

Observation de phénomènes résultant de lâchers de méthane et d'oxygène à 160 et à 270 kilomètres d'altitude. Détermination de températures thermosphériques

par M. ACKERMAN, F. GLEIZES* et P. SIMON,

Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique

3, avenue Circulaire,

B - 1180, Bruxelles, Belgique.

RÉSUMÉ. — *Les résultats obtenus lors de deux tirs de fusées les 6 et 13 juillet 1969 en Sardaigne (charges utiles ESRO S64-1 et 2) sont présentés. Après une description des charges utiles et du matériel d'observation, les phénomènes liés à l'explosion dans la thermosphère sont décrits et interprétés. La formation de nuages d'oxyde d'aluminium a permis la détermination de températures thermosphériques qui sont comparées aux résultats publiés antérieurement et aux modèles thermosphériques de Nicolet. Les résultats concernant les vents et les densités sont également cités.*

ABSTRACT. — *The results obtained from two rocket flights on July 6 and 13, 1969, in Sardinia (ESRO payloads S64-1 and 2) are given. After the description of the payloads and of the ground based instrumentation, the processes related to the explosion in the thermosphere are described and discussed. The formation of aluminium oxide clouds provides thermospheric temperature determinations. These temperatures are compared with other published data and with thermospheric models computed by Nicolet. The results about winds and densities are also given.*

I. INTRODUCTION

Dès 1950, Bates suggéra l'étude de propriétés de la haute atmosphère par l'observation optique depuis le sol de nuages artificiels de sodium fluorescents sous l'action du rayonnement solaire. Depuis lors, de nombreuses expériences ont été réalisées, principalement avec la formation des nuages artificiels de sodium, de potassium et d'oxyde d'aluminium. Ces expériences ont notamment permis la détermination de la température de la haute atmosphère.

Deux méthodes spectroscopiques différentes peuvent être utilisées, suivant la nature chimique du nuage

artificiel. La première est basée sur la mesure au crépuscule de l'élargissement Doppler de raies de résonance du sodium et du potassium ; l'ensemble des résultats obtenus par cette méthode est décrit par Blamont et Chanin [1965]. La seconde est basée sur la mesure du spectre de fluorescence de la molécule AlO. Les premiers résultats ont été obtenus par Authier et al. [1964] et Authier [1964]. Les mesures récentes de températures thermosphériques ont été faites par Golomb et al. [1966, 1967, 1968], Low [1967], Rees [1968], Rees et al. [1970], Lloyd et Low [1970] et Rees [1971] à partir de nuages artificiels d'oxyde d'aluminium.

* Laboratoire d'Astronomie de la Faculté des Sciences de l'Université de Montpellier.

Le but de cet article est de décrire deux expériences effectuées par l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique dans le cadre du programme des fusées-sondes de l'Organisation Européenne de Recherches Spatiales (CERS-ESRO), expériences qui ont notamment permis la détermination de températures thermosphériques à partir du spectre de fluorescence de la molécule d'oxyde d'aluminium. Deux charges utiles, S 64-1 et S 64-2, ont été lancées de la base de lancement de Perdasdefogu, en Sardaigne, les 6 et 13 juillet 1969 respectivement. Les charges utiles et le matériel d'observation spectroscopique sont décrits dans ce travail. Les observations relatives à la formation des nuages, à l'identification spectroscopique des émissions observées et à la détermination des températures thermosphériques y sont également présentées.

II. LA CHARGE UTILE

La charge utile était constituée de deux parties. La partie supérieure, séparée à 100 km d'altitude, comportait quatre cylindres d'une contenance de 4 litres, deux remplis de méthane à 150 bars de pression et deux remplis d'oxygène à 200 bars de pression. Chaque cylindre était muni d'une charge creuse circulaire destinée à le sectionner à 150 km d'altitude. La partie inférieure qui restait fixée au moteur comportait six cylindres, trois remplis de méthane et trois d'oxygène aux mêmes pressions respectives que les précédents. La rupture devait avoir lieu à l'apogée de la trajectoire de la fusée, à 250 km environ. Les tirs ont été effectués au moyen de fusées Skylark (moteur Raven VI + accélérateur Cuckoo). Les nombres de molécules de méthane et d'oxygène libérés simultanément à basse altitude étaient respectivement de $3,2 \times 10^{25}$ et de $4,0 \times 10^{25}$. A haute altitude, ils étaient de $4,8 \times 10^{25}$ et de $6,0 \times 10^{25}$.

III. LE MATÉRIEL D'OBSERVATION

Le matériel d'observation au sol se composait de caméras photographiques, de spectrographes et de photomètres.

Le matériel photographique comprenait deux caméras de triangulation de 50 cm de distance focale, ouvertes à $f/5$. L'une se trouvait à Monte Cardiga et l'autre à Valico Nuraxi pour permettre la détermination des altitudes et des mouvements des nuages artificiels formés. D'autre part, une caméra électrique équipée d'un objectif Super-Farron de 76 mm de distance focale, ouvert à $f/0.87$, quatre appareils électriques Hasselblad et une caméra 16 mm devaient permettre la détermination des mouvements et de la vitesse d'expansion des nuages.

Le matériel spectrographique était réparti entre les deux postes d'observation. Il se composait à

Monte Cardiga de deux spectrographes HUET CI, à prisme, ouvert à $f/0.7$, utilisés de 4 000 à 7 000 Å. A Valico Nuraxi, le matériel du laboratoire d'Astronomie de la Faculté des Sciences de l'Université de Montpellier comportait :

— un spectrographe REOSC, dit « ultraviolet », à réseau Bausch et Lomb de 600 traits/mm renforcé à 7 500 Å, utilisé dans le deuxième ordre et dont la chambre catadioptrique à optique de silice de 120 mm de focale, et ouverte à $f/1$, était utilisée de 3 000 à 5 000 Å avec une dispersion de 69 Å/mm ;

— un spectrographe REOSC, dit « visible », à réseau Bausch et Lomb de 1200 traits/mm, renforcé à 5 000 Å qui, grâce à une chambre à optique en verre de 120 mm de focale et ouverte à $f/1$, permettait de couvrir, dans le premier ordre, un domaine de longueur d'onde s'étendant de 4 000 à 6 000 Å avec la même dispersion de 69 Å/mm. (Le collimateur de ces deux appareils avait une distance focale de 587 mm) ;

— un spectrographe REOSC, dit « nébulaire », à réseau Bausch et Lomb de 600 traits/mm, renforcé à 5 000 Å, utilisé dans le premier ordre, qui, grâce à une chambre à immersion à optique en silice ouverte à $f/0.6$ (focale : 50 mm), a fourni des spectres entre 3 000 et 6 000 Å avec une dispersion de 330 Å/mm. Le collimateur avait 477 mm de distance focale.

Les trois spectrographes étaient montés au foyer Newton de télescopes de projection de 120 mm de diamètre, ouverts à $f/6$. Ces télescopes permettaient, grâce à une monture azimutale et à une mire, un pointage très rapide en direction des nuages lumineux.

TABLEAU I

Altitudes et mouvements des nuages artificiels.

N° Charge utile	Altitude (km)	Composantes des mouvements	
		Direction	Vitesse (m/sec)
S 64-1	161	Est	11
		Sud	111
		Ascendante	37
S 64-2	275	Est	111
		Nord	48
		Ouest	9
S 64-2	157	Sud	68
		Ascendante	22
		Est	110
S 64-2	278	Nord	28

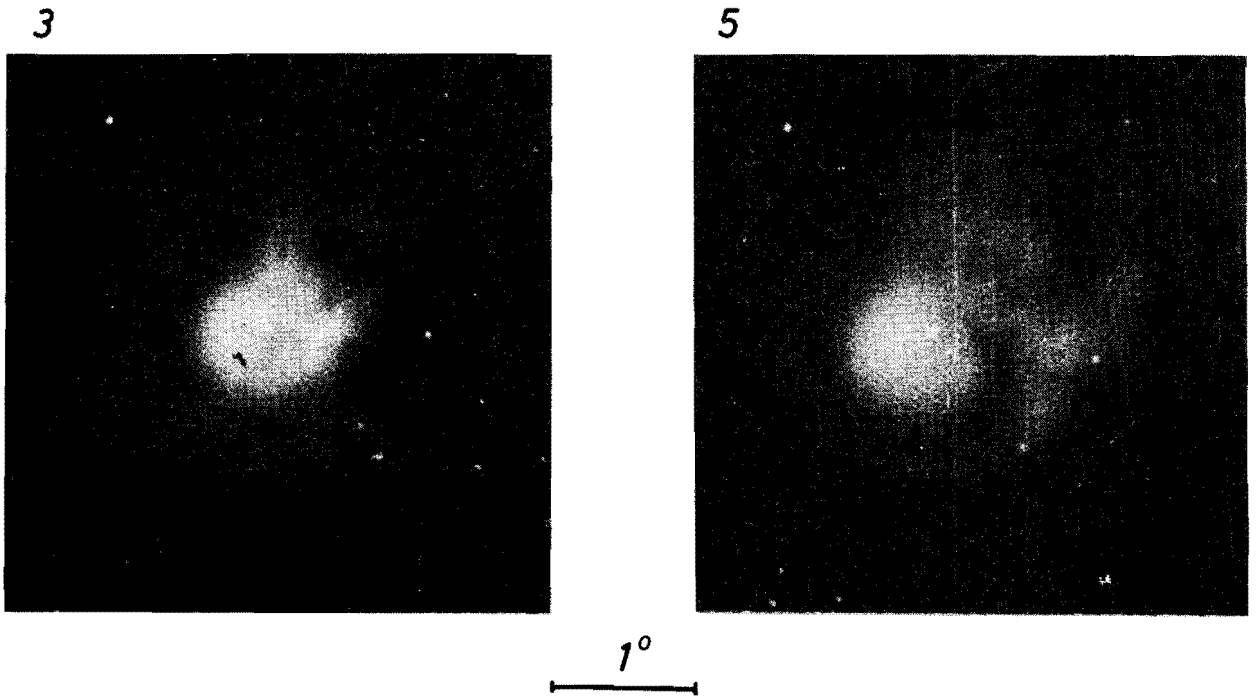


FIG. 1

Photographies obtenues avec un temps de pose de 1,48 seconde à la cadence de 0,67 image par seconde lors du lâcher à 161 km, le 6 juillet 1969. Les photographies reproduites sont la troisième et la cinquième après le lâcher de gaz. Le cliché n° 3 montre l'onde rapide, diffuse et entourant l'onde lente à peine détachée du centre explosif. Au cliché n° 5 l'onde lente reste seule visible et présente une asymétrie. Au centre, le nuage d'AIO apparaît. A la distance d'observation et perpendiculairement à la direction de visée, 1° correspond à 2,9 km.

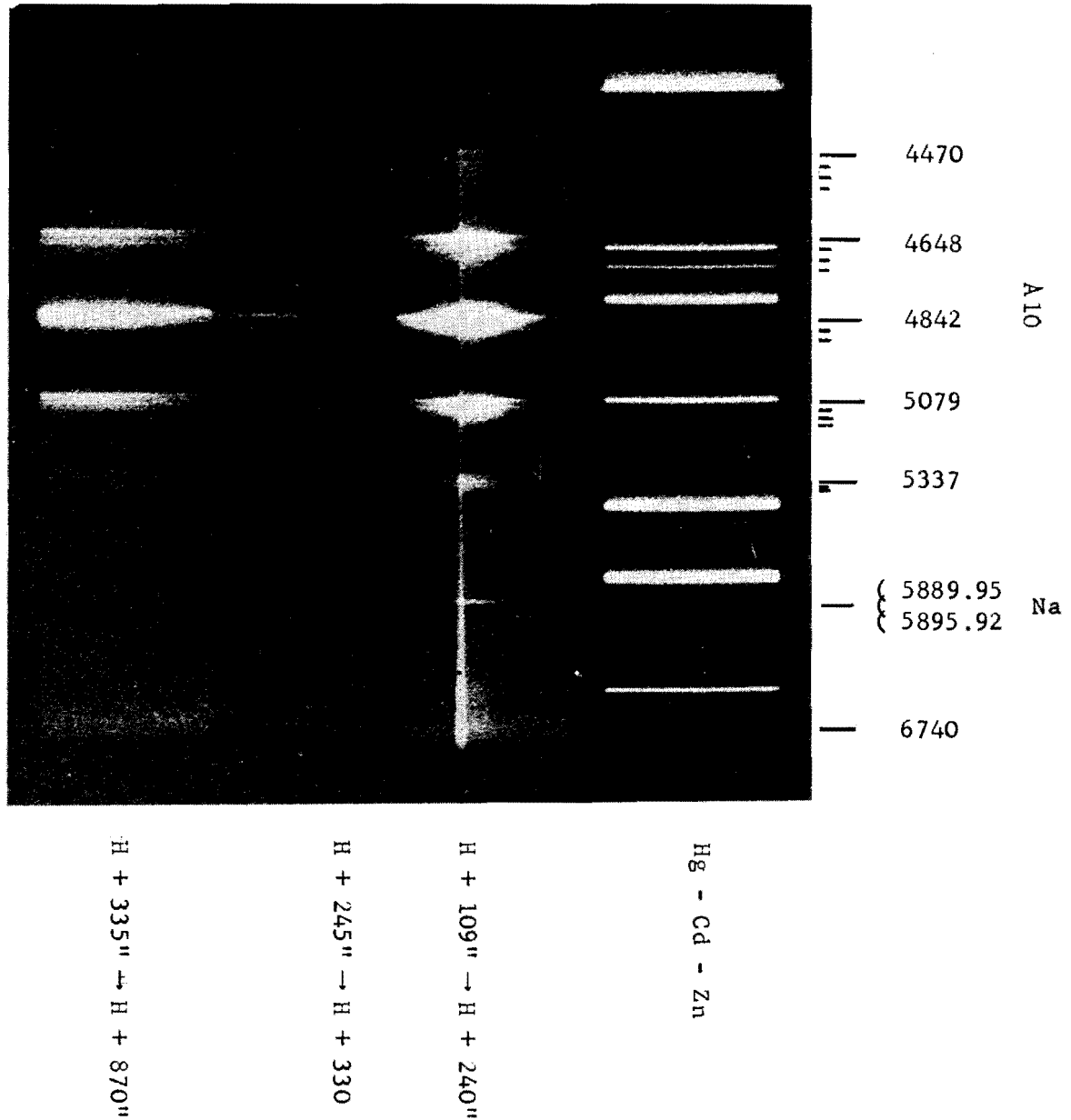
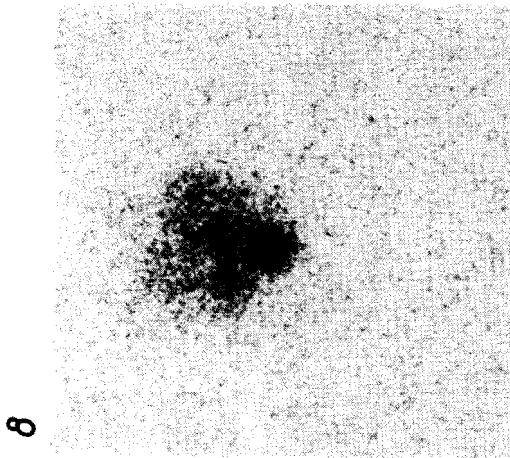
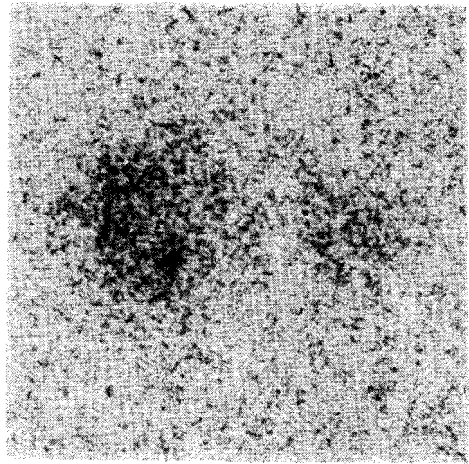


FIG. 2

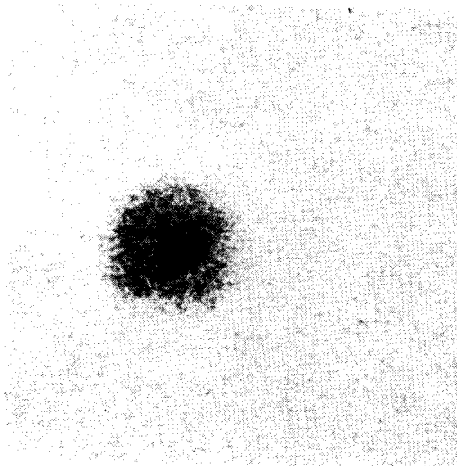
Spectres obtenus lors de l'expérience S64-2. Le moment du départ de la fusée est représenté par H . Le continuum photographié entre $H + 109''$ et $H + 240''$ a été émis par l'explosion du mélange de méthane et d'oxygène à 157 km. Le spectre dû à AlO est superposé. De $H + 245''$ à $H + 330''$. Le spectre du nuage à 278 km a été observé; seule la séquence $\Delta v = 0$ de AlO apparaît. De $H + 335''$ à $H + 770''$ le nuage d'AlO de basse altitude a atteint de plus grandes dimensions par diffusion et son image couvre toute la fente du spectrographe.



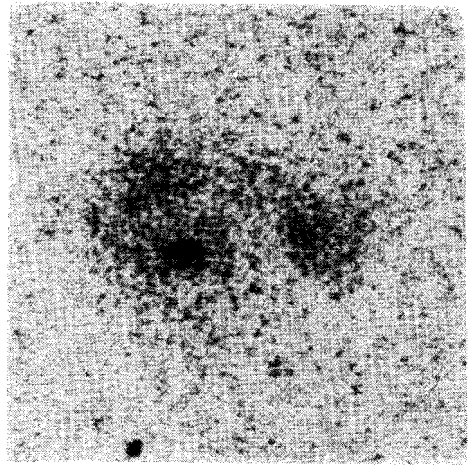
8



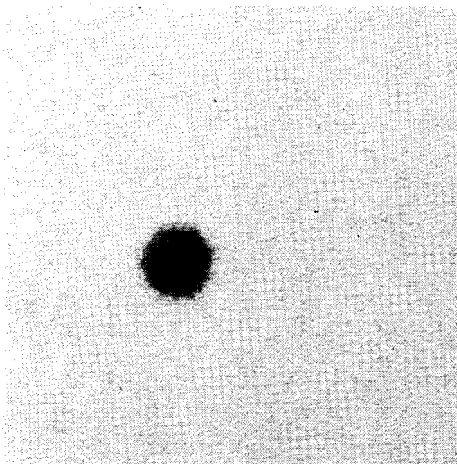
33



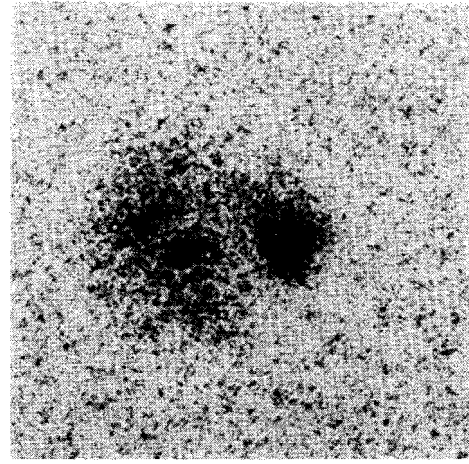
4



26



1



18

FIG. 3

Reproductions fortement agrandies des photographies 1, 4, 8, 18, 26 et 33 obtenues au $1/20^{\circ}$ de seconde à la cadence de 10 images par seconde lors du lâcher de gaz à 157 km le 13 juillet 1969. Le cliché n° 1 représente l'explosion. L'image présente un contour net et semble exempte d'effets parasites qui seraient dus à une surexposition. Dans ces conditions, la vitesse d'expansion initiale serait de 8 km par seconde au moins.

L'image n° 4 présente encore un contour net et la dimension du nuage ne correspond plus à ce moment qu'à une vitesse d'expansion moyenne de 2 km par seconde. Le nuage présente plusieurs caractères de dissymétrie, une partie est plus lumineuse et une tache s'éloigne du centre. Elle poursuit son mouvement aux clichés suivants à la vitesse constante de 0,8 km par seconde. Les clichés 18, 26 et 33 montrent l'éloignement de cette tache et la distribution de matière donnant l'image d'une spirale. A la distance d'observation, et perpendiculairement à la direction de visée, 1° correspond à 2,8 km.

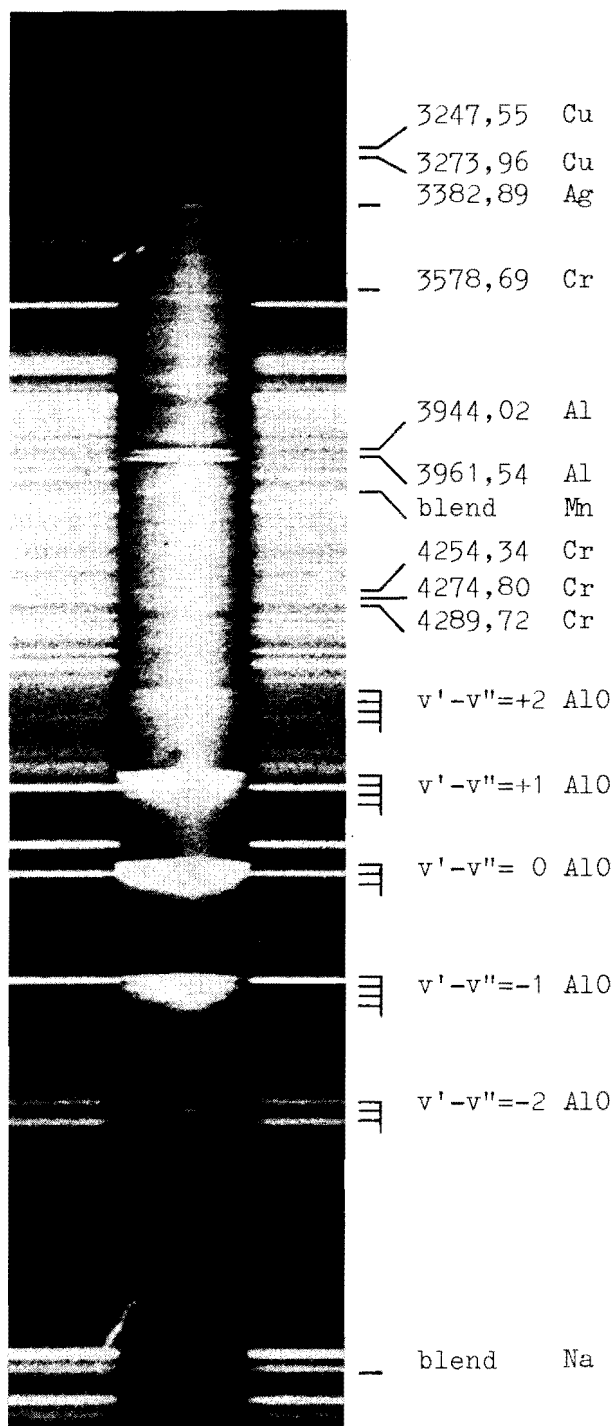


FIG. 4

Spectre du nuage de basse altitude obtenu lors de l'expérience S64-2 au moyen du spectrographe « nébulaire ». Temps de pose : 14 minutes.

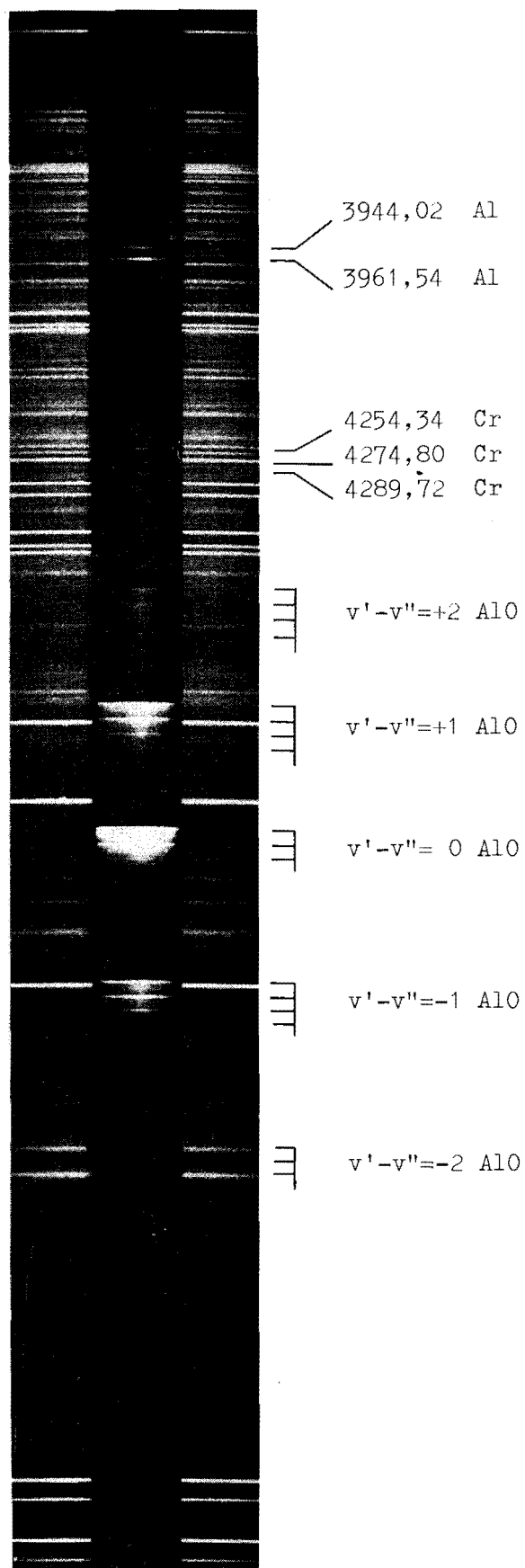


FIG. 5

Spectre du nuage de basse altitude obtenu au moyen du spectrographe « visible » lors de l'expérience S64-2. Temps de pose : 15 minutes.

IV. RÉSULTATS

Les tirs ont eu lieu sous la désignation S 64-1 et 2, les 6 et 13 juillet 1969 respectivement à 20 h 30 et à 20 h 21 (temps moyen local) pour des dépressions solaires de l'ordre de 10° . Les phénomènes les plus importants par la durée, la dimension et la luminosité, furent la formation de nuages artificiels d'AlO de couleur bleu-vert fluorescents sous l'action du rayonnement solaire. Les altitudes en ont été déterminées par Ackerman et Van Hemelrijk [1971] qui ont également mesuré les composantes horizontales et verticales des mouvements des nuages (tableau I). L'analyse des documents photographiques a permis en plus de déduire du coefficient de diffusion de l'oxyde d'aluminium la densité atmosphérique entre 155 et 165 kilomètres d'altitude, [ACKERMAN et SIMON, 1971 ; SIMON, 1971]. Les résultats sont repris dans le tableau II. Le temps d'observation des nuages de haute altitude était trop court pour déduire, à partir des mesures de diffusion, des informations valables relatives à la densité atmosphérique.

IV.1. *Phénomènes préalables
à l'observation des nuages d'AlO.*

Lors de chaque lâcher simultané de méthane et d'oxygène, une sphère très lumineuse en expansion rapide a pu être observée pendant quelques secondes. Une « onde » de symétrie quasi sphérique s'en est dégagée à une vitesse de l'ordre de 1,9 km par seconde. Elle a pu être photographiée pendant une dizaine de secondes. Du point d'explosion s'est ensuite échappée, à une vitesse de l'ordre de 0,8 kilomètre par seconde, une deuxième « onde » à contour plus irrégulier. Aux incertitudes expérimentales près, les vitesses mesurées pour les deux ondes sont les mêmes à haute et à basse altitude.

La figure 1 représente ces phénomènes dans le cas du lâcher de gaz du 6 juillet à 161 kilomètres d'alti-

tude. Des observations analogues ont déjà été effectuées antérieurement lors de la mise à feu de charges explosives dans la haute atmosphère et ont été récemment discutées par Lloyd et Low [1970]. Selon ces auteurs, l'onde lente semble pouvoir être attribuée à l'éjection de particules solides rendues visibles par diffusion de la lumière solaire. L'onde rapide pourrait être liée à l'excitation de l'air ambiant lors de la libération brutale d'énergie résultant de l'explosion. Dans le cas du lâcher de gaz du 13 juillet à 157 kilomètres d'altitude, la deuxième onde est réduite à une éjection de matière dans une seule direction. La disparition dans ce cas de toute symétrie sphérique semble confirmer qu'il s'agit de particules solides.

Le spectre du phénomène lumineux initial obtenu lors de ce lâcher est représenté à la figure 2; il a été obtenu au moyen du spectrographe C1 sur la fente duquel l'image du nuage était formée au moyen d'un objectif de 15 cm de distance focale. Du continuum de lumière émis par l'explosion se dégagent les émissions bleu-vert du nuage d'oxyde d'aluminium en expansion et plus lumineux au centre que sur les bords. Des images de la phase explosive de ce lâcher du 13 juillet à 157 km ont été obtenues à la cadence de dix clichés par seconde et avec un temps de pose de 0,05 seconde.

Six agrandissements en sont présentés à la figure 3 et représentent l'éjection asymétrique, depuis le centre explosif, de matière se répartissant en donnant l'image d'une spirale, tandis que la luminosité décroît rapidement. Une asymétrie prononcée se manifeste déjà au cliché n° 4. Tout semble se passer comme si la matière était éjectée lors de l'explosion en toutes directions mais avec des vitesses différentes croissant régulièrement avec l'angle d'éjection. Si la spirale était déployée dans un plan perpendiculaire à l'axe d'observation, la distance entre le centre explosif et l'extrémité de la spirale serait de 2 km au cliché n° 26 représenté à la figure 3.

TABLEAU II

Paramètres atmosphériques.

Charge utile	Altitude (km)	Température (°K)	Coefficient de diffusion (cm ² sec ⁻¹)	Densité (gr cm ⁻³)
S 64-1	160	645	$2,23 \times 10^8$	$1,40 \times 10^{-12}$
S 64-2	156	660	$2,03 \times 10^8$	$1,55 \times 10^{-12}$
	156*	660	$1,79 \times 10^8$	$1,76 \times 10^{-12}$
	165	660	$2,82 \times 10^8$	$1,12 \times 10^{-12}$

* Résultat obtenu à 4 670 Å.

IV.2. Résultats spectrographiques.

Les spectrographes étaient équipés de plaques ou pellicules Kodak 103a F, sauf le spectrographe « ultraviolet » qui était pourvu de pellicules 103a O. Les spectres obtenus sont reproduits aux figures 2, 4 et 5. Ils ont tous trait aux nuages de basse altitude, sauf un seul représenté à la figure 2 et montrant la transition $\Delta\nu = 0$ de AIO pour le nuage à 278 km d'altitude de S 64-2. Pour le nuage de 157 km d'altitude, les séquences $\Delta\nu = -2, -1, 0, +1$ et $+2$ apparaissent très clairement.

Du côté des grandes longueurs d'onde, et en plus des raies du sodium, d'autres émissions sont présentes dont la plupart ont un caractère de continuum. Les spectres obtenus au moyen des spectrographes « nébulaire » et « visible » sont repris aux figures 4 et 5. On voit sur ces clichés que le spectre le plus riche est celui obtenu au moyen du « nébulaire » par suite de sa grande luminosité. On y distingue un continuum solaire intense entrecoupé des raies d'absorption de Fraunhofer et auquel se superpose un certain nombre d'émissions atomiques et moléculaires. Il a été nécessaire de comparer ces spectres à ceux du ciel crépusculaire sans nuage artificiel, obtenus dans les mêmes conditions pendant la campagne de tirs, avec chacun des trois instruments, de façon à mettre en évidence certaines émissions faibles présentes au sein du spectre continu riche en raies d'absorption solaires. Ces émissions ont été repérées sur le cliché du « nébulaire » et leur longueur d'onde a été mesurée au moyen de l'enregistrement au microphotomètre Chalonge des clichés obtenus avec les spectrographes « ultraviolet » et « visible », plus dispersifs que le « nébulaire », donc permettant une mesure plus précise.

Nous avons ainsi observé, en plus des émissions dues à AIO :

— les deux raies de résonance de l'aluminium, très intenses, à 3 944,02 Å et 3 961,55 Å,

— les deux raies de résonance du cuivre, très intenses, à 3 247,55 Å et 3 273,96 Å.

— les raies du manganèse à 4 030,76 Å, 4 033,07 Å et 4 034,49 Å imparfaitement résolues entre 4 030 et 4 034 Å.

La présence de ces éléments (Al, Cu et Mn) est attribuée à l'évaporation, lors de la réaction méthanoxygène très exothermique, de l'alliage d'aluminium des cylindres de gaz des charges utiles. L'alliage AU 6 MGT utilisé contient d'autres éléments dont le spectre n'a pas été enregistré, soit qu'il se situe dans l'ultraviolet trop lointain, c'est le cas de Mg, soit que ces éléments soient en trop faible proportion, c'est le cas de Ti, Fe et Si. L'évaporation d'autres parties constitutives de la charge utile est susceptible d'expliquer la présence d'autres émissions qui ont été décelées et attribuées d'une part au chrome, avec la raie 3 578,69 Å qui ressort nettement au

centre d'une large absorption solaire, et les raies 4 254,34 Å, 4 274,80 Å et 4 289,72 Å, elles aussi nettement séparées (plus faiblement, la raie 3 605,35 Å apparaît sur l'aile d'une absorption solaire), et d'autre part à l'argent avec la raie de résonance 3 382,89 Å, assez forte. Enfin les deux raies de résonance du sodium (5 889,95 Å et 5 895,92 Å) sont également visibles sur le spectre.

IV.3. Détermination de la température de la thermosphère.

Les différents spectres obtenus ont permis de déterminer que la luminance du nuage artificiel était principalement due à la fluorescence de résonance de la molécule AIO. Les bandes observées correspondent à la transition $A^2\Sigma^+ - X^2\Sigma^+$ de cette molécule. La détermination de la température du nuage d'oxyde d'aluminium est possible par comparaison des spectres expérimentaux avec des spectres synthétiques calculés pour différentes températures. Si le nuage est en équilibre avec l'atmosphère ambiante, sa température est égale à la température de la thermosphère à l'altitude du nuage. L'équilibre de température n'est atteint que si un nombre suffisant de collisions a lieu entre deux processus d'excitation successifs de la même molécule. Les valeurs de la force d'oscillateur déterminées expérimentalement par Vanpee et al [1970], correspondent à un temps de vie moyen d'une molécule d'AIO dans le niveau fondamental $X^2\Sigma^+$ de l'ordre de 25 sec. La fréquence de collision à 160 km d'altitude étant de l'ordre de 10 sec^{-1} quelque 250 collisions ont lieu entre deux excitations successives. Ce temps est largement suffisant pour atteindre l'équilibre thermique [HARANG, 1969].

Le spectre synthétique a été calculé suivant la méthode développée par Harang [1969]. Cette méthode repose sur plusieurs hypothèses de travail. Le modèle est traité pour une transition singulet-singulet ; en effet $\Lambda = 0$, (cas *b* de Hund) et le dédoublement des raies de rotation est relativement petit vis-à-vis de la résolution des spectrographes employés. D'autre part, on suppose que les différents niveaux de vibration et de rotation du niveau électronique fondamental sont peuplés suivant la loi de Boltzman. Le calcul des facteurs de transition électronique et de vibration est basé sur des facteurs de Franck-Condon et sur les distances internucléaires calculées par Sharma [1967] en utilisant une fonction algébrique approximative déterminée par Harang [1969]. Enfin, le nombre de processus d'absorption des molécules d'AIO étant proportionnel à la densité du rayonnement solaire, la connaissance de l'intensité du spectre solaire aux longueurs d'onde correspondant aux raies d'émission de AIO est nécessaire à la réalisation du calcul. Le spectre d'émission d'un corps noir à 6 000 °K a été utilisé. Les corrections dues aux raies de Fraunhofer ont été reprises de l'atlas solaire de l'Observatoire d'Utrecht [MINNAERT et al, 1940]. Les paramètres

moléculaires nécessaires au calcul des intensités relatives des raies d'émission de AIO ont été repris du travail de Lagerqvist et al. [1957].

Le spectre obtenu, parfaitement résolu, ne correspond évidemment pas aux spectres expérimentaux. Le produit de convolution de ce spectre avec la fonction de fente du spectrographe, obtenue à partir d'une raie d'émission atomique du spectre de référence, fournit des spectres synthétiques calculés pour différentes températures. Ceux-ci peuvent être comparés, après avoir normalisé les intensités intégrées en fonction de la longueur d'onde, aux spectres expérimentaux par la méthode des moindres carrés en calculant la somme des écarts au carré entre les intensités des spectres synthétiques et des spectres expérimentaux.

La température pour laquelle le spectre synthétique donne la plus petite valeur de l'écart est considérée comme étant celle du nuage artificiel. La séquence $\Delta v = 1$ du spectre d'AIO obtenu à l'aide du spectrographe « visible » a été choisie pour la détermination de la température. Le choix a été limité à cette transition, car c'est la seule dont le spectre ne soit pas surexposé. Les mesures d'intensité ont été effectuées grâce à la méthode de Barbier-Soleillet [BARBIER, 1944], en utilisant un spectrographe d'étalonnage. Une lampe spectrale à hélium a permis de tracer la courbe d'étalonnage du film Kodak 103a F pour diverses longueurs d'onde. L'enregistrement des séquences a été effectué sur un microphotomètre Hilger à très faible vitesse de déroulement. Le continuum solaire, qui n'a pas impressionné le film aux longueurs d'onde des mesures, a pu être négligé.

Les résultats sont représentés aux figures 6 et 7. Les figures 8 et 9 montrent les valeurs des écarts au carré en fonction de la température. Le minimum des courbes obtenues permet de déterminer une température de 645 °K pour la charge utile S 64-1 et de 660 °K pour S 64-2 aux altitudes respectives de 161

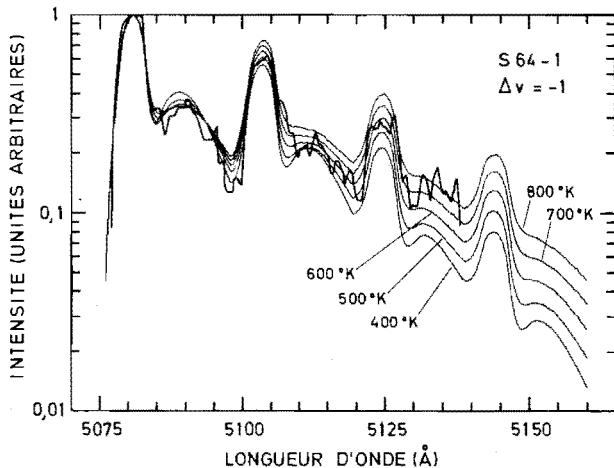


FIG. 6

Spectres synthétiques de AIO calculés pour différentes températures et spectre expérimental du nuage de basse altitude formé lors du premier tir de fusée (S64-1).

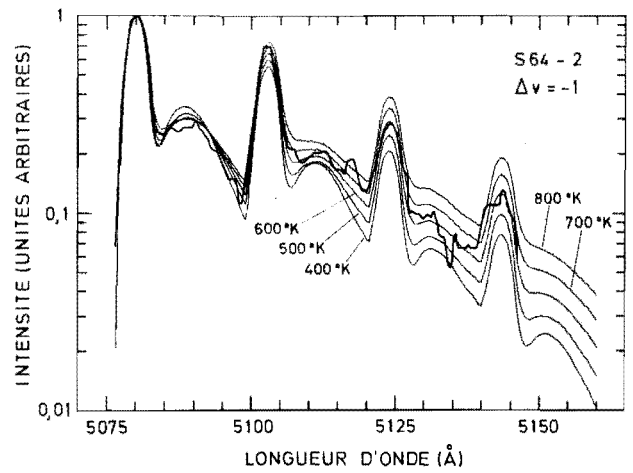


FIG. 7

Spectres synthétiques de AIO calculés pour différentes températures et spectre expérimental du nuage de basse altitude formé lors du second tir de fusée (S64-2).

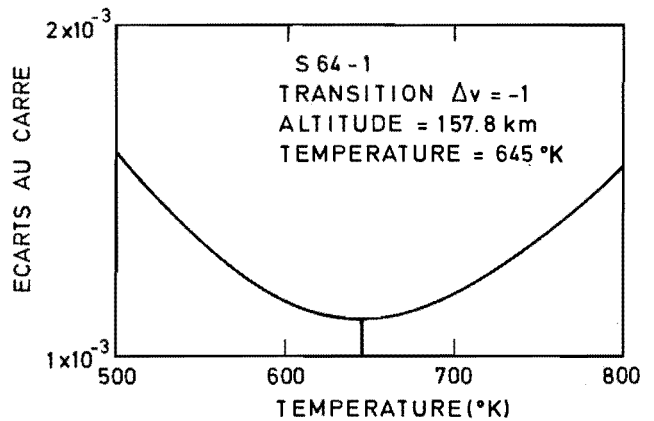


FIG. 8

Sommes des écarts au carré entre les intensités des spectres synthétiques et du spectre expérimental du nuage de basse altitude formé lors du premier tir de fusée (S64-1), en fonction de la température.

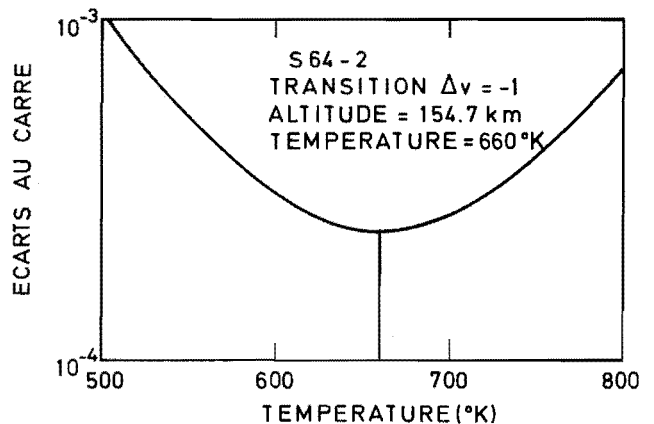


FIG. 9

Sommes des écarts au carré entre les intensités des spectres synthétiques et du spectre expérimental du nuage de basse altitude formé lors du second tir de fusée (S64-2), en fonction de la température.

et 157 km. Ces valeurs ont été utilisées par Ackerman et Simon [1971] pour calculer la densité atmosphérique à partir des coefficients de diffusion des nuages de basses altitudes. Le spectre obtenu à partir du nuage de haute altitude n'est malheureusement pas suffisamment riche en informations pour permettre une détermination précise de la température. Toutefois une estimation a été faite, pour S 64-2, qui conduit à une valeur de 850 °K à 278 km d'altitude.

Dans le but de comparer les valeurs expérimentales à celles déduites des modèles atmosphériques, les températures minimum et maximum diurnes à la thermopause ont été calculées à partir des données du flux radio-électrique solaire de longueur d'onde de 8 cm, suivant la formule établie par Nicolet [1963 a]. Les variations liées à l'indice géomagnétique K_p ont été calculées par la formule de Jacchia et al [1967] ainsi que la variation semi-annuelle [JACCHIA et al, 1968]. Le tableau III reprend les données nécessaires aux calculs et les résultats obtenus. La figure 10 présente la variation de la température en fonction de l'altitude suivant les modèles J2 de Nicolet [1964], pour les différentes températures exosphériques calculées, ainsi que les résultats obtenus à partir des charges utiles S 64. L'écart entre les valeurs expérimentales et théoriques est de l'ordre de 150 °K et de 100 °K, respectivement pour S 64-1 et 2. Les températures thermosphériques, obtenues par d'autres auteurs à partir de nuages artificiels d'oxyde d'aluminium formés au crépuscule du soir, sont reprises à la même figure. Les températures extrêmes ont été calculées à partir des mêmes formules, pour toutes les expériences publiées à ce jour, pour permettre le choix des modèles atmosphériques appropriés. La figure 11 reprend les mêmes types de résultats obtenus au crépuscule du matin.

Une constatation se dégage de ces deux figures : les résultats obtenus au crépuscule du matin sont en accord raisonnable avec les modèles atmosphériques,

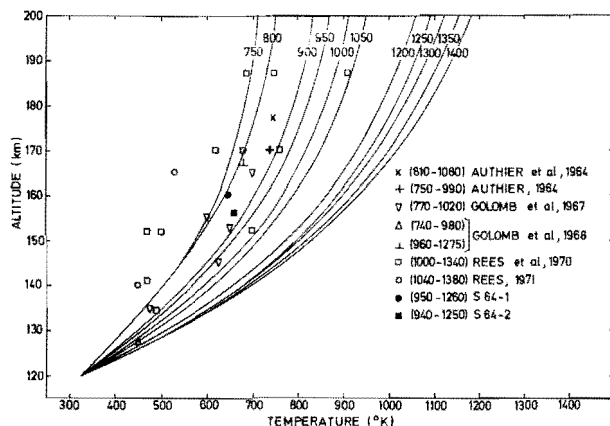


FIG. 10

Températures thermosphériques, déduites de l'observation de nuages artificiels d'oxyde d'aluminium formés au crépuscule du soir, en fonction de l'altitude. Les nombres entre parenthèses, placés devant les références, donnent les températures diurnes extrêmes à la thermopause, calculées à partir des indices du flux radioélectrique solaire S (8 cm). Les variations de la température thermosphérique, en fonction de l'altitude, déduites des modèles J2 de Nicolet, pour les températures exosphériques se rapprochant des valeurs calculées, sont représentées en trait plein.

contrairement aux résultats obtenus au crépuscule du soir où les écarts peuvent atteindre 300 °K. De plus, la dispersion des résultats est beaucoup plus grande au crépuscule du soir qu'au crépuscule du matin. Ceci pourrait laisser supposer que les conditions physiques de la thermosphère au crépuscule du soir ne sont pas entièrement reproductibles. D'autre part, il faut spécifier que les modèles atmosphériques ont été calculés [NICOLET, 1963 b] en considérant une atmosphère se refroidissant par conduction thermique. Cette hypothèse est probablement plus réaliste au crépuscule du matin où la thermosphère s'est refroidie toute la nuit, sans apport

TABEAU III

Flux radioélectriques solaires et températures exosphériques.

Charge utile	Date Temps local	S (8 cm)	\bar{S}_{27} (8 cm)	\bar{K}_p	T_{nuit} (°K)	T_{jour} (°K)
S 64-1	6 juillet 1969 20 h 30	158	134.5	1.08	950	1 260
S 64-2	13 juillet 1969 20 h 21	139	133.2	2.79	940	1 250

S (8 cm) = indice journalier du flux radioélectrique solaire (longueur d'onde = 8 cm).
 \bar{S}_{27} (8 cm) = indice moyen du flux radioélectrique solaire (moyenne sur 27 jours).
 \bar{K}_p = indice géomagnétique moyen.
 T = température isotherme.

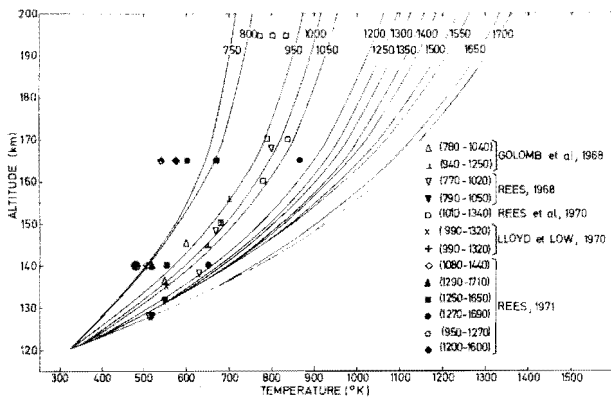


FIG. 11

Températures thermosphériques déduites de l'observation de nuages artificiels d'oxyde d'aluminium formés au crépuscule du matin, en fonction de l'altitude. Les nombres entre parenthèses, placés devant les références, donnent les températures diurnes extrêmes à la thermopause, calculées à partir des indices du flux radioélectrique solaire S (8 cm). Les variations de la température thermosphérique, en fonction de l'altitude, déduites des modèles $J2$ de Nicolet, pour les températures exosphériques se rapprochant des valeurs calculées, sont représentées en trait plein.

extérieur de chaleur, qu'au crépuscule du soir où les conditions thermiques sont plus complexes après le chauffage ultraviolet du jour. Il faut toutefois noter que l'ensemble des résultats au crépuscule du soir pourrait mettre en évidence un gradient de température plus faible, donc un refroidissement plus rapide de la thermosphère. Les conditions aux limites, fixées à 120 km d'altitude, pourraient de ce fait être revues, soit en ce qui concerne la température — celle-ci devrait être plus élevée — soit en ce qui concerne l'altitude des conditions aux limites, pour laquelle une variation diurne n'est pas nécessairement exclue.

V. CONCLUSIONS

Les charges utiles S 64-1 et 2, utilisées chacune pour réaliser deux lâchers de méthane et d'oxygène aux altitudes de 160 et 270 km ont permis d'obtenir des résultats de deux types différents : d'une part ceux qui sont directement liés à l'explosion des gaz et précèdent la formation des nuages d'oxyde d'aluminium, et d'autre part ceux qui ont été déduits de l'observation de ceux-ci.

Des premiers phénomènes, seule la phase explosive initiale (cliché n° 1 de la figure 3), de durée très courte ne dépassant guère le dixième de seconde, peut être caractérisée avec quelque précision et être identifiée aux ondes de choc décrites antérieurement par Blamont et Boulblil [1965]. Les phases suivantes ne peuvent faire l'objet que d'une description.

Les résultats obtenus à partir de l'observation des nuages artificiels d'oxyde d'aluminium ont trait aux déterminations de vents, de densités et de températures dans la thermosphère. Seul ce dernier paramètre est discuté dans ce travail étant donné que les deux autres ont fait l'objet de publications séparées [ACKERMAN et Van HEMELRIJCK, 1971 ; ACKERMAN et SIMON, 1971 et SIMON, 1971]. Les deux valeurs de températures thermosphériques sont en accord raisonnable avec les résultats des autres auteurs, mais sont nettement moins élevées que les valeurs déduites des modèles thermosphériques de Nicolet [1964]. De l'étude globale des résultats publiés par d'autres auteurs, il résulte que les données obtenues au crépuscule du matin sont en accord raisonnable avec les modèles thermosphériques, contrairement aux résultats obtenus au crépuscule du soir pour lesquels des écarts importants existent. Ceci peut éventuellement s'expliquer par les hypothèses physiques qui sont à la base du calcul des modèles de la thermosphère.

REMERCIEMENTS

Nous remercions le professeur Nicolet pour ses conseils et pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail, ainsi que le professeur Andrillat et son équipe du laboratoire d'Astronomie de la faculté des Sciences de l'université de Montpellier qui comprenait Mme Andrillat, Mlle Bloch et MM. Laffineur et Roques, pour leur participation à la campagne S 64. Nous remercions le personnel du Centre de Recherches des Poudreries Réunies de Belgique (P.R.B.) pour son esprit de collaboration lors de la mise au point et de la réalisation des charges utiles et l'équipe de l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique comprenant MM. Ailliet, Baedewijns, Biaume, Callewier, Craenen, Frimout, Pastiels, Schadeck, Vanbelle, Van Hemelrijck et Van Ransbeeck, pour sa contribution à la réussite de la campagne de tir.

Manuscrit reçu le 28 juin 1971.

RÉFÉRENCES

- ACKERMAN M. and SIMON P., "Upper atmospheric densities between 155 and 165 km by observation of AIO clouds," *Planet. Space Sci.*, sous presse.
- ACKERMAN M. and VAN HEMELRIJCK E., "Measurement of upper atmospheric winds at 160 and 275 kilometers," *J. Geophys. Res.*, **76**, 3162-3163, 1971.
- AUTHIER B., « Mesures de température de l'ionosphère à partir de la fluorescence de molécules produites artificiellement au moyen de fusées », *Ann. Géophys.*, **20** (4), 353-382, 1964.
- AUTHIER B., BLAMONT J. E. et CARPENTIER G., « Mesure de la température de l'ionosphère à partir de la fluorescence crépusculaire du monoxyde d'aluminium », *Ann. Géophys.*, **20** (3), 342-345, 1964.
- BARBIER D., « Recherches sur les nébuleuses ; I. Le spectre continu de la Nébuleuse d'Orion dans la région des courtes longueurs d'onde », *Ann. Astrophys.*, **7**, 80-106, 1944.
- BATES D. R., "A suggestion regarding the use of rockets to vary the amount of atmospheric sodium," *J. Geophys. Res.*, **55**, 347-349, 1950.
- BLAMONT J. E. et BOUBLIL Y., « Étude de la propagation d'une onde de choc et des phénomènes optiques obtenus à partir d'explosions dans l'ionosphère », *Ann. Géophys.*, **21** (1), 2-12, 1965.
- BLAMONT J. E. and CHANIN-LORY M. L., "Temperature measurements in the ionosphere from 100 to 400 km between 1960 and 1964," *Space Research V*, 1137-1139, 1965.
- CIRA 1965, "Cospas International Reference Atmosphere 1965," North-Holland Publishing Company, Amsterdam, 1965.
- GOLOMB D., DEL GRECO F. P., HARANG O., JOHNSON R. H. and MAC LEOD M. A., "Neutral diffusion coefficients, temperatures and densities in the lower thermosphere," *Space Research*, **VIII**, 705-712, 1968.
- GOLOMB D., HARANG O. and DEL GRECO F. P., "Upper atmosphere densities and temperatures at 105-165 kilometers from diffusion and spectral intensity of AIO trails," *J. Geophys. Res.*, **72**, 2365-2370, 1967.
- GOLOMB D. and MAC LEOD M. A., "Diffusion coefficients in the upper atmosphere from chemiluminous trails," *J. Geophys. Res.*, **71**, 2299-2305, 1966.
- HARANG O. E., "AIO resonant spectra and temperature measurement of the thermosphere. Part one: description of the method," *Scientific Report n° 1*, The Auroral Observatory, Tromsø, Norway, 1969.
- JACCHIA L. G., SLOWEY J. W. and VERNIANI F., "Geomagnetic perturbations and upper-atmosphere heating," *J. Geophys. Res.*, **72**, 1423-1434, 1967.
- JACCHIA L. G., SLOWEY J. W. and CAMPBELL I. G., "Semiannual density variations in the upper atmosphere, 1958 to 1966," *Planet. Space Sci.*, **17**, 49-60, 1969.
- LAGERQVIST A., LENNART NILSSON N. E. and BARROW R. F., "Rotational analysis of the $^2\Sigma$ - $^2\Sigma$ system of AIO," *Ark. Fysik*, **12** (25), 543-546, 1957.
- LLOYD K. H. and LOW C. H., "Anomalous upper atmospheric parameters derived from two aero-high rocket firings," *Technical Note HSA 175*, Weapons Research Establishment, Adelaide, 1970.
- LOW C. H., "Atmospheric temperature measurement above 100 km altitude from AIO spectra," *Planet. Space Sci.*, **15**, 199-200, 1967.
- MINNAERT M., MULDER G. F. W. and HOUTGAST J., "Photometric atlas of the solar spectrum," *Sterrewacht "Sonneborgh"*, Utrecht, 1940.
- NICOLET M., "Solar radio flux and temperature of the upper atmosphere," *J. Geophys. Res.*, **68**, 6121-6144, 1963 a.
- NICOLET M., "Density of the heterosphere related to temperature," *Smithsonian Contributions to Astrophysics*, **6**, 175-187, 1963 b.
- NICOLET M., "Aeronomiya," *Edition "Mir"*, Moscou, 1964.
- REES D., "Determinations of upper atmosphere structure above 90 km by optical observations on rocket-borne chemical releases," *Space Research V III*, 909-919, 1968.
- REES D., "Upper atmosphere neutral temperature profiles in the auroral zone, 1968-1970," *Planet. Space Sci.*, **19**, 233-241, 1971.
- REES D., ROPER R. G., LLOYD K. H. and LOW C. H., "Determination of the structure of the atmosphere between 90 and 250 kilometers using contaminant releases, I. Woomera, May 1968," *Scientific Report n° 1*, Department of Physics, University College London, U.K., 1970.
- SHARMA A., "The Franck-Condon factors and r-centroids of the $A^2\Sigma$ - $X^2\Sigma$ band system of AIO," *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, **7**, 289-293, 1967.
- SIMON P., « Détermination de la densité de la thermosphère terrestre par l'observation de la fluorescence de nuages artificiels d'oxyde d'aluminium », *Acad. Roy. Bel., Bull. Cl. Sci.*, **57**, 154-168 1971
- VANPEE M., KINEYKO W. R. and CARUSO R., "Experimental determination of the oscillator strengths for the $A^2\Sigma$ - $X^2\Sigma$ band system of aluminium oxide," *Combustions and Flame*, **19**, 381-395, 1970.