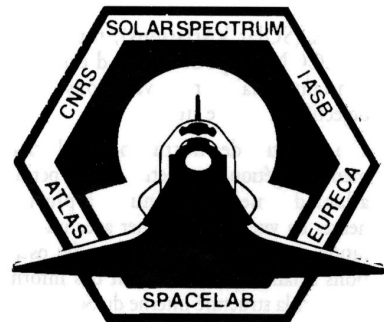




# La Mesure du rayonnement Ultraviolet Solaire lors des missions ATLAS

par Paul C. Simon, Didier Gillotay et William Peetermans  
Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique



## I. Introduction

L'atmosphère de la terre est le siège de nombreux processus aéronomiques qui déterminent sa composition chimique, son bilan énergétique et son comportement dynamique. Ces processus dépendent directement du rayonnement solaire et de son absorption dans l'atmosphère. Toute la photochimie atmosphérique est initiée par les processus de photodissociation provoqués par le rayonnement ultraviolet du Soleil. La composition chimique de l'atmosphère dépend également d'une manière critique de la nature des molécules qui, émises à la surface du globe, soit par des processus géo- et biochimiques naturels soit par les activités humaines, sont transportées aux altitudes supérieures par les composantes dynamiques de l'atmosphère.

L'étude scientifique de notre environnement atmosphérique terrestre en général et de l'atmosphère moyenne en particulier requiert de ce fait des données fondamentales telles que la distribution spectrale de l'énergie émise par le Soleil dans l'ultraviolet. Ces données, avec les sections efficaces d'absorption des molécules atmosphériques, permettent de quantifier la pénétration du rayonnement solaire dans l'atmosphère et les processus de photodissociation.

## II.

### Le rayonnement solaire

Le Soleil peut être considéré comme une source lumineuse sphérique de  $1,4 \times 10^6$  km de diamètre, située à  $1,5 \times 10^8$  km de la Terre. Il a un angle apparent de 32 min d'arc. L'éclairement énergétique exprimé en  $W/m^2$  est en première approximation équivalent à celui d'un corps noir à 5800 K. Dans le domaine infrarouge et radioélectrique, le spectre solaire est essentiellement un continuum avec des raies d'émission dans le domaine centimétrique des longueurs d'onde. Les structures d'absorption (raies de Fraunhofer) dues aux constituants de l'atmosphère solaire apparaissent aux longueurs d'ondes inférieures à 1000 nm pour disparaître à nouveau en dessous de 180 nm environ. Les raies d'émission d'origine chromosphérique et coronale caractérisent alors le spectre solaire. Dans l'ultraviolet, le continuum du spectre solaire ne

peut plus être représenté par un corps noir de 6000K qui surestime largement l'éclairement énergétique du soleil. De fait, vers 160 nm, le continuum solaire est équivalent à un corps noir de 4400 K.

Le Soleil constitue la principale source d'énergie pour le système Terre-atmosphère dans son ensemble. Son rayonnement qui s'étend des rayons X aux ondes centimétriques possède son maximum d'énergie dans le domaine visible de son spectre. La quantité totale d'énergie reçue au sommet de l'atmosphère terrestre est de  $1368 W \cdot m^{-2}$ . Compte tenu de la géométrie de la terre, le flux moyen incident est réduit au quart de cette valeur. Trente pour-cent environ sont réfléchis vers l'espace, ce qui laisse  $230 W \cdot m^{-2}$  du rayonnement solaire absorbé par le système Terre-atmosphère dans son ensemble. Seuls les domaines spectraux correspondant à l'ultraviolet et à l'infrarouge sont fortement absorbés par les constituants atmosphériques.

## III

### Les observations du spectre solaire

L'observation du Soleil remonte à plusieurs siècles mais les rayonnements ultraviolet et infrarouge furent seulement mis en évidence au XIX<sup>e</sup> siècle respectivement par Ritter et Herschel. La première observations spectrale à haute résolution entre 298 et 733 nm date de 1885. Toutefois, il a fallu attendre 1946 pour observer le premier spectre ultraviolet du soleil jusqu'à 210 nm grâce aux fusées V-2 capturées aux Allemands à l'issue de la 2<sup>ème</sup> guerre mondiale. Ce lancement a également mis en évidence l'extension de la couche d'ozone jusqu'à une altitude de l'ordre de 55 km. Depuis lors, les observations se sont multipliées, permettant d'étendre notre connaissance du spectre solaire jusqu'à l'ultraviolet extrême et les rayons X. La raie Lyman  $\alpha$  de l'hydrogène (121,6 nm) a notamment été observée dès 1952. Les fusées-sondes et les satellites artificiels ont été abondamment utilisés mais aussi les ballons stratosphériques et, dans une moindre mesure, les avions. Des observations dans le domaine visible ont aussi été réalisées à partir d'observatoires de haute altitude.

Durant le cycle Solaire 21 (1975-1986) plusieurs mesures de l'éclairement ultraviolet du soleil ont été réalisées à partir de ballons stratosphériques, de fusées-sondes, de satellites et de la navette spatiale. À l'exception des observations en ballons stratosphériques qui sont limitées, pour une altitude de 40 km à la fenêtre optique autour de 200-210 nm et aux longueurs supérieures à 270 nm, les autres observations se placent en dehors de l'atmosphère moyenne et, de ce fait, permettent une mesure directe du rayonnement solaire, depuis Lyman  $\alpha$  jusque 400 nm, sans correction pour son absorption résiduelle par l'atmosphère.

Les observations spatiales n'ont pas encore apporté de réponse univoque sur la distribution spectrale de l'énergie solaire et surtout sur ses variations temporelles, principalement dans l'ultraviolet. Des désaccords subsistent entre 135 et 185 nm pour les valeurs du flux correspondant à une activité modérée, proche du minimum, du Soleil. Les variations au cours du cycle de 11 ans peuvent atteindre un facteur 1.6 pour la raie Lyman  $\alpha$ . Dans le domaine spectral compris entre 175 et 240 nm, les variations temporelles sont quantitativement beaucoup moins élevées (< 10 pour-cent) et sont de ce fait difficiles à mesurer vu les problèmes de stabilité radiométrique à long terme des instruments en orbite. Aux longueurs d'ondes supérieures à 200 nm la précision absolue actuellement atteinte est de l'ordre de  $\pm 4$  pour-cent à  $\pm 5$  pour-cent. Les variations temporelles au-delà de 240 nm sont inférieures à 3 pour-cent et sont, de ce fait, encore plus difficiles à mesurer. Dans le visible, les meilleures observations effectuées à partir d'un observatoire de haute altitude par Neckel et Labs (1984) ont une précision absolue de  $\pm 1$  pour-cent.

La figure 1 représente la distribution spectrale de l'énergie solaire dans l'ultraviolet intégrée sur une bande passante de 1 nm, depuis Lyman  $\alpha$  jusqu'à 400 nm.

#### L'intervalle de longueur d'onde 175-320 nm.

Ce domaine de longueur d'onde concerne très spécifiquement le bilan de l'ozone stratosphérique qui est produit à partir de la photodissociation de l'oxygène moléculaire.

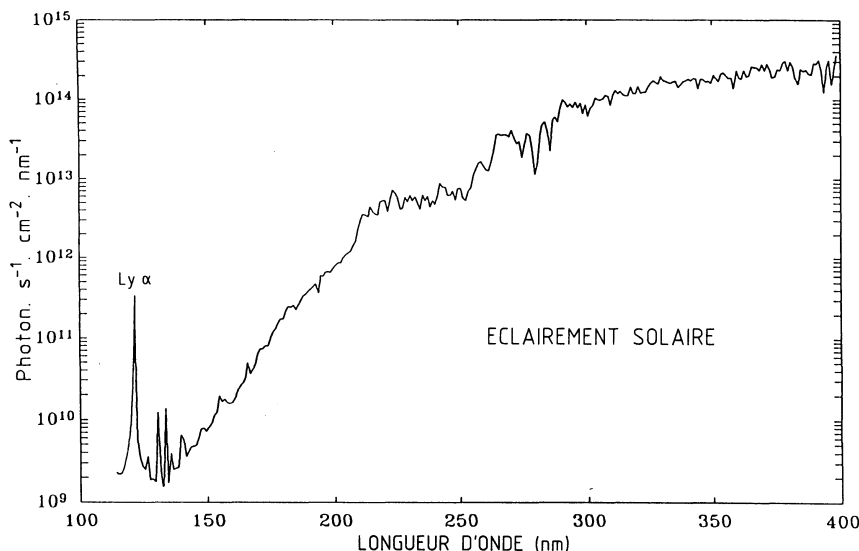


Fig. 1: Spectre solaire de 120 à 400 nm, intégré sur des intervalles de 1 nm.

Il est détruit par sa propre photodissociation. Il concerne aussi la photodissociation des halocarbures qui produit les atomes de chlore responsables de la destruction catalytique de l'ozone. Le domaine de 290 à 320 nm est aussi fondamental pour la stratosphère inférieure et pour la troposphère où de la photodissociation de l'ozone est la seule source des atomes d'oxygène excités  $O(^1D)$ , principal oxydant dans la stratosphère.

Les observations faites entre 200 et 320 nm ont été discutées en détail par Labs et al. (1987) en les comparant aux résultats de l'expérience «Spectre solaire» (SOLSPEC) obtenus lors de la mission SPACELAB 1 en 1983. Ceux-ci ont été confirmés par les résultats de la mission SPACELAB 2 en 1985 (VanHoosier et al., 1988) avec l'expérience «Solar Ultraviolet Spectral Irradiance Monitor» (SUSIM). Pour la première fois, deux mesures indépendantes de l'éclairement ultraviolet du soleil sont en accord à quelques pour-cent près pour le flux intégré dans le domaine 200-320 nm.

#### IV.

#### Les variations temporelles du rayonnement ultraviolet solaire

Le Soleil est une étoile variable qui présente un cycle d'activité de 11 ans bien connu et des variations séculaires dont les périodes sont controversées. De plus, sa période de rotation de 27 jours induit une modulation à court terme du rayonnement ultraviolet. Ces deux types de variations, 11 ans et 27 jours, qui ont des effets quantifiables sur

la photochimie de l'atmosphère moyenne, ont été étudiés par les observations satellitaires. Les variations à long terme, de l'ordre de 6 pour-cent à 205 nm, sont suffisamment importantes pour induire des variations dans le bilan de l'ozone stratosphérique. Elles sont encore quantitativement mal connues vu la difficulté de maintenir au niveau du pour-cent la précision radiométrique, même relative, des instruments en orbite. De ce fait, les variations associées à la rotation de 27 jours du Soleil qui sont déterminées avec une meilleure précision, ont été utilisées pour valider les processus photochimiques de l'atmosphère moyenne même si leur impact est négligeable à long terme.

#### Les variations de 27 jours.

Les variations associées à la rotation de 27 jours du Soleil ont été étudiées par le «Solar Backscatter Ultraviolet (SBUV) Spectrometer» à bord du Satellite Nimbus 7 depuis novembre 1978 jusqu'au minimum d'activité entre les cycles 21 et 22 et par le spectromètre UV à bord du satellite «Solar Mesosphere Explorer» (SME) de 1982 à 1989.

La technique de filtrage par transformée de Fourier a été utilisée pour isoler des séries temporelles disponible la modulation de 27 jours en fonction de la longueur d'onde. Les résultats sont illustrés par les figures 2 et 3. La modulation la plus importante du cycle 21 se situe en août 1982 avec une variation de 28 pour-cent pour Lyman  $\alpha$  et de 5 pour-cent à 205 nm. Il faut cependant tenir compte que les variations de 27 jours sont habituellement plus faibles et différentes en amplitude d'une rotation à une autre. De ce fait les valeurs moyennes des variations à 27 jours sont relativement moins élevées que celles observées en août 1982.

#### Les variations associées du cycle d'activité de 11 ans.

Les variations à long terme du rayonnement ultraviolet solaire sont quantitativement mal connues sauf pour Lyman  $\alpha$  avec les observations du satellite SME et les corrélations avec des indices comme la raie K du CaII à 397 nm. Le problème essentiel est la dégradation des caractéristiques radiométriques des instruments solaires en orbite sur des périodes dépassant une année (ou même quelques mois).

Le spectromètre SBUV a montré une dégradation importante (plusieurs dizaines de pour-cent en dessous de 300 nm sur 6 ans).

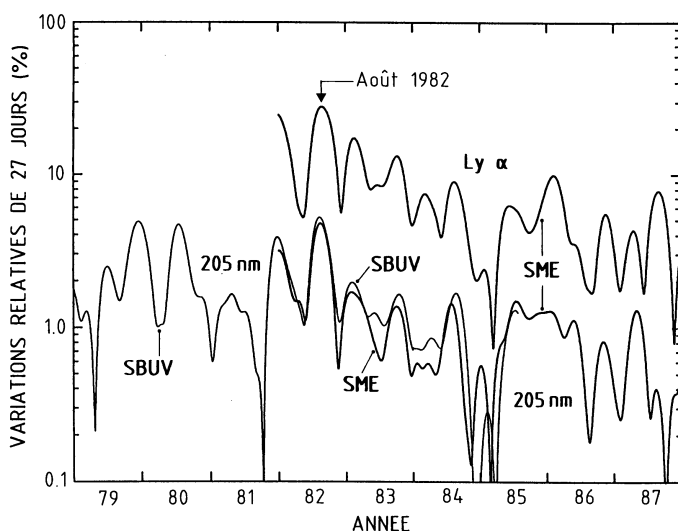


Fig. 2: Variations relatives de 27 jours pour Lyman  $\alpha$  et à 205nm de 1979 à 1987 inclus, à partir des observations de SME et SBUV.

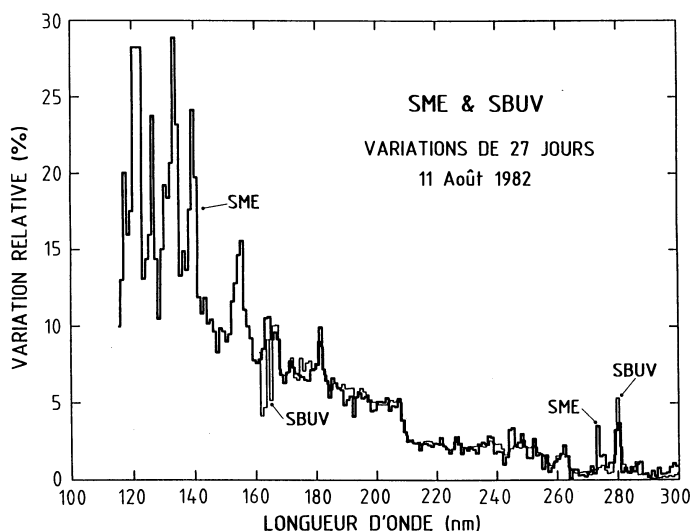


Fig. 3: Distribution spectrale des variations de 27 jours de 120 à 300nm observées en août 1982 par SME et SBUV.

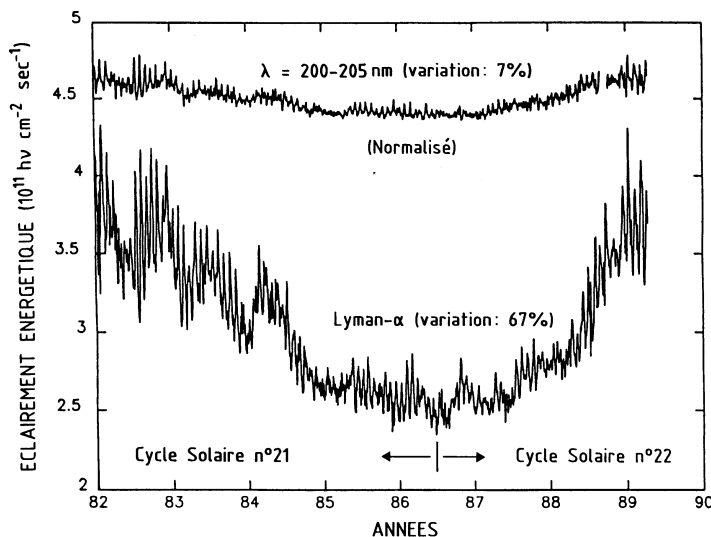


Fig. 4: Eclairement énergétique du soleil mesuré par SME de 1982 à 1989 à Lyman  $\alpha$  et 205 nm.

Afin de pallier à cette difficulté, un indice basé sur le rapport des éclaircissements mesurés dans la raie d'émission de MgII à 280 nm et dans les ailes de longueurs d'onde très proches permet de s'affranchir de la dégradation instrumentale et de déduire de manière empirique des variations aux autres longueurs d'onde (Donnelly, 1991). Par contre, le satellite SME dont la dégradation pendant son temps de vie a pu être corrigée, a donné des séries temporelles qui sont, à ce jour, les plus fiables avec toutefois des incertitudes relativement élevées lorsque cette variation à long terme devient inférieure à 10 pour-cent. La figure 4 illustre les résultats obtenus à partir des observations de SME pendant la phase descendante du cycle solaire 21 (1982-1986 inclus).

## V.

### La mesure du spectre solaire à bord de la navette spatiale

En fait, la mesure du rayonnement solaire en dehors de l'atmosphère terrestre s'est avérée extrêmement difficile. Les raisons sont multiples. Tout d'abord, les instruments d'observation doivent être étalonnés au laboratoire afin de pouvoir céduire des valeurs absolues de la distribution spectrale d'énergie émise par le Soleil. Le transfert d'une échelle radiométrique absolue sur un instrument qui mesure une source lumineuse aussi intense que le Soleil n'est pas chose aisée. Ensuite, la validité de cet étalonnage après le lancement de l'instrument dans l'espace semble poser quelques problèmes vu les divergences obtenues entre plusieurs observations. Les conditions propres au lancement des fusées (propreté, vibrations, temps d'observation inférieurs à 10 minutes, etc...) sont sans aucun doute responsable de la dégradation de la précision des étalonnages et des mesures. Enfin, les instruments placés en orbite, qui sont donc soumis à la totalité du rayonnement solaire, y compris le rayonnement X, subissent des dégradations qui modifient leurs caractéristiques radiométriques. Il n'a donc pas été possible, jusqu'à présent, de déduire avec certitude des valeurs quantitatives sur les variations à long terme du rayonnement solaire à partir de satellites.

Les mesures les plus précises ont été obtenues depuis un observatoire de haute altitude par Neckel et Labs (1981) au cours des années soixante. Elles sont forcément principalement limitées au visible. Ces observations étaient basées sur l'alternance entre la mesure de sources de transfert radiométrique stable et celle du Soleil.

En fait, l'instrument était régulièrement étalonné en cours d'observation et la mesure de la distribution spectrale de l'énergie solaire était déduite après comparaison entre le signal du Soleil et celui de sources étalons, le trajet optique au travers du spectromètre étant rigoureusement identique dans les deux cas.

Ce principe de mesure n'avait jamais été utilisé dans l'espace étant donné la durée réduite des observations en fusée-sonde et la masse, le volume et la puissance électrique disponibles à bord des satellites scientifiques. De plus, la technologie propre aux sources étalons n'avait jamais été développée pour une utilisation spatiale. Le développement de la navette spatiale et du laboratoire spatiale européen SPACELAB a incontestablement ouvert une nouvelle voie dans l'observation du Soleil.

#### L'expérience «Spectre solaire».

Cette expérience a pour but de mesurer la distribution spectrale de l'énergie associée au rayonnement solaire ainsi que ses variations temporelles, notamment celles corrélées avec le cycle d'activité de 11 ans. Le domaine de longueur d'onde étudié s'étend de l'ultraviolet (180 nm) à l'infrarouge (3000 nm). Ce domaine spectral couvre 98 pour-cent de l'énergie totale émise par le Soleil et permet donc des comparaisons avec des mesures simultanées de la «constante» solaire.

Le principe de la mesure est basé sur la comparaison du signal résultant du Soleil et avec celui résultant de sources de référence, faisant partie intégrante de l'instrument. Toute modification des caractéristiques radiométriques de l'instrument en cours d'observation peut ainsi être contrôlée à l'aide des sources de référence. Le laboratoire spatial SPACELAB a été la première opportunité qui s'est présentée permettant d'appliquer ce principe et de couvrir un domaine spectral aussi large étant donné l'absence d'absorption atmosphérique à une altitude de 250 km. De plus, comme le SPACELAB est intégré dans la navette spatiale, les instruments d'observation sont récupérés après la mission. Il est donc possible de vérifier les étalonnages radiométriques du spectromètre après des observations solaires en orbite.

Un instrument d'observation entièrement nouveau a été conçu et réalisé pour répondre aux objectifs scientifiques. Il est composé de trois doubles monochromateurs utilisant comme optique de dispersion des réseaux holographiques concaves de 10 cm de focale. Les caractéristiques principales de l'instrument sont les suivantes (figures 5, 6 et 7) :

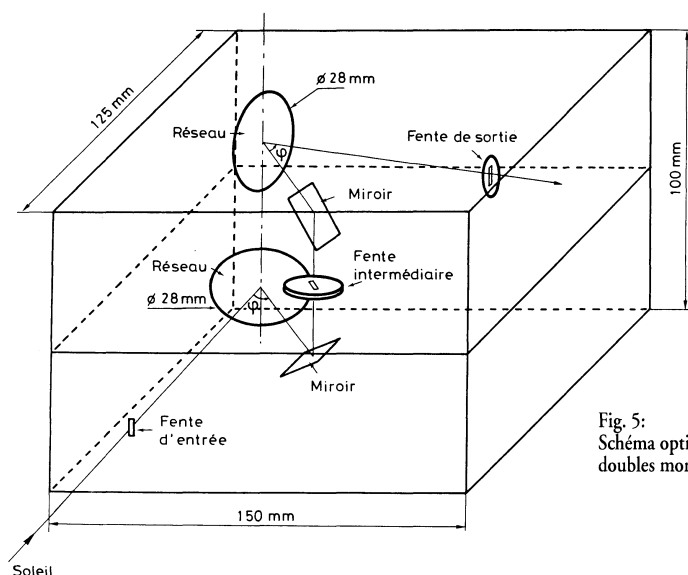


Fig. 5:  
Schéma optique d'un des trois  
doubles monochromateurs.

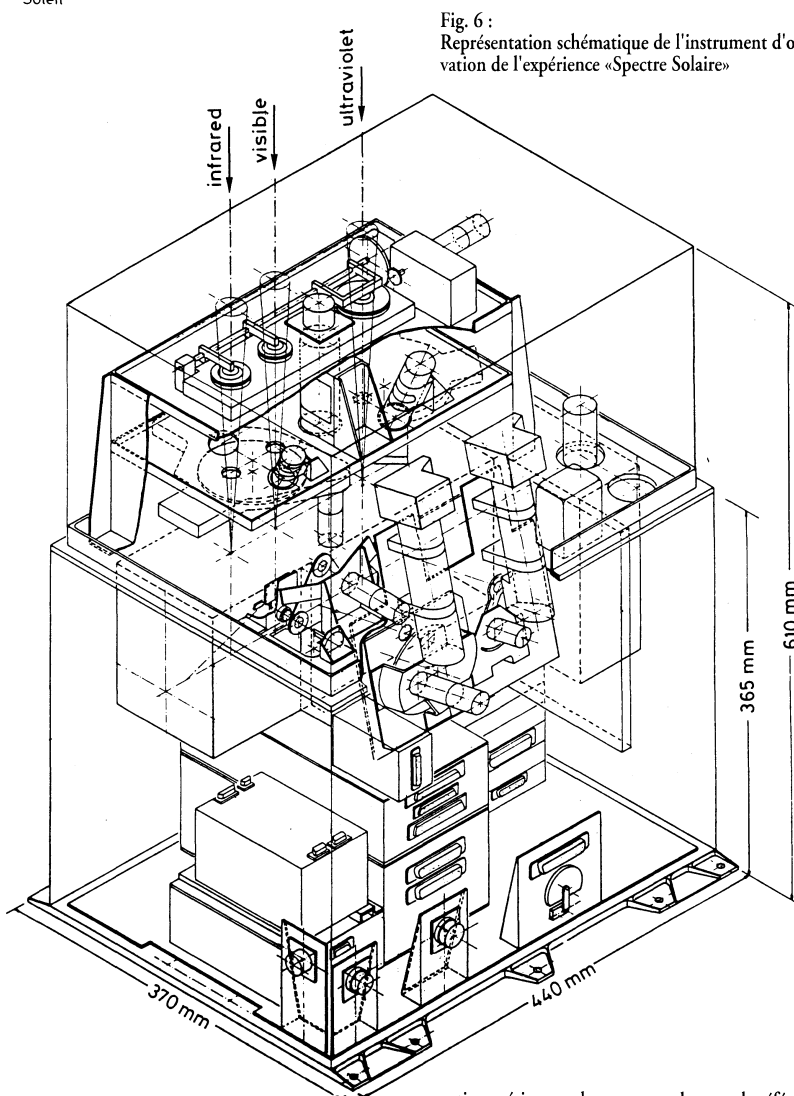


Fig. 6 :  
Représentation schématique de l'instrument d'observation de l'expérience «Spectre Solaire»

partie supérieure : obturateurs et lampes de références  
partie centrale : spectromètres et détecteurs  
partie inférieure : sous-ensembles électroniques  
masse de l'instrument : 32 kg  
puissance consommée : 100 watt  
télémesure : 350 bits/sec

- Les 3 doubles monochromateurs couvrent respectivement les domaines ultraviolet, visible et proche infrarouge avec des intervalles de longueurs d'ondes communs entre les spectromètres ultraviolet et visible d'une part et les spectromètres visible et infrarouge d'autre part.
- Les 6 réseaux sont montés sur le même axe de rotation afin d'avoir une reproductibilité parfaite des bandes passantes de l'instrument.
- La lumière du Soleil est diffusée à l'intérieur de chaque double monochromateur à l'aide d'une fenêtre dépolie qui nous affranchit des imprécisions de pointage lors des observations solaires.
- Chaque double monochromateur peut être éclairé, pendant le vol, par des sources ultraviolettes et visibles qui serviront de référence par rapport aux étalonnages absolus qui sont réalisés avant et après chaque lancement. Une lampe spectrale permet de vérifier l'échelle de longueur d'onde en orbite.
- L'instrument est contrôlé par un microprocesseur qui reçoit également les commandes envoyées depuis le sol.

Ce projet a été proposé, conçu et réalisé grâce à une étroite collaboration européenne entre le Service d'Aéronomie du CNRS (France), l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique (IASB), le «Landessternwarte» à Heidelberg (RFA) et le «Hamburger Sternwarte» (RFA). L'équipe scientifique et technique de l'IASB a participé à toutes les étapes du projet, depuis la définition de l'instrument jusqu'au contrôle des opérations au cours du vol, en passant par la fabrication de plusieurs sous-ensembles, par les essais de qualification, les étalonnages radiométriques. À titre d'exemple, la structure mécanique a été réalisée à l'IASB qui a ainsi prouvé sa compétence dans une technologie difficile et exigeante.

L'expérience «spectre solaire» a volé lors de la mission SPACELAB 1 en 1983. Elle était placée sur la palette porte-instrument, extérieure au module pressurisé. Deux autres instruments solaires, mesurant la «constante» solaire étaient fixés sur le même structure de base.

#### Les étalonnages radiométriques.

Les objectifs scientifiques ne peuvent être atteints sans un étalonnage absolu de chaque double monochromateur avec son détecteur. Il faut, en effet, établir la relation entre les signaux des détecteurs et l'énergie solaire qui éclaire les fenêtres d'entrée de l'instrument. L'étalon primaire est le

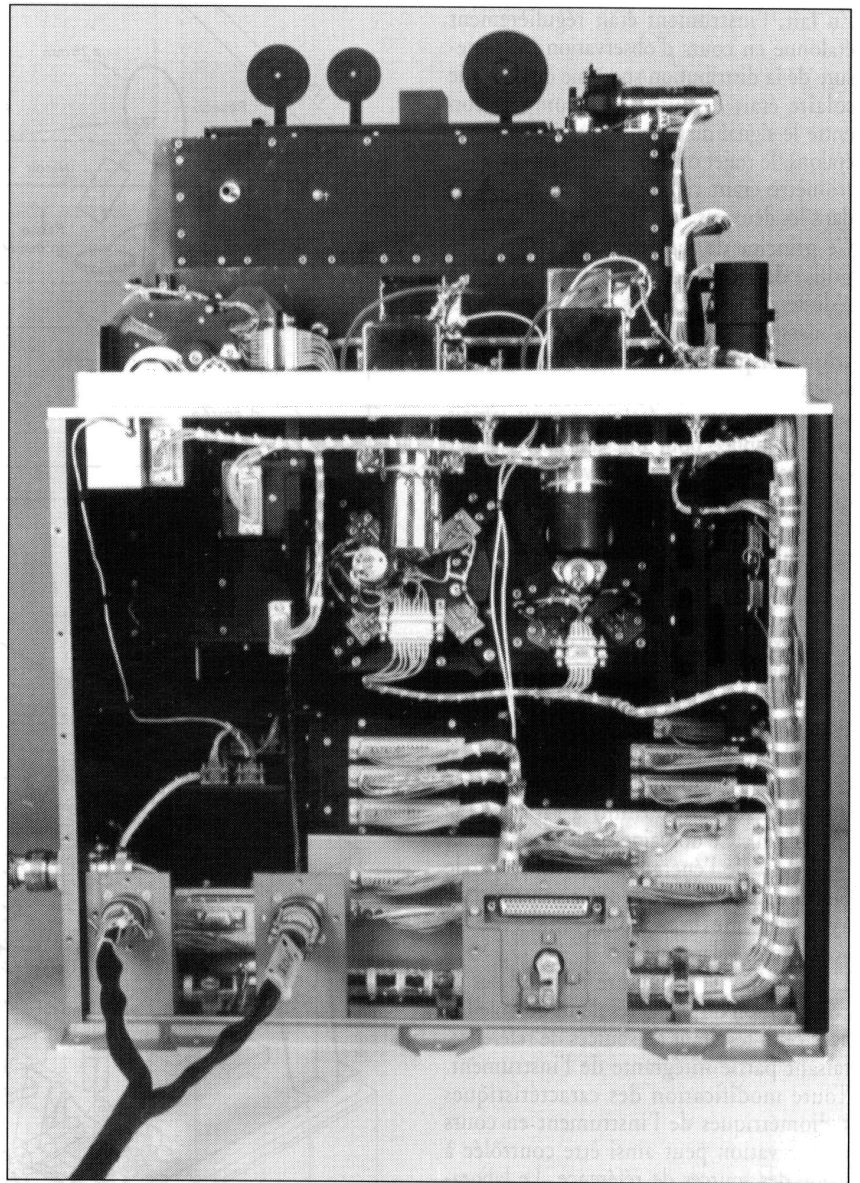


Fig. 7: Photographie de l'instrument sans structure mécanique latérale.

rayonnement d'un corps noir travaillant à une température de 3100 K. Comme ces étalonnages ne peuvent être fait qu'au laboratoire, c'est-à-dire longtemps avant le lancement, il est absolument nécessaire de vérifier la stabilité de l'instrument pendant la période d'intégration au «Kennedy Space Center» (KSC) et d'effectuer un contrôle radiométrique le plus rapidement possible après l'atterrissage de la navette.

Pour répondre à ces besoins, deux ensembles de sources de transfert ont été utilisés : dix lampes à ruban de tungstène pour les longueurs d'ondes supérieures à 250 nm et dix lampes au deutérium pour les longueurs d'ondes inférieures à 350 nm. Cinq lampes de chaque modèle sont gar-

dées au laboratoire tandis que les autres accompagnent l'instrument pour effectuer les contrôles radiométriques requis en «temps réel». La reproductibilité des étalons de transfert à ruban de tungstène est de l'ordre de 0,1 pour-cent dans le domaine visible pour une période de 10 ans.

## VI.

### Le programme ATLAS

La mesure de l'éclairement énergétique du Soleil lors de missions spatiales de 7 à 10 jours ne sont actuellement valables que dans un contexte de mesures atmosphériques simultanées à bord de la même navette et/ou en corrélation avec les obser-

vations satellitaires qui donnent les dimensions géographique globale et temporelle vu la continuité des mesures pendant plusieurs années. C'est pourquoi le programme ATLAS a été défini en fonction du cycle d'activité de 11 ans du Soleil afin de rencontrer cette dimension temporelle, mais aussi pour obtenir des observations corrélées avec celles des satellites comme ce fut le cas du «Upper Atmospheric Research Satellite» (UARS) lancé en octobre 1991. La figure 8 présente la série des missions du programme ATLAS jusqu'au début du siècle prochain, avec les deux missions déjà réalisées en mars 1992 et avril 1993.

La complexité des mesures radiométriques absolues de l'éclairement énergétique du Soleil a amené la NASA à faire voler ensemble les deux instruments SOLSPEC et SUSIM qui avaient participé respectivement aux missions SPACELAB 1 et 2 en décembre 1983 et août 1985. De plus, la version du SBUV pour la navette spatiale (SSBUV) participe à différentes missions de courte durée, y compris les missions ATLAS, de manière autonome, sans être intégrée à la charge utile ATLAS. Cet instrument a pour but de permettre des observations comparatives avec un instrument semblable intégré sur les satellites NOAA dont le but principal est la mesure de la distribution verticale de l'ozone, qui nécessite une mesure régulière du spectre solaire dans l'ultraviolet. Le SSBUV a été modifié afin de permettre également un étalonnage radiométrique de l'instrument en orbite. L'intégration des instruments solaires de la mission ATLAS 1 dans la soute de la navette spatiale est illustrée par la figure 9.

Ces trois instruments ont produit d'excellents résultats qui sont actuellement en cours d'analyse et de comparaison, en tenant compte notamment des variations temporelles de 27 jours et de celles liées au cycle d'activité. De plus, une version semblable de SUSIM se trouve à bord de UARS avec une autre expérience solaire «Solar/Stellar Irradiance Comparison Experiment» (SOLSTICE).

D'autre part, la plate-forme EURECA («European Retrieval Carrier») de l'Agence Spatiale Européenne comporte une deuxième version de l'expérience «Spectre Solaire». Sa mission qui a débuté en août 1992 pour se terminer en mai 1993 a permis des mesures simultanées lors de la mission ATLAS 2 en avril 1993, ce qui augmentera la précision des mesures de la plate-forme EURECA pendant les 9 mois d'observation solaire qui se sont déroulées avec succès.

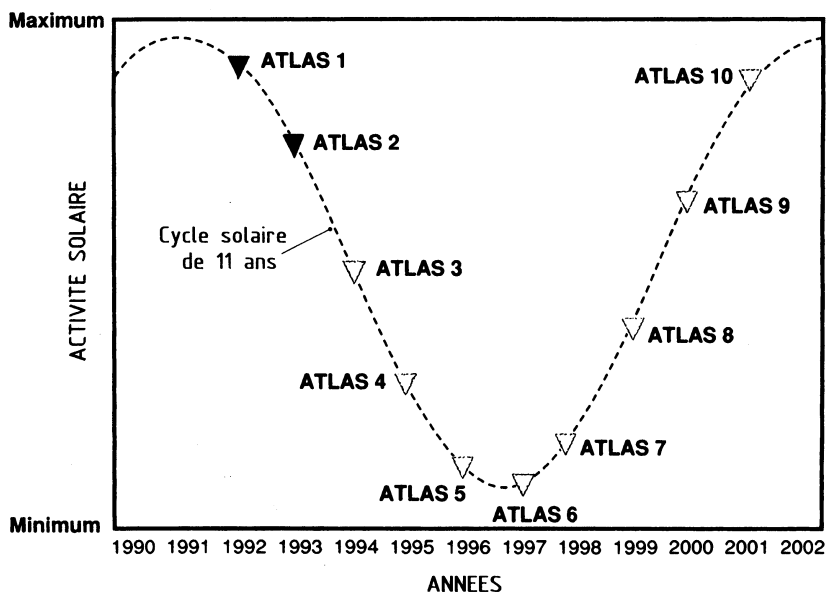


Fig. 8: Série des vols ATLAS de 1992 à 2001.

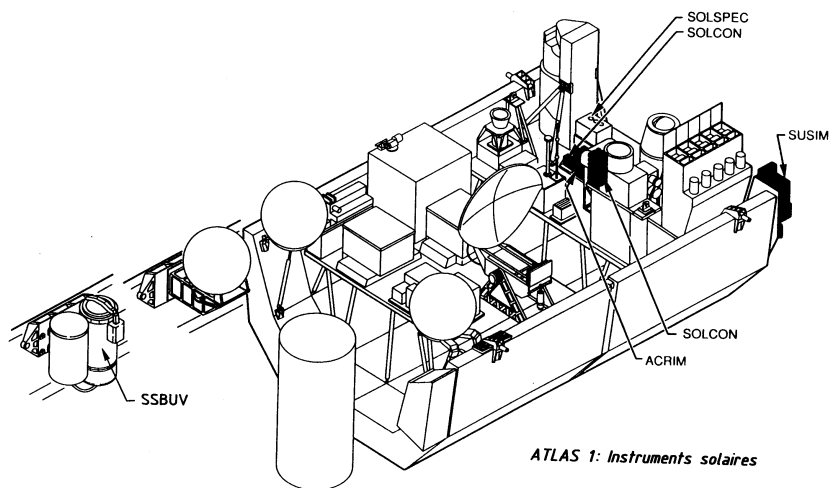


Fig. 9: Disposition des instruments solaires dans la navette spatiale lors de la mission ATLAS 1.

La définition du programme ATLAS, avec ses spécificités particulièrement importantes par les mesures radiométriques à long terme de l'éclairement énergétique du Soleil, permet donc d'apporter des éléments quantitatifs indispensables pour l'étude des relations «Soleil-atmosphère» et plus spécialement pour l'étude des changements globaux de notre environnement atmosphérique, permettant la détermination précise des changements naturels de l'atmosphère par rapport à ceux d'origine anthropique.

\*  
\* \*

## Références

- DONNELLY, R.F., *J. Geom. Geoelec.*, 43, Suppl., 835-842, 1991.  
 LABS, D., H. NECKEL, P.C. SIMON et G. THUILLIER, *Solar Phys.*, 107, 203-219, 1987.  
 NECKEL, H. et D. LABS, *Solar Phys.*, 74, 231-249, 1981.  
 NECKEL, H. et D. LABS, *Solar Phys.*, 90, 205-258, 1984.  
 VANHOOSIER, M.E., J.-D.F. BARTOE, G.E. BRUECKNER et D.K. PRINZ, *Astr. Lett. and Commun.*, 27, 163-168, 1988.