



HAL
open science

Les expériences optiques du satellite D2A

J. R. Huriet

► **To cite this version:**

J. R. Huriet. Les expériences optiques du satellite D2A. Nouvelle Revue d'Optique Appliquée, 1970, 1 (4), pp.213. 10.1088/0029-4780/1/4/301 . insu-03559399

HAL Id: insu-03559399

<https://insu.hal.science/insu-03559399>

Submitted on 6 Feb 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

MÉMOIRES

SERVICE D'AÉRONOMIE DU C. N. R. S.

F 91-Verrières-le-Buisson

LES EXPÉRIENCES OPTIQUES DU SATELLITE D2A

par

J. R. HURIET *

INTRODUCTION

Le satellite D2A (fig. 1), réalisé par le Centre National d'Etudes Spatiales sera lancé de la base de Kourou en novembre 1970, par une fusée Diamant, sur une orbite quasi circulaire à 550 km d'altitude et 45° d'inclinaison.

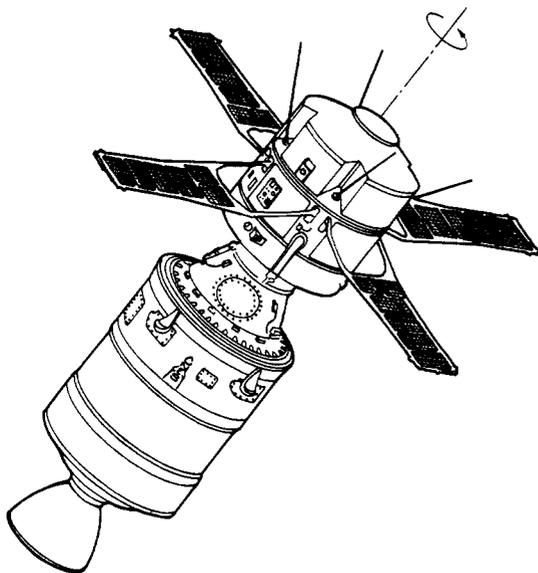


FIG. 1. — Le satellite D2 en cours de lancement, après ouverture des panneaux solaires.

Les 6 expériences du Service d'Aéronomie placées à bord sont destinées à étudier l'atmosphère d'hydrogène atomique qui entoure la terre, l'émission à 1 216 Å de l'hydrogène solaire, l'émission à la même

longueur d'onde de sources extra-terrestres telles que les nébuleuses par exemple. Ces expériences, proposées par J. E. Blamont en 1964, permettent d'accéder aux caractères physiques des émissions (largeur de

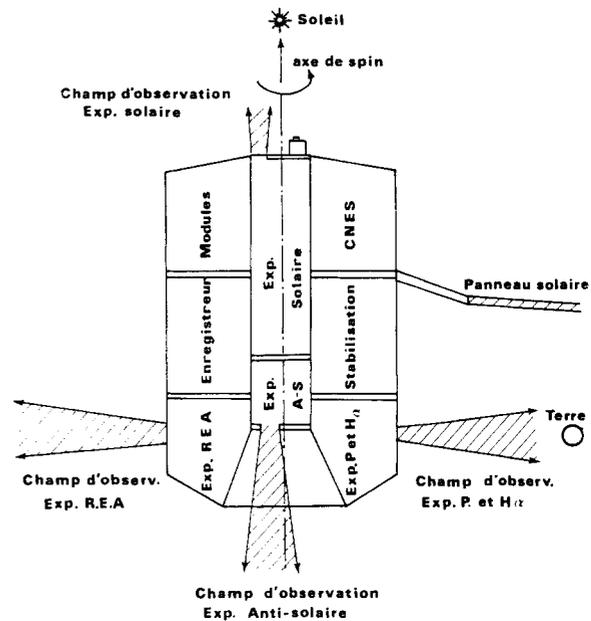


FIG. 1 bis. — Schéma général D2-A.

raie et intensité par exemple) dont sont déduits des caractères physiques de l'atmosphère (température et pression par exemple).

Quatre expériences visent à 90° de la direction du soleil (Expériences latérales), les deux autres placées dans le tube central du satellite, visent en direction du

(*) Actuellement à la Société SODERN-PARIS, 23 rue du Retrait — F 75 Paris 20°.

soleil et dans la direction opposée. En effet, le satellite tourne autour de son axe de symétrie à raison d'un

tour par minute et cet axe est constamment dirigé vers le soleil (à ± 30' d'arc près) (fig. 1 bis).

I. — RÉSONANCE OPTIQUE

Dans le cas de l'atome d'hydrogène, la transition α de la série de Lyman à 1 216 Å peut être observée par résonance optique. Le temps pendant lequel l'électron reste au niveau 2 est très court (durée de vie ~ 10⁻⁸ seconde). Ce temps définit la largeur naturelle de la raie de Lorentz. En fait, dans un gaz les atomes sont en mouvement, ils se comportent comme autant d'oscillateurs locaux dont la vitesse par rapport à l'observateur varie dans des limites liées à la température du milieu. Cette agitation crée un élargissement de la raie qui a alors un profil Doppler. Le phénomène de résonance sur un niveau déterminé ne peut avoir lieu que dans le domaine de fréquence très étroit défini par ce profil Doppler (~ 2.10⁻² Å à 300 °K). Si la lumière incidente a un profil spectral Φ(λ), si le profil spectral de la raie d'absorption est A(λ), le flux réémis par résonance est :

$$R = K' \cdot \Phi(\lambda) * A(\lambda).$$

K' est un facteur dépendant des conditions expérimentales. Il apparaît alors, que si on trouve un artifice « a » pour faire varier A(λ), on observera :

$$R(a) = K' \cdot \Phi(\lambda) * A(\lambda, a) \quad (\text{fig. 2}).$$

L'artifice « a » utilisé pour l'expérience D-2 est d'une part l'effet Doppler dû au mouvement du satellite et d'autre part la variation de la largeur de raie A(λ) en fonction du nombre d'atomes présents dans le milieu résonnant.

Le nombre de photons absorbés, puis réémis, « dN » est déterminé par

$$dN = - N_0 \cdot K_0 \cdot L.$$

K est le coefficient d'absorption, ρ la densité d'atomes neutres et L la distance parcourue par le photon. Ceci permet de définir l'épaisseur optique du milieu :

$$\tau = K \cdot \rho \cdot L.$$

Le facteur K dépend de la longueur d'onde suivant la relation :

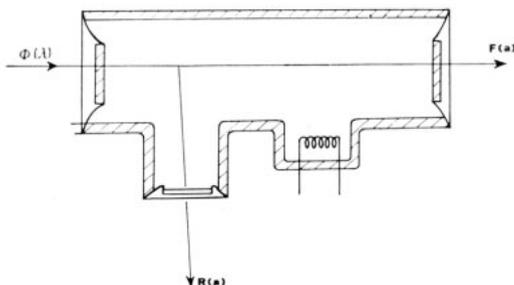


FIG. 2. — Schéma de principe de fonctionnement de la cellule à hydrogène atomique.

$$k_\lambda = \frac{e^2 \sqrt{\eta}}{m \cdot c} \cdot \lambda_0 \cdot f \cdot \sqrt{\frac{M}{2RT}} \cdot \exp - \left(\frac{\lambda - \lambda_0}{\Delta\lambda_D} \right)^2.$$

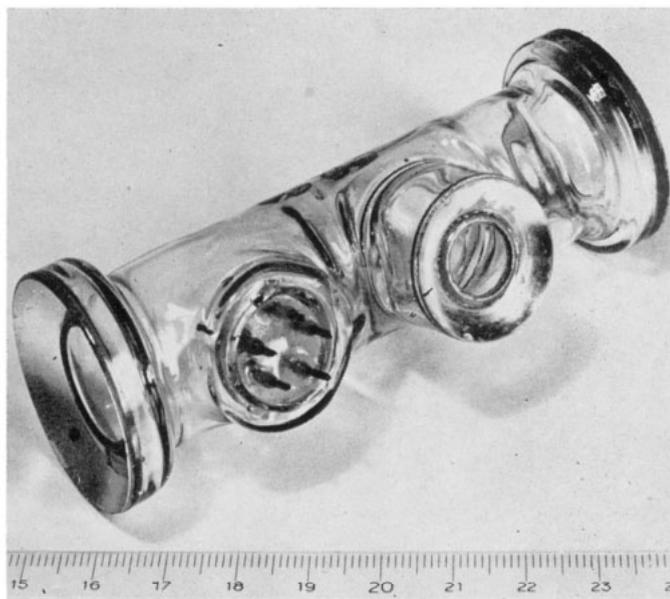
On voit aussi qu'il dépend de la température du milieu résonnant.

Le flux transmis par le milieu résonnant est :

$$F(a) = \Phi(\lambda) - K'' \cdot \Phi(\lambda) * A(\lambda, a) \quad (\text{fig. 2}).$$

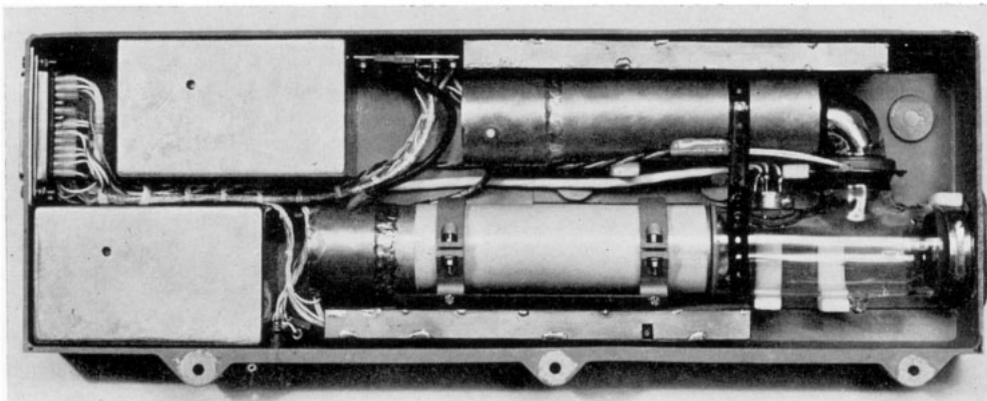
Si l'étendue spectrale de Φ(λ) n'est pas trop grande devant les variations de A(λ, a), il est aussi possible de connaître Φ(λ) à partir de F(a).

C'est ce qui est réalisé dans les cellules à hydrogène fabriquées dans notre laboratoire, le flux Φ(λ) pénètre par une fenêtre en fluorure de lithium, il sort F(a) par la fenêtre opposée et R(a) par la fenêtre placée à 90° des deux autres. En effet, à l'intérieur de la cellule en verre, l'hydrogène (pression 100 à 400 microns de Hg) est dissocié par effet Langmuir sur un filament porté à 1 900 °C par effet Joule. Les atomes d'hydrogène ainsi obtenus peuvent « résonner » à la longueur d'onde Lyman-α (voir photographie 1).



PHOTOGRAPHIE 1. — Cellule à hydrogène utilisée sur le satellite D2. Les fenêtres en LiF sont scellées sur des coupelles en argent qui absorbent les variations de dilatation entre le verre et le LiF.

Chaque cellule est associée à deux photomultiplicateurs, l'ensemble ainsi constitué est appelé USPED (Ultra Selective Photo Emissive Detector). La bande passante de ce spectromètre est 2.10⁻² Å environ (voir photographie 2). Afin d'éviter une détérioration du signal électrique, les alimentations haute-tension, les préamplificateurs et les amplificateurs à seuil sont placés au voisinage immédiat des détecteurs.

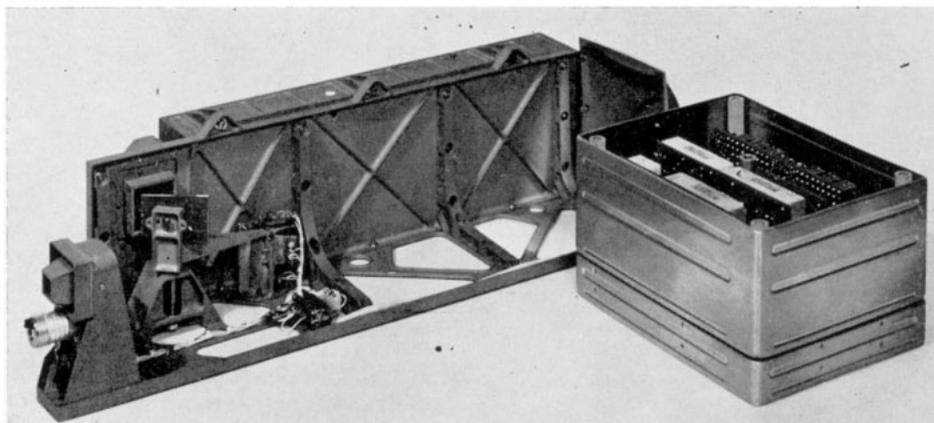


PHOTOGRAPHIE 2. — « U. S. P. E. D. ». De gauche à droite les deux alimentations HT, les photomultiplicateurs avec leurs préamplificateurs et leurs amplificateurs discriminatoires, puis la cellule à hydrogène.

II. — EXPÉRIENCE LATÉRALE « R. E. A. »

L'expérience « R. E. A. » (voir photographie 3), placée sous le plateau inférieur du satellite occupe environ 16 décimètres cubes et pèse 4,7 kg (électronique comprise). La puissance moyenne consommée est 6,7 watts avec des pointes de 8,4 watts. La

télémesure enregistre 1 700 bits par cycle de mesures dont 300 bits de surveillance, soit 169 000 bits par orbite. Cinq ordres de télécommande permettent de modifier le fonctionnement de l'expérience, qui se compose en fait de 2 expériences intégrées.



PHOTOGRAPHIE 3. — On peut voir de gauche à droite le bloc d'entrée de l'expérience supportant un petit baffle, une fente d'entrée, un mécanisme d'obturation avec son moteur. Puis le miroir oscillant avec son mécanisme de commandes, le boîtier USPED placé verticalement. Ensuite, partiellement caché par le module d'électronique, un réseau concave en béryllium ; enfin les modules d'électronique : le module inférieur fournit les alimentations basse tension régulées, le module supérieur contient les chaînes de comptage, le registre à décalage et la logique de fonctionnement de l'expérience.

1. Expérience Lyman-alpha

Cette expérience a pour but la surveillance de l'émission Lyman-alpha de l'hydrogène atomique géocoronal. Le nombre très important des données enregistrées permettra de calculer un modèle d'atmosphère à partir de bases bien connues et de suivre l'évolution de ce modèle en fonction de l'heure diurne ou nocturne et de l'activité solaire.

Tout d'abord aura lieu l'étude de la variation d'intensité de la raie, puis l'étude de sa largeur et enfin son profil (renversement). Ces différents paramètres permettront de calculer le nombre d'atomes émetteurs, leur température et l'épaisseur optique du milieu

dans la direction de la visée. Afin de mesurer précisément ces valeurs, l'expérience « R. E. A. » se compose d'un monochromateur suivi d'une cellule à hydrogène ayant deux voies de mesure (résonance et absorption). La bande passante de la voie « résonance » est $2/100 \text{ \AA}$ environ. Il est possible de la faire varier en modifiant l'épaisseur optique de la cellule suivant un cycle étalonné. De plus, l'effet Doppler permet un balayage de $\pm 4/100 \text{ \AA}$. La forme de la raie émise par l'hydrogène géocoronal pourra être étudiée en entier.

Contrairement au cas de l'expérience « Solaire » pour laquelle les largeurs de raie sont disproportionnées, la voie « Absorption » de la cellule donnera des résultats très précis puisque les largeurs sont dans le

rapport 1 à 2. Le balayage de la géocouronne par l'expérience sera complet. Ceci d'autant plus que l'expérience fonctionne de jour comme de nuit, sans interruption avec un ensemble de deux mesures complémentaires toutes les secondes de temps. La durée de chaque révolution étant de 100 minutes environ et la précession de quelques degrés, il sera possible de suivre l'évolution de l'émission, pour une même zone de la géocouronne.

2. Expérience émission oxygène (E)

Outre l'étude de l'émission Lyman-alpha envisagée précédemment, l'expérience a aussi pour but la surveillance de l'émission du triplet de l'oxygène atomique (OI) géocoronal.

En faisant varier l'inclinaison d'un petit miroir, il a été possible de centrer la bande passante du monochromateur sur 1 304 Å, longueur d'onde d'émission de l'oxygène atomique. Ainsi, périodiquement (toutes les 4 secondes), un mécanisme commandé par la logique de l'expérience change l'inclinaison du miroir permettant de mesurer successivement Lyman-alpha et l'émission

à 1 304 Å par la voie de mesure directe (fig. 3). Le comportement de l'oxygène atomique est différent de celui de l'hydrogène atomique. Sa hauteur d'échelle est évidemment plus basse. L'émission devenant très faible au-delà de 500 km, ceci permet de faire des mesures du flux intégré sur la direction d'observation et d'en déduire le profil d'émission avec l'altitude.

Compte tenu des mesures fournies par l'expérience Solaire, il sera aussi possible d'étudier l'évolution de l'émission en fonction de l'activité solaire.

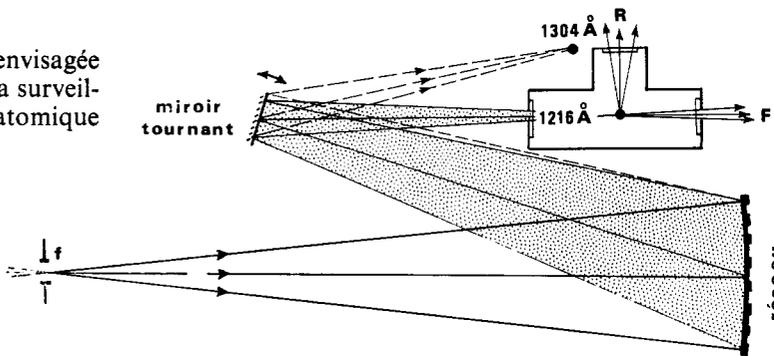


FIG. 3. — R. E. A. Schéma optique.

III. — EXPÉRIENCE LATÉRALE « POLARISATION »

Les mesures de polarisation de la lumière émise par résonance peuvent donner des informations sur les processus d'excitation du milieu, processus responsables de l'émission géocoronale.

Le taux de polarisation de l'émission Lyman-α de l'hydrogène géocoronal est mesuré grâce à deux polarimètres constitués par des lames en fluorure de lithium fonctionnant sous l'incidence de Brewster et par réflexion. Cette mesure est effectuée perpendiculairement à la direction du soleil, dans un plan, grâce au mouvement de rotation du satellite autour de l'axe terre-soleil. Un monochromateur simple permet d'éliminer les raies d'émission de N et |OI|. Dans le cas de la structure fine, la transition 1 S/2 et 2 P/2 n'est pas polarisée : par contre, la transition 1 S/2, 2 P/2

est polarisée avec un taux de 42,9 %. Compte tenu des rapports d'intensité, le taux de polarisation global est 28,5 %. Mais ceci est valable pour une épaisseur optique très faible car le taux de polarisation est rapidement diminué quand l'épaisseur optique croît à cause de la diffusion multiple. Ceci a été vérifié expérimentalement par C. T. Emerich ; pour une épaisseur optique de l'ordre de 3, le taux de polarisation atteint seulement 10 % (fig. 4).

Lorsqu'on s'élève dans l'atmosphère et lorsqu'on regarde dans différentes directions, la variation du taux de polarisation de l'émission indique la région de transition d'une atmosphère optiquement épaisse à une atmosphère optiquement mince.

La dépolarisation due à la diffusion multiple est une mesure sensible de l'épaisseur optique dans la ligne de visée.

D'autre part, dans une atmosphère optiquement mince, la dépolarisation mesure la contribution à l'intensité globale de l'excitation par bombardements de particules chargées ou par toute autre source de lumière non polarisée. Mais, quels que soient les processus d'excitation de HI, la variation du taux de polarisation est une fonction de l'épaisseur optique. Les résultats doivent donc être confrontés aux différentes hypothèses sur la répartition de HI.

L'expérience (voir photographie 4) est placée sous le plateau inférieur du satellite, elle occupe un volume de 3 décimètres cubes environ. Elle pèse 2,8 kg (électronique comprise). La puissance moyenne consommée est 3,2 watts. La télémessure enregistre 504 bits par format soit 50 000 bits par orbite. Quatre ordres de télécommande permettent de modifier son fonctionnement.

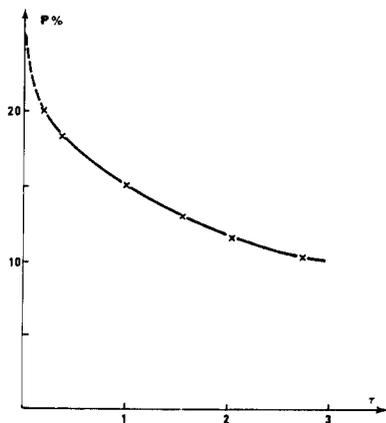
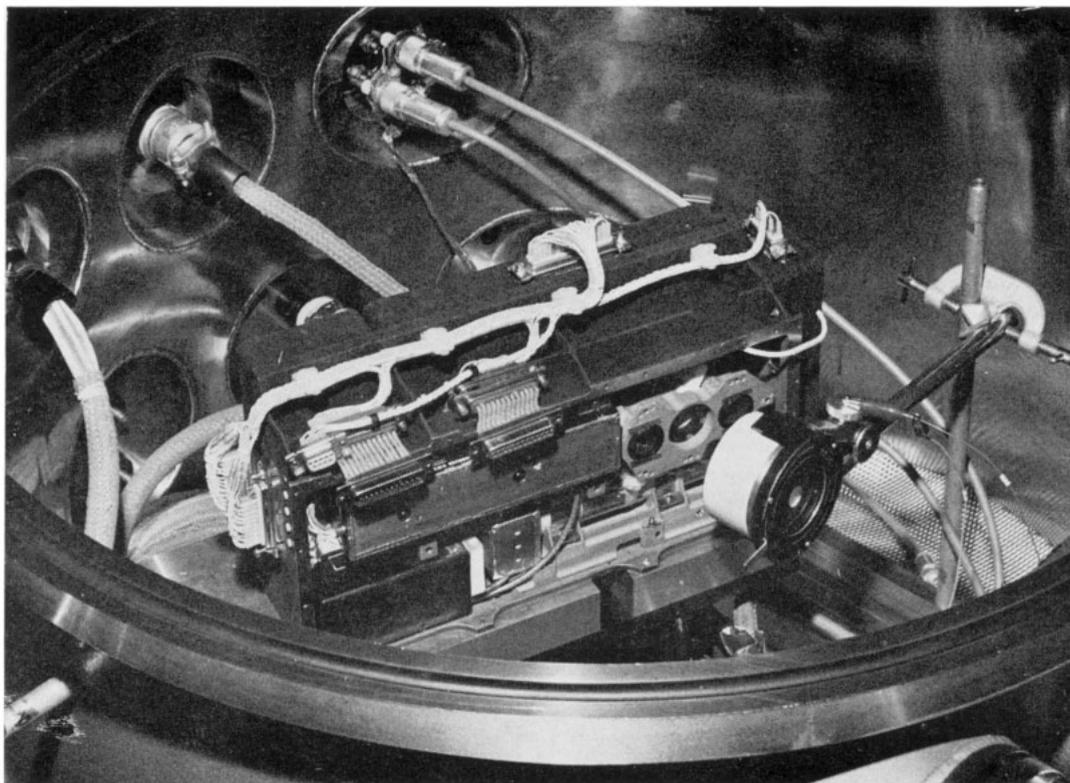


FIG. 4. — Variation du taux de polarisation de l'émission résonnante à 1 216 Å en fonction de l'épaisseur optique τ.



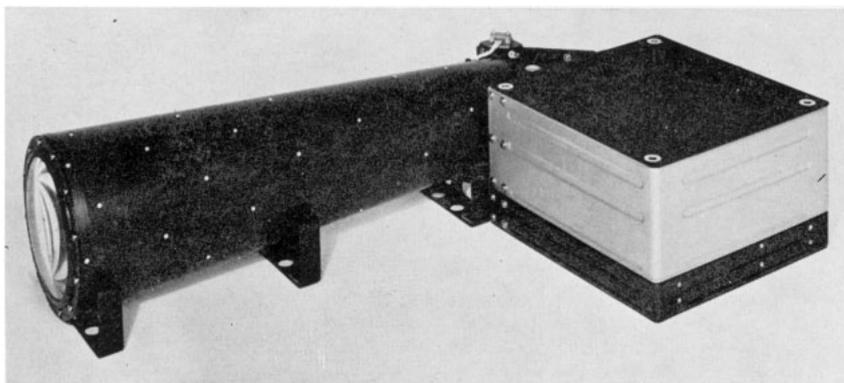
PHOTOGRAPHIE 4. — L'expérience « Polarisation » en cours de test dans une des chambres à vide du Service d'Aéronomie.

IV. — EXPÉRIENCE LATÉRALE « H α »

Il est intéressant de connaître le rapport entre les intensités Lyman- α et Lyman- β , mais il est difficile de mesurer directement Lyman- β car la longueur d'onde correspondante est trop absorbée par les optiques et les fenêtres des détecteurs. Par contre, l'émission Balmer α à 6 563 Å est parfaitement détectable. Les probabilités de transition du niveau Lyman- β vers le niveau Lyman- α étant connues, il est possible de déterminer par cet intermédiaire l'intensité de l'émission Lyman- β . Des mesures au sol, préliminaires à l'expérience embarquée, ont montré que l'émission H- α du ciel nocturne était comprise entre 6 et 10 Rayleigh suivant l'heure d'observation et sa direction. Ces

résultats sont en bon accord avec ceux de Shcheglov et de Tinsley.

L'expérience (photographie 5) comprend une lentille en polycarbonate formant une image du milieu environnant sur deux filtres interférentiels, l'un centré sur 6 563 Å, l'autre sur 6 530 Å (*). Derrière chacun des filtres se trouve une photocathode appartenant au même photomultiplicateur. Ce photomultiplicateur à deux cathodes permet d'effectuer des mesures quasi simultanées sur les deux voies par commutation électronique de la lecture. De ce fait, toute fluctuation de gain des chaînes de mesure est éliminée et par conséquent, la précision de la mesure est considérablement augmentée. Grâce à l'utilisation d'un amplificateur à seuil, le courant d'obscurité à la température ambiante ne dépasse pas 30 électrons par seconde tout en laissant passer plus de 70 % du signal.



PHOTOGRAPHIE 5. — L'expérience H α .

(*) En effet l'émission H α à 6 563 Å se superpose à un fond continu d'émission qu'il est nécessaire de mesurer en même temps car son intensité varie. Cette mesure de contrôle est effectuée à 6 530 Å, hors des raies d'émission de OH.

V. — EXPÉRIENCE SOLAIRE

L'expérience occupe 9 décimètres cubes environ et pèse 3,6 kg (électronique comprise). La puissance moyenne utilisée est 2,04 W. Il y a 500 bits de mesure enregistrés par format, soit environ 50 000 bits par orbite. Quatre ordres de télécommande permettent de modifier le fonctionnement.

Le soleil a un diamètre apparent de 32 minutes ce qui permet de le considérer comme un objet étendu. Ce disque brillant que nous avons l'habitude de voir correspond en fait à la photosphère, épaisse de quelques centaines de kilomètres. Il est enveloppé par une deuxième couche atmosphérique principale ; la chromosphère, dont l'épaisseur est quelques milliers de kilomètres et dont la température est 10 000 à 20 000 degrés. Enfin, la couronne, dont la température atteint le million de degrés s'étend jusqu'à plusieurs rayons solaires.

La chromosphère émet et simultanément absorbe la raie Lyman- α ($\sim 10^9$ photon $\text{s/cm}^2/\text{sec}$), si bien que la forme de la raie atteignant la haute atmosphère terrestre est déjà renversée. L'hydrogène géocoronal dont la température est de l'ordre de 1 500 degrés crée alors un second renversement beaucoup plus étroit que le premier (voir fig. 5).

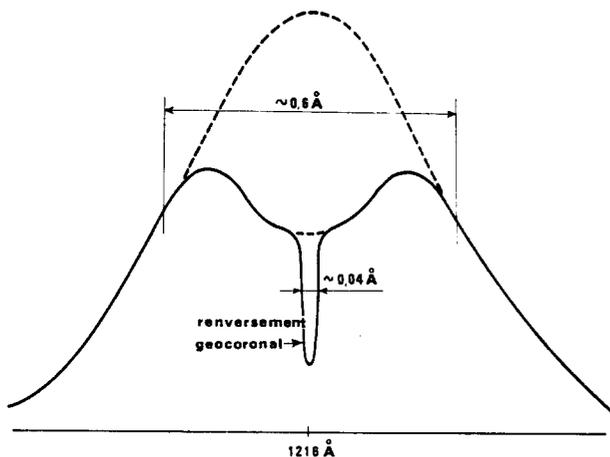


FIG. 5. — Forme de la raie Lyman- α solaire observée vers 500 km d'altitude.

Ce sont la forme et l'intensité de cette raie qui sont étudiées par l'expérience « Solaire » placée dans le tube central du satellite. En effet, ce dernier est stabilisé en direction du soleil, et au moyen d'une optique appropriée, constituée de réseaux et de miroirs, il est possible de former une image monochromatique du soleil. Un découpeur optique analyse point par point cette image. Chaque point découpe une zone de 5×5 minutes d'arc sur l'image.

L'analyse spectrale fine est effectuée au moyen d'une cuve à hydrogène atomique. La bande passante sur la voie « résonance » étant 2/100 d'Angström environ, c'est l'effet Doppler dû au mouvement du satellite (de $+7$ à -7 km/sec) qui est utilisé pour assurer le balayage en longueur d'onde de la partie centrale. Afin de pouvoir connaître aussi la forme d'une partie

des ailes de la raie, il est possible d'utiliser l'effet isotopique et d'avoir une cellule à deutérium atomique. Ainsi, l'expérience possède deux voies de mesure, l'une à 1 215,664 Å, l'autre à 1 215,334 Å (voir fig. 6).

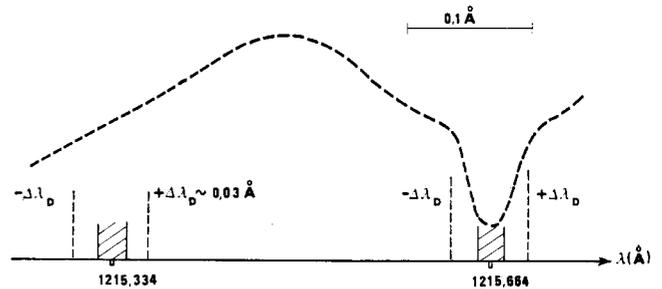


FIG. 6. — Utilisation de l'effet isotopique entre H et D pour l'observation du profil de la raie solaire.

La voie « absorption » de chaque cellule donne l'intensité sur toute la largeur de la raie. Enfin, une position privilégiée du découpeur optique permet de mesurer le flux global émis par le soleil.

Le soleil étant la principale source d'excitation de l'atmosphère terrestre, l'expérience « Solaire » permet donc, non seulement d'étudier l'émission Lyman-alpha solaire, mais de connaître la fonction « Source » des expériences examinant l'émission géocoronale.

Pour effectuer toutes ces mesures, il a fallu placer dans un volume de 200 mm de diamètre et de 450 mm de hauteur deux monochromateurs, deux cellules (hydrogène et deutérium), 4 photomultiplicateurs et quelques mécanismes nécessaires à l'analyse et à la calibration. L'ensemble pèse environ 5,3 kg (plus 2,6 kg d'électronique placée sur le plateau supérieur à côté des modules C. N. E. S.).

La consommation moyenne en fonctionnement est 8,2 W avec des pointes de 17 watts.

Chaque cycle de mesure comporte 49 points, ce qui représente pour 64 secondes de fonctionnement (1 format) 3 136 bits de mesure, auxquels s'ajoutent 24 bits de surveillance (soit 192 000 bits par orbite).

Six ordres de télécommande permettent de modifier la séquence de fonctionnement de l'expérience.

VI. — EXPÉRIENCE « ANTI-SOLAIRE »

L'expérience « Anti-Solaire » vise à l'opposé de l'expérience « Solaire » d'où son nom. Le satellite étant stabilisé, cette expérience peut examiner l'émission provenant d'une zone du ciel située entre -4 et $+4$ degrés par rapport au plan de l'écliptique. La bande passante de l'expérience est centrée sur 1 216 Å, elle peut donc détecter l'émission de nébuleuses ayant une atmosphère d'hydrogène, de la voie lactée et d'étoiles chaudes : ceci dans le cône d'ombre de la terre. Compte tenu des effets Doppler possibles et des

différences de température, la forme du signal reçu doit être à peu près celle représentée par la figure 7.

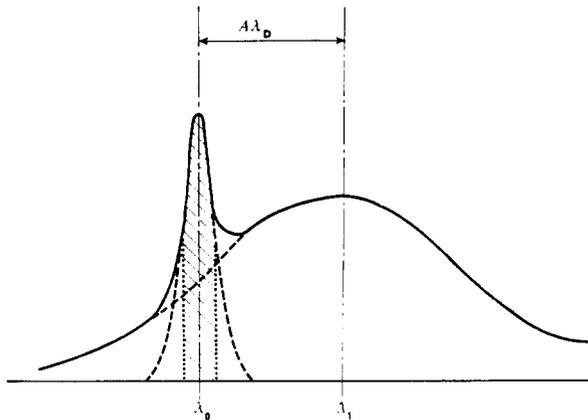


FIG. 7. — Profil spectral de l'émission détectée par l'expérience « anti-solaire ».

Un pic d'émission à 1 216 Å correspond au flux émis par l'hydrogène géocoronal. Un pic d'émission décalé de $\Delta\lambda_D$ correspond au flux émis par la source observée à travers l'hydrogène géocoronal.

La cellule à hydrogène atomique donne deux signaux. L'un S_1 est proportionnel au flux émis à 1 216 Å (λ_0) dans une bande passante de 2/100 d'Angström, l'autre S_2 est proportionnel à l'ensemble du flux reçu dans la bande passante globale. La connaissance de S_1 et de S_2 permet de discriminer l'origine des flux.

Placée dans le même tube, que l'expérience « Solaire » l'expérience « Anti-Solaire » occupe un volume de 7 décimètres cubes environ et pèse 3,6 kg (électronique comprise). La consommation moyenne pendant la nuit est 5 watts avec des pointes de 8 watts.

En fonctionnement normal, la télémessure enregistre 256 bits de mesure par format plus 48 bits de surveillance (soit 12 200 bits par orbite).

Six ordres de télécommande permettent de modifier la séquence de fonctionnement de l'expérience.

VII. — DÉVELOPPEMENTS SPÉCIFIQUES AUX EXPÉRIENCES

D2A est le premier satellite français à expériences multiples. Nous avons utilisé ou fait développer quand ils n'existaient pas, un certain nombre de composants optiques. Parmi les principaux développements il faut citer les lentilles en polycarbonate CR39 de grand diamètre (LOR-TELEGIC) dont la légèreté et la tenue en ambiance spatiale sont remarquables ; les réseaux de diffraction (Jobin et Yvon), ouverts jusqu'à $f/2,5$, et ayant 100×100 mm pour les plus grands, et qui, bien que travaillant à 1 216 Å ont une efficacité de l'ordre de 40 %. Les traitements de surface (SEAVOM) dans l'ultraviolet lointain dont le pouvoir réflecteur

atteint 80 % ; les miroirs et supports de réseaux en métal allégé tels que béryllium, AG5 et titane dont l'emploi a permis de réaliser une importante économie de poids par fixation directe dans la structure, tout en conservant les qualités optiques nécessaires : un photomultiplicateur à deux cathodes dont la lecture est commutable électroniquement (RTC) et dont le courant d'obscurité est de l'ordre de 10^{-10} A pour une cathode S20 de 40 mm de diamètre utile : et enfin nous avons déjà mentionné les cellules à hydrogène atomique et les lampes d'étalonnage émettant à 1 216 Å réalisées par notre laboratoire.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] R. TOUSEY, (1963). — « The extreme U. V. spectrum of the sun ». *Space Science Rev.*, **2**, 3.
- [2] B. A. TINSLEY, (1968). — « Temporal variations in Geocoronal H- α ». *J. G. R.*, **73**, 4139.
- [3] T. M. DONAHUE et G. F. THOMAS, (1963). — « Lyman- α scattering in the earth's geocorona ». *J. G. R.*, **68**, 2661.
- [4] J. E. BLAMONT, J. R. HURIET, et Coll. — « L'expérience D2 ». *Publication du Service d'Aéronomie*, I à VI.
- [5] MORDEHAI LIWSHITZ, (1967). — « The effect of thermal escape on the neutral hydrogen density ». *J. G. R.*, **72**, 285.
- [6] J. E. BLAMONT, A. VIDAL MADJAR, (1970). — « Surveillance de l'émission Lyman-alpha solaire pendant l'année 1969 ». *COSPAR*, 1970.

Remerciements : Je tiens à remercier le Pr. J. E. BLAMONT, MM. C. EMERICH, S. CAZES, J. CHARRA, Mme C. LAURENT, Mlle A. C. LEVASSEUR, qui m'ont constamment aidé pendant l'étude et la réalisation de ces expériences. Je remercie Mlle GUILLARD, MM. GUILLARD et LAMENARDI qui ont organisé et

suiwi la majeure partie des développements techniques, ainsi que M. P. COUFLEAU et la section Satellite du Service d'Aéronomie, qui ont assuré l'étude et la fabrication des ensembles mécaniques et électroniques.