

I N S T I T U T D ' A E R O N O M I E S P A T I A L E D E B E L G I Q U E

3 - Avenue Circulaire

B - 1180 BRUXELLES

AERONOMICA ACTA

A - N° 171 - 1976

La caméra de triangulation de l'IAS

par

H. DEBEHOGNE, C. LIPPENS, E. VAN HEMELRIJCK

et

E. VAN RANSBEECK

B E L G I S C H I N S T I T U U T V O O R R U I M T E - A E R O N O M I E

3 - Ringlaan

B - 1180 BRUSSEL

AVANT-PROPOS

L'article "La caméra de triangulation de l'IAS" paraîtra dans "Annales de Géophysique", 1976.

FOREWORD

The article "La caméra de triangulation de l'IAS" will be published in "Annales de Géophysique", 1976.

VOORWOORD

Het artikel "La caméra de triangulation de l'IAS" zal verschijnen in "Annales de Géophysique", 1976.

VORWORT

Dieses Artikel "La caméra de triangulation de l'IAS" wird in "Annales de Géophysique", 1976 herausgegeben werden.

LA CAMERA DE TRIANGULATION DE L'IAS

par

H. DEBEHOGNE*, C. LIPPENS**, E. VAN HEMELRIJCK** et E. VAN RANSBEECK**

* *Observatoire Royal de Belgique, B-1180 Bruxelles*

** *Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique, B-1180 Bruxelles*

Résumé

Une étude détaillée de la méthode de réduction appliquée à des clichés pris avec les caméras de triangulation de l'IAS lors de l'expérience NO-II est présentée de même que les caractéristiques principales de ces caméras.

Les caméras de triangulation (ouverture : F/5; distance focale: 500 mm), du type azimutale, sont équipées d'un viseur. Le montage assure une rotation aisée et un pointage rapide dans la direction d'un corps céleste. Le champ est d'environ $22^{\circ} \times 28^{\circ}$ et l'optique ne présente pas de distorsion.

Depuis 1974, les caméras sont pourvues d'un obturateur automatique électronique. Grâce à cette modification, la qualité des images stellaires a été améliorée et, en conséquence, la précision sur les coordonnées mesurées.

La réception d'une impulsion de démarrage provoque l'exécution automatique d'un cycle de 3 temps de pose, programmé à l'avance. Tous les temps sont affichés et le décompte est visualisé sous forme de chiffres illuminés. Une sortie permet d'enregistrer le cycle exécuté sur bande magnétique ou sur enregistreur sur papier.

L'erreur systématique de 8", obtenue dans le passé, a été abaissée à moins d'une seconde d'arc. Ceci nous permet d'obtenir une précision sur l'altitude des nuages artificiels de 0.1 km jusqu'à 100 km et de l'ordre de 1 km à partir d'environ 100 km.

Finalement, la distance focale des caméras est déterminée par deux méthodes différentes.

Abstract

A detailed plate reduction study of the photographs taken with the IAS triangulation cameras during the NO-II experiment is presented together with the characteristic features.

These triangulation cameras (opening : F/5; focal length : 500 mm) have an azimuthal frame and are equipped with a view finder. The mounting allows the cameras to turn freely around the axis and to point rapidly in the direction of a celestial body. The field is about $22^\circ \times 28^\circ$. The optical system is free of distortion.

Since 1974 an automatic, electronic shutter completes the cameras increasing so the quality of the stellar images and consequently the accuracy of the measured coordinates.

The start of an impulse executes automatically a cycle of 3 exposure times programmed in advance. All the times are visualised and the count down can be followed on a display. The shutter is electrically connected to a tape recorder or a printing device.

The systematical accuracy of $8''$, obtained in the past, was highly increased to $1''$. This allows us altitude determinations of artificial clouds with absolute accuracies of 0.1 km at 100 km height and of the order of 1 km above this altitude.

Finally the focal length of the cameras is computed with two different methods.

Samenvatting

Een gedetailleerde studie van de reductiemethode toegepast op filmbeelden genomen door de IRA triangulatiecameras tijdens de NO-II proefneming wordt weergegeven alsook de voornaamste karakteristieken van deze cameras.

De triangulatiecameras (opening : F/5; brandpuntsafstand : 500 mm) zijn van het azimuthale type en uitgerust met een kijker. De montage werd zodanig opgevat dat ze aan de camera een gemakkelijke rotatie en een vlug richten naar een hemellichaam verzekert.

Sinds 1974 zijn de cameras voorzien van een automatische, elektronische sluiters. Dank zij deze verandering is de kwaliteit van de sterrenbeelden op de film verbeterd en bijgevolg ook de nauwkeurigheid op de gemeten coördinaten.

Door de ontvangst van een startpuls wordt een automatische, op voorhand geprogrammeerde cyclus van drie belichtingstijden in werking gesteld. Al de tijden worden afgebeeld en de aftelling wordt zichtbaar gemaakt door middel van zichtbare cijfers. Een uitgang laat het vastleggen van de uitgevoerde cyclus op magneetband of een schrijvend registreerapparaat toe.

De systematische fout van 8"; die we vroeger bereikten, werd nu verkleind tot minder dan één boogseconde. Dit laat ons toe een nauwkeurigheid op de hoogte van kunstmatige wolken te bekomen van 0.1 km tot 100 km hoogte en van de grootte-orde van 1 km vanaf ongeveer 100 km.

Tenslotte werd, aan de hand van twee verschillende methoden, de brandpuntsafstand van de camera berekend.

Zusammenfassung

Eine detaillierte Studie der Reduktionsmethode angewendet auf Filmbilder genommen mit der IRA Triangulationskamas während der NO-II Experimenten wird vorgestellt wie auch die wichtigste Charakteristiken dieser Kamas.

Die Triangulationskamas (Offnung : F/5; Brennweite : 500 mm) sind von azimutalen Type und sind ausgerüstet mit einem Gucker. Die Montage wurde so aufgefast dass sie für die Kamera eine leichte Rotation und ein schnelles Richten nach einem Himmelskörper versichert.

Seit 1974 sind die Kamas ausgerüstet mit einem automatischen, elektronischen Verschluss. Durch diese Veränderung ist die Qualität der Sternbilder auf dem Film verbessert und mithin die Genauigkeit auf den gemessenen Koordinaten.

Durch Empfang eines Startimpuls wird einem automatischen auf Vorhand programmierten Zyklus von drei Beleuchtungszeiten in Wirkung gestellt. Alle Zeiten werden abgebildet und die Abzählung wird sichtbar gemacht mittelst leuchtenden Zahlen. Ein Ausgang lässt das Festlegen des ausgeführten Zyklus auf Magnetband und auf einem Registrierapparat zu.

Der systematische Fehler von 8", der wie vorher bekommen, wurde nun verkleinert zu 1 Bogensekunde und weniger. Dies gibt uns eine Genauigkeit auf die Höhe künstlicher Wolken von 0.1 km auf 100 km Höhe und von etwa 1 km oberhalb ungefähr 100 km zu bekommen.

Zum Schluss wird die Brennweite der Kamera mit zwei verschiedenen Methoden berechnet.

INTRODUCTION

En 1950, Bates (1950) préconisait la réalisation d'expériences de formation de nuages artificiels dans la haute atmosphère au moyen de fusées sondes. La première expérience du genre fut effectuée à White Sands (New Mexico) par Edwards, Bedinger, Manring et Cooper (1955). Depuis lors, cette méthode particulière d'étude de l'atmosphère supérieure a été abondamment exploitée (Rosenberg, 1966; Blamont et Barat, 1967; Bedinger, 1972): les résultats acquis concernent un grand nombre de sujets de recherches, parmi lesquels il convient de citer la vitesse et la direction des vents, les coefficients de diffusion, la température, la composition chimique de l'atmosphère et les constantes de vitesse de réaction.

Les nuages artificiels ne se prêtent à l'observation depuis le sol que si les gaz absorbent et réémettent le rayonnement solaire (fluorescence) ou réagissent avec les atomes ou molécules atmosphériques pour créer des constituants rendus visible par chemiluminescence.

Par ailleurs, l'altitude à laquelle se manifestent ces divers phénomènes est un des paramètres essentiels dont une connaissance très précise s'avère indispensable pour procéder à l'exploitation des observations (Albritton, Young, Edwards et Brown, 1962; Jarrett, McGrattan et Rees, 1963; Lloyd, 1971; Smith, 1963).

Les deux caméras de triangulation de l'IAS ont déjà été utilisées lors de plusieurs expériences spatiales pour déterminer la direction et l'altitude de nuages artificiels (Ackerman et Van Hemelrijck, 1971; Van Hemelrijck et Debehogne, 1972; Van Hemelrijck, 1973; Frimout, Lippens, Simon, Van Hemelrijck, Van Ransbeeck et Rehri, 1976). La réduction des plaques photographiques, prises avec ces caméras est à l'origine d'une étude des formules de transformation donnant la plus grande précision possible sur la position des étoiles (Debehogne, 1970; Debehogne et Van Hemelrijck, 1972, 1974b).

Le but final de cette étude était d'assurer une précision sur l'altitude des nuages artificiels meilleure que 0.1 km jusqu'à 100 km et de l'ordre de 1 km à partir d'environ 100 km. Néanmoins, afin d'obtenir une telle précision, des modifications mécaniques et électroniques des caméras de triangulation se sont avérées nécessaires.

L'étude détaillée de la méthode de réduction a été faite sur des clichés pris lors de l'expérience NO-II réalisée par l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique. Cette expérience consistait en un lâcher d'une quantité connue de monoxyde d'azote dans la thermosphère inférieure, de manière à déterminer la concentration de l'oxygène atomique par la mesure de la chemiluminescence de la réaction $\text{NO} + \text{O} \rightarrow \text{NO}_2 + h\nu$.

Trois charges-utiles ont été lancées par des fusées Centaure II C les 12 et 13 septembre 1974 à partir de la base de lancement du Centre Spatial Guyanais à Kourou.

Dans ce travail, nous décrivons la caméra et nous présentons les réductions ainsi que les résultats de l'étude des formules de transformation.

II. DESCRIPTION DE LA CAMERA

La caméra, à l'exception de l'optique, a été étudiée et réalisée aux ateliers mécaniques et électroniques de l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique. Dans ce qui suit, nous allons brièvement en décrire les trois parties principales: la mécanique, l'électronique et l'optique.

2.1. La mécanique (Fig. 1)

La chambre de la caméra de triangulation se présente comme un parallélépipède de dimensions 36 x 36 x 43 cm. Elle est construite en alliage d'aluminium soudé et porte à l'arrière deux glissières soutenant des châssis standard de 24 x 28 cm.

Derrière l'objectif se trouve un obturateur à lamelle d'une ouverture maximale de 100 mm et commandé par un électro-aimant. Pour éviter la formation de condensation lors de la prise de vue, deux éléments de chauffage (puissance maximale: 110 watt chacun) peuvent être fixés autour de l'objectif. La puissance libérée est réglable par un circuit à thyristors. L'orientation de la caméra sur un objet céleste (étoile ou planète) se fait à l'aide d'un viseur Viking 8 x 20 contenant un réticule et monté sur la partie supérieure de la chambre. En

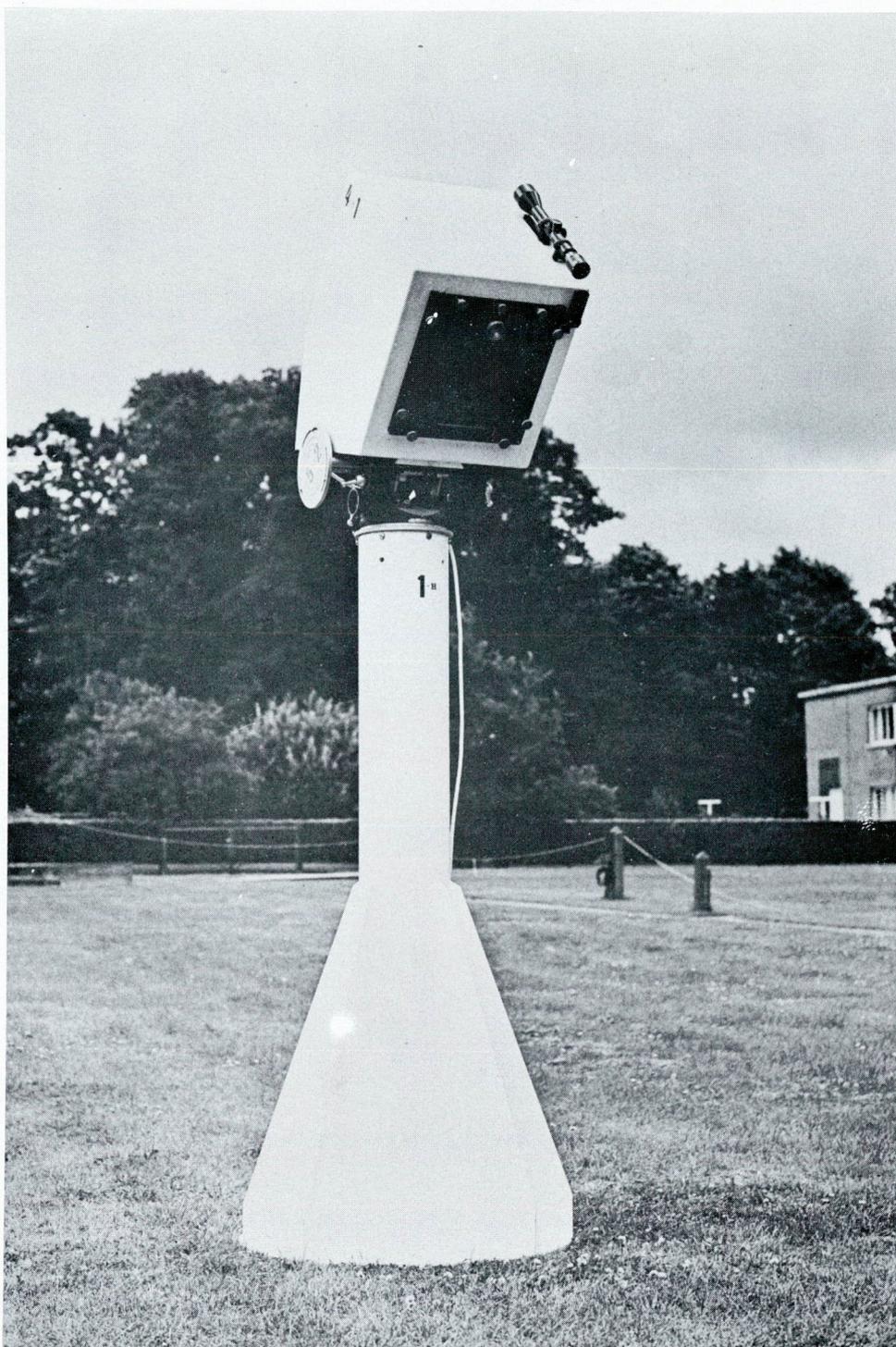


Fig. 1.- Vue générale de la caméra de triangulation IAS avec sa tourelle bi-dimensionnelle qui permet l'orientation selon deux axes (azimut et élévation). La tourelle elle-même est montée sur un pied sous forme d'un cône tronqué d'une hauteur de 1.25 m environ.

plus, une lamelle réglable, placée derrière le viseur, permet de former l'image du soleil sur un petit écran. On peut donc orienter la caméra aussi bien pendant la nuit que pendant la journée.

En dessous de la chambre se trouve un tiroir qui contient tous les composants électroniques pour programmer le fonctionnement automatique de la caméra.

Le tout est fixé sur une tourelle bi-dimensionnelle qui permet l'orientation selon deux axes (azimut et élévation). La tourelle elle-même est montée sur un pied sous forme d'un cône tronqué d'une hauteur de 1.25 m environ.

Des cercles gradués (qui permettent aussi une remise à zéro), solidaires du pied et de l'instrument mis en station, assurent un pointage à 10' près dans la direction de visée prévue et calculée à partir des coordonnées des stations d'observation et de la trajectoire théorique des fusées.

L'installation des caméras aux sites d'observation demande beaucoup de soins : le montage doit assurer une rotation aisée et un pointage rapide dans la direction de visée (azimut et élévation). Les supports des caméras sont stabilisés et des précautions prises pour éviter les vibrations lors de la prise de vue. Un socle en béton assure la stabilité de chaque caméra. Scellée dans ce socle, une plaque métallique, munie de trois boulons, permet la mise de niveau du pied en aluminium, support de la caméra.

2.2. L'électronique

2.2.1. Description (Fig. 2)

La réception d'une impulsion de démarrage par le programmeur de la caméra de triangulation provoque l'exécution automatique d'un cycle de 3 temps de pose, programmé à l'avance. Le temps qui s'écoule entre la réception de cette impulsion et la première ouverture de la caméra, les temps de pose et les temps entre deux ouvertures consécutives peuvent

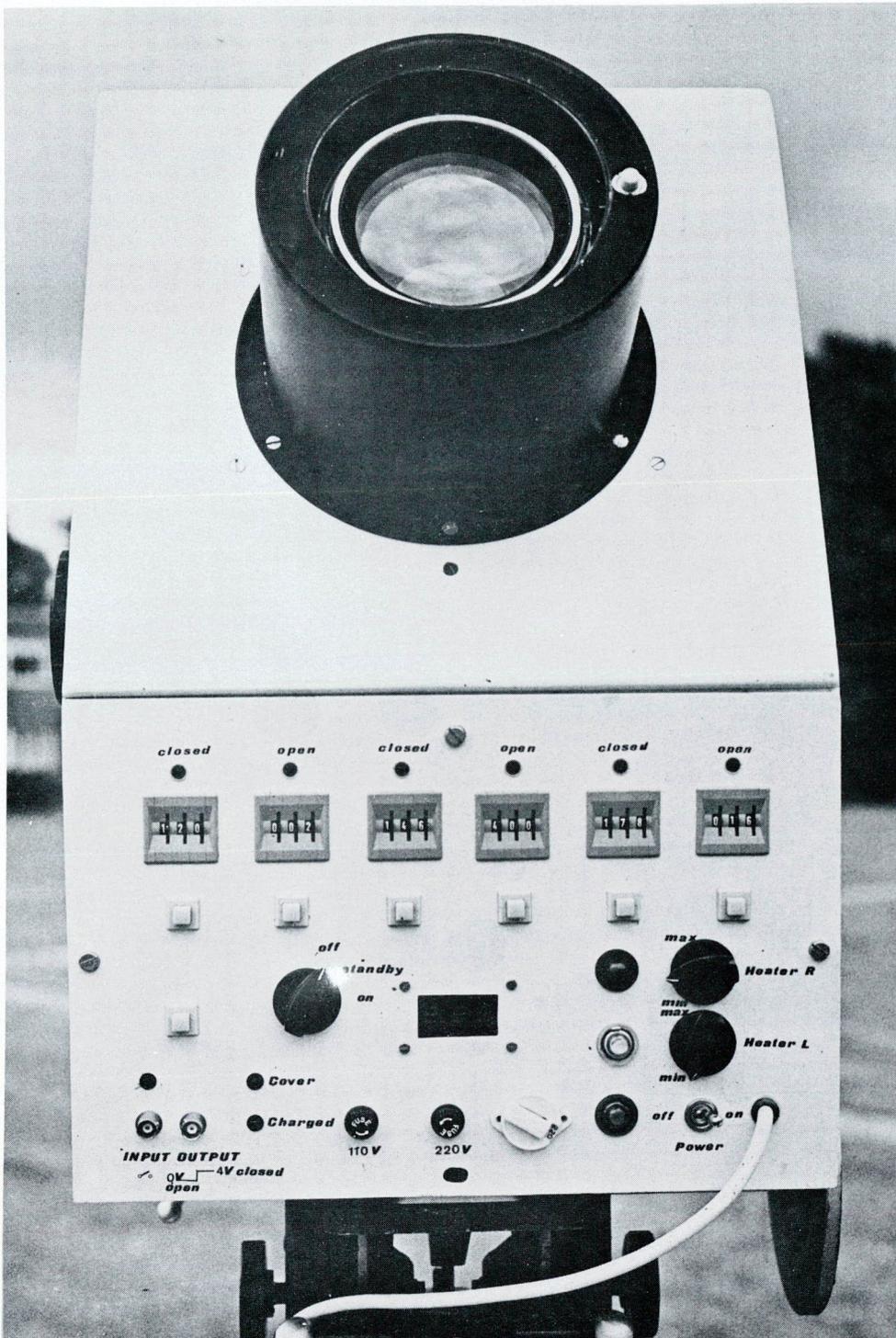


Fig. 2.- Tiror contenant tous les composants électroniques pour programmer le fonctionnement automatique de la caméra de triangulation IAS.

être programmés de 1 à 999 secondes (avec un pas de 1 sec.) à l'aide de commutateurs digitaux rotatifs (thumbwheel). La précision est meilleure que 1 msec. L'impulsion de démarrage peut être donnée manuellement par un bouton-poussoir (manuel start push button) ou automatique à distance par un court-circuit extérieur (remote).

Au-dessus de chacun des 6 blocs programmeurs qui comprennent tous trois commutateurs digitaux rotatifs (pour les centaines, les dizaines et les unités de temps en secondes) se trouve une petite lampe qui reste allumée tout au long du décompte du temps affiché correspondant. Le décompte même est visualisé sous forme de chiffres illuminés (display). En dessous de chaque bloc programmeur, on a placé un bouton-poussoir. En poussant sur un de ceux-ci, le temps sélectionné correspondant apparaît sur l'affichage. Ceci facilite la programmation dans l'obscurité (expériences nocturnes). Même après le démarrage d'un cycle, il y a encore moyen de changer les temps établis.

Une sortie (recorder) permet d'enregistrer le cycle exécuté sur bande magnétique ou sur enregistreur à papier.

Un commutateur à trois positions ARRET (OFF), ATTENTE (STANDBY) et MARCHE (ON) commande le programmeur. Le cycle ne peut démarrer qu'avec le commutateur en position MARCHE.

Indépendamment du programmeur on trouve 2 potentiomètres réglant la puissance des éléments de chauffage autour de l'objectif par un circuit à thyristors.

2.2.2. Fonctionnement

La figure 3 donne le schéma bloc du programmeur. Comme base de temps (clock) on utilise un diapason avec une fréquence de résonance de 800 Hz, suivie d'un diviseur par 800. Après ceci vient un décompteur à prédétermination à 3 décades (presetable down counter). L'entrée de prédétermination reste branchée sur une ligne (bus). Ce n'est que pendant la durée d'une brève impulsion "charge" (load puls) que l'information présente sur la ligne sera inscrite.

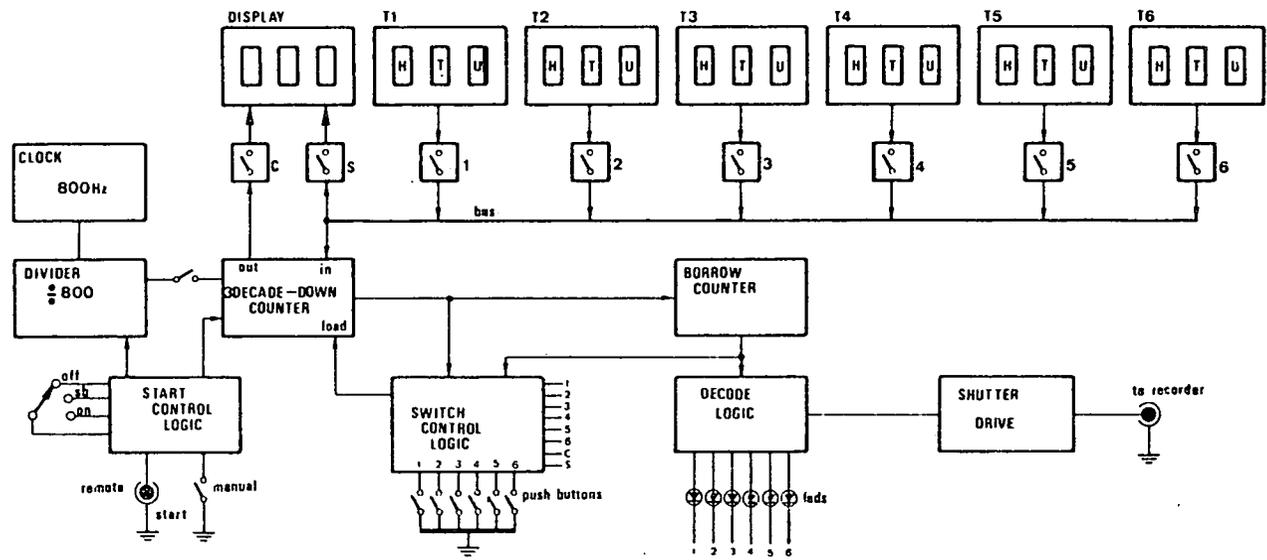


Fig. 3.- Schéma bloc du programmeur.

Dans les positions ATTENTE et MARCHE et en absence d'une impulsion de démarrage, le compteur de retrait (borrow counter), le diviseur par 800 et le décompteur restent maintenus dans l'état "remise à zéro". En plus, la porte qui lie ces deux derniers reste ouverte. Dès l'arrivée d'une impulsion de démarrage, la logique de démarrage ferme cette porte et libère les diviseurs et les compteurs; 1/100 de seconde plus tard, la première impulsion sort du diviseur par 800, traverse le décompteur en provoquant une impulsion de retrait (le décompteur était en état zéro) et met le compteur de retrait en état 1. La logique décodeuse (decode logic) reconnaît cet état et allume la lampe 1 au-dessus du premier compteur. Le circuit de commande de l'obturateur (shutter drive) garde ce dernier fermé. L'obturateur ne s'ouvre que si le compteur de retrait contient un nombre pair (à l'exception de zéro). L'impulsion de retrait sortant du décompteur à 3 décades est aussi détecté par la logique de commutation (switch control logic). Celle-ci y réagit connaissant l'état du compteur de retrait par la fermeture de l'interrupteur 1. De ce fait, le code binaire du premier bloc programmeur est mis sur la ligne. Tout de suite après, la logique de commutation donne une impulsion de chargement (loadpuls) au décompteur. En conséquence, l'information sur la ligne s'inscrit dans les compteurs. Ces derniers sont maintenant prêts pour décompter le premier temps. Toutes les secondes, une impulsion sort du diviseur par 800 qui diminue chaque fois le contenu du décompteur à 3 décades, jusqu'au moment où on arrive à zéro. A ce moment la deuxième impulsion de retrait sort du décompteur. Le compteur de retrait se met sur 2, l'obturateur s'ouvre, la deuxième lampe s'allume et la première s'éteint. La logique de commutation lie le deuxième bloc programmeur à la ligne et donne une impulsion de chargement au décompteur à 3 décades: le deuxième temps (un temps de pose) est inscrit dans ce décompteur et le décompte peut recommencer. Ceci se répète jusqu'au moment où le cycle entier est terminé. A la fin de cette opération, la 7ème impulsion de retrait, détectée par la logique de commutation met l'instrument dans l'état ATTENTE.

Dans des circonstances normales, l'interrupteur C reste tout le temps fermé et l'interrupteur S ouvert de manière à ce que lors du décompte, le contenu du décompteur soit visualisé sur l'affichage. Toutefois, si on pousse sur un des boutons poussoirs de sélection pour visualiser la position d'un bloc programmeur, l'interrupteur C s'ouvre et S se ferme de

manière à ce que l'affichage soit maintenant connecté à la ligne. En même temps, l'interrupteur correspondant se ferme et l'information du bloc programmeur est mise sur la ligne. Ceci peut même se faire lors du déroulement du cycle car le chargement du décompteur à 3 décades prenant moins d'une milliseconde, la ligne reste libre pendant pratiquement tout le temps. L'arrivée d'une impulsion de retrait dans la logique de commutation coupe brièvement la connexion bloc programmeur sélectionné - affichage pour libérer la ligne et pour charger un nouveau temps dans le décompteur. Une milliseconde après, la connexion interrompue est rétablie. L'oeil humain qui regarde l'affichage ne se rend pas compte de cette brève coupure.

La logique entière est exécutée en TTL (Transistor Transistor Logic) et les interrupteurs en logique trois états. Le programmeur est construit sur un seul circuit imprimé de dimensions 19.5 x 22.0 cm et contient 44 circuits intégrés, 4 transistors et un optoisolateur.

2.3. L'optique

L'objectif de la caméra de triangulation de la marque Boyer Saphir, a un diamètre de 100 mm et une distance focale de 500 mm. Il est donc ouvert à F/5. Nous employons des plaques photographiques Kodak 103 F, de dimensions 8 x 10 pouces (env. 20 x 25 cm) ce qui représente un champ d'environ 22° x 28°. Il est à signaler que l'optique de la caméra ne présente pas de distorsion importante (Debehogne, 1970).

3. REDUCTIONS ET RESULTATS DE L'ETUDE DES FORMULES DE TRANSFORMATION

3.1. Formules de réduction

Les réductions (déterminations des positions) ont été effectuées par la méthode des moindres carrés appliquée à des formules de transformation des coordonnées mesurées (x,y) sur les clichés en les coordonnées standard (X, Y; situées dans le plan tangent à la sphère céleste centrée sur le centre optique de l'instrument). Ces formules s'expriment par des

polynômes complets ou incomplets allant du second au septième degré :

$$X = \sum_{i+j=k=0}^n a_{ij} x^i y^j \quad (1)$$

$$Y = \sum_{i+j=k=0}^n b_{ij} x^i y^j \quad (2)$$

n entier positif, i+j entiers, positifs ou nuls, tels que i+j = k ≤ n où j croît et i décroît; les constantes du cliché, a_{ij}, b_{ij} peuvent être nulles, égales ou vérifier des relations de liaison.

Le principe générale de la méthode de réduction est connu (Barlier, 1970; Latka, 1970; Debehogne et Van Hemelrijck, 1974a). Nous croyons utile d'en rappeler les points suivants :

3.1.1. Formules de passage des coordonnées équatoriales α, δ aux coordonnées standard X, Y (Smart, 1960)

$$X = \cos \delta \sin (\alpha - \alpha_0) / A \quad (3)$$

$$Y = [\sin \delta \cos \delta_0 - \cos \delta \sin \delta_0 \cos (\alpha - \alpha_0)] / A \quad (4)$$

$$A = \sin \delta \sin \delta_0 + \cos \delta \cos \delta_0 \cos (\alpha - \alpha_0) \quad (5)$$

α, δ étant l'ascension droite et la déclinaison de l'étoile considérée, α₀, δ₀ les coordonnées de l'étoile dont l'image est prise comme origine dans le plan des mesures.

3.1.2. Formules inverses

$$\operatorname{tg}(\alpha - \alpha_0) = X/B \quad (6)$$

$$\operatorname{tg} \delta = \cos(\alpha - \alpha_0) (\sin \delta_0 + Y \cos \delta_0) / B \quad (7)$$

$$B = \cos \delta_0 - Y \sin \delta_0 \quad (8)$$

3.1.3. Représentation conventionnelle d'une transformation

La transformation :

$$X = a_{00} + a_{10}x + a_{01}y + a_{20}x^2 + \boxed{a_{11}xy} + \boxed{a_{02}y^2} + a_{30}x^3 + a_{21}x^2y + \boxed{a_{12}xy^2} + a_{03}y^3,$$

$$Y = b_{00} + \boxed{b_{10}x} + b_{01}y + \boxed{b_{20}x^2} + \boxed{b_{11}xy} + b_{02}y^2 + b_{30}x^3 + \boxed{b_{21}x^2y} + \boxed{b_{12}xy^2} + b_{03}y^3$$

dans laquelle les termes encadrés seront supprimés, sera décrite : (3; 3,5; 5,6,9; 2,4,5,8,9). En général, si le degré maximum des polynômes X et Y vaut n, si K et L sont les nombres de termes omis dans ces polynômes et si n_{xk} , n_{yl} représentent les numéros d'ordre de ces termes, la formule de transformation sera désignée simplement par

$$(n; K, L; n_{x1}, \dots, n_{xk}, \dots, n_{xK}; n_{y1}, \dots, n_{yl}, \dots, n_{yL}) \quad (9)$$

La représentation des polynômes complets (ou aucun terme pour X et Y n'est omis, soient $K = L = 0$) se fait par (n; 0, 0), n étant le degré du polynôme et non simplement par (n) pour éviter de confondre avec les équations ou les formules dans notre texte.

3.2. Résultats

L'étude de la qualité des réductions a porté sur les résidus de 30 étoiles-tests, comme dans les études précédentes, alors que le nombre maximum des étoiles de référence atteignait 90 de façon à pouvoir étudier dans de bonnes conditions (nombres suffisant d'équations d'observation par rapport au nombre d'inconnues) le polynôme complet du 7ème degré comportant 36 termes (36 inconnues).

Le procédé des étoiles-tests a été exposé précédemment (Debehogne, 1970). Les résultats obtenus (tableau I) font apparaître la nécessité de l'utilisation de polynômes contenant le terme indépendant, les deux termes du premier degré en x et y , les deux termes en x^2 et xy pour exprimer la coordonnée standard X et les deux termes en xy et y^2 pour Y (x et y sont les coordonnées mesurées); cela signifie qu'une erreur de perpendicularité de l'axe optique par rapport aux clichés a dû être résorbée, l'erreur de centrage jouant très peu comme il a été constaté (Debehogne et Van Hemelrijck, 1974b). Cette erreur de perpendicularité n'est pas plus importante que dans les clichés précédemment traités, mais l'amélioration de la précision recherchée et obtenue dans les présentes réductions, a imposé le choix des formules de degré 2 au moins, comportant les termes nécessaires pour résorber le faible défaut de perpendicularité de l'axe optique par rapport au cliché (Debehogne, 1968). A noter aussi que les formules (2;1,1;6,x) $x = 4,5,6$ donnent de bons résultats en α , tandis que les formules (2;1,1;x,4) $x = 4,5,6$ sont favorables pour obtenir un $(O-C)_\delta$ " petit. Quant à la précision obtenue, on constate que l'adjonction des perfectionnements mécaniques et électroniques a été très efficace. En effet, les moyennes arithmétiques des écarts ou résidus sur les étoiles-tests valent 2 à 3" pour la formule (2;1,1;6,4) (tableau I), 1" $2(\alpha)$ à 2" $5(\delta)$ pour les polynômes complets des second et troisième degrés pour des nombres d'étoiles de base (référence) allant de 10 à 30. Pour ce dernier nombre, on obtient 1" $2(\alpha)$ et 1" $4(\delta)$ en utilisant la formule (4;0,0) et 1" $2(\alpha)$ et 2" $4(\delta)$ pour la formule (3;0,0).

Pour des nombres d'étoiles de base allant de 54 à 90, on a obtenu, sur les 30 étoiles-tests, des moyennes arithmétiques de résidus encore meilleurs (Tableau II).

Signalons que la moyenne arithmétique des résidus en α sur les 54 étoiles de base, dans le cas du polynôme du 7ème degré, valait seulement 0" 3 (erreur interne); comme cette moyenne pour les 30 étoiles-tests vaut 1" 0 (erreur externe), il paraît à l'évidence combien il est essentiel d'accorder confiance uniquement aux étoiles-tests pour l'étude de la qualité des réductions.

4. CONCLUSION

Ainsi donc, depuis les premières réductions effectuées sur les clichés de la caméra de triangulation IAS, il a été possible d'abaisser la moyenne arithmétique des écarts sur les étoiles-tests de 8" (Debehogne, 1970) à moins de 1" dans de nombreux cas. L'amélioration est surtout sensible pour les polynômes de degré ≤ 4 qui, dans la pratique, seront les seuls utilisés.

Comme la précision sur la position des étoiles est améliorée, nous obtenons une meilleure détermination des constantes du cliché, a_{ij} et b_{ij} par les expressions (1) à (5). Ensuite l'ascension droite (α) et la déclinaison (δ) du nuage artificiel peuvent être calculées avec une meilleure précision en utilisant les expressions (1), (2) et (6) à (8). Ces paramètres permettent d'obtenir aisément l'azimut et l'élévation du nuage qui restent cependant entachés des erreurs sur la détermination de la position géographique des instruments d'observation.

Dans de nombreux cas on a ainsi obtenu une précision sur l'altitude de 0.05 km en dessous de la turbopause ou les détails sont mieux précisés à cause de la turbulence. A partir d'environ 100 km cette précision est de l'ordre de 1 km.

Enfin pour déterminer les dimensions du nuage il faut connaître l'échelle du cliché ou distance focale avec la meilleure précision possible. Rappelons que la distance focale de cet instrument, vaut 500 mm (valeur indiquée sur l'objectif) mais nous en obtenons une bonne valeur par le calcul en prenant indépendamment les inverses des coefficients a_{10} et b_{01} dans les formules de transformation (1), (2) des coordonnées mesurées x, y en les coordonnées standard X, Y (Debehogne, 1968). Pour $n = 7$, on a : $a_{10} = 1.9738$ et $b_{01} = 1.9741$ d'où $f = 506.6$ mm.

Par une méthode mise au point par Justus, Edwards et Fuller (1964) et qui est basée aussi sur les mesures d'étoiles sur un fond du ciel, nous obtenons pour la distance focale $f = 506.3$ mm.

TABLEAU I : Moyennes arithmétiques des écarts en α , $(\overline{O-C})_\alpha$ '' et δ , $(\overline{O-C})_\delta$ '' sur les étoiles-tests obtenues avec des polynômes incomplets du 2ème degré. O représentant la valeur catalogue et C la valeur calculée.

FORMULES	$(\overline{O-C})_\alpha$ ''	$(\overline{O-C})_\delta$ ''
(2: 1. 1; 6. 6)	2.8	25.0
(2: 1. 1; 6. 5)	2.8	22.2
(2. 1. 1; 6. 4)	2.8	2.6
(2: 1. 1. 5. 6)	22.4	25.0
(2: 1. 1; 5. 5)	22.6	22.1
(2: 1. 1; 5. 4)	22.5	2.6
(2: 1. 1; 4. 6)	25.5	25.0
(2. 1. 1; 4. 5)	25.4	22.1
(2: 1. 1; 4. 4)	25.4	2.6

TABLEAU II : Meilleures moyennes arithmétiques des écarts $(\overline{O-C})_a$ '' et $(\overline{O-C})_\delta$ '' sur les étoiles-tests (30) obtenues avec des polynômes complets de degré 3 à 7 et 54 à 90 étoiles de base. O représentant la valeur catalogue et C la valeur calculée.

FORMULES	$(\overline{O-C})_a$ ''	$(\overline{O-C})_\delta$ ''
(3; 0, 0)	0.8	0.8
(4; 0, 0)	0.8	0.8
(5; 0, 0)	0.8	0.9
(6; 0, 0)	0.8	1.1
(7; 0, 0)	1.0	1.4

REFERENCES

- ACKERMAN, M. et VAN HEMELRIJCK, E., "Measurements of upper atmospheric winds at 160 and 275 kilometers", *J. Geophys. Res.*, **76**, 3162-3163, 1971.
- ALBRITTON, D.L., YOUNG, L.C., EDWARDS, H.D. et BROWN, J.L., "Position determination of artificial clouds in the upper atmosphere". *Photogram. Engng.*, **28**, 608-614, 1962.
- BARLIER, F., "Méthode de réduction photographique utilisée à l'observatoire de Meudon - Cas d'un cliché à grand champ-", *Cospar Transactions*, **7**, 217-225, 1970.
- BATES, D.R., "A suggestion regarding the use of rockets to vary the amount of atmospheric sodium", *J. Geophys. Res.*, **55**, 347-349, 1950.
- BEDINGER, J.F., "Thermospheric motions measured by chemical releases", *Space Research*, **12**, 919-934, 1972.
- BLAMONT, J.E. et BARAT, J., "Introduction d'un modèle pour la structure des mouvements de l'atmosphère entre 85 et 110 km d'altitude", *Ann. Geophys.*, **23**, 173-195, 1967.
- DEBEHOGNE, H., "L'influence de l'erreur de-centrage sur les mesures des plaques photographiques", *Bull. Classe Sci. Acad. Roy. Belg.*, **54**, 1434-1438, 1968.
- DEBEHOGNE, H., "Discussion de diverses méthodes de réduction des clichés", *Astron. and Astrophys.*, **8**, 189-196, 1970.
- DEBEHOGNE, H. et VAN HEMELRIJCK, E., "Formules de base pour la détermination de l'altitude des nuages artificiels", *Bull. Classe Sci. Acad. Roy. Belg.*, **58**, 513-535, 1972.
- DEBEHOGNE, H. et VAN HEMELRIJCK, E., "Méthode des moindres carrés appliquée à la réduction des clichés astrométriques", *Acta Astr.*, **24**, 309-317, 1974a.
- DEBEHOGNE, H. et VAN HEMELRIJCK, E., "Etudes par étoiles-tests de la réduction des clichés pris au moyen de la caméra de triangulation IAS", *Astron. and Astrophys.*, **36**, 317-319, 1974b.
- EDWARDS, H., BEDINGER, J., MANRING, E. et COOPER, C., "Aurora and Airglow", E.B. Armstrong and A. Dalgarno, Eds. Pergamon, New York, 122, 1955.
- FRIMOUT, D., LIPPENS, C., SIMON, P., VAN HEMELRIJCK, E., VAN RANSBEECK, E. et REHRI, A., "Mesure de la concentration d'oxygène atomique dans la thermosphère au moyen de lâchers de gaz", dans les comptes-rendus du Colloque International, "Technologie des expériences spatiales", Paris, 569-580, 1976.

- JARRET, A.H., McGRATTAN, G.J. et REES, J.A., "The measurement of high altitude wind velocities from vapour releases - I. Projector method". *Planet. Space Sci.* 11. 1309-1310, 1963.
- JUSTUS, C.G., EDWARDS, H.D. et FULLER, R.N., "A method employing star backgrounds for improving the accuracy of the location of clouds or objects in space". *Photogram. Engng.*, 30, 594-607, 1964.
- LATKA, J., "The method of plate reduction used at the polish academy of sciences". *Cospar Transactions*, 7, 195-202, 1970.
- LLOYD, K.H., "Concise method for photogrammetry of objects in the sky". WRF-- Technical Note - 72 (WR&D), 1971.
- ROSENBERG, N.W., "Chemical releases at high altitudes", *Science*, 152, 1017-1027, 1966.
- SMART, W.M., "Text-book on spherical Astronomy", Cambridge University Press, 1966.
- SMITH, F.J., "The measurement of high altitude wind velocities from vapour releases - II Computer method", *Planet. Space Sci.*, 11, 1311-1317, 1963.
- VAN HEMELRIJCK, E., "Hoogtebepaling van het uitstotingspunt van vijf kunstmatige wolken. Proefneming NO-I". *Aeronomica Acta C*, 35, 1973.
- VAN HEMELRIJCK, E. et DEBEHOGNE, H., "Observations au Portugal de phénomènes lumineux se rapportant à une expérience de lâcher de barium dans la magnétosphère". *Ciel et Terre*, 88, 292-297, 1972.

- 102 - VAN HEMELRIJCK, E. et H. DEBEHOGNE, Observations au Portugal de phénomènes lumineux se rapportant à une expérience de lâcher de barium dans la magnétosphère, 1972.
- 103 - NICOLET, M. et W. PEETERMANS, On the vertical distribution of carbon monoxide and methane in the stratosphere, 1972.
- 104 - KOCKARTS, G., Heat balance and thermal conduction, 1972.
- 105 - ACKERMAN, M. and C. MULLER, Stratospheric methane from infrared spectra, 1972.
- 106 - ACKERMAN, M. and C. MULLER, Stratospheric nitrogen dioxide from infrared absorption spectra, 1972.
- 107 - KOCKARTS, G., Absorption par l'oxygène moléculaire dans les bandes de Schumann-Runge, 1972.
- 108 - LEMAIRE, J. et M. SCHERER, Comportements asymptotiques d'un modèle cinétique du vent solaire, 1972.
- 109 - LEMAIRE, J. and M. SCHERER, Plasma sheet particle precipitation : A kinetic model, 1972.
- 110 - BRASSEUR, G. and S. CIESLIK, On the behavior of nitrogen oxides in the stratosphere, 1972.
- 111 - ACKERMAN, M. and P. SIMON, Rocket measurement of solar fluxes at 1216 Å, 1450 Å and 1710 Å, 1972.
- 112 - CIESLIK, S. and M. NICOLET, The aeronomic dissociation of nitric oxide, 1973.
- 113 - BRASSEUR, G. and M. NICOLET, Chemospheric processes of nitric oxide in the mesosphere and stratosphere, 1973.
- 114 - CIESLIK, S. et C. MULLER, Absorption raie par raie dans la bande fondamentale infrarouge du monoxyde d'azote, 1973.
- 115 - LEMAIRE, J. and M. SCHERER, Kinetic models of the solar and polar winds, 1973.
- 116 - NICOLET, M., La biosphère au service de l'atmosphère, 1973.
- 117 - BIAUME, F., Nitric acid vapor absorption cross section spectrum and its photodissociation in the stratosphere, 1973.
- 118 - BRASSEUR, G., Chemical kinetic in the stratosphere, 1973.
- 119 - KOCKARTS, G., Helium in the terrestrial atmosphere, 1973.
- 120 - ACKERMAN, M., J.C. FONTANELLA, D. FRIMOUT, A. GIRARD, L. GRAMONT, N. LOUISNARD, C. MULLER and D. NEVEJANS, Recent stratospheric spectra of NO and NO₂, 1973.
- 121 - NICOLET, M., An overview of aeronomic processes in the stratosphere and mesosphere, 1973.
- 122 - LEMAIRE, J., The "Roche-Limit" of ionospheric plasma and the formation of the plasmopause, 1973.
- 123 - SIMON, P., Balloon measurements of solar fluxes between 1960 Å and 2300 Å, 1974.
- 124 - ARIJS, E., Effusion of ions through small holes, 1974.
- 125 - NICOLET, M., Aéronomie, 1974.
- 126 - SIMON, P., Observation de l'absorption du rayonnement ultraviolet solaire par ballons stratosphériques, 1974.
- 127 - VERCHEVAL, J., Contribution à l'étude de l'atmosphère terrestre supérieure à partir de l'analyse orbitale des satellites, 1973.
- 128 - LEMAIRE, J. and M. SCHERER, Exospheric models of the topside ionosphere, 1974.
- 129 - ACKERMAN, M., Stratospheric water vapor from high resolution infrared spectra, 1974.
- 130 - ROTH, M., Generalized invariant for a charged particle interacting with a linearly polarized hydromagnetic plane wave, 1974.
- 131 - BOLIN, R.C., D. FRIMOUT and C.F. LILLIE, Absolute flux measurements in the rocket ultraviolet, 1974.
- 132 - MAIGNAN, M. et C. MULLER, Méthodes de calcul de spectres stratosphériques d'absorption infrarouge, 1974.
- 133 - ACKERMAN, M., J.C. FONTANELLA, D. FRIMOUT, A. GIRARD, N. LOUISNARD and C. MULLER, Simultaneous measurements of NO and NO₂ in the stratosphere, 1974.
- 134 - NICOLET, M., On the production of nitric oxide by cosmic rays in the mesosphere and stratosphere, 1974.
- 135 - LEMAIRE, J. and M. SCHERER, Ionosphere-plasmashet field aligned currents and parallel electric fields, 1974.
- 136 - ACKERMAN, M., P. SIMON, U. von ZAHN and U. LAUX, Simultaneous upper air composition measurements by means of UV monochromator and mass spectrometer, 1974.
- 137 - KOCKARTS, G., Neutral atmosphere modeling, 1974.

- 138 - BARLIER, F., P. BAUER, C. JAECK, G. THULLIER and G. KOCKARTS, North-South asymmetries in the thermosphere during the last maximum of the solar cycle, 1974.
- 139 - ROTH, M., The effects of field aligned ionization models on the electron densities and total flux tubes contents deduced by the method of whistler analysis, 1974.
- 140 - DA MATA, L., La transition de l'homosphère à l'hétérosphère de l'atmosphère terrestre, 1974.
- 141 - LEMAIRE, J. and R.J. HOCH, Stable auroral red arcs and their importance for the physics of the plasmopause region, 1975.
- 142 - ACKERMAN, M., NO, NO₂ and HNO₃ below 35 km in the atmosphere, 1975.
- 143 - LEMAIRE, J., The mechanisms of formation of the plasmopause, 1975.
- 144 - SCIALOM, G., C. TAIEB and G. KOCKARTS, Daytime valley in the F1 region observed by incoherent scatter, 1975.
- 145 - SIMON, P., Nouvelles mesures de l'ultraviolet solaire dans la stratosphère, 1975.
- 146 - BRASSEUR, G. et M. BERTIN, Un modèle bi-dimensionnel de la stratosphère, 1975.
- 147 - LEMAIRE, J. et M. SCHERER, Contribution à l'étude des ions dans l'ionosphère polaire, 1975.
- 148 - DEBEHOGNE, H. et E. VAN HEMELRIJCK, Etude par étoiles-tests de la réduction des clichés pris au moyen de la caméra de triangulation IAS, 1975.
- 149 - DEBEHOGNE, H. et E. VAN HEMELRIJCK, Méthode des moindres carrés appliquée à la réduction des clichés astrométriques, 1975.
- 150 - DEBEHOGNE, H. et E. VAN HEMELRIJCK, Contribution au problème de l'aberration différentielle, 1975.
- 151 - MULLER, C. and A.J. SAUVAL, The CO fundamental bands in the solar spectrum, 1975.
- 152 - VERCHEVAL, J., Un effet géomagnétique dans la thermosphère moyenne, 1975.
- 153 - AMAYENC, P., D. ALCAYDE and G. KOCKARTS, Solar extreme ultraviolet heating and dynamical processes in the mid-latitude thermosphere, 1975.
- 154 - ARIJS, E. and D. NEVEJANS, A programmable control unit for a balloon borne quadrupole mass spectrometer, 1975.
- 155 - VERCHEVAL, J., Variations of exospheric temperature and atmospheric composition between 150 and 1100 km in relation to the semi-annual effect, 1975.
- 156 - NICOLET, M., Stratospheric Ozone : An introduction to its study, 1975.
- 157 - WEILL, G., J. CHRISTOPHE, C. LIPPENS, M. ACKERMAN and Y. SAHAI, Stratospheric balloon observations of the southern intertropical arc of airglow in the southern american area, 1976.
- 158 - ACKERMAN, M., D. FRIMOUT, M. GOTTIGNIES, C. MULLER, Stratospheric HCl from infrared spectra, 1976.
- 159 - NICOLET, M., Conscience scientifique face à l'environnement atmosphérique, 1976.
- 160 - KOCKARTS, G., Absorption and photodissociation in the Schumann-Runge bands of molecular oxygen in the terrestrial atmosphere, 1976.
- 161 - LEMAIRE, J., Steady state plasmopause positions deduced from McIlwain's electric field models, 1976.
- 162 - ROTH, M., The plasmopause as a plasma sheath : A minimum thickness, 1976.
- 163 - FRIMOUT, D., C. LIPPENS, P.C. SIMON, E. VAN HEMELRIJCK, E. VAN RANSBEECK et A. REHRI, Lâchers de monoxyde d'azote entre 80 et 105 km d'altitude. Description des charges utiles et des moyens d'observation, 1976.
- 164 - LEMAIRE, J. and L.F. BURLAGA, Diamagnetic boundary layers : a kinetic theory, 1976.
- 165 - TURNER, J.M., L.F. BURLAGA, N.F. NESS and J. LEMAIRE, Magnetic holes in the solar wind, 1976.
- 166 - LEMAIRE, J. and M. ROTH, Penetration of solar wind plasma elements into the magnetosphere, 1976.
- 167 - VAN HEMELRIJCK, E. et H. DEBEHOGNE, Réduction de clichés de champs stellaires pris par télévision avec intensificateur d'image, 1976.
- 168 - BRASSEUR, G. and J. LEMAIRE, Fitting of hydrodynamic and kinetic solar wind models, 1976.
- 169 - LEMAIRE, J. and M. SCHERER, Field aligned distribution of plasma mantle and ionospheric plasmas, 1976.
- 170 - ROTH, M., Structure of tangential discontinuities at the magnetopause : the nose of the magnetopause, 1976.