires européens aux compétences complémentaires. □

REFERENCES

- [1] J. Besson, 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 n° 6, pp. 343-353, 1978.
- [2] C. Muller, C. Lippens, J. Vercheval, M. Ackerman, J. Laurent, M.P. Lemaître, J. Besson, A. Girard. *Expérience « spectromètre à grille » à bord de la première charge utile de Spacelab*. J. Optics, 16, 4, pp. 155-168, 1985.
- [3] J. Besson. *Conception mécanique et thermique d'une expérience embarquée sur la navette : le spectromètre Spacelab 1*. L'Aéronautique et l'Astronautique, 113, 1985-6.
- [4] A. Girard, J. Besson, D. Brard, J. Laurent, M.P. Lemaître, C. Lippens, C. Muller, J. Vercheval, M. Ackerman. *Global results of grille spectrometer experiment on board Spacelab 1*. Planet. Space Sci., 36, 3, pp. 291-300, 1988.
- [5] A. Girard. *Spectromètre à grille*. Applied Optics 2, p. 79, 1963.