

Zeitschrift: Archives des sciences [1948-1980]
Herausgeber: Société de Physique et d'Histoire Naturelle de Genève
Band: 22 (1969)
Heft: 1

Artikel: Mesures de l'ultra-violet stellaire à partir de ballons stratosphériques
Autor: Gaide, Albert
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-739146>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 04.05.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

MESURES DE L'ULTRA-VIOLET STELLAIRE A PARTIR DE BALLONS STRATOSPHERIQUES

PAR

Albert GAIDE

RÉSUMÉ

Basé sur l'étude des critères d'évolutions des étoiles chaudes, le présent travail consiste à réaliser des observations photométriques du proche ultra-violet stellaire à partir de plate-formes d'observation stratosphériques. Dans le chapitre I nous rappelons les raisons motivant cette extension des observations terrestres puis nous analysons les possibilités d'observations qui sont offertes par les ballons de grande capacité et les moyens technologiques dont nous disposons pour mener ce genre d'observations. Le chapitre II est consacré à la description de la nacelle astronomique qui fut mise au point et à l'exposé des résultats technologiques recueillis au cours des premières expériences. Le chapitre III traite de la méthode d'observation par balayage lent du ciel, de l'instrument d'observation et des méthodes d'identification et d'analyse des enregistrements photographiques. Dans le chapitre IV nous discutons les avantages et les inconvénients de la photométrie photographique à larges bandes. Enfin dans le chapitre V nous analysons les résultats qui furent obtenus au cours du vol de juin 1965 et nous tirons les conclusions qui s'imposent sur les possibilités futures de l'astronomie stratosphérique dans le proche ultra-violet.

ABSTRACT

This work is based on the study of the evolutionary criteria of early type stars and consists in carrying out photometric observations of the stellar near ultra-violet from a balloon-borne observatory. In chapter I, we indicate the reasons which motivate this extension of the terrestrial observations and we analyse what observational possibilities are offered by the large balloons and which are the available technological means to carry out such observations. Chapter II is devoted to a description of the astronomical gondola which we developed and to the presentation of the technological results recorded during the first experiments. The chapter III deals with the sky slow-scanning observational method, the telescope used and the methods of identifying and analysing the photographic recordings. In chapter IV we discuss the advantages and disadvantages of the broad-band photographic photometry. Finally in chapter V we analyse the results which were gathered during the flight of June 1965 and we draw the necessary conclusions concerning the future possibilities of the stratospheric astronomy in the near ultra-violet.

I. OBJECTIFS SCIENTIFIQUES, POSSIBILITÉS ET OPTIONS FONDAMENTALES

1. GÉNÉRALITÉS

L'étude de la structure et de l'évolution des étoiles a été essentiellement basée sur les données que lui fournit l'observation du rayonnement visible. Mais cette fenêtre spectrale de l'atmosphère terrestre est extrêmement étroite en comparaison de l'étendue du spectre électro-magnétique des radiations stellaires. Les possibilités d'analyse de l'observateur terrestre sont confinées à un intervalle d'échantillonnage très restreint dont les limites sont en outre bien déterminées. Dans de nombreux cas, les informations qu'il peut y recueillir ne correspondent pas aux caractères spectraux les plus marquants des divers individus stellaires.

Les nouvelles possibilités d'observation qu'offre la technologie spatiale permettent d'envisager maintenant une extension appréciable de l'intervalle d'échantillonnage. Sans bouleverser la philosophie des observations, elles ouvrent la voie à un nombre considérable d'études et sont à même de fournir une quantité d'informations encore inestimable. Si l'on considère uniquement l'étude du rayonnement ultra-violet, les informations qui sont dès lors « disponibles » revêtent un grand intérêt dans de nombreux domaines. On peut citer parmi les plus importants; la recherche des paramètres fondamentaux des étoiles chaudes (luminosité, température effective, composition chimique), l'étude des propriétés physiques des couches externes des étoiles (contrôle des modèles, étude des enveloppes à raies d'émission, des étoiles Be à enveloppes étendues, des étoiles de Wolf-Rayet, des binaires proches), la détermination de nouveaux critères de classifications spectrales, et enfin, l'étude très importante de l'absorption interstellaire.

Les fusées-sondes et les satellites artificiels sont donc appelés à jouer un rôle important en astronomie moderne. Mais les expériences utilisant ces véhicules sont complexes et coûteuses et il est souvent avantageux de prendre en considération les possibilités qu'offrent les ballons stratosphériques. En effet, les grands progrès qui furent réalisés en matière de films synthétiques (polyéthylène, dacron, nylon, mylard) ont conduit à la réalisation d'enveloppes de très grande capacité (300.000 mètres cubes). Ces ballons, robustes et légers, sont capables d'emporter un équipement complexe à des altitudes auxquelles l'extinction atmosphérique est fortement réduite dans l'infra-rouge et l'ultra-violet proche. Ils ouvrent ainsi la voie à de nombreuses études qui semblaient être réservées, il y a quelques années encore, aux fusées-sondes et aux satellites artificiels.

L'objet de la présente étude porte sur la réalisation d'une nacelle à buts astronomiques et sur l'analyse des possibilités d'observation de l'ultra-violet stellaire à partir de ballons stratosphériques. Ces recherches sont destinées à étendre au rayonnement ultra-violet des étoiles la photométrie à larges bandes et en 7 couleurs que l'Observatoire de Genève effectue depuis plusieurs années. Les indices de couleur ultra-violet fourniront des informations très importantes sur les étoiles chaudes, sur la métallicité des étoiles froides, sur l'activité des étoiles variables et sur l'absorption interstellaire.

2. LA TRANSPARENCE ATMOSPHERIQUE DANS LE PROCHE ULTRA-VIOLET AUX ALTITUDES ATTEIGNABLES EN BALLONS STRATOSPHERIQUES.

Les possibilités d'observation qu'offrent les ballons stratosphériques dépendent de la transparence atmosphérique à l'altitude de plafonnement. S'il est généralement admis qu'une altitude de 30 km est suffisante pour les observations dans l'infra-rouge les exigences sont plus sévères dans le proche ultra-violet (1900-3200 Å) tandis qu'elles sont hors de portée des ballons pour le reste de l'ultra-violet.

Aux altitudes entrant en considération, 30 à 45 km, la transparence atmosphérique au proche ultra-violet est surtout conditionnée par l'absorption due à l'ozone. Elle se manifeste faiblement dans la bande de Huggins, débutant vers 3550 Å, puis de façon importante dans la bande de Hartley qui s'étend jusqu'à 2100 Å en passant par un fort maximum d'absorption situé à 2550 Å. Le grand étalement de ces bandes d'absorption confère à l'ozone un rôle prépondérant bien qu'il ne soit pas le seul facteur d'extinction dans le proche ultra-violet. L'absorption par l'oxygène moléculaire n'est pas négligeable aux longueurs d'onde inférieures à 2440 Å (seuil de la transition interdite de Herzberg) mais elle joue un rôle moins important que celui de l'ozone. Relevons enfin qu'aux longueurs d'ondes plus courtes que 1760 Å (seuil de la bande de Schumann) la photodissociation de l'oxygène moléculaire et la photoionisation de certains composants atmosphériques (O, N₂, NO) constituent un écran opaque dès 100 km d'altitude.

Si l'observation du rayonnement de longueur d'onde inférieure à 1800 Å est totalement exclue aux altitudes qui sont atteignables en ballons stratosphériques, il n'en est pas de même pour le proche ultra-violet. L'extinction atmosphérique produite par l'ozone décroît considérablement entre 30 km, où elle est pratiquement totale, et 45 km qui est l'altitude maximale que l'on peut espérer atteindre en ballon. Les possibilités d'observation du proche ultra-violet ne sont pas inexistantes mais leur importance reste étroitement liée à la transparence des couches d'ozone subsistant au-dessus de l'observateur.

La prévision du profil d'extinction atmosphérique à une altitude donnée est toutefois imprécise car la distribution verticale de l'ozone ne dépend pas seulement du lieu géographique. Elle est aussi sujette à d'importantes fluctuations saison-

nières et journalières. Les profils d'extinction (fig. 1) que J. V. Dave ¹ calcula à partir de la distribution verticale d'ozone, mesurée au moyen de fusées par H. Newell, illustrent l'importance des fluctuations saisonnières. Ils mettent également en évidence l'affaiblissement appréciable de l'extinction atmosphérique entre 33 et 39 km.

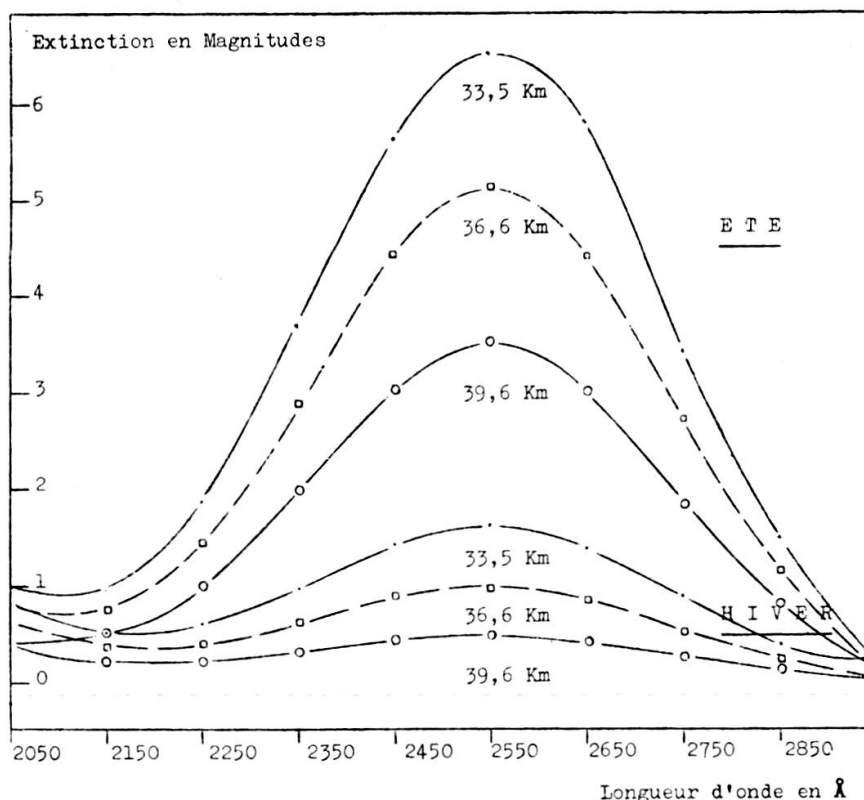


FIG. 1. — Extinction atmosphérique en magnitudes due à la dispersion moléculaire et à l'absorption par l'ozone et l'oxygène.

Ces courbes ont été tirées des tables calculées par J. V. Dave sur la base d'observations par fusées (Newell: High alt. rocket res. Acad. Press 53) et les tables 16-15/16-16A/16-17 du Handbook of Geophysics (voir: Gehrels reference 1).

Partant de la distribution verticale de Green ², M^{me} C. Navach ³ a déterminé la distribution d'énergie apparente de différents types d'étoiles en fonction de l'altitude de l'observateur et de la distance zénithale d'observation. Elle a tenu compte à cet effet de l'absorption par l'ozone et par l'oxygène moléculaire et a obtenu des familles de profils (fig. 2) qui mettent mieux en évidence les possibilités d'observation à partir de plateformes stratosphériques.

Si la distribution verticale de Green correspond effectivement à la distribution verticale de l'ozone lors des observations, les profils de la figure 2 montrent que l'atténuation atmosphérique est tolérable à 39 km d'altitude. Le flux incident que l'on pourrait détecter au voisinage du maximum d'absorption de l'ozone serait du même ordre de grandeur que le flux incident que l'on détecte dans le visible.

L'extinction atmosphérique dans le proche ultra-violet n'est pas totalement éliminée, mais il est possible d'évaluer son effet quantitatif en observant les mêmes étoiles à différentes distances zénithales, autrement dit, à travers différentes masses d'air. La durée de vol d'un ballon permet d'envisager un tel programme mais il est nécessaire d'étudier le comportement des couches d'ozone, dans l'espace et dans le temps, avant de choisir et de confirmer une méthode d'extrapolation des flux mesurés à leurs valeurs extra-atmosphériques.

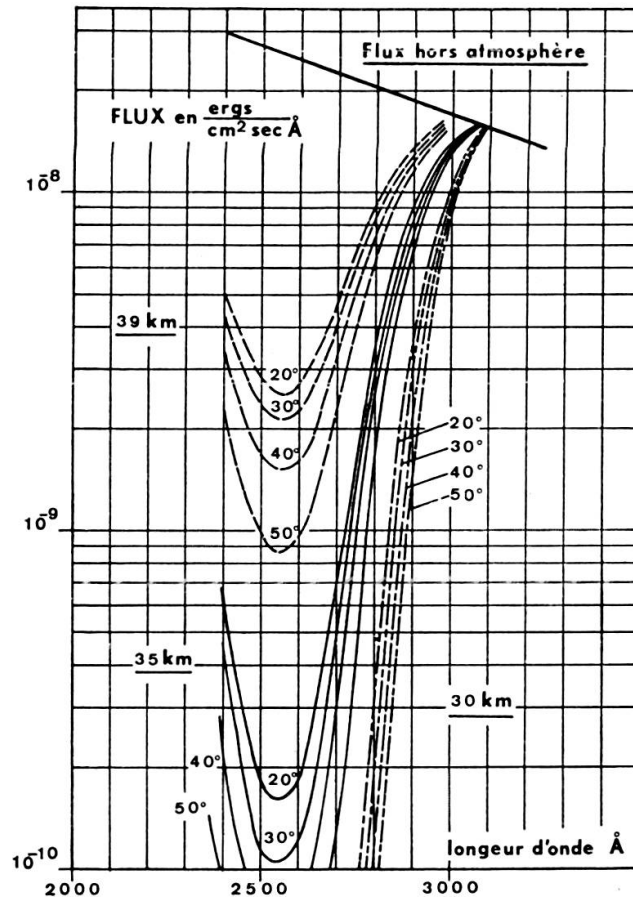


FIG. 2. — Distribution spectrale d'énergie d'une étoile du type B2 non rougie à différentes altitudes et à travers différentes masses d'air, selon M^{me} C. Navach.

3. SERVITUDES, MOYENS ET OPTIONS TECHNOLOGIQUES

Il ressort du précédent paragraphe qu'un programme d'observation du proche ultra-violet stellaire est concevable à condition d'atteindre ou de dépasser 39 km d'altitude. Pour le réaliser il est nécessaire d'adopter un équipement d'observation dont le poids n'excéderait pas 200 kg afin d'être conforme aux performances des ballons disponibles. Il est également nécessaire de choisir une méthode d'observation qui soit compatible avec les sous-systèmes disponibles et l'infrastructure de la base de lancement.

Indépendamment du problème posé par l'utilisation de la station stratosphérique (fonctionnement entièrement automatique ou intervention depuis le sol par télécommande), le choix de l'instrument et de la méthode d'observation dépend très étroitement des performances du dispositif de pointage et de stabilisation et de la capacité de transmission du dispositif de télémessure.

Les performances du dispositif de stabilisation jouent cependant le rôle le plus important car le choix du mode d'observation dépend avant tout de la précision avec laquelle l'image stellaire est immobilisée dans le champ du télescope. Le rôle de la télémessure se manifeste si l'on choisit un mode de traitement des observations par détection photoélectrique. Un problème additionnel est alors posé par la précision de transmission des données. La transmission analogique ne pose pas de problème de capacité de transmission mais elle introduit des distorsions pouvant atteindre plusieurs pour cent des signaux initiaux. La transmission digitale évite toute déformation du signal mais elle nécessite un dispositif de comptage photoélectrique complexe et exige assez souvent une capacité de transmission élevée.

En considération de ces problèmes et dans le cas d'une étude qui implique l'observation d'un grand nombre d'étoiles, deux possibilités peuvent être retenues;

1. Système photoélectrique à faible champ
2. Système photographique à grand champ.

Si la qualité de la stabilisation est bonne (1 minute d'arc ou même mieux), l'une ou l'autre de ces méthodes peut être appliquée sans grandes difficultés supplémentaires. Pour le système photoélectrique, le temps d'intégration ou la durée de chaque mesure peuvent être suffisamment étendus pour satisfaire les restrictions d'une télémessure digitale lente et de capacité de transmission limitée. Pour le système photographique il est possible de réaliser des expositions de longues durées. Mais il est nécessaire, dans les deux cas, de disposer d'une plate-forme inertielle, autrement dit, d'un système de stabilisation et de pointage qui soit lié à la sphère des fixes. Cette plate-forme permet d'orienter le télescope à faible champ en direction des étoiles qui ne se prêtent pas au pointage direct (étoiles de faible éclat ou zone céleste richement peuplée). Elle permet d'éliminer, dans le cas des observations photographiques, l'effet du mouvement apparent des étoiles.

Si la qualité de la stabilisation est insuffisante (plusieurs minutes d'arc), il faut se résoudre à utiliser une méthode d'observation par balayage du ciel. Il est alors difficile d'effectuer des observations photoélectriques car les mesures doivent être faites dans un intervalle de temps relativement court correspondant au passage de l'étoile dans le champ du télescope. Dans le cas d'observations photométriques, cette méthode nécessite enfin un instrument par couleur observée et les résultats obtenus sont souvent incertains à cause de l'accumulation des signaux provenant des étoiles qui apparaissent simultanément dans le champ du télescope. L'analyse de ces

observations implique la connaissance très précise de l'attitude complète de l'instrument afin d'identifier les sources et de distinguer leurs contributions au signal recueilli.

Les études photographiques utilisant un instrument à grand champ se prêtent mieux à la méthode d'observation du ciel par balayage car elles permettent d'éviter l'accumulation des signaux et ne nécessitent pas la connaissance très précise de l'attitude de l'instrument. La durée d'exposition de l'émulsion est cependant limitée puisqu'elle est fixée par la vitesse de défilement des images stellaires dans le champ du télescope.

Quand ce programme de recherche fut lancé, les moyens disponibles étaient encore limités. Les dispositifs de stabilisation à grandes performances étaient d'un coût très élevé, la base de lancement du CNES ne disposait pas encore d'un ensemble de télémessure de capacité élevée et l'on manquait d'informations sur l'ampleur des phénomènes perturbateurs. Le programme d'observation photoélectrique, qui avait été prévu à l'origine, fut remplacé par un programme d'observation photographique faisant l'objet de la présente étude.

Cette première phase des recherches fut consacrée à la mise au point d'un équipement simplifié, entièrement automatique, assurant une autonomie de sept heures de vol et permettant d'observer les mêmes étoiles à différentes élévations. Les observations étaient réalisées au moyen d'un petit télescope de Maksutov qui fut orienté en azimut par le dispositif de prépointage de la future nacelle stabilisée du CNES.

Pour produire le balayage lent et régulier du ciel, le magnétomètre du dispositif d'orientation en azimut était soumis à une rotation régulière autour d'un axe vertical. Agissant par l'intermédiaire de son actuateur le dispositif d'asservissement corrigeait continuellement ce dépointage volontaire et entraînait la nacelle dans une rotation assez régulière et lente (1 tour en 15 minutes) autour de son axe vertical.

Enfin, si les ballons qui étaient disponibles à cette époque ne permettaient pas de dépasser une altitude 33 Km avec une charge de 200 Kg, ces premières expériences photographiques avait pour but de recueillir des observations partielles de l'ultra-violet stellaire, de mettre en évidence les principaux aspects des observations astronomiques par ballons et de fournir les données nécessaires à l'élaboration de programmes plus évolués.

II. CONCEPTION ET EQUIPEMENT DE LA NACELLE

1. GÉNÉRALITÉS

La construction d'une nacelle astronomique entièrement automatique est moins ardue que celle d'un satellite ou d'une ogive de fusée mais elle n'est pas beaucoup moins complexe. Elle nécessite la mise au point de nombreux sousensembles électroniques de faible consommation et de grandes performances (alimentations, program-

mateurs, dispositifs de récupération des données). Elle implique aussi une bonne connaissance des effets du milieu ambiant (perturbations aérodynamiques, déperditions thermiques, dangers de givrage et d'oxydation) et des données fondamentales de l'expérience stratosphérique (lancement, durée de vol, récupération, télémesure).

Etant donné qu'une bonne partie de ces informations manquait, il fut nécessaire de réaliser une nacelle aux objectifs scientifiques modestes qui devait permettre d'acquérir l'expérience indispensable à la conception d'équipements plus complexes et à la conduite d'observations stratosphériques sans intervention depuis le sol. L'équipement de cette nacelle expérimentale a donc été conçu en fonction des trois objectifs suivants:

1. Etude du milieu environnant et de ses effets sur le comportement en vol des divers composants.
2. Etude de l'attitude de la nacelle non stabilisée d'abord puis de la nacelle munie du dispositif de pré-pointage en azimuth de la nacelle stabilisée que la Compagnie des Compteurs mettait au point pour le compte du CNES ⁴.
3. Observation du proche ultra-violet stellaire par photométrie photographique à larges bandes.

La première de ces études porta sur des mesures de pression et de température du milieu externe et du milieu interne. La seconde fut destinée à mettre en évidence l'importance des perturbations aérodynamiques et les performances que l'on pouvait attendre du dispositif de stabilisation en azimuth. La troisième constitua la première tentative d'observation de l'ultra-violet stellaire à partir de ballons stratosphériques.

2. DESCRIPTION DE LA NACELLE ET DE SON ÉQUIPEMENT

Même pour une expérience simplifiée, l'équipement de la nacelle constitue un ensemble d'autant plus complexe qu'il est appelé à fonctionner de façon entièrement autonome. Il est en effet nécessaire de prévoir, autour des instruments de mesures, les divers composants qui assureront leur alimentation électrique, leur interrogation et la mise en mémoire de leurs données. Ces appareils de soutien constituent avec le dispositif d'acquisition en azimuth l'équipement de base de la nacelle.

a) *Intégration de la nacelle*

La nacelle proprement dite doit servir de support aux divers instruments et assurer leur protection dans la phase de récupération. Elle doit également présenter une forme extérieure n'offrant que peu de prises aux perturbations aérodynamiques. Pour remplir ces exigences, sans accroissement considérable de poids, les armatures

tubulaires constituent la solution la mieux appropriée. La nacelle (fig. 3) est formée de tubes d'aluminium qui sont vissés à des demi-sphères évidées constituant les nœuds de l'armature. L'adoption d'une structure bien triangulée confère une grande robustesse à la nacelle tandis que la forme polyédrique se prête à un carénage simple constitué de panneaux de jute qui sont tendus sur les facettes externes de la nacelle.

Les divers composants de l'équipement, rendus assez volumineux par les enrobages protecteurs (isolateurs thermiques), sont répartis dans l'espace appréciable qu'offre la partie centrale de la nacelle (fig. 4). Certains appareils comme le pivot, l'entraînement du magnétomètre, l'électronique de télémesure, fonctionnent à la pression ambiante mais les autres instruments sont placés dans une enceinte pressurisée. Elle contient d'une part le télescope, qui est étanche au niveau de sa lentille correctrice d'entrée, et d'autre part les dispositifs d'alimentation, de programmation et d'enregistrement photographique des données. La logique d'acquisition en azimut a également été pressurisée afin que la chaleur, qui est dégagée par les transistors de puissance, soit dissipée par convection. Il n'a pas été nécessaire de pressuriser les batteries grâce au choix d'éléments étanches.

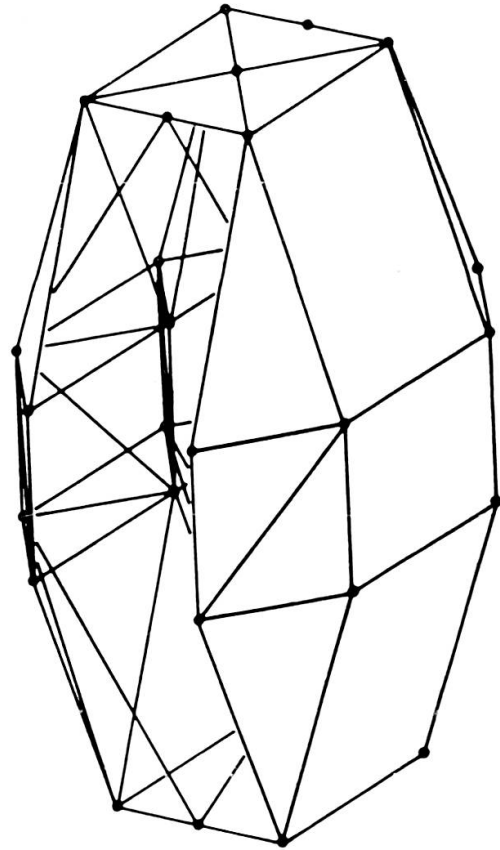


FIG. 3. — Schéma de l'armature de la nacelle.

b) *Les équipements de mesure*

Abstraction faite du télescope, qui sera décrit dans le chapitre suivant, les équipements de mesures se rapportent à l'étude du milieu ambiant, des conditions régnant à l'intérieur des appareillages et de l'attitude de la nacelle. Une sonde baro-thermo-hygrométrique, couramment utilisée dans les sondages météorologiques, est destinée à l'étude du milieu ambiant tandis que d'autres capsules barométriques et un thermomètre électronique à plusieurs sondes permettent de contrôler la qualité de la pressurisation et de comparer les températures internes et externes des divers instruments. Enfin, au cours d'une des campagnes de lancement, la concentration d'ozone a été

mesurée au moyen d'une sonde de Regener par détection de la chemi-luminescence de pastilles de Rhodamine-B.

L'étude des mouvements de la nacelle est basée sur les données du magnéto-mètre de restitution d'attitude CDC HRA 31 fréquemment utilisé à bord des fusées. Cet instrument fournit les valeurs des composants du champ magnétique terrestre, selon un trièdre lié à la nacelle. Il permet de déduire à chaque instant l'orientation de ce trièdre par rapport à un référentiel fixe. L'évolution de l'attitude instantanée donne l'amplitude de balancement et la vitesse de rotation de façon plus simple, et plus précise, que par des mesures directes de ces grandeurs.

Pour des raisons inhérentes au caractère particulier des expériences spatiales, les instruments de mesure ont été généralement dédoublés et différenciés afin de garantir une meilleure redondance. Quant aux données, elles furent acheminées par radio et enregistrées à bord de la nacelle de manière à assurer leur récupération même si la liaison radio de télémesure était interrompue (tableau 1).

c) Les équipements de soutien

Les appareils de soutien, qui constituent la centrale de la nacelle, assurent l'alimentation, la commande et le contrôle des instruments de mesure.

TABLEAU 1

Types de grandeurs mesurées, capteurs et méthodes de restitution des données technologiques

Grandeur	Télémesure		Enregistrement photographique	
	Capteur	Mode	Capteur	Mode de lecture
Pression	Capsule Anéroïde	Modulation PPM	Capsule Anéroïde	Analogique par instrument à cadre mobile.
Température	Thermomètre Bilame	Modulation PPM	Thermomètre électronique	Analogique par instrument à cadre mobile
Humidité	Membrane hygrométrique	Modulation PPM	néant	néant
Concentration d'ozone	Sonde de Regener	Conversion tension-fréquence	néant	néant
Attitude	Magnétomètre	Analogique PAM	Suiveur de boussole	Analogique par instrument à cadre mobile

L'alimentation en courant continu est fournie par une batterie de vingt accumulateurs au nickel-cadmium (9 A/h sous 24 volts) qui assurent une autonomie de huit heures à l'ensemble des circuits électroniques. Cette batterie alimente également un oscillateur unijonction produisant un courant alternatif, 24 volts 50 Hz, qui permet d'actionner des moteurs synchrones, tandis qu'une batterie de même capacité est réservée aux circuits de thermostatisation.

La commande des divers appareils et le déroulement chronologique de ces opérations sont réalisés au moyen de deux horloges de programmation à cames entraînées par des moteurs synchrones. L'horloge rapide (1 tour/mn) est réservée aux opérations cycliques et l'horloge lente (1 tour en 7 h) est réservée aux opérations isolées. Ces programmeurs simples et sûrs constituent une solution acceptable tant qu'il y a une faible diversité d'opérations. En effet, les opérations systématiques, comme l'avance du film dans la caméra du télescope, le déclenchement de l'enregistrement photographique, la commutation des sondes thermométriques se produisent de façon cyclique tandis que les opérations intervenant à des intervalles irréguliers, comme la mise en marche du système d'acquisition en azimuth, l'enclenchement du dispositif de mise en rotation de la nacelle ou le changement d'élévation du télescope, sont en nombre restreint et ne nécessitent qu'un petit empilement de cames.

La fonction de contrôle de la centrale consiste à recueillir les informations relatives au comportement des appareils. Elle est étroitement liée au problème de la restitution des données scientifiques et technologiques. Dans le cas actuel, où les observations astronomiques se font photographiquement, les données scientifiques sont mises en mémoire sur le film du télescope. Les données technologiques (température, pression, inclinaison du télescope, azimuth, fonctionnement du stabilisateur, témoins de chauffage et signaux de synchronisation) sont transmis au sol par radio et enregistrés photographiquement à bord. Le dispositif de télémessure analogique (FM/FM) mis à disposition par le CNES comporte un émetteur dont la fréquence porteuse se situe entre 120 et 140 MHz

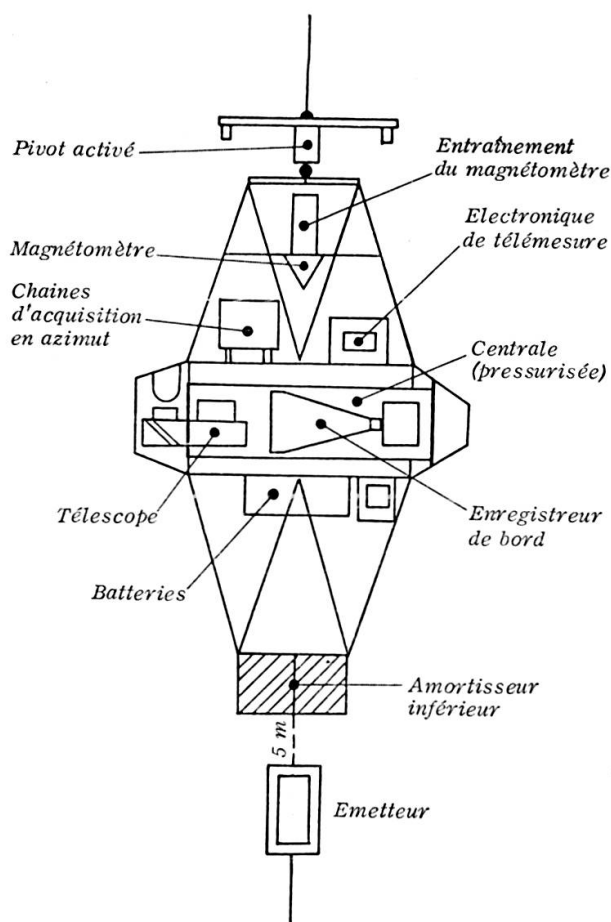


FIG. 4. — Répartition des équipements dans la nacelle.

et divers modulateurs se conformant au standard IRIG. Pour éliminer les imprécisions dues aux distorsions, la majeure partie des données est transmise par modulation d'impulsions en position (PPM).

Le dispositif d'enregistrement à bord de la nacelle comporte une caméra 16 mm qui photographie toutes les 30 secondes un tableau d'instruments à cadre mobile, de compteurs à affichage numérique et de lampes témoins. Bien qu'un tel système soit volumineux, il permet d'enregistrer simultanément une grande variété de données et présente de ce fait une capacité de mémoire appréciable. La lecture directe des différents instruments est effectuée avec une précision qu'il est difficile d'égaler avec la télémessure. La restitution des données ne dépend pas de la liaison radio.

d) *Le régulateur de la vitesse de rotation*

Un régulateur de la vitesse de rotation de la nacelle autour de son axe vertical a été incorporé à l'équipement afin d'effectuer les observations par balayage. Ce dispositif comprend le pivot activé et la logique d'acquisition en azimuth de la Compagnie des Compteurs ainsi que le magnétomètre de restitution d'attitude qui sert de capteur.

Le rôle de la logique d'acquisition est d'agir sur le pivot de suspension de la nacelle de manière à orienter un des axes du magnétomètre en direction du Nord magnétique. L'azimut de pointage du télescope est alors égal à l'angle formé par son axe optique et l'axe nord-sud du magnétomètre. Le balayage lent et régulier du ciel est réalisé en faisant varier cet angle de façon continue. Ceci revient à entraîner la rotation du magnétomètre par un moteur synchrone. Grâce à l'action permanente de la logique d'acquisition, le magnétomètre reste fixe dans l'espace tandis que la nacelle effectue un mouvement de rotation de sens contraire.

Il est ainsi possible de réaliser des rotations de l'ordre de 1 tour en 15 minutes sans se heurter aux difficultés qui auraient été posées par la régulation directe de vitesses de rotation aussi faibles. Il est enfin possible de ne balayer qu'un secteur restreint du ciel, de part et d'autre d'une constellation, en inversant le sens de rotation du magnétomètre au moyen de butées solidaires de la nacelle.

3. LES RÉSULTATS TECHNOLOGIQUES DES PREMIÈRES EXPÉRIENCES

Les expériences qui furent réalisées avec la nacelle expérimentale ont fourni les nombreux enseignements indispensables à la réalisation d'observations au moyen d'instruments autonomes et précisé les divers aspects d'une expérience par ballon. Elles ont mis en évidence le fonctionnement très satisfaisant de l'équipement, relevé certains défauts et suggéré de nombreuses améliorations. Elles ont également donné de bonnes observations stellaires qui feront l'objet des chapitres suivants.

a) Principaux aspects de l'expérience par ballon.

Considérée dans ses grandes lignes, l'expérience par ballon se déroule en quatre phases: le lancement, l'ascension, les observations et la récupération. Si l'opération de lancement est un peu délicate, à cause des dimensions appréciables de l'enveloppe, la prise en charge de la nacelle est généralement douce et aucune restriction importante n'est imposée à l'encombrement extérieur de l'équipement. L'ascension s'effectue à un rythme régulier qui est de l'ordre de 300 m/mn. Elle dure un peu moins de deux heures dans le cas d'un ballon de 50.000 m³ emportant une charge de 200 kg à 32 km d'altitude. Durant cette phase le ballon traverse les couches froides de l'atmosphère (tropopause) situées entre 10 et 25 km d'altitude. La température peut tomber à -60 ou -70° C aux latitudes de l'Europe et elle remonte de jour jusqu'à 0° C aux environs de 40 km. Mais si l'expérience se déroule de nuit, cette remontée de la température est beaucoup plus faible et l'on a relevé des valeurs de l'ordre de -40 à -60° C à 32 km. Ces basses températures et surtout celles de la tropopause présentent un danger certain pour le ballon car elles réduisent les qualités mécaniques de son enveloppe et peuvent provoquer son éclatement.

L'altitude de plafonnement est atteinte lorsque le gaz de gonflage occupe tout le volume disponible. Cette altitude dépend naturellement de la charge emportée, du volume du ballon mais aussi du poids de ce dernier, autrement dit, de son épaisseur. Si l'enveloppe n'a pas subi de dommages au cours de la manutention au sol, ou lors de la traversée de la tropopause, l'altitude de plafonnement varie très peu au cours du vol et la durée des observations n'est limitée que par les dérives géographiques. Elle dépend des vents de hautes altitudes dont les vitesses peuvent atteindre 250 à 300 km/h à certaines périodes de l'année (automne et printemps).

La phase de récupération est déclenchée par télécommande ou par une minuterie qui sectionne la corde reliant le ballon au parachute. Après 45 minutes de descente, la nacelle touche le sol à la vitesse de 5 m/sec, ce qui correspond à une chute libre d'environ 125 cm. Des amortisseurs, caissons déformables plutôt qu'arceaux de fibre de verre, absorbent aisément le choc à moins que des circonstances particulièrement malchanceuses ne se présentent. Dans le cas des expériences décrites ici, la nacelle n'a subi que des dommages externes minimes au cours des cinq récupérations qui furent effectuées.

b) Les effets du milieu environnant

Les effets du milieu environnant sont à considérer sous deux aspects essentiels: Les conditions assez rigoureuses dans lesquelles l'équipement doit fonctionner et les perturbations aérodynamiques qui apparaissent au niveau de la stabilisation.

Si les faibles pressions (une dizaine de millibars) réduisent les échanges de chaleur par convection et impliquent généralement la pressurisation des circuits électronique (claquages), ce sont les basses températures qui imposent les conditions les plus

sévères. Elles n'affectent pas seulement le fonctionnement des parties mécaniques (contractions, diminution de la viscosité des lubrifiants) mais produisent de nombreux effets secondaires tels que la perte de capacité des batteries et la friabilité d'un grand nombre de matières synthétiques (films surtout). Enfin, l'existence de ces basses températures dans des couches atmosphériques dont l'humidité n'est pas toujours négligeable (surtout en-dessous de 10 km), nécessite la protection des surfaces externes des composants optiques contre la formation d'une pellicule de givre. Les nombreuses précautions (isolation, chauffage, pressurisation) qu'il faut prendre pour réduire les effets du milieu environnant peuvent être réalisées de différentes manières. Dans le cas de cette étude, la pressurisation des instruments et la confection d'enrobages assez épais (5 à 10 cm de polystyrène expansé) donnèrent des résultats satisfaisants. Chaque système protecteur doit toutefois être traité séparément et il est recommandable de contrôler son efficacité par des essais en simulateur.

Le second type d'effets du milieu environnant, celui des perturbations aérodynamiques, joue un rôle important dans la stabilisation de la nacelle. Lors de la première expérience, l'étude d'attitude de la nacelle non stabilisée a montré que les mouvements de rotation pouvaient être importants si le carénage ne présentait pas une symétrie de rotation par rapport à l'axe vertical de la nacelle. En effet, comme le carénage ne recouvrait que les joues latérales de l'armature, le maître couple latéral de la nacelle variait de façon appréciable avec l'angle de projection. Le vent différentiel, existant du fait que la nacelle et le ballon ne présentent pas le même maître-couple et qu'ils ne se trouvent pas à la même altitude, s'engouffrait dans la nacelle et la faisait tourner autour de son axe vertical. Il provoquait, au cours de l'ascension, un mouvement de rotation aléatoire atteignant 2 tours/min. Mais ce mouvement fit place, dès l'arrivée au plafond, à une oscillation assez régulière dont l'étude permit d'estimer la couple de rappel à 60 gr cm.

Pour l'étude d'attitude de la nacelle munie du dispositif d'acquisition en azimuth, le carénage fut étendu à toute la nacelle, abstraction faite de la fenêtre d'observation du télescope. Les résultats qui furent obtenus au moyen du magnétomètre et, de façon plus précise à partir des clichés du télescope, montrèrent que la stabilisation du pointage en azimuth était de l'ordre de ± 15 minutes d'arc et que l'amplitude du mouvement pendulaire de la nacelle était du même ordre de grandeur.

C) *Conclusions*

Ces premières expériences ont mis en évidence les divers aspects des observations par ballon et montré quels étaient les nombreux avantages de ce genre de véhicule. Abstraction faite des possibilités d'observation, les expériences par ballons sont peu coûteuses. Elles ne soumettent pas l'équipement aux contraintes mécaniques sévères des fusées et des satellites. Elles ne posent pas de grandes restrictions à l'encombrement des instruments et elles permettent des observations de plusieurs heures avec

un équipement relativement complexe. La bonne récupération des instruments, conditionnée essentiellement par la conception de la nacelle, permet d'utiliser plusieurs fois le même équipement scientifique. Enfin le caractère modéré des perturbations aérodynamiques ouvre toutes les possibilités à la création d'équipement entièrement stabilisés.

III. INSTRUMENT ET METHODE D'OBSERVATION

I. GÉNÉRALITÉS.

Le choix de l'instrument et de la méthode d'observation dépend du genre d'étude envisagé mais il est également lié, dans le cas d'expériences spatiales, aux performances des sous-systèmes disponibles. (Commande à distance ou commande automatique, pointage et stabilisation, restitution des informations).

a) *Choix d'un procédé photographique*

L'étude de la structure et de l'évolution des étoiles par photométrie en plusieurs couleurs implique l'observation d'un grand nombre d'individus stellaires. Elle peut être réalisée de manière électronique, en utilisant un détecteur photo-électrique, ou de manière photographique, en utilisant une émulsion photo-sensible. Si la méthode photo-électrique est la plus précise, son exploitation soulève de nombreuses difficultés dans le cadre d'une expérience spatiale. Elle nécessite la mise au point d'une plateforme inertielle, complexe et coûteuse, et pose des problèmes de retransmission et d'interprétation des données dont la résolution est très délicate.

Sans renoncer définitivement aux procédés photo-électriques, il était plus judicieux de tirer parti, à ce stade des recherches, des nombreux avantages qu'offrent les procédés photographiques. La double fonction de détecteur et de mémoire de l'émulsion photo-sensible permet d'observer simultanément plusieurs étoiles tout en séparant les informations correspondant à chacune d'elles. Ce rôle de mémoire offre également une plus grande sécurité de récupération des données et évite leur transmission par télémessure. Enfin les procédés photographiques peuvent se satisfaire d'un dispositif de pointage et de stabilisation aux performances modestes.

b) *L'observation par balayage lent du ciel*

Le système de pointage dont dispose la nacelle est en effet rudimentaire. Il se base, en azimut, sur le champ magnétique terrestre (dispositif d'acquisition en azimut de la Compagnie des Compteurs) et, en élévation, sur la nacelle elle-même. Grâce

aux faibles amplitudes du mouvement pendulaire de la nacelle, ce système permet de réaliser une stabilité de pointage qui est meilleure que ± 15 min d'arc, tant en élévation qu'en azimut.

Comme cette stabilité de pointage est insuffisante pour effectuer des poses photographiques, le procédé d'observation a été conçu pour opérer par balayage lent du ciel. Cette méthode, qui est souvent appliquée en fusées et satellites, consiste à observer les étoiles pendant que leurs images défilent dans le champ du télescope.

L'observation par balayage se prête bien aux études photographiques. Elle permet d'observer un grand nombre d'étoiles et elle n'est pas restreinte aux seules couvertures systématiques du ciel. L'inversion du sens de balayage permet d'observer un groupe stellaire bien déterminé et une programmation appropriée de l'élévation du télescope permet d'observer ce même groupe d'étoiles entre leur lever et leur culmination. Il est ainsi possible de réaliser des programmes d'observation assez complexes et d'étudier les mêmes étoiles à travers différentes masses d'air.

c) Adaptation de la photométrie à larges bandes

La photométrie photographique à larges bandes, qui sera discutée au chapitre IV, s'adapte aisément aux observations par balayage. Dans ce genre d'observations, le défilement de l'image stellaire dans le plan focal du télescope produit une trace photographique qui se prête bien à l'analyse densitométrique. Ce mouvement offre aussi un moyen de commutation très simple des filtres du système photométrique. En effet, si ces filtres sont placés à proximité du plan focal, de manière à ce que leurs bords soient perpendiculaires au sens de défilement, l'image stellaire impressionnant l'émulsion prend successivement la couleur du filtre qui intercepte ses rayons. La trace photographiée présente différentes densités optiques dont l'analyse fournit les valeurs de la lumination stellaire dans chacune des couleurs.

La conversion des luminations en intensités nécessite la connaissance des temps d'exposition mais cette information n'est pas indispensable s'il est possible de réaliser l'uniformité des temps d'exposition par régulation de la vitesse de balayage. Le rapport des luminations est alors égal au rapport d'intensités et il fournit directement les indices de couleurs recherchés.

Les performances que l'on peut attendre de cette méthode d'observation sont étroitement liées à la qualité du balayage. Dans le cas présent, les fluctuations de la vitesse de balayage (10 à 20%), résultant des imprécisions de pointage du dispositif d'acquisition en azimut et des perturbations aérodynamiques (± 15 min. d'arc), compliquent l'analyse des enregistrements et en réduisent la précision. L'existence d'une limite inférieure à la vitesse de balayage, liée aux ronflements des circuits électroniques d'asservissement, se traduit enfin par la limitation du temps d'exposition et la limitation des possibilités d'observation.

2. L'INSTRUMENT D'OBSERVATION

L'instrument d'observation qui est utilisé pour ces expériences de photométrie à larges bandes est un télescope du type Maksutov-Newtonien dont le choix a été motivé par son faible encombrement et par certains avantages qu'offre sa disposition géométrique. L'étanchéité qu'il est possible de réaliser au niveau du ménisque correcteur permet de le placer dans une enceinte pressurisée, tandis que la sortie latérale du faisceau facilite l'enregistrement photographique.

a) Description du télescope

Le télescope de Maksutov se compose d'un miroir sphérique et d'un ménisque correcteur dont les surfaces sont également sphériques. Le choix de ces surfaces, selon les règles établies par Maksutov et Bouwers, confère au ménisque un très faible pouvoir grossissant et une importante aberration de sphéricité qui en font un excellent

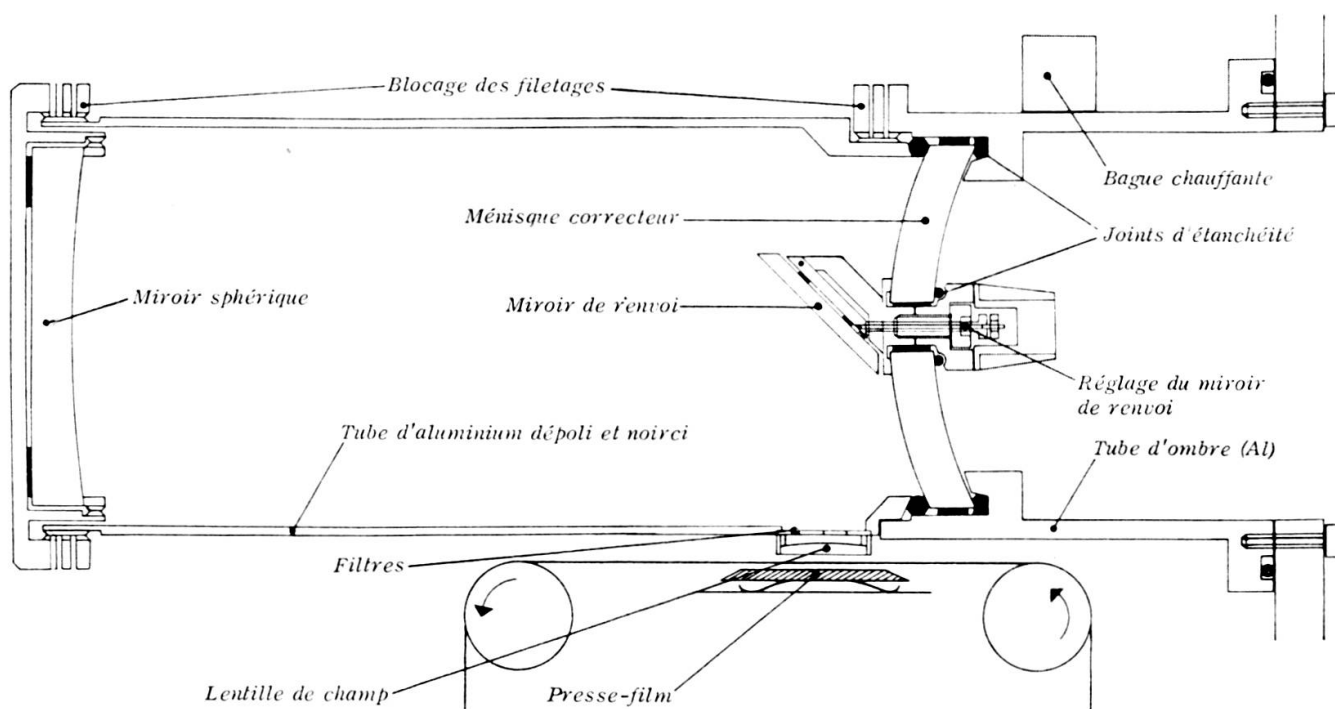


FIG. 5. — Coupe schématique du télescope de Maksutov.

correcteur de réflecteurs sphériques. Enfin, comme la distance miroir-ménisque est assez courte, l'instrument résultant est particulièrement compact et l'on peut fixer un miroir d'extraction Newtonien à même le ménisque.

Le télescope (fig. 5) a une pupille d'entrée de 60 mm de diamètre, une distance focale de 187,5 mm et un champ de 5,5 degrés correspondant à 18 mm dans le plan focal. Il comporte, en plus du miroir sphérique et du ménisque correcteur, un miroir

de renvoi monté sur le ménisque et un correcteur de courbure dont la face plane matérialise le plan focal et facilite le positionnement du film photographique. Ces composants, dont les caractéristiques sont réunies dans le tableau 2, présentent de bonnes propriétés dans le proche ultra-violet. Les miroirs sont pourvus d'un revêtement dont la réflectivité est élevée (80%) jusqu'à 2000 Å tandis que le ménisque et la lentille correctrice sont d'un quartz dont la transparence est de 90 % jusqu'à 1800 Å.

Les composants du télescope sont montés dans un tube d'aluminium noirci qui est fixé à la flasque de l'enceinte pressurisée (fig. 5). L'étanchéité est assurée au niveau du tube, du ménisque et du support du miroir de renvoi par des joints toriques en silicone. La mise au point du télescope s'effectue par translation du miroir sphérique, parallèlement à l'axe optique, et par pivotement du miroir de renvoi autour de l'axe optique et autour d'une direction qui est perpendiculaire à cet axe. La première opération est réalisée en vissant ou dévissant la fixation du miroir sphérique. La seconde opération est réalisée en faisant pivoter la monture du miroir de renvoi dans son logement et en faisant pivoter le miroir H au moyen de deux vis concentriques traversant la pièce de fixation au ménisque.

Les dimensions du champ ont été réduites par un diaphragme rectangulaire de 14 mm de haut et 9 mm de large. Le champ photographiable ne couvre qu'une moitié d'un film de 35 mm, laissant l'autre moitié libre pour les étalonnages.

b) *Équipement accessoire du télescope*

L'équipement photographique, le dispositif de dégivrage et le miroir de renvoi externe constituent les principaux accessoires du télescope.

L'enregistrement photographique des traces stellaires s'effectue sur un film de 35 mm qui est plaqué contre la face plane du correcteur de courbure par le couloir frontal du chargeur. Ce chargeur, dont la contenance est de 30 m, est un ensemble monobloc comprenant le dévideur et la bobineuse. Il assure l'avance rapide du film, par pas correspondant à la hauteur de champ du télescope, au moyen d'un moteur que commande une horloge à cames. Ce dispositif photographique fonctionne sans obturateur car c'est le temps séparant deux changements de clichés (10 secondes) qui fixe la durée d'exposition de l'émulsion.

Le dispositif de dégivrage est destiné à éviter la formation d'une pellicule de givre sur la face externe du ménisque correcteur. Ce dispositif comporte une bague chauffante entourant le tube d'ombre est dissipant 15 Watts sur ordre d'un thermostat. Un tube froid, placé en avant du télescope et servant à tenir le miroir de renvoi externe fait aussi office de piège à humidité.

Un miroir de renvoi externe a été placé en avant du télescope afin d'observer le ciel à différentes élévations sans modifier la position du télescope et de l'enceinte pressurisée. Ce miroir plan, de forme elliptique, est monté dans un tube qui est solidaire du télescope par l'intermédiaire d'un roulement à billes lui permettant de

tourner autour de l'axe optique. Un moteur, actionné par ordre du programmeur central, fait varier la position du tube par pas de 3 degrés tandis qu'un palpeur permet de contrôler cette position par lecture d'un code binaire gravé sur le tube.

Pour éviter la formation de givre sur le miroir de renvoi externe, une couche absorbante noire fut déposée par évaporation avant la déposition de la couche réfléchissante. Cette couche noire de 1000 Å d'épaisseur est chauffée par le rayonnement qu'émet un bloc d'aluminium, placé derrière le miroir et dont la température est maintenue à 40° C. La présence de cette couche noire constitue un support chaud au revêtement réfléchissant.

TABLEAU 2.

Caractéristiques optiques du télescope de Maksutov.

a) <i>Ménisque correcteur en quartz (Suprasil-I de Heraeus) :</i>	
— Rayon de courbure de la face concave	83,6 mm
— Rayon de courbure de la face convexe	87,5 mm
— Epaisseur au centre	9 mm
— Diamètre extérieur	74,95 mm
— Diamètre optique	60 mm
b) <i>Miroir sphérique en verre pyrex :</i>	
— Rayon de courbure	375 mm
— Diamètre extérieur	74,80 mm
— Diamètre optique	72,20 mm
— Epaisseur au centre	9,8 mm
— Revêtement: Alflex-A (Balzers)	
c) <i>Miroir de renvoi en verre pyrex :</i>	
— Miroir rectangulaire	40 × 28 mm
— Epaisseur	4 mm
— Revêtement: Alflex-A (Balzers)	
d) <i>Correcteur de courbure en quartz (Suprasil-I de Heraeus) :</i>	
— Lentille plan-convexe	
— Rayon de courbure de la face convexe	65 mm
— Epaisseur approximative	3 mm
e) <i>Caractéristiques globales au télescope :</i>	
— Distance focale	187,5 mm
— Pupille d'entrée	Ø 60 mm
— Champ circulaire	5°5
(soit 18 mm Ø dans le plan focal)	
— Distance miroir-ménisque	153,5 mm
<i>Note : La taille des composants optiques a été réalisée par Télé-Optik (Zurich).</i>	

c) Le choix des filtres

Le choix des filtres dépend de la luminosité du télescope et du temps d'exposition de l'émulsion. Comme la luminosité du télescope est faible et que la durée d'exposition est relativement courte, il est nécessaire d'utiliser des filtres à bandes passantes très larges (quelques milliers d'Ångströms). Mais un choix judicieux de filtres à bandes très larges permet de constituer un système de filtres fictifs à bandes beaucoup plus étroites.

Considérons à cet effet les filtres Suprasil I et Schott WG 9 qui furent employés pour les premières expériences (fig. 6). La lumière qui traverse le Suprasil correspond à la bande passante 2200-6500 Å tandis que la lumière qui traverse le second filtre correspond à la bande 3500-6500 Å. Après analyse de ces enregistrements, le flux qui serait parvenu dans la bande fictive 2200-4200 Å est obtenu par soustraction. L'utilisation d'un système à trois filtres (fig. 7), qui est prévue pour les expériences suivantes, permettra de mettre en évidence les quatre bandes: 2200-3000 Å, 3000-3800 Å, 2200-3200 et 2200-3800 Å.

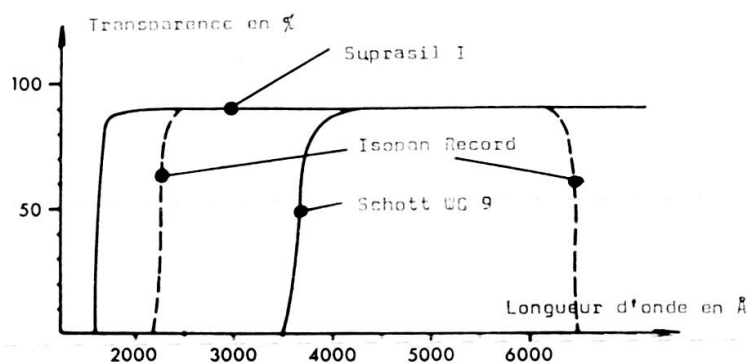


FIG. 6. — Profils de transparence spectrale du Suprasil I, du filtre Schott WG 9 et profil de sensibilité spectrale schématisé de l'émulsion Agfa Isopan record.

Ce procédé est moins précis que celui qui consiste à mesurer l'énergie reçue dans une bande passante réelle mais il permet d'utiliser au mieux les possibilités d'enregistrement. En effet, si l'on considère des étoiles de plus en plus faibles, les flux traversant ces filtres peuvent encore impressionner l'émulsion alors que le flux traversant un filtre à bande étroite serait bien inférieur au seuil de sensibilité de l'émulsion. Comme la différence entre la largeur des bandes passantes des filtres est faible, les flux qui les traversent ne sont pas très différents et provoquent des noircissements dont les densités sont relativement proches. Ces noircissements sont affectés du même genre d'erreurs photographiques et si un des observables est enregistré, les autres le sont aussi dans la majorité des cas. Enfin ce procédé permet de définir de nombreux filtres fictifs dans un domaine de longueurs d'ondes où les filtres réels sont rares.

3. PROGRAMME D'OBSERVATION, IDENTIFICATION ET ANALYSE DES DONNÉES

a) *Programme d'observation*

La méthode d'observation par balayage lent et régulier du ciel, qui est exposée dans ce chapitre, est réalisée en faisant tourner la nacelle autour de son axe vertical. Le télescope explore une bande de la voûte céleste dont la distance zénithale est constante et dont la hauteur est égale à la hauteur de champ du télescope. Les étoiles sont étudiées pendant que leurs images traversent la plage focale, et l'on peut observer ainsi un très grand nombre d'objets stellaires au cours d'un même vol.

Sous sa forme la plus simple, cette méthode consisterait à observer systématiquement tout le ciel en réalisant des révolutions complètes. Il est cependant plus judicieux de limiter le secteur de balayage, en inversant le sens de rotation de la nacelle à des azimuts bien déterminés, et de suivre le mouvement apparent des étoiles en modifiant l'élévation du télescope. L'observation est alors restreinte à un groupe d'étoiles présentant un intérêt particulier. Elle permet d'utiliser la pellicule photographique disponible de manière plus rationnelle. L'observation répétée de ces étoiles conduit aussi à une amélioration statistique des mesures tandis que leur observation à différentes distances zénithales permet de tenir compte de l'extinction atmosphérique.

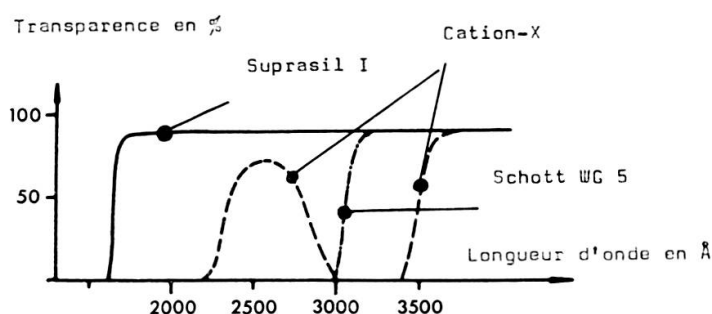


FIG. 7. — Profils de transparence spectrale des filtres définissant les bandes passantes d'un système photométrique à quatre couleurs.

La complexité des programmes d'observation augmenta avec le nombre de vols. Pour la première expérience l'élévation du télescope demeura inchangée. Pour la seconde expérience, la nacelle effectua des rotations complètes mais l'élévation du télescope fut accrue de 3 degrés après chaque passage au nord. La coïncidence du balayage et du mouvement ascendant des astres situés à l'Est, permit d'observer les mêmes étoiles à deux, trois et même quatre élévations consécutives. Enfin, dès le vol 03, l'inversion du sens de balayage fut introduite et le programme d'observation porta sur l'étude des constellations d'Orion et des Gémeaux entre 10 et 43 degrés d'élévation (fig. 8.).

b) *L'identification des traces stellaires*

En deux heures de fonctionnement, le télescope recueille plusieurs centaines de traces stellaires qui sont réparties sur quelques 1800 clichés. L'identification désigne l'ensemble des opérations qui permettent d'attribuer à chaque trace l'étoile qui l'a produite.

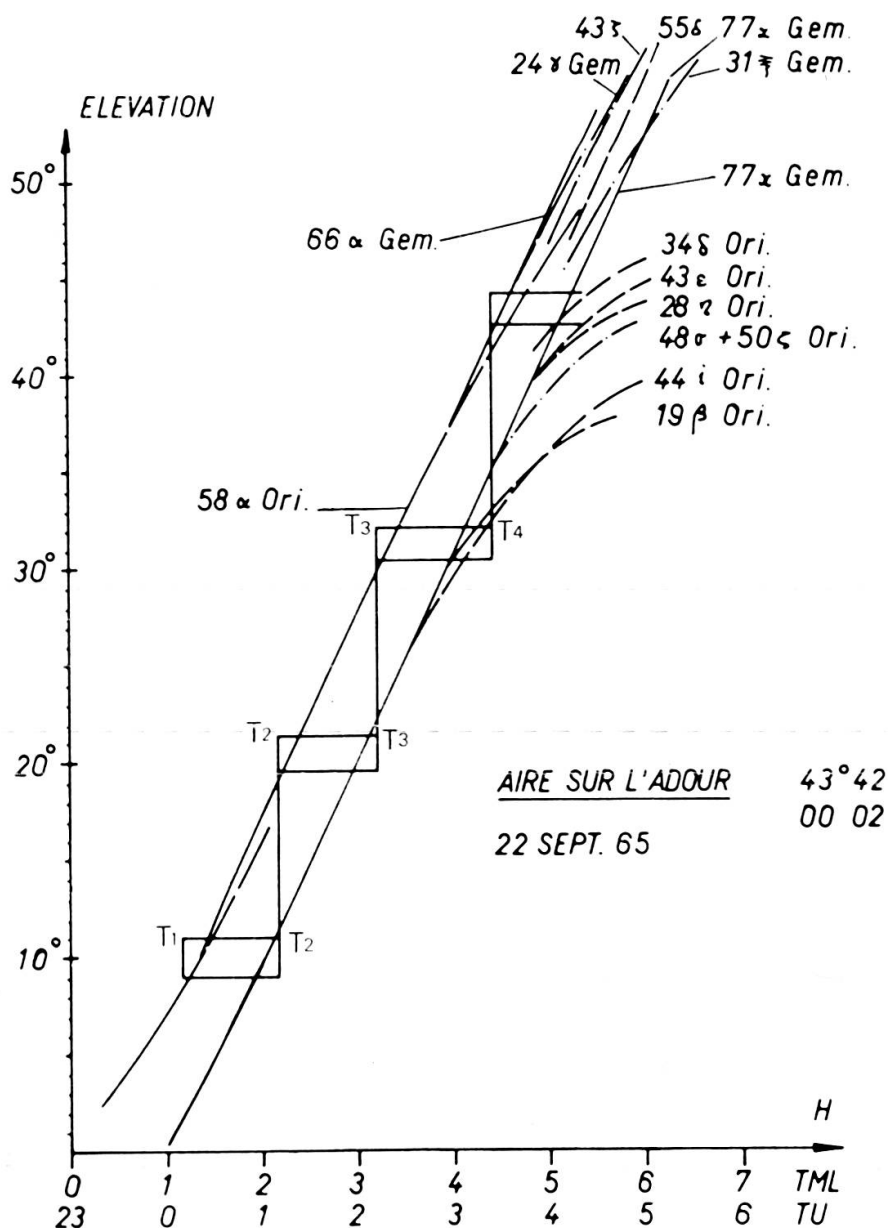


FIG. 8. — Programme d'observation des constellations d'Orion et des Gémeaux. Les élévations des principales étoiles de ces constellations sont portées en fonction du temps. Dans l'intervalle de temps T1 à T2, le balayage est effectué en va-et-vient entre le Sud et 60 degrés Est. Au temps T2, l'élévation du télescope est modifiée de manière à rattraper le mouvement apparent des étoiles. La même opération est répétée en T3 et T4 permettant d'observer ces étoiles à travers différentes masses d'air.

Le problème posé par l'identification est soluble si l'on connaît, à un instant déterminé, l'azimut et la hauteur de l'objet qui a impressionné l'émulsion. La transformation de ces coordonnées locales en coordonnées équatoriales permet de localiser l'objet sur un atlas du ciel et de l'identifier. Les nombreux recoupements qu'offrent les objets brillants permettent d'éliminer les doutes et les erreurs subjectives.

Les coordonnées locales de l'objet (azimut, élévation) sont déterminées en deux étapes. Des coordonnées approximatives sont déduites en premier lieu de l'orientation moyenne de la nacelle et de la position du télescope pour le cliché considéré. Des coordonnées plus précises sont déduites à l'endroit où le changement de cliché produit l'interruption de la trace. A cet endroit, l'instant est parfaitement connu puisque l'avance du film est commandée par le programmeur de bord qui est contrôlé à son tour par télémétrie. L'écart en hauteur et azimut, entre le point d'interruption et le centre du cliché, donne les coordonnées locales de l'étoile à l'instant du changement de cliché.

C) *Analyse des enregistrements photographiques*

Après développement du film et identification des traces stellaires, l'étude des enregistrements photographiques comporte une analyse densitométrique des noircissements stellaires puis la conversion de ces noircissements en énergies au moyen de la caractéristique de sensibilité globale de l'émulsion.

L'analyse densitométrique est effectuée au moyen d'un microphotomètre dont la fente exploratrice se déplace perpendiculairement à la trace stellaire. Parallèlement à la trace, la hauteur de la fente est grande (750 microns) afin de réduire les effets de la granulation photographique tandis que perpendiculairement, sa largeur est réduite au minimum (15 à 20 microns) de manière à reproduire le profil densitométrique aussi fidèlement que possible. Enfin, si la largeur de la trace n'est pas dix fois plus grande que celle de la fente, il est procédé à un raffinement du profil par déconvolution.

Chaque profil densitométrique est converti point par point en un profil énergétique dont l'intégrale exprime l'énergie stellaire ayant impressionné l'émulsion sur la longueur de trace équivalente à la hauteur de la fente exploratrice. A condition de ne pas modifier cette dernière dimension en analysant les segments de trace correspondant aux différents filtres du télescope, les rapports d'énergie ainsi obtenus donnent les indices de couleur recherchés.

La conversion des noircissements en énergies est opérée par un ordinateur au moyen de la caractéristique de sensibilité globale que l'on représente analytiquement par portions, faute de pouvoir trouver une seule forme analytique simple. Cette caractéristique est déterminée pour chaque émulsion en impressionnant une gradation densitométrique sur la partie du film qui est cachée durant les observations. Elle est effectuée peu de temps avant ou après les observations, de manière à réduire les effets de vieillissement photographique, et développée dans les mêmes conditions que les enregistrements stellaires.

Cette méthode de mesure des indices de couleur stellaires est naturellement entachée de tous les défauts inhérents aux analyses photographiques que nous discuterons au chapitre IV. Elle subit également les effets des fluctuations de la vitesse de défilement qui modifient la durée d'exposition. Mais la forme des enregistrements permet de tenir compte de ces fluctuations et d'apporter une certaine amélioration statistique en relevant de nombreux profils tout au long d'une même trace.

IV. LA PHOTOMÉTRIE PHOTOGRAPHIQUE À LARGES BANDES

La photométrie photographique, qui nous concerne dans cette recherche, est une photométrie à larges bandes définies par des filtres d'absorption du type passe-bas et par le profil de sensibilité spectrale de l'émulsion photographique. Le mode d'enregistrement, les conditions d'observations ainsi que les opérations de dépouillement sont susceptibles d'introduire de nombreuses imprécisions qui affectent la qualité du résultat final. Systématiques ou accidentelles, certaines de ces erreurs peuvent être corrigées mais nombreuses sont celles qui, par leur nature physique ou par les restrictions instrumentales, sont difficiles à estimer. Elles définissent, comme nous le verrons dans ce chapitre, les limites d'application de la photométrie photographique qui a été adoptée dans cette phase préparatoire des recherches.

1. EFFETS DES PERTURBATIONS ATMOSPHÉRIQUES ET INSTRUMENTALES

a) *L'extinction atmosphérique*

L'extinction atmosphérique produite par l'ozone est la principale perturbation atmosphérique que nous considérerons, puisque l'agitation atmosphérique et l'extinction par diffusion Rayleigh sont négligeables aux altitudes atteintes par les ballons stratosphériques.

L'extinction par l'ozone, dont les principaux caractères furent exposés au chapitre I, produit une importante distorsion de la distribution spectrale de l'énergie stellaire. Pour l'éliminer, on peut déterminer l'effet quantitatif de l'extinction par des mesures de la distribution verticale d'ozone à l'endroit et à la date des observations (méthode Umkehr ou Sondage par fusées) ou bien déterminer la variation de l'extinction en fonction de la distance zénithale. Ce dernier cas, qui est le seul à être pratiquement réalisable, consiste à observer les mêmes étoiles à différentes élévations et à déduire les valeurs extra-atmosphériques des indices de couleur par extrapolation.

L'application de cette méthode est cependant liée à la validité des hypothèses suivantes :

1. Constance de l'intensité du rayonnement stellaire de référence.
2. Permanence de la sensibilité instrumentale
3. Isotropie de l'atmosphère dans tout l'angle solide utilisé.
4. Permanence des propriétés absorbantes de l'atmosphère pendant la durée des observations.
5. Validité, au sens physique, de l'extrapolation.

Selon Rufener ⁵, la première hypothèse est garantie pour certaines étoiles, tandis que la seconde peut être bien respectée en passant aux indices de couleur. Il est cependant difficile de discuter la validité des hypothèses 3 et 4 en raison du manque de données concernant les fluctuations de l'ozone. Un contrôle de l'hypothèse 4 pourrait être partiellement effectué en observant, au cours de l'expérience, des sources dont la distance zénithale varie peu au cours de la nuit. Cette opération nécessite cependant un équipement beaucoup plus complexe que l'équipement actuel.

Le choix de la loi d'extrapolation et la vérification de la dernière hypothèse soulèvent les plus grandes difficultés. L'extrapolation conventionnelle (droite de Bouguer) basée sur la loi de Beer, n'est pas valable pour de larges bandes passantes à cause de la forme très prononcée du profil d'extinction de l'ozone. Il est par conséquent nécessaire d'établir une loi d'extrapolation qui soit basée sur le calcul théorique de la variation de l'extinction en fonction de la masse d'air et en fonction des bandes passantes du système photométrique.

Indépendamment de la validité d'une telle approximation, l'application d'une loi d'extrapolation se heurte à une difficulté supplémentaire que soulève la faible variation des indices de couleur en fonction de l'élévation et en comparaison de la précision des mesures. Les estimations théoriques réunies dans le tableau 3 mettent en évidence la faiblesse de ces variations dans le cas du système à deux bandes passantes très larges dont nous discuterons les résultats au chapitre V.

Les valeurs du tableau 3 se rapportent à une bande passante dont la largeur est de 4500 Å. En admettant que la largeur des filtres fictifs soit 10 fois plus petite, la variation des indices serait dix fois plus grande. Dans ce cas, la variation de l'indice d'une étoile de type B3, sur l'intervalle de distances zénithales compris entre 20 et 50 degrés, serait de 7% à 30 km, 15% à 35 km et 26% à 39 km. Comme l'imprécision de mesure des indices de couleur est supérieure à 10%, il apparaît que la détermination de la variation de l'extinction avec la distance zénithale n'a de sens que si l'on peut atteindre 39 km ou plus.

b) *Perturbations provenant de l'instrument d'observation*

L'instrument peut affecter les observations par des effets attenant à la qualité optique des images et à ses propriétés sélectives. Dans le cas présent, les fluctuations de la vitesse de balayage peuvent également être considérées comme des perturbations d'origine instrumentale.

Les défauts de l'image optique que forme le télescope sont généralement négligeables en comparaison du pouvoir de résolution des émulsions ultra-rapides. La méthode d'analyse densitométrique des traces stellaires permet d'ailleurs de s'affranchir de pareils défauts, grâce à la conversion point par point des profils de noircissement. Cette méthode tolère même des défauts dépassant ceux de l'image optique et prenant l'ampleur de défauts de focalisation.

TABLEAU 3

Variations théoriques et relatives de l'indice [(Visible + UV)-Visible] en fonction de la distance zénithale et de l'altitude. Les valeurs de ce tableau ont été calculées sur la base des profils d'extinction de l'ozone de Madame Navach (chapitre I), des distributions spectrales d'énergie de modèles stellaires de Houziaux et de la réponse spectrale de l'instrument et de l'émulsion photographique.

Distance zénithale	50°	40°	30°	20°	Altitude
Etoile B ₃	1,000	1,003	1,005	1,007	30.000 m
B ₈	1,000	1,002	1,004	1,005	
A0	1,000	1,001	1,002	1,003	
Etoile B ₃	1,000	1,006	1,011	1,015	35.000 m
B ₈	1,000	1,004	1,007	1,010	
A0	1,000	1,002	1,004	1,006	
Etoile B ₃	1,000	1,011	1,020	1,026	39.000 m
B ₈	1,000	1,006	1,012	1,016	
A0	1,000	1,003	1,006	1,009	

Les propriétés sélectives de l'instrument n'apparaissent pas explicitement dans cette étude car les étalonnages densitométriques et la détermination de la sensibilité spectrale du système photographique sont effectués en tenant compte du télescope

Les fluctuations de la vitesse de balayage, produites par les perturbations aérodynamiques et les perturbations éventuelles du champ magnétique terrestre au voisinage du magnétomètre, produisent des fluctuations du temps d'exposition de l'émulsion. Elles peuvent atteindre des valeurs de $\pm 30\%$ mais elles sont généralement inférieures à ces cas extrêmes. Elles nécessitent l'étude d'un grand nombre de profils le long de chaque segment de trace, afin de déterminer par extrapolation les valeurs des luminations ou énergies totales correspondant au même temps d'exposition. L'imprécision de cette extrapolation est cependant inférieure, dans la majorité des cas traités, aux erreurs relatives que l'on commet en déterminant l'énergie totale qui a impressionné l'émulsion.

c) *Imprécisions de mesure de la densité optique*

L'analyse des traces stellaires est basée sur la détermination de la densité optique des noircissements au moyen d'un microphotomètre. Dans le cas d'un appareil à déviation variable, comme le microphotomètre de Chalonge, la densité d s'exprime en fonction de la déviation $I(F)$, correspondant au fond de l'émulsion, et de la déviation I , correspondant au noircissement étudié:

$$d = \log [I(F)/I].$$

La précision de mesure de la densité est liée à des effets inhérents à l'émulsion photographique mais elle dépend également de la précision de lecture des déviations du microphotomètre. Celles-ci sont relevées sur papier photographique et l'on peut admettre l'incertitude absolue de lecture de 0,4 mm. Elle est inférieure à 1% en valeur relative si les déviations sont supérieures à 40 mm, autrement dit, si les densités optiques sont inférieures à 1,2. Mais pour les densités supérieures à 1,2 les déviations sont de plus en plus faibles et l'incertitude relative de la lecture atteint 10% au début de la zone de saturation de l'émulsion (densités de 2).

L'augmentation de l'intensité de la source du microphotomètre permet d'accroître les déviations correspondant aux forts noircissements et de réduire l'incertitude relative de mesure. Mais le raccordement de cette déviation avec celle du fond introduit une nouvelle erreur et l'imprécision de mesure des forts noircissements reste appréciable.

2. ERREURS DUES À L'ÉMULSION PHOTOGRAPHIQUE

Les incertitudes inhérentes aux émulsions photosensibles et aux circonstances de leur traitement: irradiation photographique, effets de la granulation, effets de voisinage et erreurs photométriques locales, interviennent lors de l'enregistrement des observables, lors de la détermination des densités optiques des noircissements et lors de la conversion des noircissements en énergies ou luminations.

a) *Perturbation des enregistrements*

Les principales perturbations qui sont susceptibles d'altérer la distribution d'énergie dans le profil de la trace stellaire sont l'irradiation photographique, les effets de la granulation et les effets de voisinage. Les deux premières sont inhérentes à l'émulsion tandis que la troisième est liée au développement.

L'irradiation photographique, qui produit un élargissement de l'image stellaire par diffusion de la lumière dans l'émulsion, est directement prise en considération lors de l'analyse point par point du profil densitométrique. Par ailleurs, comme la

lumination varie peu d'un filtre à l'autre, la différence d'élargissement de la trace stellaire prend des valeurs de quelques microns qui sont faibles en comparaison des autres imprécisions affectant le profil.

Les effets de voisinage, qui altèrent le profil densitométrique à l'endroit de fortes discontinuités de noircissement, sont dus au sous-développement de la partie claire et au surdéveloppement de la partie exposée (effet Eberhardt). L'analyse des enregistrements d'étalonnage, pour lesquels l'image de la source étendue (quartz dépoli) présente des bords nets, montre que ces perturbations ne sont pas importantes dans la zone noircie mais qu'elles sont appréciables dans la zone claire. Pour éviter les erreurs qu'elles introduiraient dans le calcul des densités de noircissement, il est nécessaire de déterminer la transparence du fond de l'émulsion en dehors de la zone perturbée par l'effet Eberhardt.

La granulation de l'image développée se traduit par des fluctuations de la densité optique de l'enregistrement densitométrique, produites par les irrégularités statistiques de la distribution des grains d'argent réduits. Ces défauts sont appréciables quand les dimensions de l'image stellaire sont inférieures à 0,1 mm car la largeur de la fente exploratrice du microphotomètre doit être réduite à des valeurs minimales (15 à 20 microns) qui sont proches de la dimension des grains (quelques microns). Il est toutefois possible d'atténuer l'effet de la granulation dans l'analyse de traces stellaires en multipliant par un facteur 20 ou 30 la hauteur de la fente exploratrice. La compensation statistique dont on bénéficie a pour effet de « lisser » le profil densitométrique.

Afin de réduire l'effet de la granulation dans la détermination de l'échelle densitométrique, il est avantageux d'employer une source d'étalonnage étendue produisant une plage de noircissement, plutôt qu'une trace fine semblable aux traces stellaires. Le plateau que présentent les enregistrements permet de déterminer une valeur moyenne du noircissement et d'estimer l'incertitude relative due à la granulation et aux imprécisions de lecture des enregistrements du microphotomètre.

Dans le cas de cette étude, l'analyse des plages d'étalonnage montre que l'incertitude relative, qui affecte la valeur moyenne de la densité optique des plateaux de noircissement, est de 2,8% pour les faibles noircissements et de 10% pour les noircissements proches de la zone de saturation de l'émulsion (fig. 9). Ces valeurs comprennent à la fois les incertitudes produites par la granulation et par les imprécisions de lecture des enregistrements du microphotomètre.

b) *Imprécisions de la caractéristique de sensibilité globale*

La conversion des noircissements photographiques en énergie s'effectue par l'intermédiaire de la caractéristique de sensibilité globale de l'émulsion déduite de la gradation densitométrique d'étalonnage. La précision de cette opération dépend de la précision de relevé de la caractéristique et de la validité des étalonnages que nous analyserons au paragraphe IV. 3.

En admettant que les étalonnages soient bien adaptés, les erreurs de conversion découlent essentiellement des erreurs commises en déterminant la caractéristique. Elles sont dues à l'imprécision de la gradation (échelle d'énergie) et à l'imprécision de mesures des densités optiques. Dans le cas présent, la gradation densitométrique

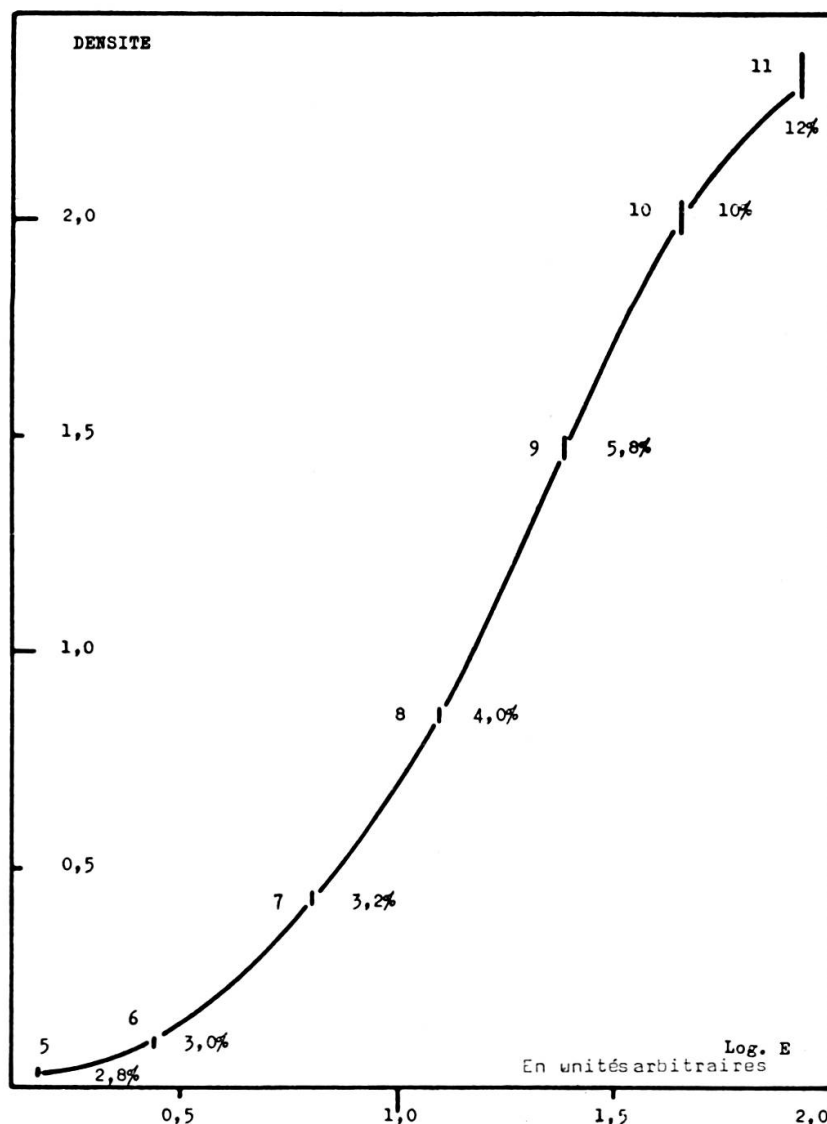


FIG. 9. — Caractéristique de sensibilité globale dans la bande passante du filtre A (1800-7000 Å). Les barres verticales indiquent l'ampleur des imprécisions qui sont dues à la granulation et aux erreurs de lecture des enregistrements microphotométriques.

est obtenue par réduction de la lumen au moyen de 12 diaphragmes. Ils définissent une échelle d'énergie, en unité arbitraire, qui est mesurée au moyen d'un photomultiplicateur et d'un électromètre. Plusieurs séries de mesures permettent de définir les rapports d'énergie des différents diaphragmes avec une précision de 2%.

Les erreurs de mesure de l'échelle d'énergie et les erreurs de mesure des densités optiques ont pour effet d'ajouter de part et d'autre de la caractéristique de sensibilité globale une bande d'incertitude dont la largeur, parallèlement à l'axe des énergies, vaut :

$$\log E = 2\% + \Delta d(d)/\gamma(d)$$

où Δd est l'incertitude entachant la densité d , $\gamma(d)$ la pente de la caractéristique à la densité d , et 2% l'incertitude de l'échelle d'énergie.

En admettant que le profil de densité optique des traces stellaires soit déterminé avec la même précision que la caractéristique de sensibilité, l'incertitude relative affectant la conversion de ces noircissements vaut :

$$\log E = 2\% + 2\Delta d(d)/\gamma(d)$$

Elle est élevée dans la zone du seuil de réponse de l'émulsion où la pente peu prononcée conduit à des valeurs de l'ordre de 20 à 30%, mais elle est plus faible dans la partie linéaire où la pente de 2 se traduit par une incertitude de conversion de l'ordre de 6 à 12%.

L'incertitude relative entachant le résultat final, c'est-à-dire l'intégrale de l'énergie ayant impressionné la trace, dépend du profil de la trace et de l'importance des noircissements. Il s'agit d'une combinaison pondérale où les grandes erreurs, introduites par la conversion des faibles noircissements, jouent un rôle qui est réduit par la faible participation de ces zones à l'intégrale finale. On peut donc admettre que dans les cas normaux, où le noircissement est ni trop fort ni trop faible, la précision de la conversion des grandeurs enregistrées est de l'ordre de 8 à 10%.

La conversion des noircissements en énergie est affectée, en dernier lieu, par les erreurs photométriques locales provenant des différences de sensibilité absolue et des différences de développement qui peuvent exister entre la zone d'impression de la trace stellaire et la zone d'impression de la gradation densitométrique. Il semble toutefois que ces erreurs se traduisent essentiellement par la variation de la densité de noircissement du fond de l'émulsion. Elles ont pour effet de déplacer les caractéristiques de sensibilité globale parallèlement à l'axe des énergies (fig. 10).

L'incertitude supplémentaire que cette nouvelle source d'erreur introduit, est aussi importante que l'incertitude découlant des imprécisions de la caractéristique. Dans ces circonstances, l'incertitude relative qui affecte la mesure de l'énergie stellaire dans chacune des bandes passantes du système photométrique est de l'ordre de 16 à 20%. Mais si les résultats finals sont exprimés sous la forme d'indices de couleur, cette incertitude est fortement réduite pour deux raisons inhérentes au mode d'enregistrement et au mode de conversion. Les erreurs photométriques locales sont vraisemblablement identiques pour les différents segments de la trace stellaire et n'affectent pas les rapports d'énergie de façon appréciable. En convertissant les noircissements des divers segments de la trace au moyen de la même caractéristique de sensibilité, les incertitudes de conversion prennent l'aspect d'erreurs systématiques dans la région de noircissement commune aux deux segments considérés. L'incertitude entachant la conversion des noircissements se réduit alors aux imprécisions qui existent dans la zone de noircissement qui n'est pas commune aux deux

enregistrements. L'erreur correspondant à ces imprécisions est généralement faible car les noircissements des différents segments diffèrent peu les uns des autres. Dans ces circonstances, l'incertitude relative affectant les indices de couleur provient surtout des imprécisions de mesure des profils densitométriques. Elles fixent une limite inférieure de précision des indices qui est de l'ordre de 8 à 10% dans le meilleur des cas.

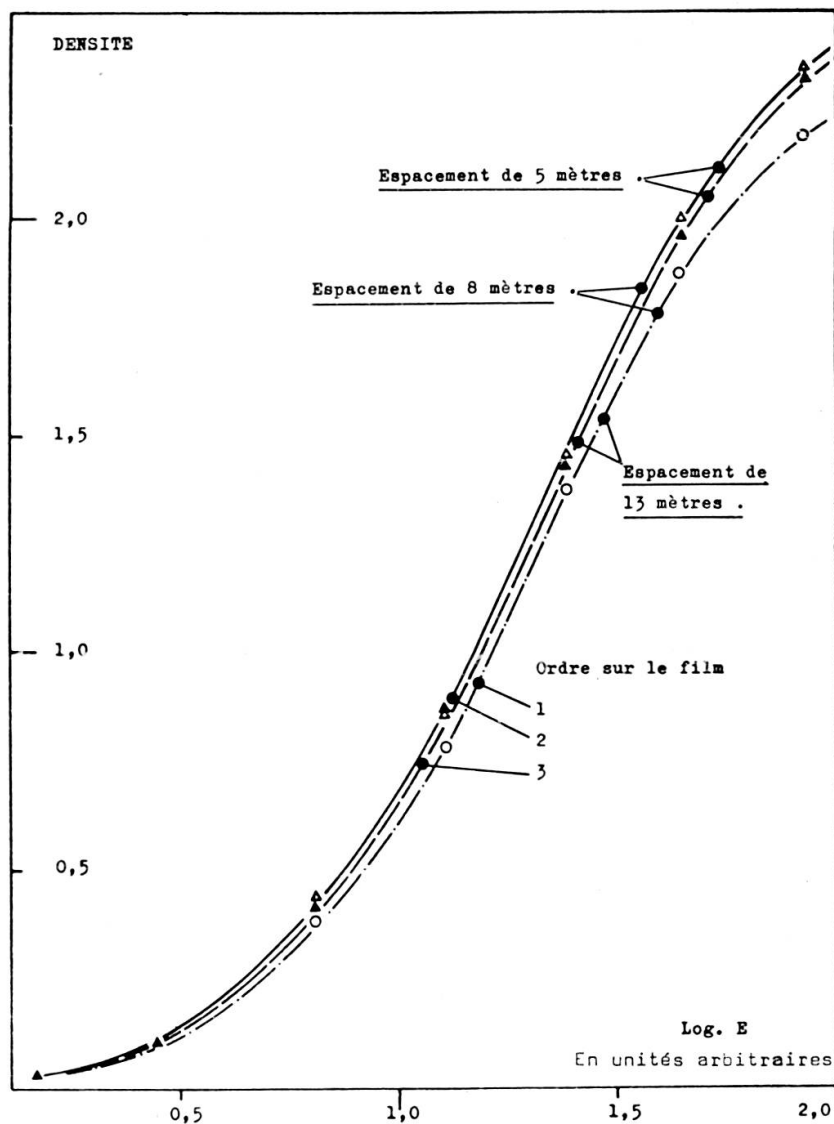


FIG. 10. — Effets des erreurs photométriques locales.
Caractéristiques de sensibilité globale relevée en différents endroits du film.

3. ERREURS PROVENANT DU MODE D'ÉTALONNAGE

Les imprécisions provenant de la méthode d'impression de la gradation densitométrique, du choix de la source d'étalonnage et du mode de définition des bandes passantes du système photométrique constituent un troisième type d'erreurs qui est essentiellement lié aux propriétés spectrales des émulsions photo-sensibles.

a) Critères de validité des étalonnages

La validité des étalonnages en sensibilité globale est généralement liée au respect des quatre conditions suivantes :

- Les étalonnages doivent être effectués dans les mêmes conditions instrumentales (effets sélectifs), les mêmes conditions thermiques (variation de la sensibilité avec la température) et dans les mêmes circonstances d'exposition (défauts de la réciprocité temps-éclairage) que les observations.
- Les gradations densitométriques doivent être impressionnées au voisinage des observations (erreurs photométriques locales).
- Les intervalles de temps qui séparent l'époque de développement de l'époque des étalonnages, et l'époque du développement de l'époque des observations, doivent être sensiblement égaux (rapport 8/10 à 9/10) afin de réduire les effets dus à l'évolution de l'image latente.
- La distribution spectrale d'énergie de la source d'étalonnage doit être proche de celle des étoiles observées.

La méthode d'étalonnage qui est appliquée dans cette étude permet de respecter, dans une bonne mesure, la première condition. La seconde condition est moins importante si l'on n'envisage que la détermination d'indices de couleur. La troisième condition est respectée grâce aux longs intervalles de temps qui séparent le développement des impressions. La quatrième condition, qui sera analysée séparément au paragraphe 3c, est difficile à satisfaire en raison du choix limité de sources de laboratoire à spectre continu.

b) Discussion de la méthode d'étalonnage

La méthode d'étalonnage consiste à enregistrer, dans des conditions proches de celles des observations, la gradation densitométrique qui est obtenue en réduisant l'éclairage d'une étoile artificielle par une série de 12 diaphragmes de module 2. Le pivotement du miroir MS (fig. 11) produit le défilement apparent de l'étoile artificielle et fournit une trace qui est semblable aux traces stellaires. Afin d'améliorer la précision de mesure des densités optiques, l'étoile artificielle est constituée d'un quartz dépoli que délimite le diaphragme rectangulaire D1. Plusieurs gradations de ce genre sont impressionnées, tout au long du film de 30 m, sur la partie qui reste cachée au cours des observations.

Cette méthode d'enregistrement des gradations densitométriques reproduit de façon assez satisfaisante les conditions d'observations. Il existe cependant quelques écarts dans les conditions ambiantes (15 à 20° C en température et 30 unités en humidité relative), dans la vitesse de défilement (—40 à +15% de variations dues aux changements d'élévation) et dans l'éclairage de la pupille d'entrée (le faisceau d'étalonnage ne couvre qu'une faible partie de la pupille d'entrée). Les écarts de la

vitesse de défilement sont toutefois faibles et n'introduisent pas de défauts de réciprocity appréciables. L'éclairement partiel de la pupille d'entrée introduit une erreur négligeable qui est due à la différence de transparence du quartz entre l'épaisseur moyenne traversée par le faisceau d'étalonnage et l'épaisseur moyenne de tout le ménisque. L'effet de l'écart des conditions ambiantes est plus difficilement appréciable. S'il produit une variation de sensibilité, celle-ci se manifeste de façon systématique pour tous les enregistrements, et l'on peut admettre que ses conséquences sur les indices de couleurs seront fortement réduites, comme cela est le cas pour les erreurs photométriques locales.

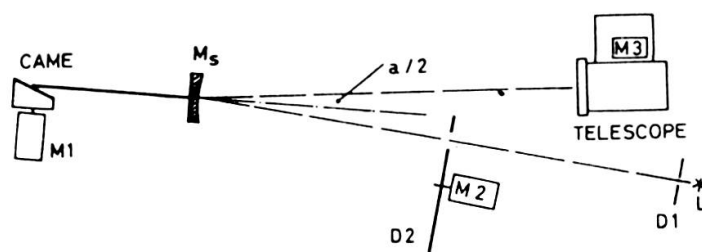


FIG. 11. — Schéma du banc d'étalonnage.

L'analyse des différentes gradations d'un même film ont montré que les erreurs photométriques locales avaient pour effet de déplacer les caractéristiques parallèlement à l'axe des énergies ou axe des éclairissements. Les analyses de gradations qui furent développées dans les mêmes conditions mais qui avaient été impressionnées à des époques différentes n'ont pas mis en évidence des erreurs appréciables que l'on pourrait imputer à l'évolution de l'image latente. Il semble que ce dernier phénomène peut être négligeable si l'intervalle de temps séparant le développement des impressions est de quelques semaines.

c) Erreurs provenant du caractère restrictif des étalonnages

Les principales erreurs provenant du mode d'étalonnage sont liées au quatrième critère de validité. Elles sont dues au fait que la caractéristique de sensibilité globale n'est pas indépendante de la distribution spectrale d'énergie de la source d'étalonnage. Elles sont également dues au fait que, dans cette étude, les bandes passantes du système photométrique sont surtout définies par le profil de sensibilité spectrale de l'émulsion.

Or les profils de sensibilité spectrale varient avec la lumination car les caractéristiques de sensibilité monochromatique ne sont pas identiques à toutes les longueurs d'onde, comme le montre la figure 12 relative à l'émulsion Agfa Isopan record. Les profils des bandes passantes (fig. 13) dépendent par conséquent de la densité du noircissement, donc de l'intensité de la source observée, selon une loi qui est propre à chaque type d'émulsion et qui semble être peu sensible aux circonstances

du traitement photographique. La configuration de la caractéristique de sensibilité globale dépend de la distribution spectrale d'énergie de la source d'étalonnage et elle n'est pas la même suivant que la gradation densitométrique est impressionnée à travers l'un ou l'autre des filtres du système photométrique (fig. 14).

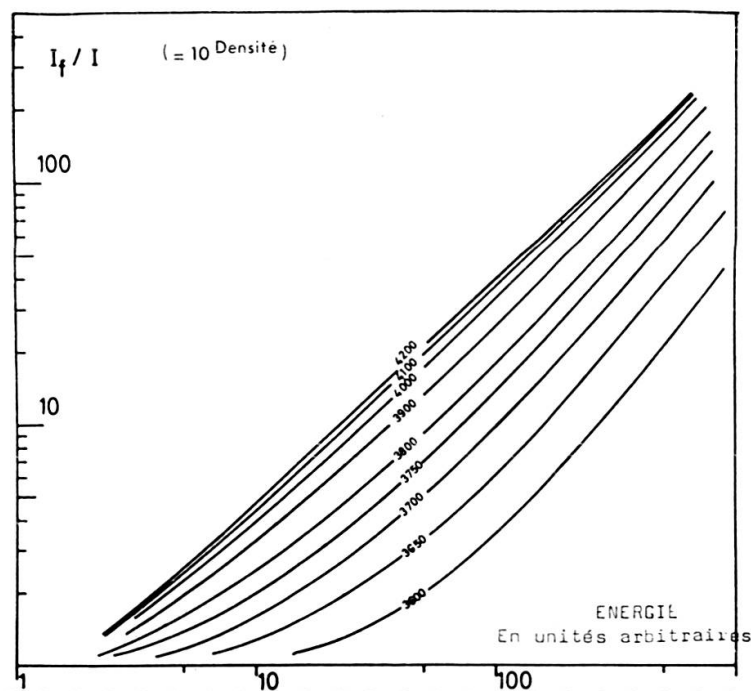


FIG. 12. — Famille des caractéristiques de sensibilité monochromatiques de l'émulsion, entre 3600 et 4200 Å (zone du filtre 3700 Å).

Les conséquences de ces phénomènes se manifestent lors de la conversion des noircissements au moyen d'une caractéristique de sensibilité globale unique. Dans ce cas, deux étoiles de même type spectral mais de magnitudes différentes présentent des indices de couleur différents. La variation de la vitesse de défilement, du fait des changements d'élévation, se traduit également par des variations de l'indice de couleur de chaque étoile. Il est donc nécessaire d'utiliser pour chaque bande passante la caractéristique de sensibilité globale qui lui correspond.

Le raccordement des échelles d'énergie de ces différentes caractéristiques soulève cependant certaines difficultés puisque l'émulsion participe à la définition des bandes passantes. Les échelles d'énergie, qui sont déterminées au moyen du photomultiplicateur, correspondent en effet à la bande de sensibilité de ce dernier et non pas aux bandes passantes de l'émulsion. Il est donc nécessaire de déterminer le profil de sensibilité spectrale de l'émulsion, d'en déduire la largeur des bandes passantes du système photométrique et de calculer, connaissant la distribution spectrale d'énergie de la source d'étalonnage, le décalage de lumination qui existe entre les gradations densitométriques.

Dans le cas des observations qui seront discutées au chapitre V, un raccordement plus simple a été effectué car on se trouve en présence de deux caractéristiques seulement. Il consiste à considérer une des caractéristiques comme référence et à déterminer les distorsions qui la différencient de l'autre, après superposition dans la zone de linéarité. Ces écarts, exprimés en rapports d'énergie, ne sont autres que les erreurs que l'on commet en convertissant les noircissements de la seconde bande passante avec la caractéristique de sensibilité de la première. Ces erreurs, qui revêtent dans notre cas le caractère d'un rougissement des indices de couleur, peuvent être calculées à partir des caractéristiques de sensibilité spectrale. L'analyse qui fut effectuée dans ce sens laisse penser que le rougissement photographique est un phénomène inhérent au type d'émulsion et qu'il est peu sensible aux circonstances du traitement photographique (imprécision et développement).

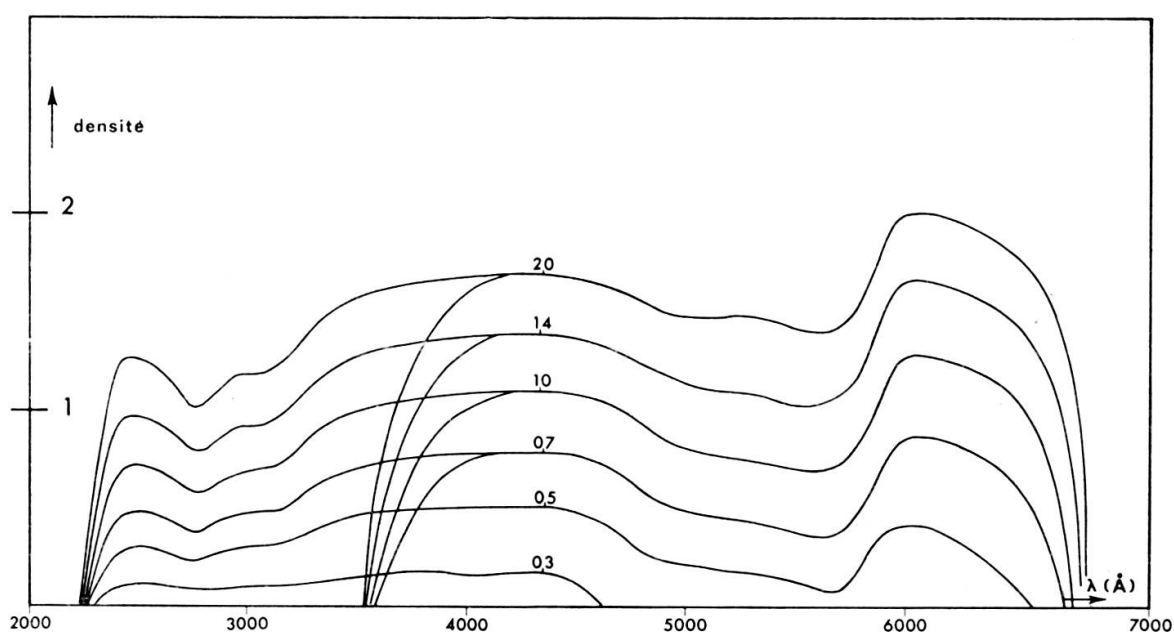


FIG. 13. — Profils de sensibilité spectrale de l'émulsion pour une source théorique dont la distribution spectrale d'énergie est uniforme.

Ces courbes sont déduites des enregistrements par correction du profil densitométrique de la source au moyen des caractéristiques de sensibilité monochromatiques. Les chiffres juxtaposés aux profils indiquent la largeur des fentes d'entrée et de sortie du monochromateur.

Les erreurs qui sont introduites par l'imprécision de raccordement des échelles d'énergie, ou par la détermination des facteurs de correction du rougissement photographique, viennent s'ajouter aux incertitudes de conversion entachant les indices de couleur. Dans le cas d'un raccordement d'échelle l'erreur commise est de l'ordre de 3 à 5%. Dans le second cas, la connaissance de la correction du rougissement est entachée d'une incertitude relative qui reflète la précision des caractéristiques. Selon les distorsions, l'incertitude peut atteindre 30%. Mais, comme la correction

totale ne représente que 10 ou 20% de l'indice de couleur, l'incertitude relative résultante est de l'ordre de quelques pour cent, faisant passer la précision finale des indices de couleur de 8-10% à 10-15%.

La seconde conséquence de la variation des caractéristiques de sensibilité monochromatiques avec la longueur d'onde se traduit par l'existence d'une étroite corrélation entre la caractéristique de sensibilité globale et la distribution spectrale d'éner-

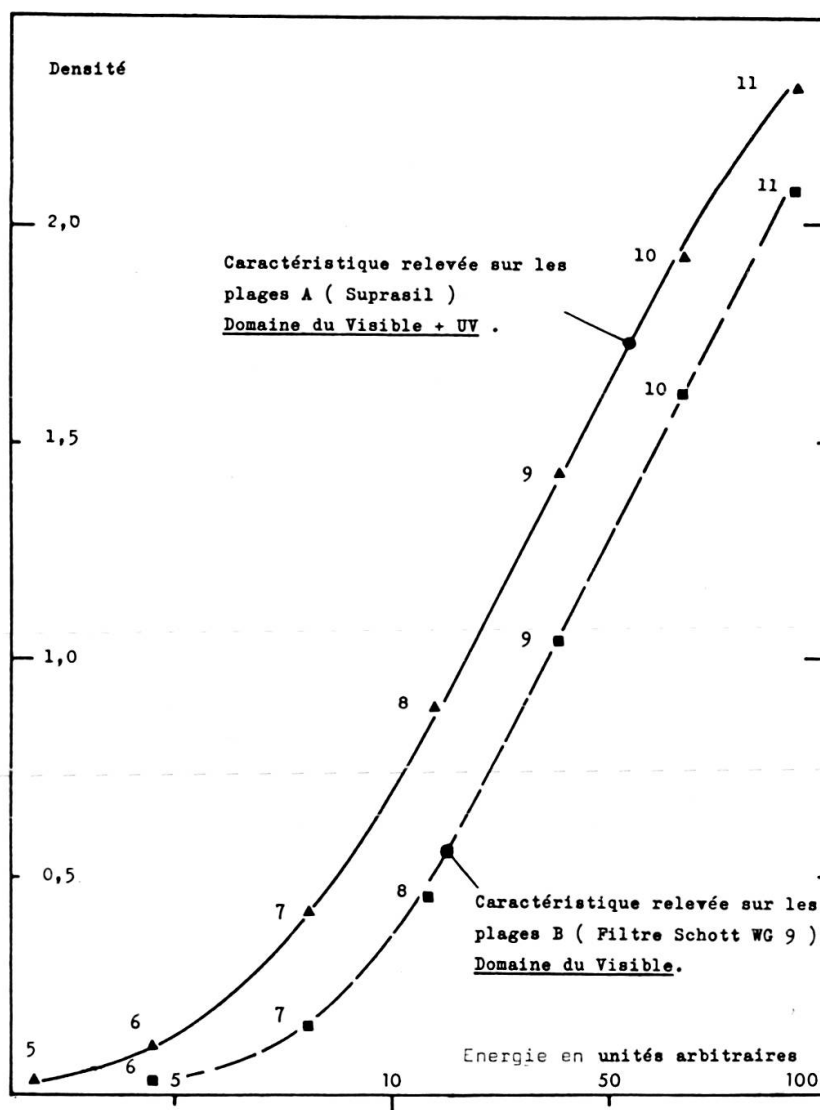


FIG. 14. — Variation de la forme de la caractéristique de sensibilité globale avec le domaine spectral d'émission de la source d'étalonnage.

gie de la source d'étalonnage. Cette relation semble être faible si l'on considère des distributions correspondant à des étoiles de types voisins, comme le montrent les caractéristiques de sensibilité globale (fig. 15) qui furent calculées à partir de modèles stellaires et des caractéristiques de sensibilité monochromatique de l'émulsion. Toutefois, comme le choix de sources d'étalonnage présentant un spectre continu

est extrêmement restreint, il est difficile de mesurer directement ces écarts et l'on est réduit à considérer la gradation densitométrique d'étalonnage comme inhérente à la définition du système photométrique.

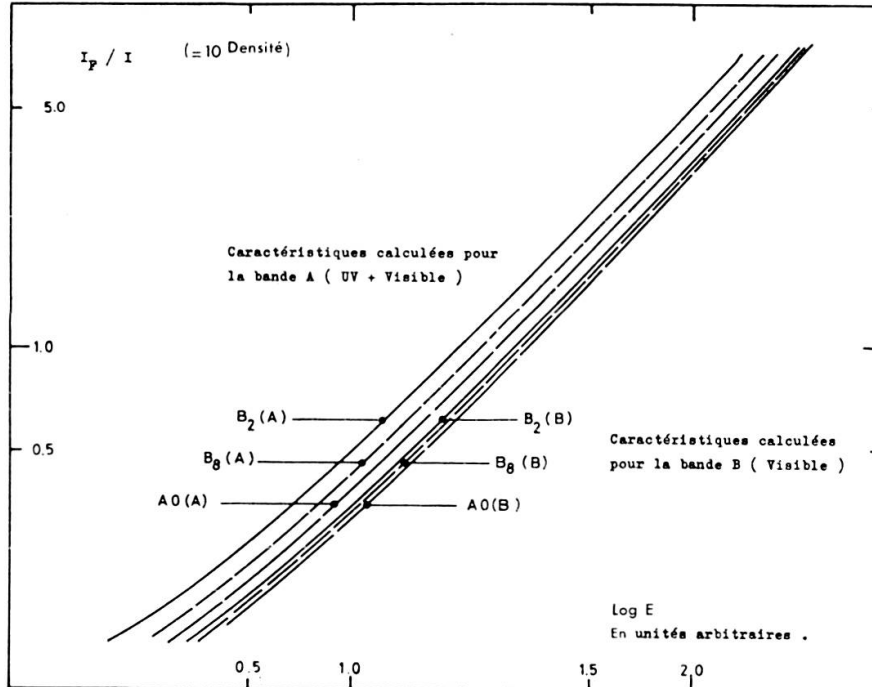


FIG. 15. — Caractéristiques de sensibilité globale calculées à partir de la sensibilité spectrale de l'émulsion pour des sources de distributions spectrales différentes et dans des intervalles spectraux différents.

V. RÉSULTATS DES OBSERVATIONS

Trois campagnes d'observation, représentant au total cinq lancements, ont été réalisées. La première fut effectuée en décembre 1964, avec la nacelle démunie de toute stabilisation, pour mettre en évidence les perturbations aérodynamiques et étudier le comportement de l'équipement. La méthode d'observation par balayage régulier du ciel fut introduite pour le vol de Juin 1965, qui a fourni les nombreuses observations que nous analyserons dans ce chapitre. Quant à la troisième campagne, qui comportait le programme d'observation par paliers et un système de quatre bandes passantes, elle ne permit de recueillir aucune information supplémentaire par suite d'éclatements prématurés des ballons.

a) Description des observations

Les observations réalisées au cours du vol de Juin 1965 furent recueillies sur un film Agfa Isopan record au moyen du télescope de Maksutov muni d'une combinaison de deux filtres photométriques. Le programme d'observation consistait

en un balayage régulier du ciel au rythme d'une révolution complète en 15 minutes. L'élévation du télescope fut fixée à 45 degrés pour la première révolution puis augmentée de 3 degrés à chaque passage au Nord.

Au cours des deux heures d'observations qui furent réalisées à 32.500 mètres d'altitude, les étoiles des constellations suivantes: Céphée, le Cygne, Vulpecula, Aquila, Ophiucus, le Serpent, Bootes, la Grande Ourse et la Petite Ourse, se présentèrent dans le champ du télescope. La coïncidence du mouvement de balayage, du changement d'élévation et du mouvement ascendant des étoiles situées à l'Est, a permis d'observer ces étoiles à deux, trois et même quatre élévations consécutives, distantes de 3 degrés.

Sur les 1300 clichés qui furent exposés, 500 traces stellaires ont été relevées et identifiées. Elles correspondent à des étoiles atteignant la 6^e magnitude. Mais une centaine d'étoiles seulement ont produit de bons enregistrements. Cette réduction du nombre d'observations utiles provenait surtout du fait que les étoiles faibles produisent un noircissement qui est trop proche de celui du fond de l'émulsion et que l'observable le plus faible n'est pas détecté. Elle provenait également d'un défaut de focalisation accidentel causé par la pressurisation du télescope.

b) *Analyse et discussion des observations*

L'analyse des traces relevées a été essentiellement portée sur les étoiles qui furent observées à différentes élévations (tableau 4). Les luminations ayant impressionné l'émulsion dans la bande A (ultra-violet + visible), qui s'étend sur tout le domaine de sensibilité de l'émulsion (2300-6800 Å), et dans la bande B (visible), qui s'étend de 3700 Å à 6800 Å, ont été déterminées au moyen d'une seule caractéristique de sensibilité globale avec correction du rougissement photographique. Le tableau 5 réunit les indices (A-B) qui furent ainsi obtenus et présente dans sa troisième colonne, l'indice (A-B) qui aurait été déduit si l'on n'avait pas tenu compte du rougissement photographique.

L'analyse de la variation de l'indice de couleur avec l'élévation de l'astre observé montre qu'il y a généralement un léger gain en ultra-violet. Mais le caractère de ce résultat demeure qualitatif car la dispersion des indices provenant des incertitudes de mesure des luminations et du faible intervalle d'élévation considéré, ne permettent pas de mettre en évidence une loi d'extinction. Cette constatation illustre bien les arguments de la discussion concernant, au chapitre IV 1, le problème de l'élimination de l'extinction atmosphérique aux altitudes inférieures à 39 km.

S'il n'est pas possible de déterminer des indices de couleur qui soient corrigés de l'extinction atmosphérique, le diagramme de couleur (fig. 16) permet de tirer de nombreuses indications au stade actuel des observations. Dans ce diagramme, l'indice de couleur observé est porté, pour chaque étoile, en fonction de son indice (B-V) de la photométrie UBV. Le diagramme comprend également les indices qui furent déterminés depuis la station de haute montagne du Jungfrauoch, ainsi que

des bandes hachurées correspondant à l'indice théorique qui est obtenu à partir des profils d'extinction atmosphérique (chapitre I), de modèles stellaires et de la sensibilité spectrale de l'émulsion.

TABLEAU 4

Indications sur les étoiles analysées

Etoile	N° GC	N° HD	N° BS m	type spectral	Indice B-V	Hauteurs d'observation en degrés et minutes d'arc
18 γ Aquila	26315	178125	7248 5,10	B8 usb	−0,09	57° 08
50 γ Aquila	27354	186791	7525 2,80	gk3	1,52	52° 01, 53° 30
08 β Céphée	30118	205021	8238 3,32	B2 usb	−0,25	54° 15, 55° 24
66 ν Cygne	29802	202904	8146 4,42	B3 ne	−0,12	60° 02, 62° 45, 65° 25
81 π 2 Cygne	30512	207330	8335 4,26	B3	−0,12	54° 11, 56° 59, 59° 03
09 α Dauphin	28780	196687	7906 3,86	B8 n	−0,05	41° 47, 44° 18, 46° 56, 61° 30
11 α Dragon	19019	123299	5291 3,64	A0 p s	−0,05	50° 21
13 γ Petite Ourse	20692	137422	5735 3,14	A2 n s	−0,05	54° 09, 53° 06

L'analyse du diagramme de couleur met d'abord en évidence la bonne concordance des indices de couleur théoriques et des indices de couleur recueillis à 32 km d'altitude. La comparaison de ces derniers indices avec les indices relevés en haute montagne fait ressortir un bleuissement qui est de l'ordre de 0,1 magnitude. Comme la transparence atmosphérique se limite au environs de 3150 à 3200 Å en haute montagne, le gain de 0,1 magnitude correspond essentiellement à un élargissement de 10% de la bande A. Etant donné que la largeur de cette bande est de 3500 Å au niveau du sol, et que le profil d'extinction de l'ozone est très prononcé entre 30 et 35 km d'altitude, le gain de 0,1 magnitude signifie que le domaine spectral observé s'étend jusqu'aux environs de 2800 Å, conformément aux prévisions du chapitre I.

Ce diagramme permet aussi de tirer une indication qualitative sur l'extinction interstellaire dans le proche ultra-violet. Les étoiles ν et Π_2 du Cygne sont des étoiles rougies dont les indices (B-V) prendraient normalement les valeurs −0,3 et −0,2. La translation qui les amène dans leur position correcte correspond dans le cas de ce diagramme à une translation parallèle à l'axe (B-V). Cette translation, appelée également droite de rougissement, est la représentation de la loi d'absorption interstellaire. Elle est bien connue dans le visible où sa variation est inversement proportionnelle à la longueur d'onde. En admettant que cette loi soit valable dans l'ultra-violet, la droite de rougissement qui fut calculée sur la base d'indices théoriques, présente, dans le diagramme considéré, une pente prononcée et s'écarte nettement de la parallèle à l'axe (B-V).

L'écart qui est ainsi mis en évidence, laisse présumer que la loi de rougissement du visible n'est plus valable dans le proche ultra-violet, comme semblent l'indiquer les mesures par fusées. Le fait que la translation soit apparemment parallèle à l'axe (B-V), confirmerait par ailleurs le caractère neutre de l'absorption interstellaire dans l'ultra-violet. Ce dernier résultat revêt seulement la forme d'une hypothèse. L'analyse d'un plus grand nombre d'étoiles et la réalisation d'observations plus évoluées, permettront d'en contrôler la validité.

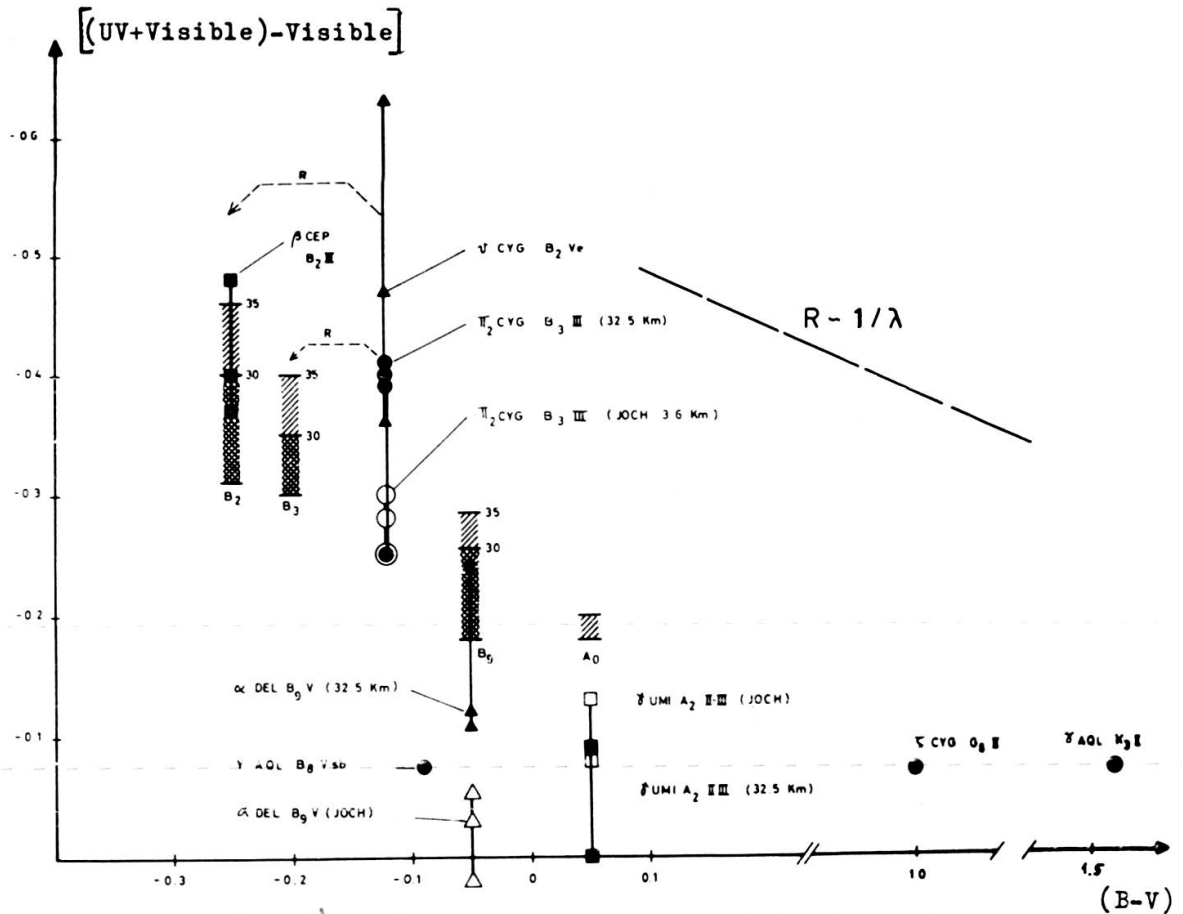


FIG. 16. — Diagramme de couleur des étoiles du vol 02.

Les points noirs correspondent aux indices mesurés à 32.500 m d'altitude, les points blancs correspondent aux indices mesurés depuis la station du Jungfrauoch (3.600 m) et les bandes hachurées correspondent aux indices qui ont été calculés à partir des caractéristiques de sensibilité monochromatique de l'émulsion, de modèles stellaires et de la transparence atmosphérique déduite d'une distribution standard de l'ozone. Sa droite de pente $R \sim 1/\lambda$ représente la loi de rougissement interstellaire telle qu'elle se présente dans le visible.

VI. CONCLUSIONS

La discussion du chapitre IV et l'analyse des observations de la seconde campagne de lancements permettent de tirer de nombreuses conclusions sur les possibilités qui sont offertes par les observations stratosphériques et sur les principaux aspects de la méthode d'observation qui fut appliquée dans cette première phase des recherches.

Sur le plan purement technologique, les premières campagnes de lancements ont confirmé le bon fonctionnement de l'équipement, suggéré de nombreuses améliorations et prouvé que la réalisation d'un équipement d'observations astronomiques était à la portée d'instituts universitaires disposant de moyens techniques limités et d'un appui financier modeste. Si l'altitude atteinte au cours de ces vols est restée bien inférieure à l'altitude désirée de 39 km, les résultats qui furent recueillis avec le petit télescope de Maksutov ont montré que l'observation par balayage régulier du

TABLEAU 5

Indices (A-B) corrigés du rougissement, pour les étoiles observées à plusieurs hauteurs
A = [Visible + Ultra-violet] B = [Visible]

Nom	type spectral	(A-B) non corrigé	(A-B) corrigé	Elevation de l'astre en degrés et minutes d'arc
50 γ AQL	gK 3	-0,27	-0,07	52 01
		-0,18	-0,07	53 30
08 β CEP	B2	-0,68	-0,48	53 33
		-0,56	-0,37	54 15
		-0,50	-0,40	55 24
66 ν CYG	B3	-0,59	-0,47	60 02
		-0,72	-0,63	62 45
		-0,48	-0,36	65 25
81 ξ CYG	B3	-0,55	-0,41	54 11
		-0,53	-0,41	56 37
		-0,58	-0,39	59 03
		-0,45	-0,25	61 30
09 α DEL	B8	-0,43	-0,24	41 47
		-0,28	-0,11	44 18
		-0,27	-0,12	46 56
13 γ UMi	A2	-0,30	-0,09	54 09
		-0,14	-0,00	53 06

ciel constitue une méthode sûre, simple et efficace. Ils ont également montré que le gain en ultra-violet était conforme, à l'altitude atteinte, aux précisions basées sur les modèles de distribution verticale de l'ozone. Ce résultat confirme l'intérêt que présenteront les observations par ballon dès qu'il sera possible d'atteindre ou de dépasser l'altitude de 39 km avec les futurs ballons de 100.000 et même 300.000 mètres cubes.

Sur le plan purement astronomique, les observations stellaires ont mis en évidence les nombreux avantages que présentent les émulsions photographiques grâce à leur grande capacité de mémorisation et à la simplicité du procédé de recueil des données. L'observation par balayage régulier du ciel est bien adaptée à l'étude qui est envisagée dans la présente recherche puisqu'elle permet d'analyser un très grand nombre d'étoiles au cours d'un même vol et offre un moyen très simple de commutation des filtres du système photométrique. Si le choix de ces derniers a porté sur des filtres à bandes passantes très larges, ceci est dû en grande partie à la faible luminosité de l'instrument embarqué, mais il n'empêche pas la mise en valeur de filtres fictifs à bandes passantes plus étroites.

Les principales restrictions sont cependant soulevées par l'application d'une photométrie photographique à larges bandes dans une expérience où la vitesse de défilement des images stellaires n'est pas parfaitement constante, et où l'extinction atmosphérique due à l'ozone est encore appréciable. Les fluctuations inévitables de la vitesse de défilement allongent de façon démesurée les opérations de dépouillement. La détermination de la variation de l'extinction atmosphérique avec la distance zénithale est très imprécise en raison du faible accroissement des indices de couleur en comparaison de l'imprécision de mesure qui les entache. La loi d'extinction ne revêt pas la forme simple permettant d'appliquer la loi d'extrapolation linéaire des indices. Elle fait appel à une loi d'extrapolation moins précise qui dépend de la distribution verticale de l'ozone aux altitudes supérieures à celle du ballon.

Enfin, la photométrie photographique constitue en elle-même une difficulté à cause des problèmes posés par la conversion en énergie de noircissements d'origine polychromatique. Les effets du rougissement photographique et la variation de la caractéristique de sensibilité globale avec la distribution d'énergie de la source d'étalonnage entraînent des imprécisions qu'il est difficile d'éliminer.

Sans condamner l'observation photographique, la présente étude suggère de modifier la méthode d'enregistrement des observables de manière à ce qu'elle soit indépendante du mode d'étalonnage et des effets du rougissement photographique. Une méthode d'observation qui présente de nombreux avantages dans ce sens est la spectrophotométrie photographique. Elle consisterait à enregistrer les spectres de faible résolution produits par un prisme placé à l'entrée du télescope.

La spectrophotométrie photographique n'est pas incompatible avec la méthode d'observation par balayage si l'on prend la précaution de disperser la lumière dans le plan perpendiculaire au sens de défilement. La trace stellaire du système actuel est remplacée par une famille de traces monochromatiques dont le profil microphotométrique restitue le profil densitométrique du spectre stellaire. Dans ces circonstances, la méthode d'enregistrement est indépendante des fluctuations de la vitesse de défilement puisque les noircissements correspondant aux diverses longueurs d'ondes sont produits pendant le même intervalle de temps. La conversion des noircissements en énergies ou luminations est indépendante de l'effet de rougissement

puisque cette opération peut être effectuée au moyen des caractéristiques de sensibilité monochromatiques.

Les spectres stellaires de faible résolution (10 à 50 Å) que la spectrophotométrie photographique peut fournir apporteraient une grande partie des informations que nous recherchons. Ils permettraient de calculer des indices de couleur correspondant à n'importe quelles combinaisons de filtres dans un domaine spectral où ces derniers sont plutôt rares. Ils permettraient aussi de mesurer directement la variation de la transparence atmosphérique et de déterminer avec plus de précision les valeurs extra-atmosphériques des flux stellaires puisque la loi d'extrapolation linéaire de Bouguer est valable si l'on considère des intervalles spectraux de 50 Å de large.

Tout en conservant les nombreux avantages de l'observation photographique, la spectrophotométrie à faible résolution permettrait d'éviter une bonne partie des difficultés soulevées par la photométrie à larges bandes que nous avons appliquée dans cette étude. La spectrophotométrie nécessiterait cependant un télescope beaucoup plus lumineux que celui que nous avons utilisé et c'est pour cette raison qu'elle n'a pas été appliquée au cours des observations décrites ici. La photométrie à larges bandes se prêtait mieux à ces premières expériences et les résultats encourageants qu'elle a fournis permettent d'envisager maintenant la construction d'un télescope plus lumineux qui serait conçu pour des observations spectrophotométriques.

Les figures 2, 3, 4, 5 sont reprises de l'article de l'auteur intitulé « Mise au point d'une nacelle à buts astronomiques » et publié dans la revue *Sciences et Industries spatiales*, nos 1/2 et 3/4 — 1968, à Genève.

Genève, Mars 1967

BIBLIOGRAPHIE

- 1 GEHRELS et TESKA, *Appl. optics*, vol. 2, n° 1, p. 67 (1963).
- 2 Alex GREEN, *Appl. optics*, vol. 3, n° 2 (1964).
- 3 Carla NAVACH, Communication privée (à paraître).
- 4 BIZOURD, RAOULT, GODIN, *Sc. et Ind. spatiales*, n° 3-4 (1965).
- 5 F. RUFENER, *Publications de l'Observatoire de Genève*, série A, fascicule 66 (1964).

Manuscrit reçu le 31 juillet 1968

