

L'EXPERIENCE "SPECTRE SOLAIRE" (IES016)

PAUL C. SIMON

Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique
3, avenue Circulaire, B-1180 Bruxelles, Belgique

Pourquoi étudier le rayonnement solaire

L'atmosphère de la terre est le siège de nombreux processus physiques et chimiques qui déterminent sa composition chimique, son bilan énergétique et son comportement dynamique. Le rôle du rayonnement solaire et de son absorption à différentes altitudes de l'atmosphère est évidemment fondamental. En effet, le soleil est la source principale d'énergie pour l'atmosphère et pour le système climatique dans son ensemble. Le maximum d'énergie émis par le soleil se situe dans le domaine visible de son spectre. Celui-ci est relativement moins atténué lors de sa pénétration dans l'atmosphère terrestre que le rayonnement ultraviolet et infrarouge. Cette pénétration, qui varie donc suivant les domaines de longueurs d'ondes envisagés, contrôle le bilan radiatif de l'atmosphère, donc le climat, ainsi que les processus aéronomiques responsable de la structure physique et chimique de notre environnement atmosphérique.

La photochimie atmosphérique est initiée par la partie ultraviolette du spectre solaire. L'énergie ultraviolette du soleil est essentiellement absorbé par l'oxygène moléculaire dans la mésosphère et la thermosphère inférieure et par l'ozone dans la stratosphère et la mésosphère (voir figure 1). La photodissociation de l'oxygène moléculaire produit l'oxygène atomique qui se trouve à la base de la formation de l'ozone dans l'atmosphère. C'est, en fait, l'ozone qui protège la biosphère des rayons ultraviolets les plus nocifs, de longueurs d'ondes inférieures à 300 nm. Cette absorption est aussi responsable du chauffage de la strato-

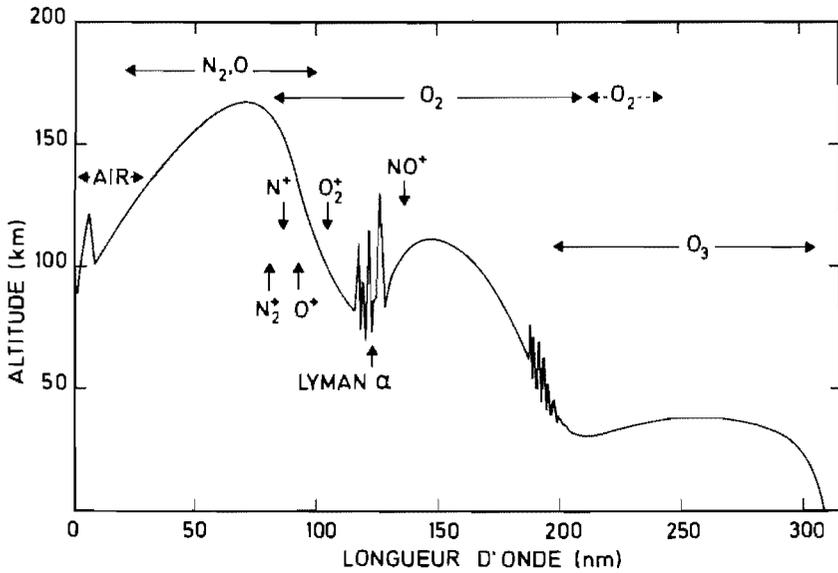


Figure 1 : Pénétration du rayonnement ultraviolet solaire dans l'atmosphère en fonction de la longueur. La courbe représente l'altitude correspondant à une épaisseur optique unitaire, c'est-à-dire à une alternation du facteur e (2.72).

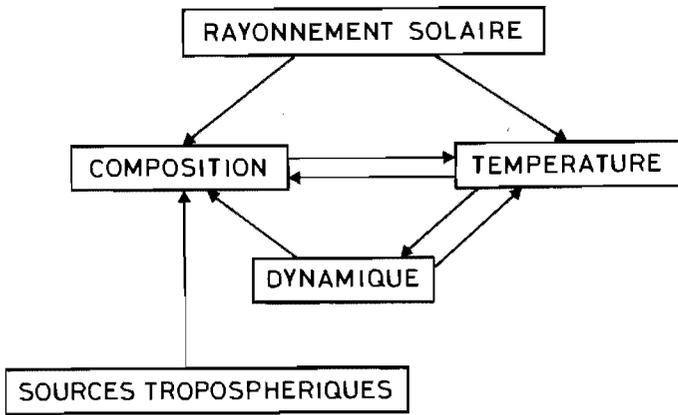


Figure 2 : Représentation schématique des interactions entre les processus physiques et chimiques de l'atmosphère.

sphère. Toutefois, le bilan radiatif de la stratosphère et de la mésosphère doit aussi tenir compte du refroidissement dû à l'émission infrarouge de ce même constituant ainsi que du dioxyde de carbone de la vapeur d'eau et, dans une moindre mesure, d'autres constituants encore plus minoritaires.

Le comportement dynamique de l'atmosphère dépend également de l'énergie solaire absorbée en fonction de l'altitude. L'étude des différents types de mouvements atmosphériques repose sur l'analyse de la structure thermique de l'atmosphère déterminée par le bilan radiatif. Ces mouvements ont une incidence directe sur la distribution méridionale des constituants minoritaires de l'atmosphère comme par exemple l'ozone.

La structure complexe de notre environnement atmosphérique résulte donc du couplage entre le rayonnement solaire, la composition chimique et la dynamique de l'atmosphère. Ces interactions sont représentées schématiquement par la figure 2.

Enfin, le soleil est aussi l'étoile la plus proche de notre planète, donc la plus accessible aux observations. Il constitue un sujet privilégié pour l'étude et la connaissance de notre univers.

La mesure de l'énergie associée au rayonnement solaire est donc essentielle à toute étude aéronomique et climatique de l'atmosphère terrestre. D'autre part, les variations temporelles de cette énergie peuvent avoir des conséquences sur la structure de notre environnement. L'atmosphère est certainement la partie du système climatique la plus exposée à ces variations. Il est donc aussi indispensable de déterminer quantitativement la grandeur de ces variations.

Comment mesurer le rayonnement solaire

L'observation du soleil remonte à plusieurs siècles. Les rayonnements ultraviolet et infrarouge furent seulement mis en évidence au début du

XIXe siècle respectivement par Ritter et Herschel et la première observation spectrale à haute résolution entre 298 et 733 nm date de 1895. 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 2e 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 α de l'hydrogène 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. Les observations spatiales n'ont toutefois pas apporté de réponses suffisamment précises sur la distribution spectrale de l'énergie solaire et sur ses variations temporelles, principalement dans l'ultraviolet. Des divergences de l'ordre de 40% subsistent encore entre

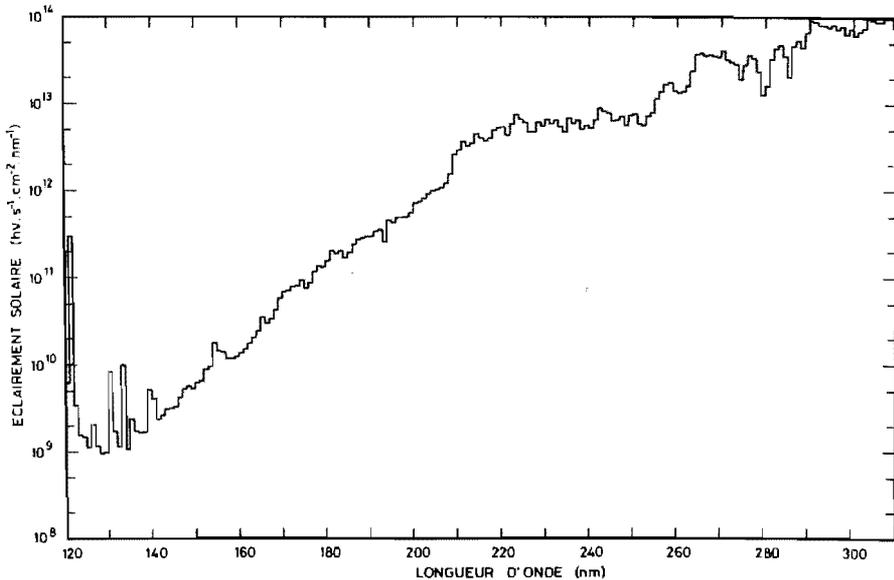


Figure 3 : Distribution spectrale de l'énergie solaire dans l'ultraviolet exprimée en photon/cm².sec et pour un intervalle spectral de 1 nm en fonction de la longueur d'onde.

plusieurs observations. De plus, les variations du rayonnement solaire associées au cycle d'activité de 11 ans sont soit mal connues, soit masquées par les imprécisions inhérentes aux techniques d'observation. (pour plus de détail, voir Simon, 1981; Simon et Brasseur, 1983).

La figure 3 représente la distribution spectrale de l'énergie solaire dans l'ultraviolet proposée par Brasseur et Simon (1981) sur base des données expérimentales les plus fiables.

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 déduire des valeurs absolues de la distribution spectrale d'énergie émise que 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 Labs et Neckel (voir Neckel et Labs, 1981) au cours des années soixante. Elles sont forcément principalement limitées au domaine spectral visible. Ces observations étaient basées sur l'alternance entre la mesure de sources de transfert radiométrique stables 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 de 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% 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 pouvait ainsi être contrôlée à l'aide des sources de référence. Le laboratoire spatial SPACELAB est en fait 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, pour la première fois, de vérifier les étalonnages radiométriques d'un 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 (fig. 4, 5 et 6) :

- 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.

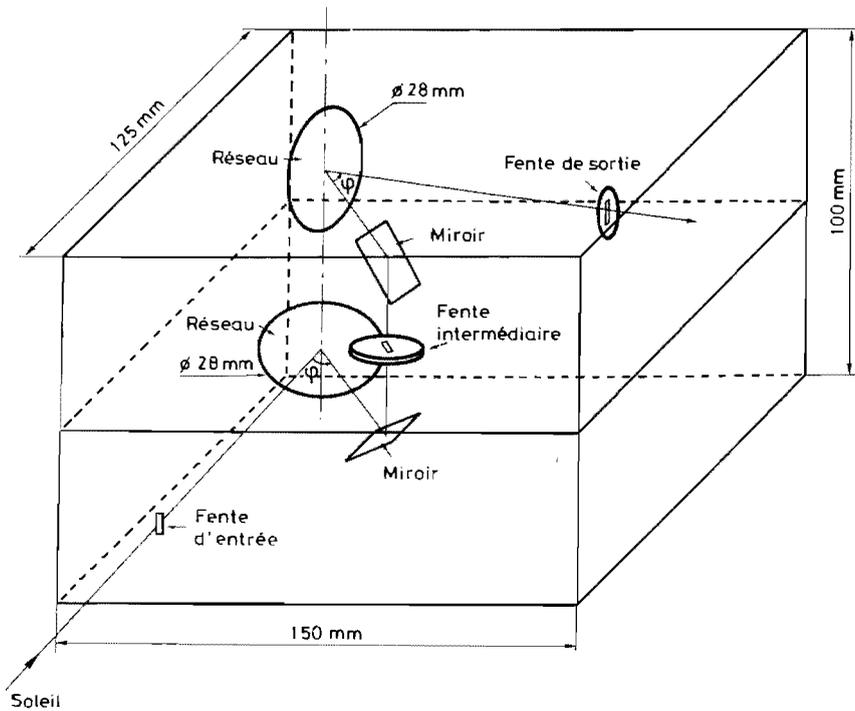


Figure 4 : Schéma optique d'un des trois doubles monochromateurs.

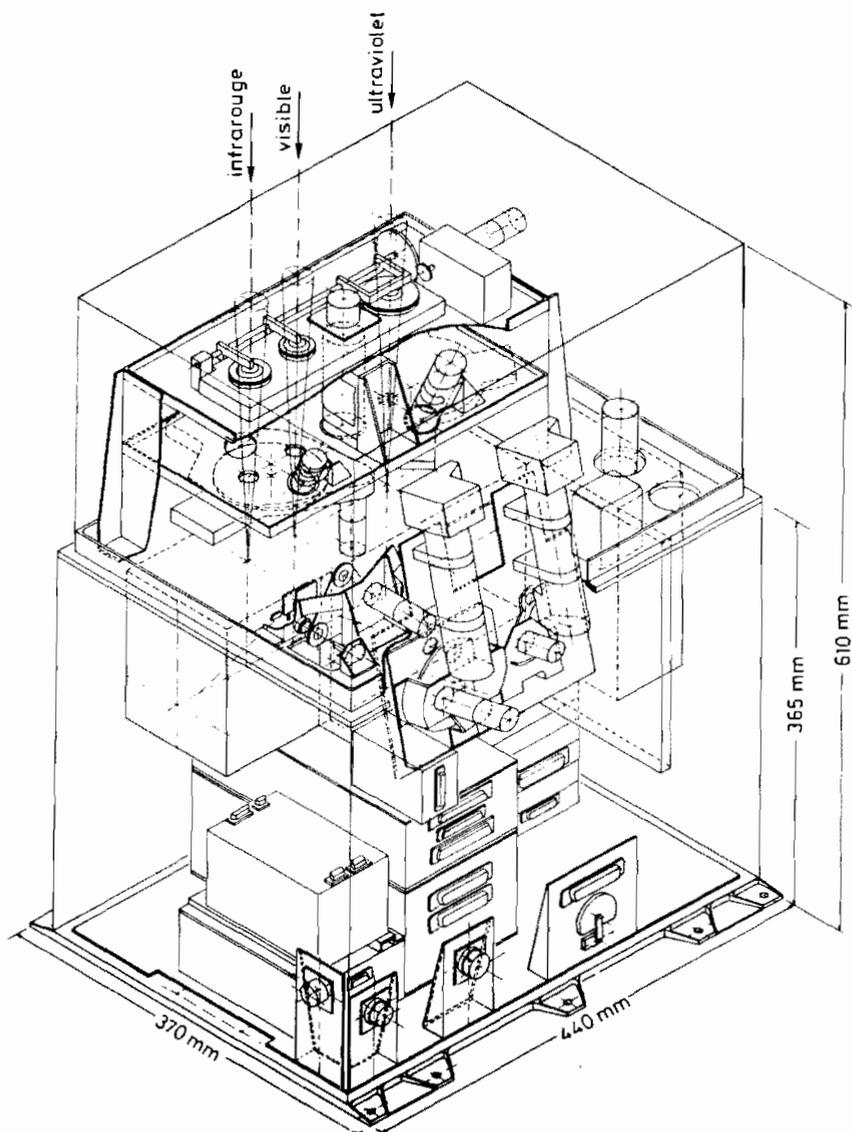


Figure 5 : Représentation schématique de l'instrument d'observation de l'expérience "Spectre solaire"

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

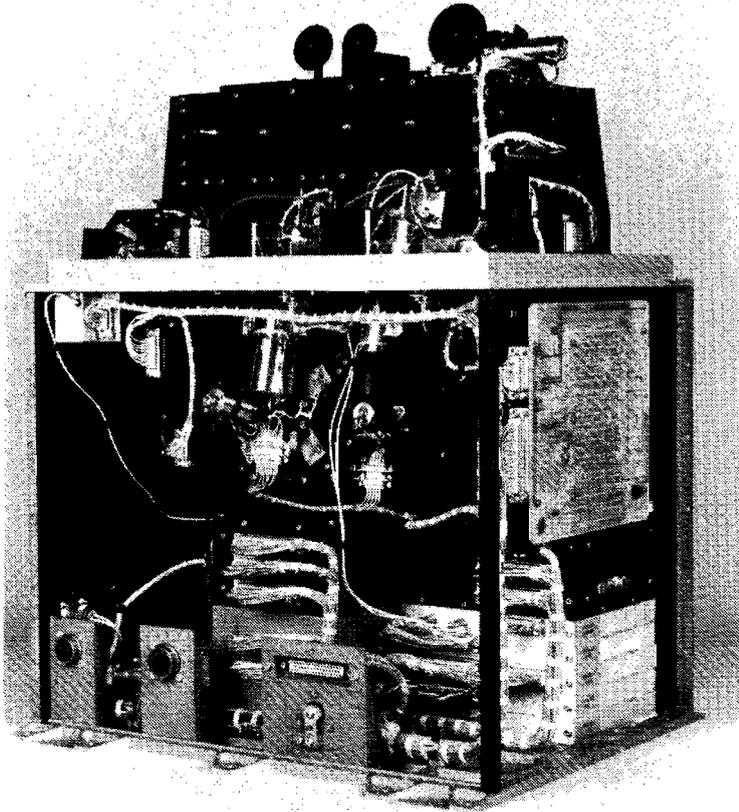


Figure 6 : Photographie de l'instrument sans structure mécanique latérale.

- 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.

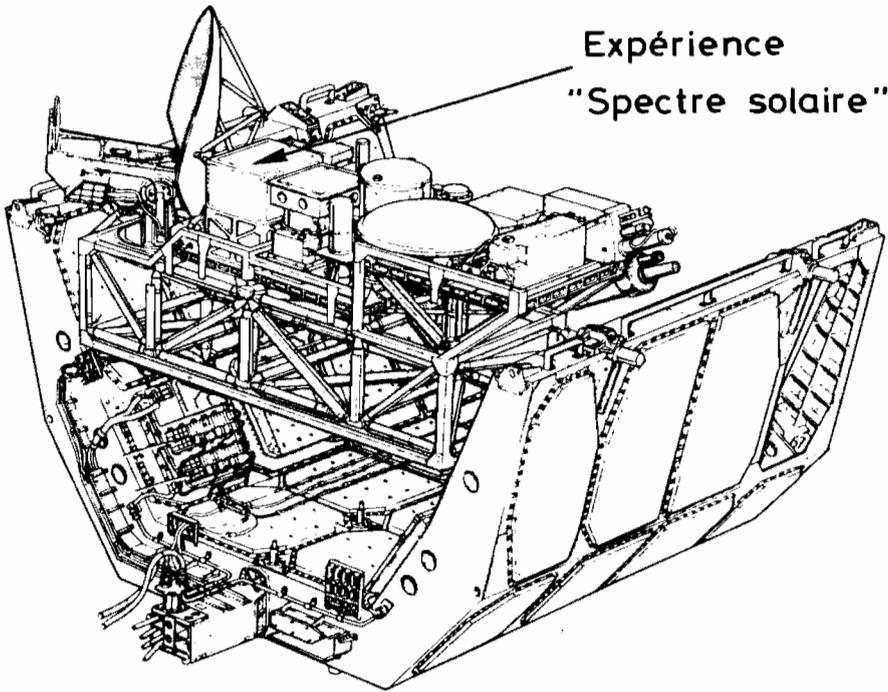


Figure 7 : Schéma de la palette porte-instrument avec le pont européen.

Ce projet a été proposé, conçu et réalisé grâce à une étroite collaboration européenne entre l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique (IASB), le Service d'Aéronomie du CNRS (France), 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 de SPACELAB, en passant par la fabrication de plusieurs sous-ensembles, par les essais de qualification, les étalonnages radiométriques. A titre d'exemple, la structure mécanique a été réalisée par les techniciens de l'IASB qui ont ainsi prouvé leur compétence dans une technologie difficile et exigeante.

L'expérience "spectre solaire" était placée sur la partie extérieure du SPACELAB, la palette porte-instrument (voir figure 7). Deux autres instruments solaires, mesurant la "constante solaire" étaient fixés sur la 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 respectif. 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 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 était 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 gardées 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% dans le domaine visible pour une période de 10 ans.

La mission SPACELAB 1

Le 9e vol de la navette spatiale, désignée officiellement STS-9/SPACELAB 1 concrétisait l'accord conclu en 1973 entre la NASA et l'Agence Spatiale Européenne (ASE). Celle-ci devait développer, financer et construire un laboratoire spatial pour le "Space Transportation System" qui, lui, était pris en charge par la NASA. Le lancement de SPACELAB 1 qui était intégré à bord de la navette "Columbia" a eu lieu le 28 novembre 1983. De fait, une station scientifique avec six hommes d'équipage a été placée à une altitude de 250 km sur une orbite circulaire inclinée de 57° par rapport à l'équateur. Pendant 10 jours, 70 expériences différentes ont été effectuées. Parmi celles-ci, l'expérience "Spectre solaire" s'est déroulée pendant la phase "chaude" de la mission, c'est-à-dire lorsque le SPACELAB était pointé vers le soleil. Trois périodes d'observation totalisant plus de 24 heures de mesures ont eu lieu le 9e et le 10e jour de la mission. Avant cela, plusieurs périodes d'étalonnage, ne requérant aucune attitude spéciale de la navette, ont eu lieu dès le début de la mission afin de contrôler les caractéristiques radiométriques de l'instrument pendant la totalité du temps passé dans l'espace.

Les résultats préliminaires sont très positifs. Il faut toutefois insister que la mesure du rayonnement solaire impliquait également un étalonnage après le vol. Celui-ci s'est déroulé au "Kennedy Space Center" (KSC) en janvier 1984. Enfin, avant de tirer des conclusions définitives sur les résultats scientifiques, l'instrument sera à nouveau étalonné par rapport au corps noir, étalon radiométrique primaire. Ceci se fera dans le courant du mois d'avril 1984.

Programmes futurs

Les observations effectuées au cours de la mission SPACELAB 1 ne constituent que la première étape du programme initialement prévu. Il est évident que pour mesurer les variations solaires à long terme, plusieurs vols, à intervalles réguliers, sont indispensables. La NASA a financé un projet intitulé "Earth Observation Mission" (EOM) qui prévoit 11 vols d'une palette porte-instrument pendant 10 ans (1985-1995). L'expérience

"Spectre solaire" a été sélectionnée par la NASA pour participer à ce projet. Les observations de rayonnement solaire couvriront donc une période complète du cycle d'activité du soleil. Les objectifs scientifiques définis en 1976 (date de la proposition de l'expérience "Spectre solaire" à l'ASE) pourront donc être réalisés grâce à cette participation au projet EOM. Ceci démontre que ces objectifs rencontrent les préoccupations de la communauté scientifique internationale en matière d'environnement atmosphérique.

Equipe scientifique de l'expérience

G. Thuillier	Service d'Aéronomie du CNRS (France)
P.C. Simon	Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique
D. Labs	Landessternwarte (RFA)
R. Pastiels	Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique
H. Neckel	Hamburger Sternwarte (RFA)

Equipe technique de l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique

E. Van Ransbeeck
P. Mignon
P. Asscherickx
M. Mathijs
R. Baedewijns
W. Decuyper

Références

- Brasseur, G. and Simon, P.C. (1981), Stratospheric chemical and thermal response to long-term variability in solar UV irradiance, *J. Geophys. Res.*, 86, 7343.
- Neckel, H. and Labs, D. (1981), Improved data of solar spectral irradiance from 0.33 to 1.25 μ , *Solar Phys.*, 74, 231.
- Simon, P.C. (1981), Solar irradiance between 120 and 400 nm and its variations, *Solar Phys.*, 74, 273.
- Simon, P.C. and Brasseur, G. (1983), Photodissociation effects of solar U.V. radiation, *Planet. Space Sci.*, 9, 31.