

Scheer Man
6/01/69

INSTITUT D'AERONOMIE SPATIALE DE BELGIQUE

3, avenue Circulaire, UCCLE - BRUXELLES 18

AERONOMICA ACTA

A - N° 57 - 1968

Mesure du rayonnement ultraviolet solaire par ballon stratosphérique

par M. ACKERMAN, D. FRIMOUT et R. PASTIELS

BELGISCH INSTITUUT VOOR RUIMTE-AERONOMIE

3, Ringlaan, UKKEL - BRUSSEL 18

AVANT-PROPOS

Ce travail a été présenté le 23 novembre 1968 à la tribune de la Société Belge d'Astronomie de Météorologie et de Physique du Globe et sera publié dans Ciel et Terre.

VOORWOORD

Dit werk werd voorgedragen op 23 november 1968 aan de tribune van de "Société Belge d'Astronomie de Météorologie et de Physique du Globe" en zal gepubliceerd worden in "Ciel et Terre".

FOREWORD

This work has been presented on November 23, 1968 at the "Société Belge d'Astronomie de Météorologie et de Physique du Globe" and will be published in "Ciel et Terre".

VORWORT

Diese Arbeit wurde am 23. November 1968 zur "Société Belge d'Astronomie de Météorologie et de Physique du Globe" vorgestellt und sie wird in "Ciel et Terre" herausgegeben werden.

MESURE DU RAYONNEMENT ULTRAVIOLET SOLAIRE PAR BALLON STRATOSPHERIQUE

par

M. ACKERMAN, D. FRIMOUT et R. PASTIELS

Résumé

On montre l'intérêt que présente la fenêtre optique de l'atmosphère à 2000 Å et des expériences de mesure du rayonnement solaire qui y pénètrent sont décrites.

Samenvatting

Het belang van de aanwezigheid van een optisch venster rond 2000 Å wordt aangetoond. Tevens geeft men een beschrijving van proeven die tot doel hebben de straling van de zon te meten die er in binnendringt.

Abstract

The atmospheric optical window à 2000 Å is described and measurements of the solar radiation penetrating it are presented.

Zusammenfassung

Das Interesse der Anwesenheit einer optischen Fenster zu 2000 Å wird vorgestellt. Messungen der Sonnenstrahlung in dieser Fenster werden beschrieben.

INTRODUCTION

L'importance du rayonnement ultraviolet du soleil présente de multiples aspects suivant les différents points de vue auxquels on se place. Les météorologistes sont intéressés par le rayonnement global du soleil qu'ils considèrent surtout comme une source d'énergie thermique. Dans ce cas, le rayonnement de longueur d'onde inférieure à 4000 Å n'apporte qu'une faible contribution. Les études spectrographiques du rayonnement ultraviolet solaire renseignent les astrophysiciens sur la structure de notre étoile. En aéronomie, le soleil est considéré comme la source des photons qui pénètrent dans l'atmosphère pour exciter, dissocier ou ioniser les molécules d'air et être ainsi l'agent des processus primaires d'initiation de toutes les réactions chimiques qui ont lieu dans l'atmosphère. Etant donné l'énergie de liaison de deux atomes dans une molécule ou d'un électron dans une molécule ou dans un atome, il est évident que le rayonnement qui, dans ce cas, présentera le plus d'intérêt est le rayonnement ultraviolet. L'oxygène par exemple, ne peut être dissocié que par de la lumière de longueurs d'onde inférieures à 2500 Å, c'est-à-dire par des photons d'énergie supérieure à environ 5 eV. Avant le développement de véhicules spatiaux, l'ultraviolet solaire était connu jusqu'à 2900 Å grâce à des observations en haute montagne. Les premières expériences spatiales de mesure de l'ultraviolet solaire ont été effectuées au moyen de fusées allemandes V 2 par le Naval Research Laboratory dès 1946⁽¹⁾.

Le spectrographe utilisé était monté dans les ailerons de queue de la fusée et devait être ramené au sol par parachute afin d'assurer la récupération du film photographique. La teneur en gélatine de ce film limitait vers les courtes longueurs d'onde la mesure de l'ultraviolet. Cet instrument permit d'obtenir des spectres du soleil de 2 à 55 km d'altitude jusqu'à la longueur d'onde d'environ 2200 Å. Le dépouillement de ces spectres donna lieu à deux types de résultats : la structure du spectre et l'intensité absolue du rayonnement dans ce domaine de longueur d'onde. La précision de ce dernier résultat était à l'époque limitée par le manque

d'une bonne méthode d'étalonnage de l'instrument avant son lancement. En effet, les expérimentateurs ne disposaient comme source lumineuse étalon que de l'arc au carbone qui présentait de multiples inconvénients. L'intensité de cette source, faible dans l'ultraviolet, était mal connue. D'autre part, son intensité dans le visible occasionne de graves problèmes de lumière parasite. Après ces premières expériences, le Naval Research Laboratory s'est rapidement orienté vers l'étude de l'ultraviolet solaire allant de quelques centaines d'Angström à 2000 Å. Le système dispersif et la surface sensible étaient alors étalonnés en valeur relative en fonction de la longueur d'onde et placés sur une échelle de calibration absolue par la mesure en vol de l'intensité de la raie Ly α de l'hydrogène au moyen d'une chambre à ionisation à oxyde d'azote. Ces travaux n'ont pas eu particulièrement trait au rayonnement compris entre 2000 et 2200 Å qui présente cependant un intérêt exceptionnel.

Edgard Meier⁽³⁾, après les premières mesures du coefficient d'absorption de l'ozone, conclut en 1903 que le rayonnement du soleil devrait, aux environs de 2000 Å, pénétrer dans des couches basses de l'atmosphère. On sait depuis qu'il est à l'origine de la formation de l'ozone à la suite de la photodissociation de l'oxygène moléculaire. Ce constituant atmosphérique peu abondant est très important du point de vue biologique en protégeant les êtres vivants des radiations ultraviolettes, et du point de vue chimique, étant donné sa faible stabilité. Dans l'ultraviolet, au-dessous de 3000 Å, l'ozone présente un maximum d'absorption spectrale se situant à 2600 Å et un minimum à 2000 Å comme le montre la figure 1.

Un autre constituant atmosphérique absorbant dans ce domaine de longueurs d'onde est l'oxygène moléculaire dont la section efficace d'absorption est représentée de 1700 à 2500 Å à la figure 2. L'absorption de l'oxygène dans ce domaine de longueur d'onde est caractérisé par une absorption très faible dans le continuum de Herzberg qui débute à 2424 Å. Ce continuum se prolonge dans les bandes de Schuman-Runge. Ces bandes

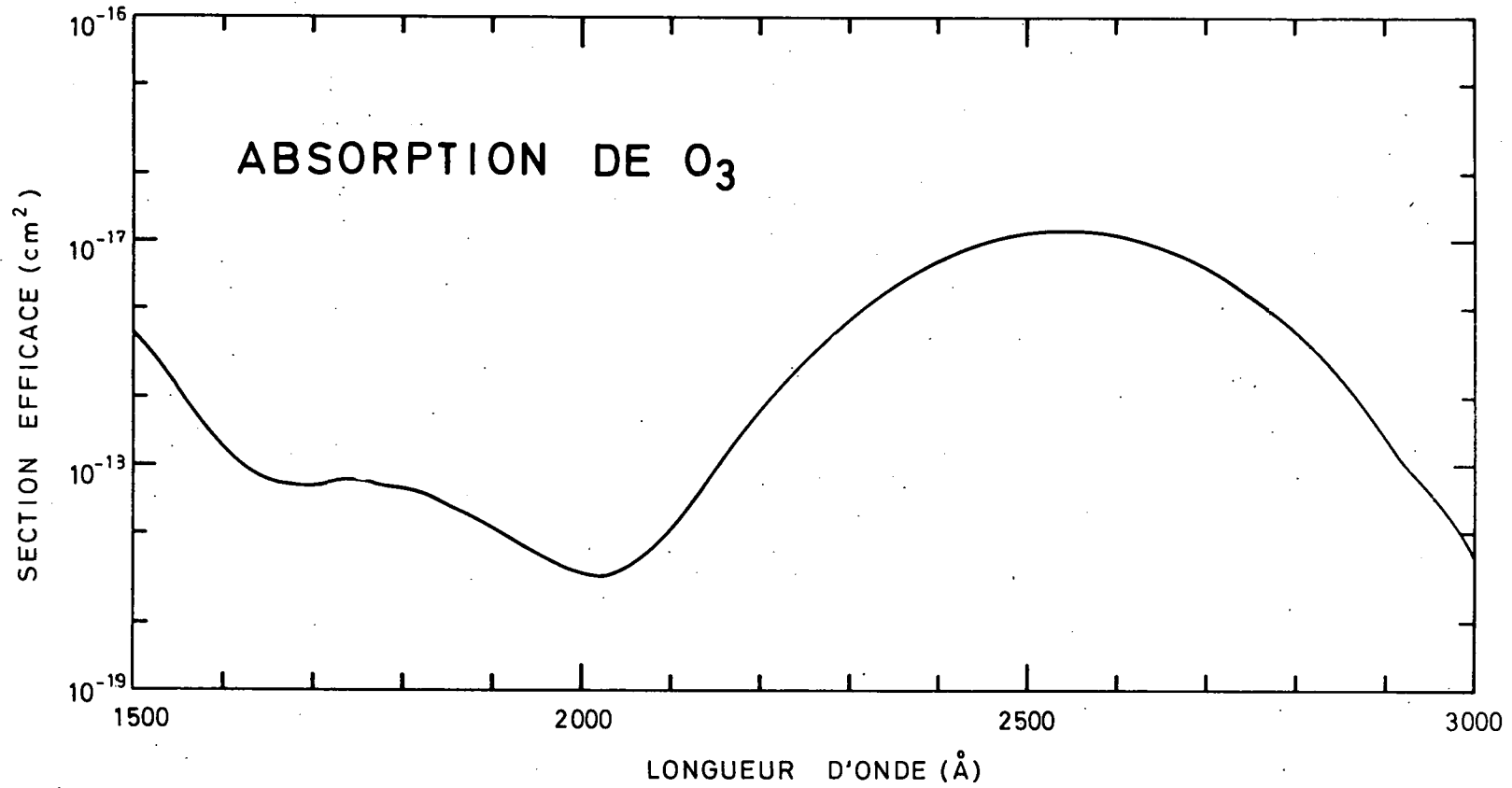


Fig. 1.- Section efficace d'absorption de l'ozone en fonction de la longueur d'onde^(11, 12).

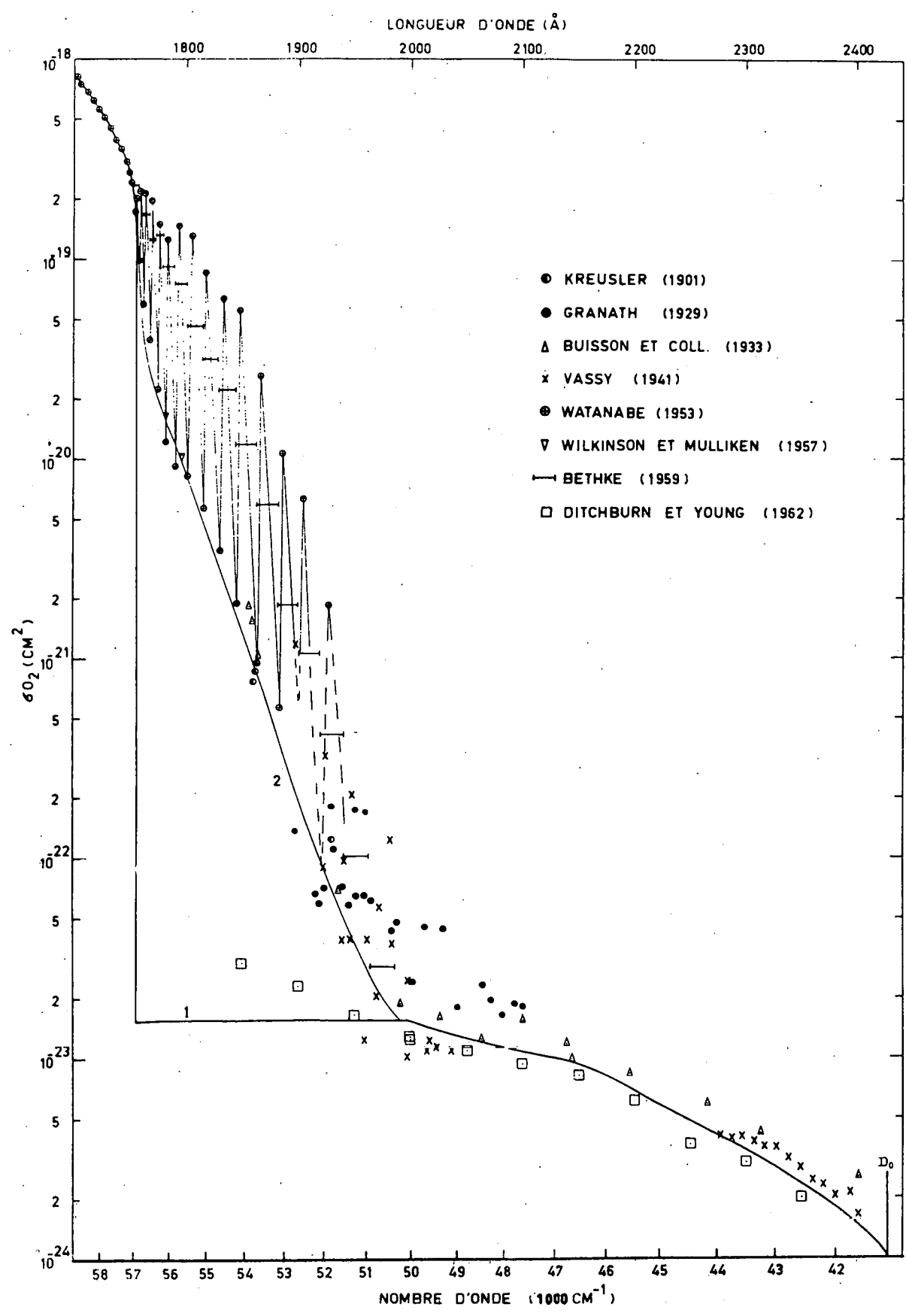


Fig. 2.- Section efficace d'absorption de l'oxygène moléculaire en fonction de la longueur d'onde.

conduisent au continuum de Schumann qui débute vers 1750 Å. Les courbes dessinées en trait plein et numérotées 1 et 2 représentent deux choix possibles de la section efficace d'absorption tenant compte des mesures de laboratoire. Un travail récent⁽⁴⁾ a permis de lever partiellement cette ambiguïté. A partir des coefficients d'absorptions de O₂ et de O₃ et d'une distribution spectrale d'intensité supposée du rayonnement, on peut calculer, pour un modèle atmosphérique donné, la pénétration du rayonnement solaire dans l'atmosphère terrestre en appliquant la loi de Beer

$$I = I_0 e^{-\tau \sec \chi}$$

où I est l'intensité à une certaine altitude au-dessus de laquelle la somme des produits du nombre total de molécules, qui la surplombent par unité de surface, par leur section efficace d'absorption, vaut τ , l'épaisseur optique. I₀ est l'intensité lumineuse en l'absence d'atmosphère et χ est la distance zénithale. La figure 3 montre le résultat d'un tel calcul et fait apparaître que le rayonnement solaire de 2000 Å pénètre sans être absorbé de façon importante jusqu'à 35 km d'altitude. Cette altitude est accessible aux ballons stratosphériques modernes qui peuvent non seulement emporter des charges de l'ordre de plusieurs centaines de kg à 35 ou 40 km mais aussi les maintenir à cette altitude pendant plusieurs heures. Un vol de fusée ne dure que quelques minutes et un satellite ne permet d'effectuer des mesures optiques au-dessous de 150 km d'altitude que dans des conditions géométriques très défavorables.

INSTRUMENTATION

Pour étudier cette fenêtre optique, nous avons réalisé une nacelle stratosphérique schématisée dans la figure 4. Elle comporte comme système dispersif, un monochromateur du type Czerny-Turner dans lequel la lumière entre après diffusion par un quartz dépoli dont l'indicatrice a été mesurée au laboratoire et dont les caractéristiques ont été vérifiées en vol⁽⁵⁾. L'élément dispersif est un réseau Bausch et Lomb de 3 x 3 cm gravé de 1200 traits par mm et renforcé à la longueur d'onde de 2000 Å.

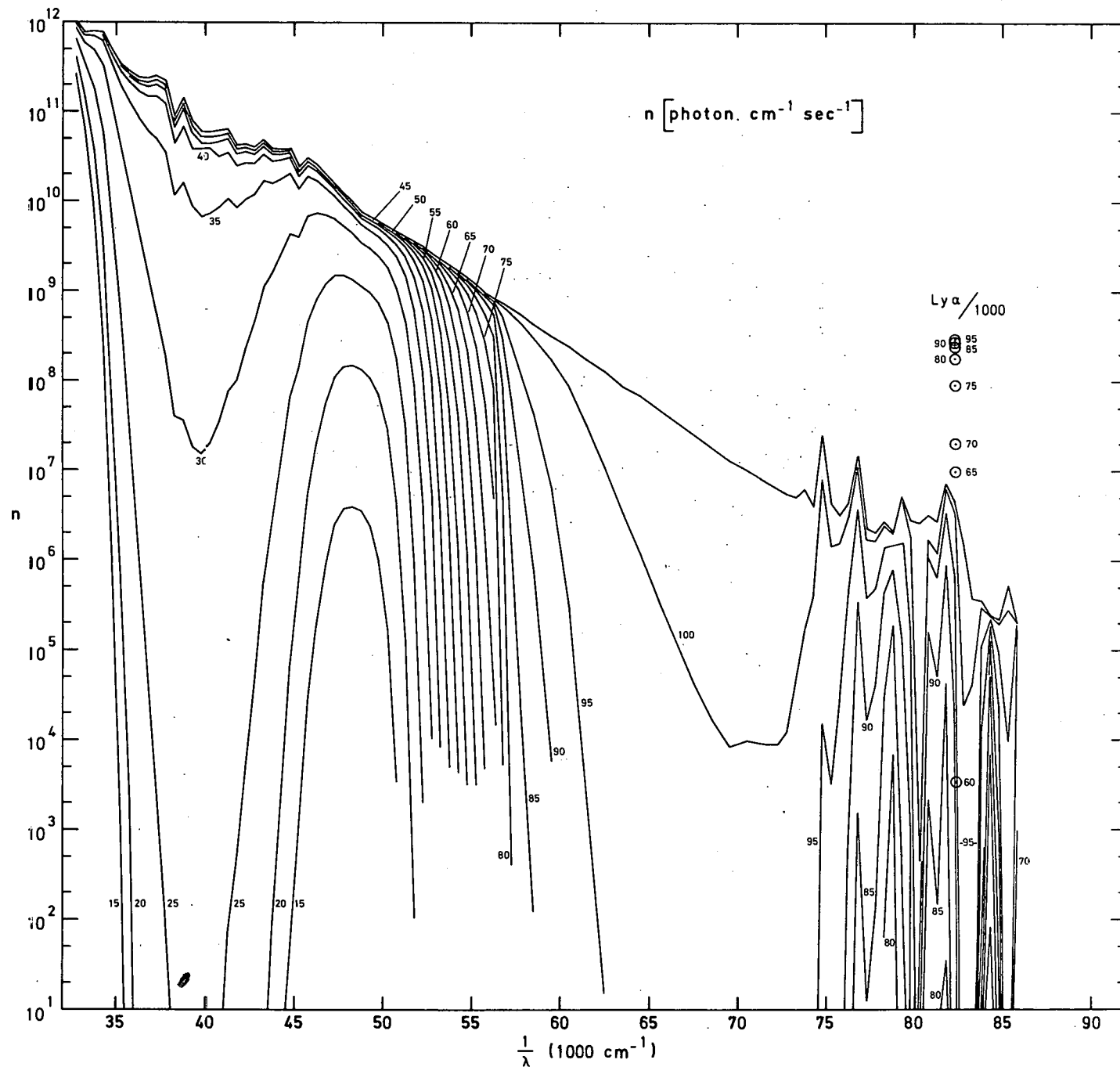


Fig. 3.- Distribution spectrale du flux de photons solaires à une unité astronomique en fonction de l'inverse de la longueur d'onde de 3000 Å à 1100 Å.

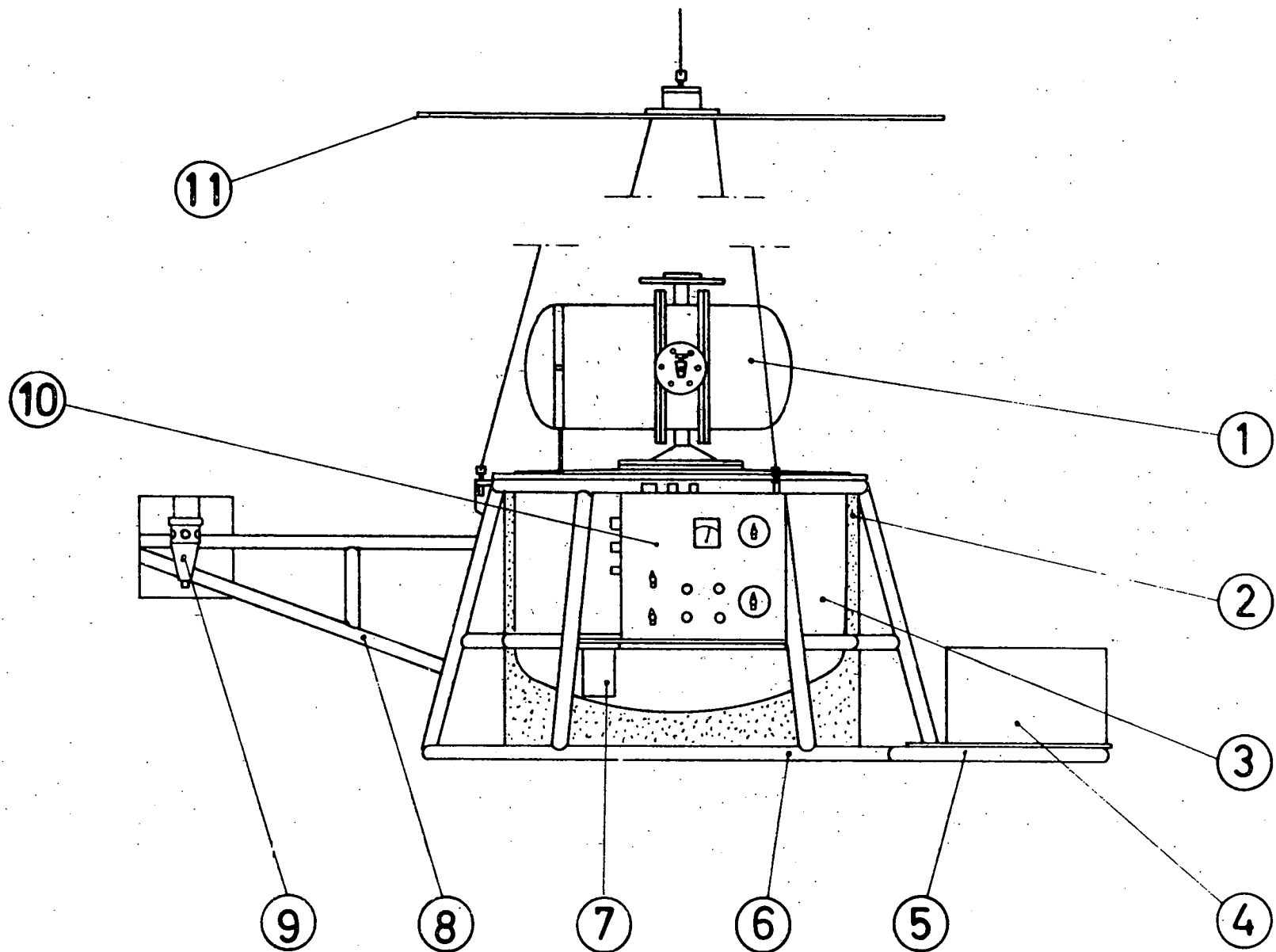


Fig. 4.- Schéma de la nacelle. L'enveloppe (1) du monochromateur est fixée au-dessus d'une cuve pressurisée (3) entourée d'un isolant thermique (2). La nacelle est déposée dans un berceau (6) destiné à amortir le choc au moment du retour au sol par parachute. Ce berceau supporte également un commutateur (4) de contrôle du bon fonctionnement de l'équipement, un manomètre (7) et un thermomètre (9). Le tableau de commande (10) permet la mise en marche et l'arrêt programmé de l'ensemble, la charge des batteries d'accumulateurs et un contrôle global du fonctionnement. Le disque (11) cache le ballon.

Le détecteur placé derrière la fente de sortie est un photomultiplicateur à cathode en cadmium qui a la propriété de n'être sensible qu'au rayonnement de longueur d'onde inférieure à 3000Å. Cette propriété permet d'éviter la lumière parasite qui pourrait gêner considérablement les mesures. Le photomultiplicateur est alimenté par d'une alimentation à haute tension de 2000 V et le courant qu'il fournit est mesuré au moyen d'un électromètre à changement automatique de sensibilité qui possède une gamme dynamique d'un million. La nacelle est suspendue au-dessous du ballon et celui-ci est caché au système optique au moyen d'un cache noirci d'une peinture choisie pour son très faible pouvoir réflecteur dans l'ultraviolet.

Un manomètre de haute précision et un thermomètre de mesure de la température de l'air constituent les autres éléments essentiels de la nacelle. La nacelle est divisée en deux compartiments l'un d'optique pressurisé à l'azote et l'autre pressurisé à l'air sec contenant l'électronique.

RESULTATS

Le Centre National d'Etudes Spatiales français a lancé la nacelle le 10 mai 1968 au centre d'Aire-sur-l'Adour et une quinzaine de spectres ont été transmis par télémesure depuis l'altitude maximum de 34 km. La figure 5 montre la l'arguage du ballon. Le vol au plafond a duré de 14 heure 23 à 16 heure 37, temps universel, pour des distances zénithales comprises entre 40° et 63°. Les signaux analogiques ont été ensuite convertis en courants électriques de sortie du photomultiplicateur. Ceux-ci ont pu être transformés en flux lumineux au moyen de la courbe d'étalonnage représentée à la figure 6. La sensibilité relative en fonction de la longueur d'onde a été déterminée au laboratoire par comparaison avec la réponse d'un photomultiplicateur à fenêtre couverte de salicylate de sodium. La source lumineuse employée était une lampe à décharge au silicium ⁽⁶⁾. La valeur absolue a été obtenue à 2537 Å au moyen d'une lampe à mercure étalonnée par l'intermédiaire d'une pile thermoélectrique

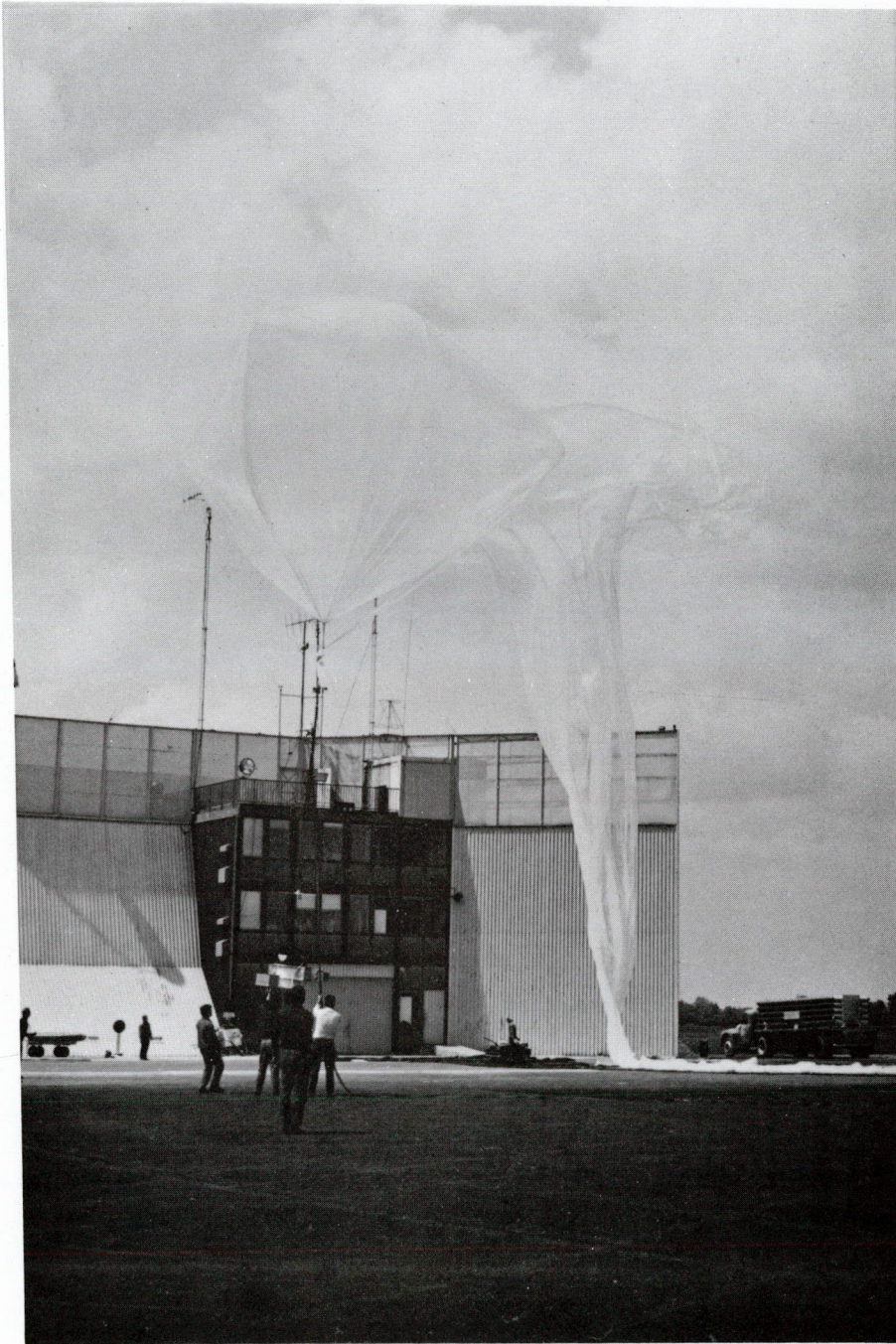


Fig. 5.- Language du ballon.

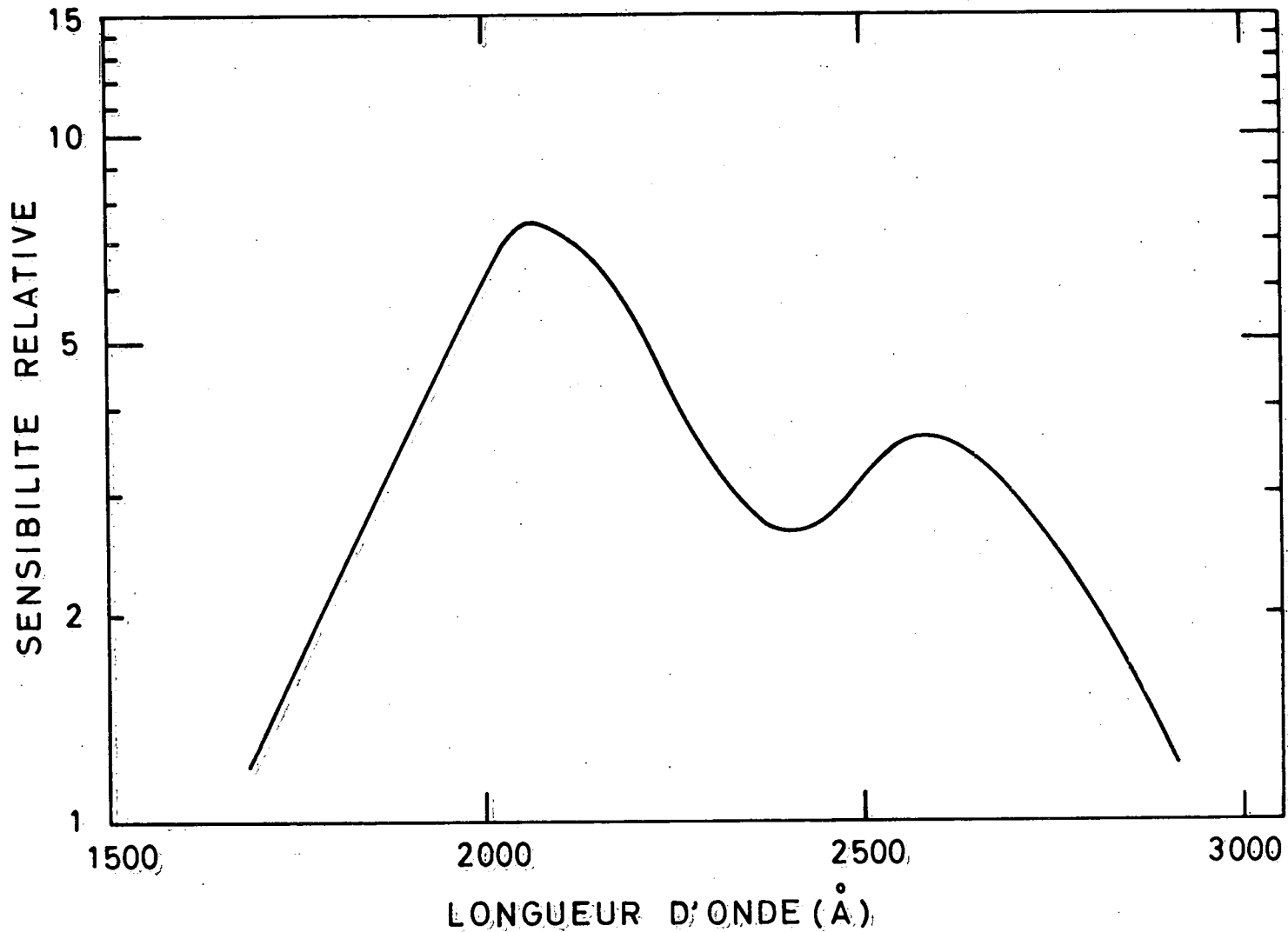


Fig. 6.- Sensibilité relative du système optique en fonction de la longueur d'onde. La sensibilité dans les conditions de vol était à 2537 Å égale à $4,71 \cdot 10^{-21}$ ampère \times photon⁻¹ \times sec⁻¹ \times cm⁻² pour une incidence normale.

standardisée par rapport à l'échelle pyhéliométrique internationale. La figure 7 montre les courants mesurés à deux longueurs d'onde différentes en fonction de la sécante de la distance zénithale. La pente des droites dérivées permet de déduire l'épaisseur optique dont la connaissance conduit ensuite à la valeur du rayonnement solaire en l'absence d'atmosphère.

La figure 8 montre les valeurs de l'intensité du rayonnement solaire que nous avons ainsi déterminées en fonction de la longueur d'onde. Elle montre que la variation du rayonnement solaire de 2100 Å à 2000 Å est beaucoup plus abrupte que le font apparaître les valeurs publiées par le Naval Research Laboratory ⁽²⁾. Nos valeurs apportent une confirmation aux résultats obtenus par Blamont et Bonnet ⁽⁷⁾ par fusée auxquels Labs et Neckel ⁽⁸⁾ ont récemment reproché qu'ils n'avaient pas été confirmés. La valeur la plus probable du flux solaire entre 2000 Å et 1900 Å conduirait à un abaissement de 200°K de la température du soleil assimilé à un corps noir par rapport aux valeurs généralement acceptées ⁽²⁾. Un tel abaissement serait en accord avec des déductions faites par Dalgarno ⁽⁹⁾ à partir de l'intensité de la lumière du ciel diurne et avec des valeurs récemment publiées ⁽¹⁰⁾ pour le continuum du soleil.

Les épaisseurs optiques mesurées sont représentées à la figure 9. Vu leur importance aux grandes longueurs d'onde, on peut les y attribuer uniquement à l'ozone. Associées aux valeurs du coefficient d'absorption de l'ozone ⁽¹¹⁾ elles permettent de déduire la valeur de $1,08 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ pour le nombre de molécules d'ozone surplombant la nacelle. Cette valeur et la section efficace d'absorption ⁽¹²⁾ de l'ozone permettent de calculer l'épaisseur optique due à ce constituant à toutes les longueurs d'onde. Dans le domaine de la fenêtre de 2000 Å, il est possible en ajoutant l'épaisseur optique due à l'oxygène, d'obtenir des valeurs globales à comparer avec nos mesures. Cette comparaison conduit à deux conclusions intéressantes. La première a trait la section efficace d'absorption de O_2 pour laquelle les valeurs de Ditchburn et Young ⁽¹³⁾ paraissent être confirmées entre 1900 Å et 2000 Å et l'ambiguïté de la figure 2 est

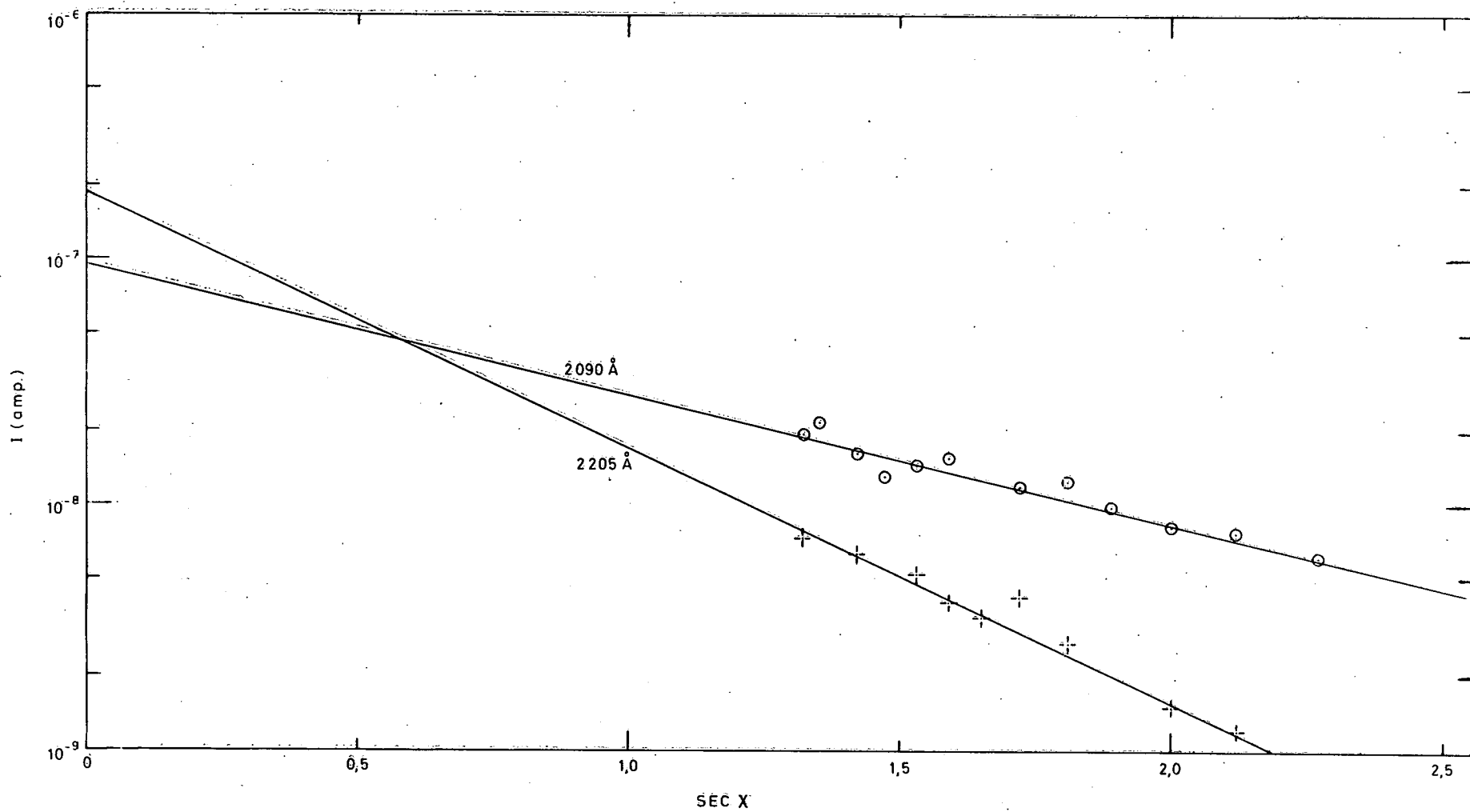


Fig. 7.- Dépendance du courant mesuré, ramené à l'incidence normale, en fonction de la sécante de la distance zénithale pour deux longueurs d'onde.

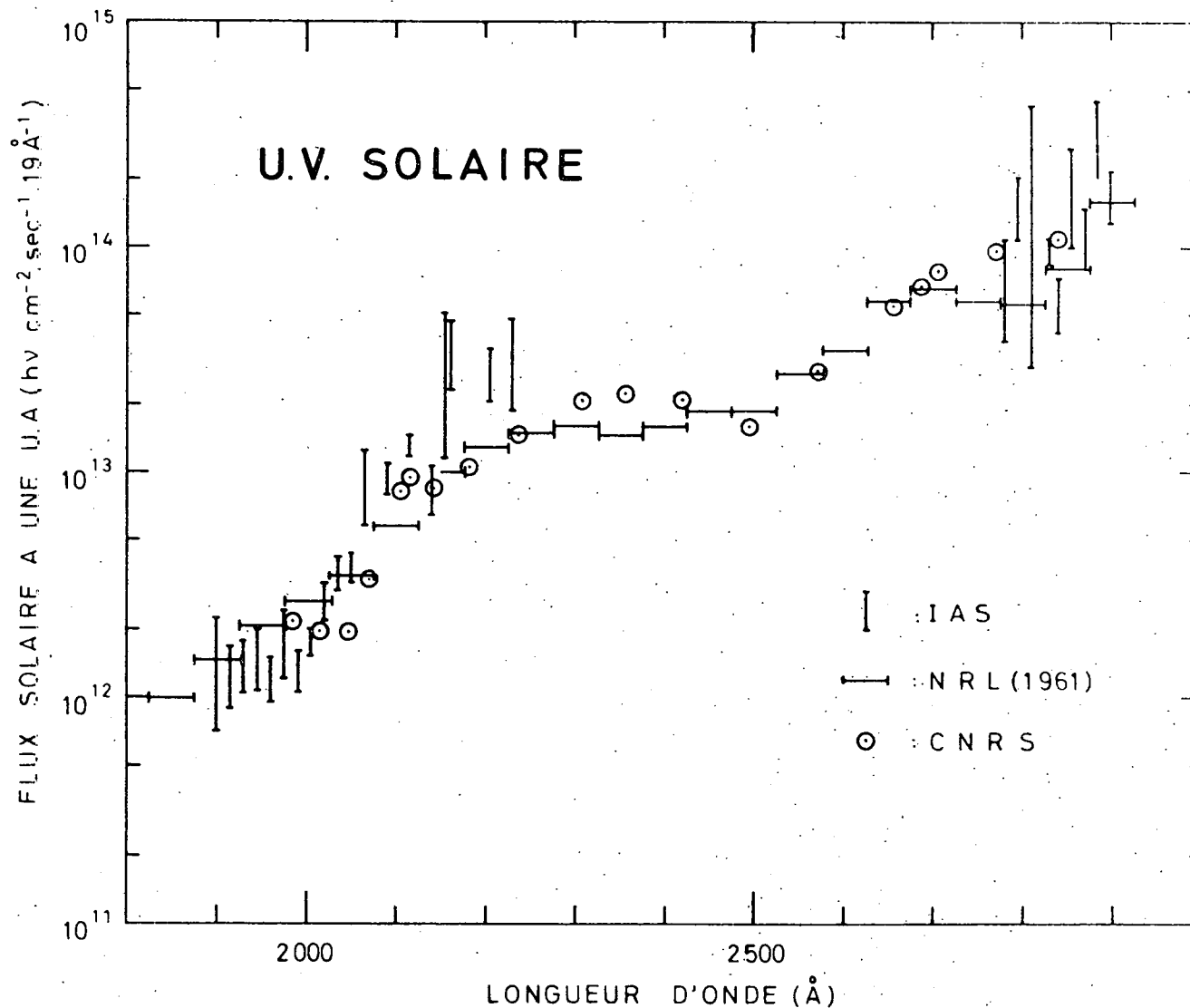


Fig. 8.- Rayonnement ultraviolet solaire de 1900 Å à 2900 Å en fonction de la longueur d'onde. Les barres horizontales représente les valeurs moyennées pour des intervalles de 50 Å (2). Les cercles représentent les valeurs publiées par Bonnet (7b). Les barres verticales représentent nos mesures ainsi que le domaine d'erreur la plus probable que nous leur attribuons.

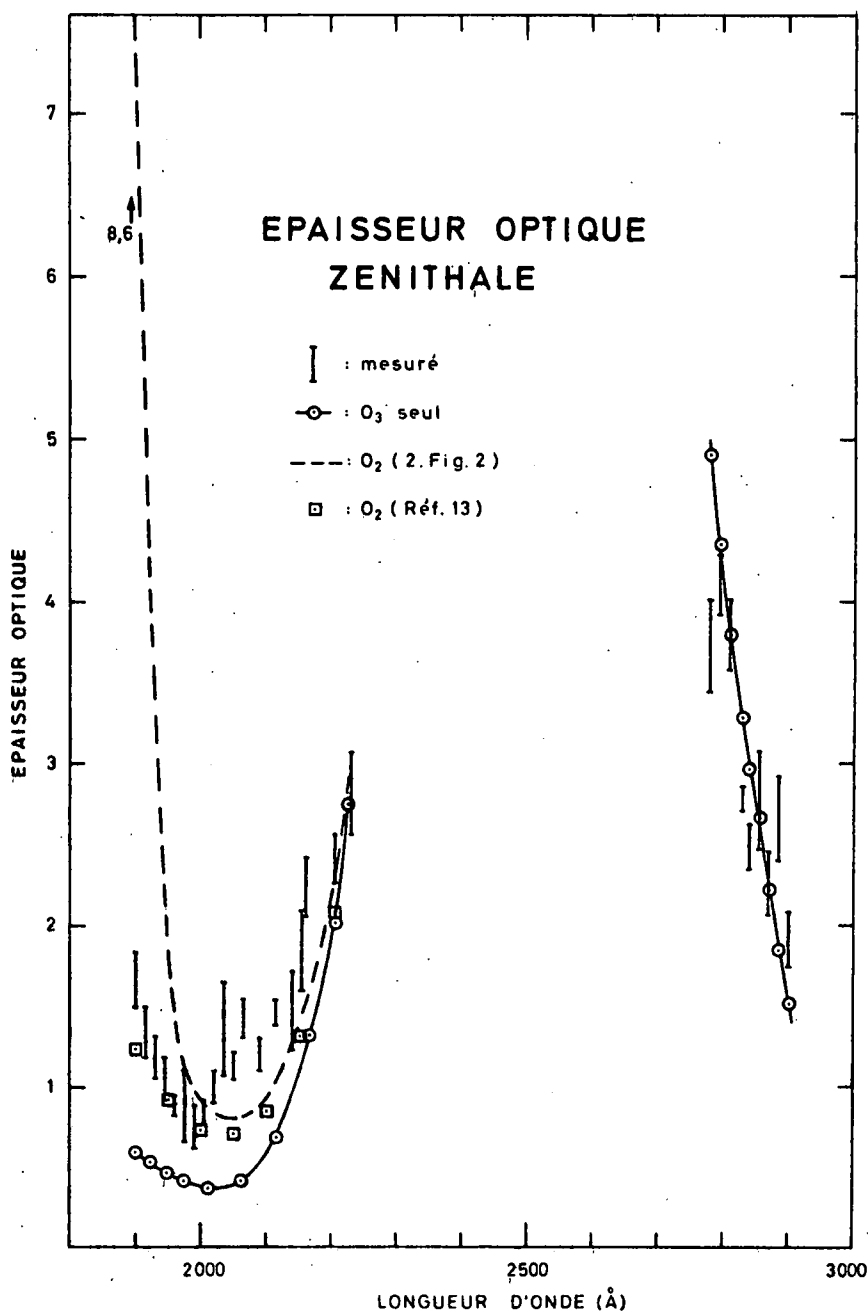


Fig. 9.- Epaisseur optique, τ , en fonction de la longueur d'onde. La courbe en trait plein joignant les cercles représente τ dû à $1,08 \times 10^{18}$ molécules d'ozone par cm^2 . A la pression de 6 millibar à laquelle les mesures ont été effectuées, $2,7 \times 10^{22}$ molécules d'oxygène par cm^2 surplombe la nacelle. En tenant compte de l'épaisseur optique qu'il est possible de leur attribuer en utilisant les valeurs de section efficace d'absorption indiquée à la figure 2, courbe 2, ou publiées par Ditchburn et Young⁽¹³⁾ la courbe discontinue et les carré représentent respectivement l'épaisseur optique totale calculée pour la fenêtre optique de 2000 Å. Les barres verticales représentent nos mesures et leur dimension indique l'erreur la plus probable.

ainsi partiellement levée. D'autre part, une absorption apparaît entre 2050 et 2150 Å dont on ne peut rendre compte par les deux constituants atmosphériques qui ont été envisagés. Ce phénomène pourrait être apparenté aux absorptions moléculaires déjà mentionnées par Durand, Oberly et Tousey⁽¹⁾ et attribuées à l'époque à l'oxyde d'azote.

CONCLUSIONS

Les résultats de cette expérience sont prometteurs et démontrent la validité de la méthode d'investigation et l'efficacité des moyens techniques mis en oeuvre. De prochaines expériences auront pour objet d'améliorer la précision des mesures.

REFERENCES

- (1) E. DURAND, J.J. Oberly and R. Tousey, *Astrophys. J.*, 109, 1 (1949).
- (2) C.R. DETWILER, D.L. GARRETT, J.D. PURCELL and R. TOUSEY, *Ann. Géophys.*, 17, 9(1961).
- (3) E. MEYER, *Ann. der Phys.*, 12, 859 (1903).
- (4) M. ACKERMAN, F. BIAUME and M. NICOLET, *Can. J. Chem.* (1969) - à paraître.
- (5) D. FRIMOUT, Thèse de doctorat en préparation
- (6) F. BIAUME, *Aeronomica Acta C* n° 17 (1968).
- (7) a) R.M. BONNET, J.E. BLAMONT and P. GILDWARG, *Astrophys. J.*, 148, L 115 (1967)
b) R.M. BONNET, P. 458 *Space Research* 8, 458 (1968).
- (8) D. LABS and H. NECKEL, *Zs. f. Astrophys.*, 69, 1 (1968).
- (9) A. DALGARNO, *J. Atm. Sci.*, 21, 463 (1964).
- (10) G.D. SANDLIN and K.G. WIDING, *Astrophys. J.*, 149, L 129 (1967).
- (11) E. VIGROUX, *Ann. de Phys.*, 8, 709 (1953)
- (12) K. WATANABE, M. ZELIKOFF and E.C.Y. INN, *Geophys. Res. Pap. N° 21 G.R.D., A.F.C.R.L.* (1953).
- (13) R.W. DITCHBURN and P.A. YOUNG, *J. Atm. Phys.*, 24, 127 (1962).