

| | |
|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| Zeitschrift: | Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft |
| Herausgeber: | Schweizerische Astronomische Gesellschaft |
| Band: | 37 (1979) |
| Heft: | 170 |
| Artikel: | L'analyse des composants de la haute atmosphère |
| Autor: | Naudet, Jean-Pierre |
| DOI: | https://doi.org/10.5169/seals-899588 |

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 23.02.2026

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

L'analyse des composants de la haute atmosphère

JEAN-PIERRE NAUDET

Introduction

La très forte absorption de l'ozone atmosphérique dans l'ultraviolet en dessous de 3000 Å interdit toute observation d'étoile dans ce domaine spectral à partir du sol. Ce constituant dont la plus grande partie se trouve en dessous de 30 km d'altitude (fig. 1) est formé dans la haute atmosphère où son étude est rendue possible par ses propriétés absorbantes remarquables. Par conséquent, l'emploi d'une nacelle stratosphérique qui permet de s'affranchir de l'absorption des basses couches de l'atmosphère intéresse à la fois l'astronome pour les études stellaires dans l'ultraviolet et l'aéronome pour les mesures optiques de l'ozone et des constituants annexes qui interviennent dans sa formation. L'étude des mécanismes de formation et de destruction de l'ozone ne peut, en effet, s'effectuer sans prendre en compte toute une série de constituants minoritaires (H, OH, NO, NO₂, C1, C1O . . .) qui réagissent chimiquement avec l'ozone. L'abondance de ces constituants dans l'atmosphère est très mal connue et soumise à des variations temporelles marquées, l'existence supposée de certains d'entre eux n'a pas encore été vérifiée expérimentalement. C'est pourquoi l'Observatoire de Genève avec sa nacelle astronomique a entrepris, conjointement avec le Laboratoire de Physique et Dynamique de l'Atmosphère de l'Université Paris VI, un programme d'étude de la stratosphère portant sur la détection des constituants qui jouent un rôle dans la chimie de l'ozone et sur la mesure de leur répartition en fonction de l'altitude. Cet article décrit essentiellement les méthodes de sondages optiques adaptées aux vols stratosphériques: sondage vertical pendant l'ascension du ballon et technique utilisant l'occultation d'un astre par la Terre pendant la période de vol du ballon à altitude constante. Une illustration de leur utilisation est donnée par la mesure de l'ozone.

Principe

L'instrumentation embarquée dans la nacelle, composée d'un télescope associé à un détecteur photoélectrique à

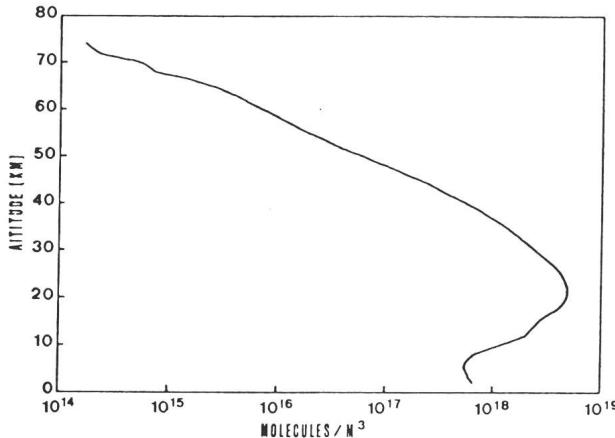


Fig. 1: Modèle de distribution verticale de l'ozone atmosphérique.

Fig. 1: Der Ozongehalt der Atmosphäre als Funktion der Höhe über der Erdoberfläche.

filtres interférentiels, est capable de pointer une étoile et de la suivre automatiquement au gré de la trajectoire du ballon (fig. 2). L'énergie émise par cette étoile subit, en traversant l'atmosphère, une atténuation sélective provoquée par la diffusion moléculaire et l'absorption propre des constituants. Pour une longueur d'onde donnée, la comparaison de l'énergie reçue par le photomètre à bord de la nacelle avec le flux de l'étoile mesuré aux confins de l'atmosphère par les satellites donne l'atténuation atmosphérique le long du trajet optique étoile — photomètre. Connaissant le coefficient d'absorption mesuré au laboratoire du constituant étudié et après déduction de l'atténuation résiduelle due à la diffusion moléculaire calculée à l'aide des modèles de densité atmosphérique, on obtient l'abondance de ce constituant le long du trajet optique. On améliore la précision de la mesure en comparant les flux reçus par le photomètre à deux longueurs d'onde aussi proches que possible l'une de l'autre, la première subissant l'absorption du constituant étudié et, l'autre pas, de façon à servir de référence. Cette mesure de l'absorption différentielle comporte le double avantage de réduire l'influence d'une imprécision sur la connaissance du flux stellaire hors atmosphère et de se satisfaire d'un étalonnage relatif de l'ins-

1. Masselottes
2. Pivot d'azimut
3. Amortisseur à bille
4. Electronique instruments
5. Electronique services
6. Batteries
7. Magnétomètre
8. Télescope - Photomètre
9. Capteur stellaire
10. Caméra TV
11. Miroir sidérostat
12. Caisson amortisseur

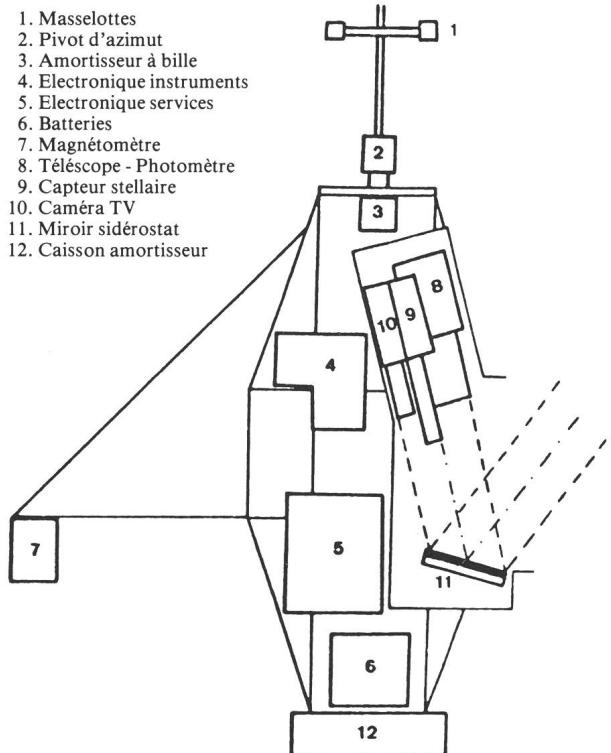


Fig. 2: La nacelle astronomique de l'Observatoire de Genève.

Fig. 2: Die Gondel des Stratosphärenballons des Genfer Observatoriums mit den astronomischen Instrumenten.

trumentation, l'étalonnage absolu étant toujours très délicat à effectuer dans l'ultraviolet.

Les quantités mesurées sont évidemment très faibles. Imaginons, un instant, que l'on puisse ramener l'atmosphère de la Terre à la température et à la pression normales (0°C , 1013 mb), on obtiendrait alors une couche de 8 km d'épaisseur. La contribution de l'ozone à cette épaisseur réduite ne dépasse guère 3 à 4 mm. Son très fort pouvoir d'absorption dans l'ultraviolet qui rend son influence décelable même lorsque l'étoile observée est proche du zénith, autorise l'étude de sa répartition en fonction de l'altitude par sondage vertical pendant l'ascension du ballon.

Cette méthode paraît difficilement applicable aux autres constituants minoritaires dont les concentrations et les coefficients d'absorption sont plus faibles que ceux de l'ozone. On préfère alors mesurer le rayonnement, transmis par l'atmosphère, d'une étoile proche de l'horizon. Cette technique d'occultation qui impose que l'altitude du ballon soit constante, met en jeu des parcours optiques considérables permettant la détection de très faibles concentrations de constituants absorbants. C'est ainsi que l'épaisseur réduite de l'ozone sur le trajet des rayons lumineux passe de 3 mm, au zénith, à 10 cm lorsque ceux-ci traversent tangentiellement l'atmosphère à l'altitude du maximum de concentration de l'ozone (25 km). Le mouvement de l'étoile sur la sphère céleste engendre un balayage vertical de l'atmosphère par les rayons rasants et offre alors la possibilité de déterminer la

distribution des constituants absorbants en fonction de l'altitude.

Sondage vertical

Au départ, le ballon n'est que partiellement gonflé à l'hydrogène, son volume initial étant multiplié par 300 ou 400 pendant la montée. Une fois lancé, le ballon poursuit son ascension jusqu'à ce que l'enveloppe soit entièrement remplie. L'excédent est alors évacué vers l'extérieur et le vol à altitude constante commence. La relative stabilité de la nacelle nécessaire au pointage du télescope sur l'étoile fait que les mesures peuvent difficilement être commencées pour des altitudes inférieures à 25 km. Elles se poursuivront jusqu'à l'altitude de plafond voisine de 40 km pour un ballon de $350\,000\text{ m}^3$. Un baromètre embarqué donne l'altitude de la nacelle. La valeur exacte de l'élévation de l'étoile pointée est calculée, en fonction du temps, à l'aide de la position géographique du ballon que fournit la poursuite radar.

La fig. 3 illustre le type d'enregistrement obtenu. Le signal de l'étoile mesurée séquentiellement à plusieurs longueurs d'onde augmente régulièrement avec l'altitude de la nacelle, par suite de la diminution de l'épaisseur d'atmosphère traversée par les rayons de l'étoile, et donc de leur absorption. Après une interprétation de ces mesures en termes d'épaisseur d'ozone intégrée sur le trajet optique étoile — photomètre, on calcule l'épaisseur réduite au-dessus de la nacelle (fig. 4). Dans le cas le plus général, le facteur qui permet de passer de l'une à l'autre

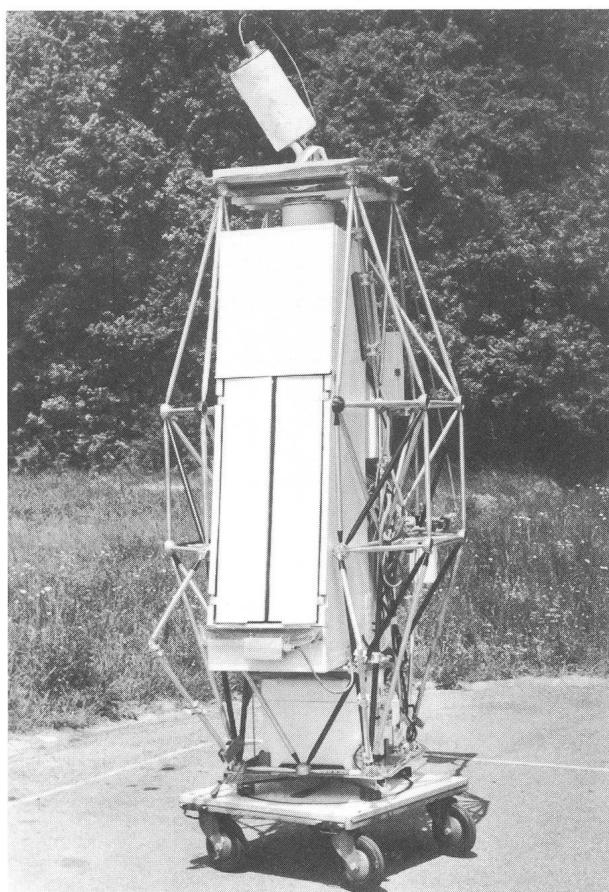


Photo 1: Vue d'ensemble de la nacelle.
Photo 1: Bild der Gondel mit dem Instrumentarium.

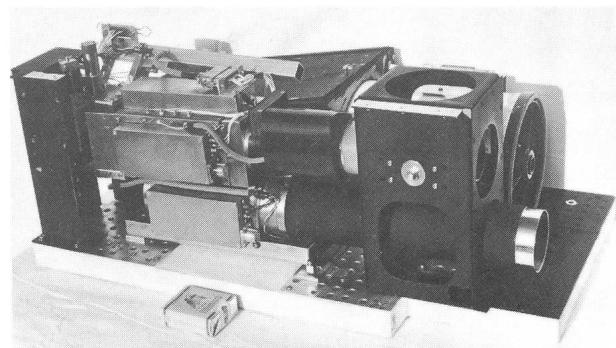


Photo 2: Photomètre U. V. stellaire à huit couleurs composé d'un télescope de 15 cm (en arrière), d'un pointeur d'étoile (au-dessus) et d'une caméra T. V. (en dessous).

Photo 2: UV-Sternphotometer für 8 Wellenlängenbereiche, bestehend aus dem Teleskop von 15 cm Öffnung (im Hintergrund), dem Sternsucher (darüber) und der TV-Kamera (darunter).

de ces grandeurs, prend en compte la courbure de l'atmosphère, dépend de la distance zénithale de l'étoile et nécessite que l'on fasse, à priori, une hypothèse sur l'allure de la distribution verticale du constituant. On peut cependant s'affranchir de cette dernière contrainte lorsque la distance zénithale de l'étoile observée ne dépasse pas 75° . Dans ce cas particulier, on ne commet pas d'erreur appréciable en supposant l'atmosphère plane: l'épaisseur réduite d'ozone au-dessus de la nacelle est alors donnée très simplement par le produit de l'épaisseur intégrée et du cosinus de la distance zénithale (fig. 5). Finalement, la distribution verticale de l'ozone est obtenue par différentiation de son épaisseur réduite par rapport à l'altitude de mesure. La fig. 9 donne un exemple des résultats acquis par sondage vertical au cours de deux vols de ballon.

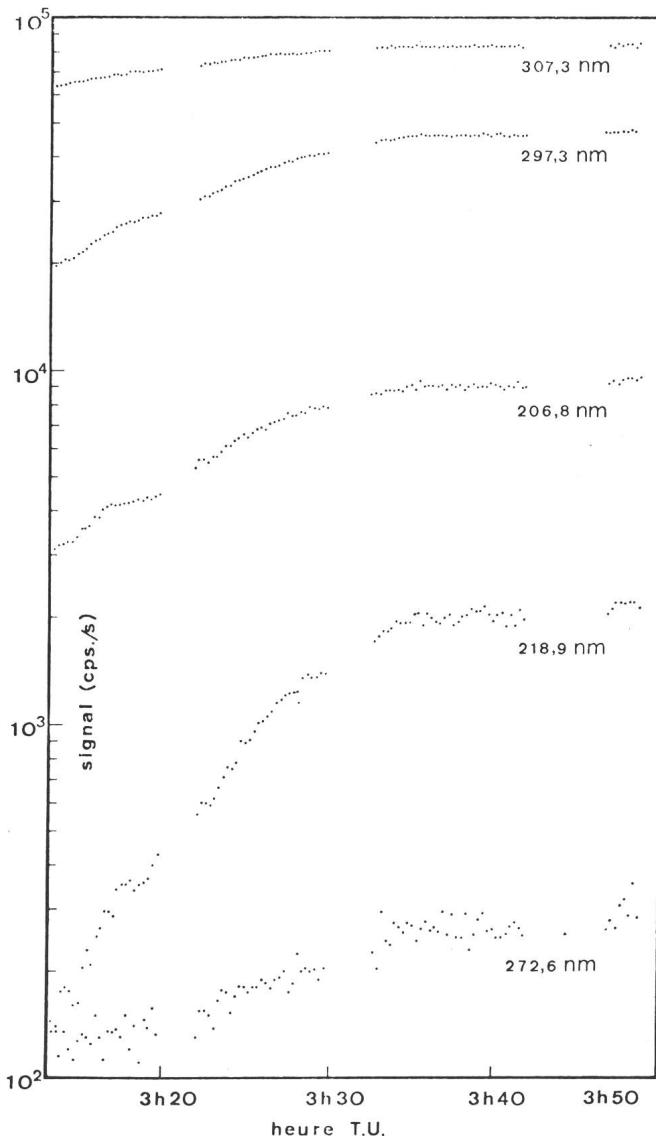


Fig. 3: Signal mesuré séquentiellement à plusieurs longueurs d'onde pendant l'ascension du ballon.

Fig. 3: Registrierungen der Strahlungsstärken eines Sterns in fünf verschiedenen Wellenlängenbereichen während des Aufstiegs des Ballons.

Technique d'occultation

Cette seconde méthode de sondage est mise en oeuvre après que le ballon ait atteint son plafond et que l'altitude de la nacelle se soit stabilisée. Les observations sont effectuées pour des distances zénithales supérieures à 90° jusqu'à ce que l'étoile soit occultée par la Terre. Essayons de nous représenter l'atmosphère comme une série de couches sphériques et concentriques d'épaisseur, à l'intérieur de chacune desquelles tous les paramètres (pression, température, concentrations . . .) sont supposés constants. A mesure que l'étoile descend sur l'horizon, ses rayons parviennent à la nacelle après avoir traversé des couches d'atmosphère de plus en plus proches du sol (fig. 6). La distance parcourue dans chaque couche par le rayon de l'étoile reçu par la nacelle varie avec la distance zénithale. Elle est maximum lorsque l'altitude minimum de la trajectoire du rayon est égale à l'altitude de cette couche. L'acuité de ce maximum

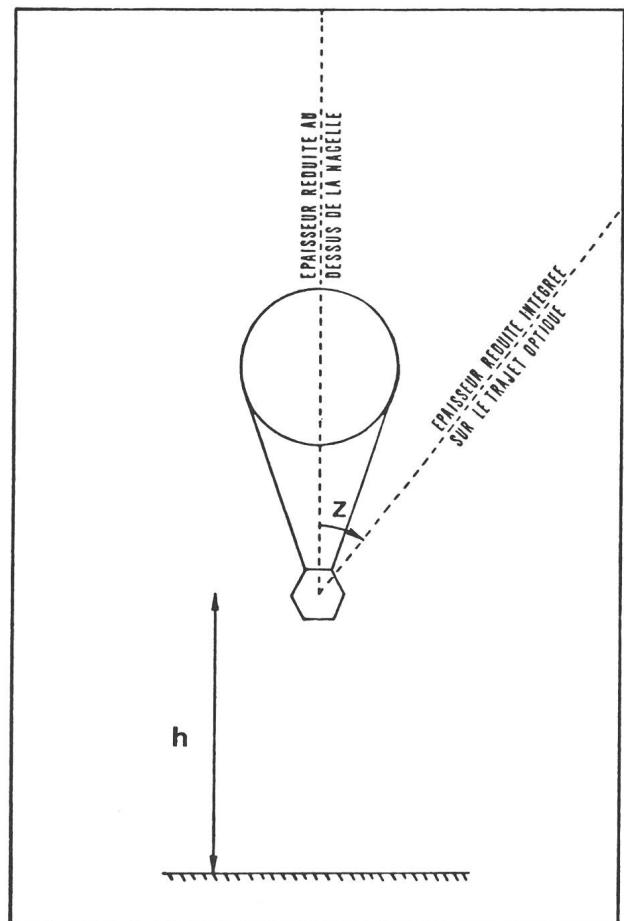


Fig. 4: Géométrie de la méthode de sondage vertical (Z = distance zénithale de l'étoile, h = altitude de la nacelle).

Fig. 4: Schema der ersten Methode der Messungen beim Aufstieg (Z = Zenitdistanz des gemessenen Sterns, h = Höhe der Gondel über der Erdoberfläche).

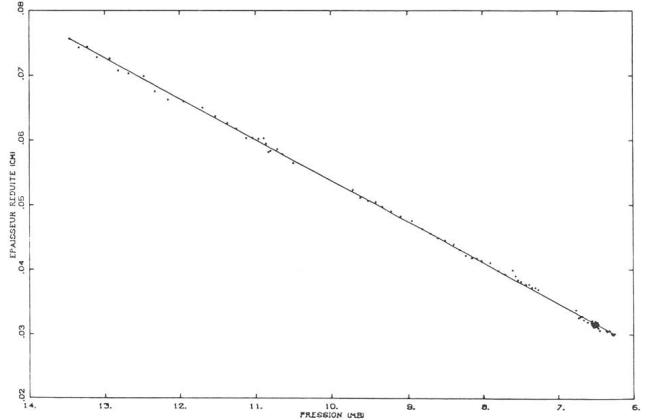


Fig. 5: Epaisseur réduite d'ozone au-dessus de la nacelle en fonction de l'altitude.

Fig. 5: Die reduzierte Ozonschichtdicke oberhalb der Gondel als Funktion der Höhe über der Erdoberfläche.

(fig. 7) élimine toute ambiguïté dans la détermination de l'altitude d'une couche absorbante.

A la fin de l'occultation de l'étoile par la Terre, on dispose de toute une série de mesures de l'atténuation du flux de l'étoile sur des parcours optiques intéressant un

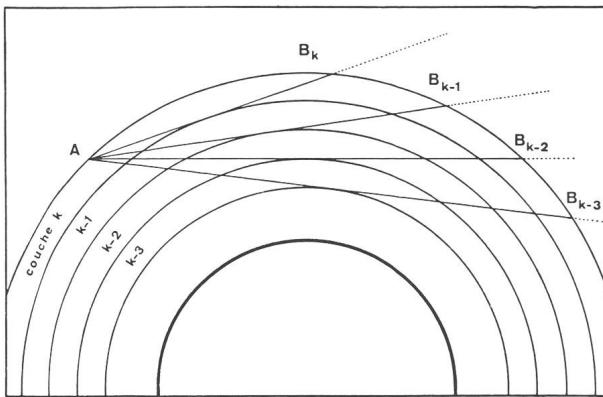


Fig. 6: Géométrie de la méthode de sondage utilisant l'occultation d'un astre par la Terre.

Fig. 6: Schema der zweiten Methode der Sondierung, bei der die allmähliche Bedeckung eines Sterns durch die Erde benutzt wird.

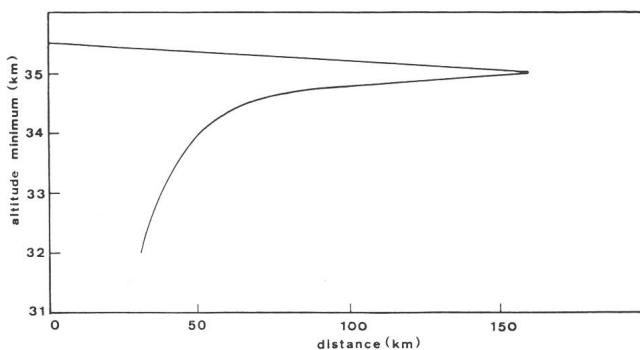


Fig. 7: Longueur du trajet des rayons lumineux de l'étoile à l'intérieur d'une couche d'atmosphère épaisse de 500 m à 35 km d'altitude, en fonction de l'altitude minimum de leur trajectoire.

Fig. 7: Länge des Lichtweges von einem Stern innerhalb einer atmosphärischen Kugelschale der Dicke 500 m in 35 km Höhe als Funktion der minimalen Höhe dieses Lichtweges über der Erdoberfläche.

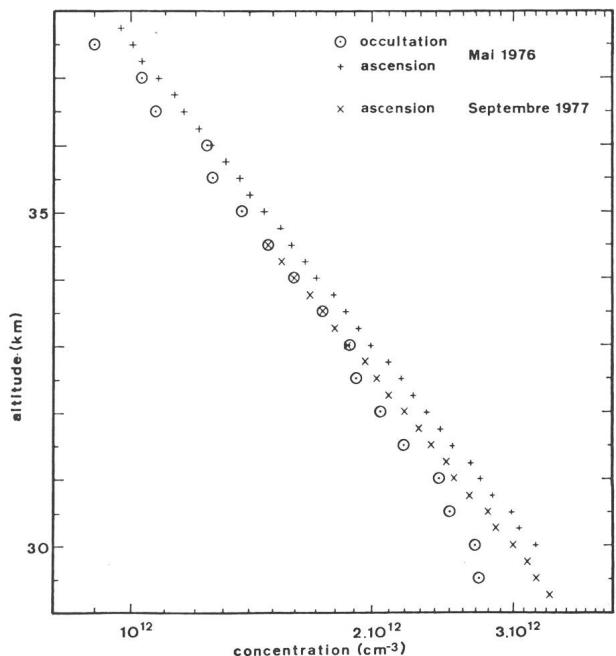


Fig. 9: Distributions verticales de l'ozone (molécules par cm^{-3}) obtenues par sondage vertical et par la technique d'occultation.

Fig. 9: Die vertikale Verteilung des Ozons (Moleküle pro cm^{-3} in verschiedenen Höhen über der Erdoberfläche) nach den beiden angewandten Methoden.

de connaître son coefficient d'absorption. Il existe alors tout un choix de méthodes mathématiques pour inverser ces mesures afin de déterminer la distribution verticale du constituant absorbant, c'est-à-dire sa concentration dans chacune des couches traversées par les rayons stellaires éclairant la nacelle.

Cette méthode de sondage implique évidemment que les propriétés de l'atmosphère soient homogènes dans le plan horizontal. Hormis les périodes du coucher et du lever du soleil où la haute atmosphère est le siège d'un déséquilibre photochimique dû à la variation rapide de son éclairement, les phénomènes stratosphériques n'accusent pas de variations horizontales importantes.

En dessous de 3500 Å, le coefficient d'absorption de l'ozone augmente très rapidement pour atteindre sa valeur maximum vers 2500 Å. La figure 8 donne un exemple de signaux obtenus, dans ce domaine spectral, pendant l'occultation de l'étoile Alpha Leo par la Terre. On observe que la décroissance du signal sur chaque filtre s'amorce d'autant plus tôt que le flux stellaire à la longueur d'onde du filtre est plus absorbé par l'ozone. Cette décroissance s'explique évidemment par l'augmentation de la quantité d'ozone sur le trajet optique étoile — photomètre au fur et à mesure que l'étoile descend sur l'horizon. Cet effet est d'ailleurs renforcé par la diffusion moléculaire qui augmente quand la longueur d'onde décroît. A cette variation lente, il se superpose des oscillations rapides et irrégulières provoquées par des variations accidentnelles de l'altitude du ballon: une excursion en altitude de la nacelle modifie la longueur du trajet des rayons reçus et donc leur atténuation. La figure 9 donne une mesure de la distribution verticale de l'ozone obtenue par la méthode d'occultation.

Conclusion

Les observations stratosphériques s'inscrivent dans le

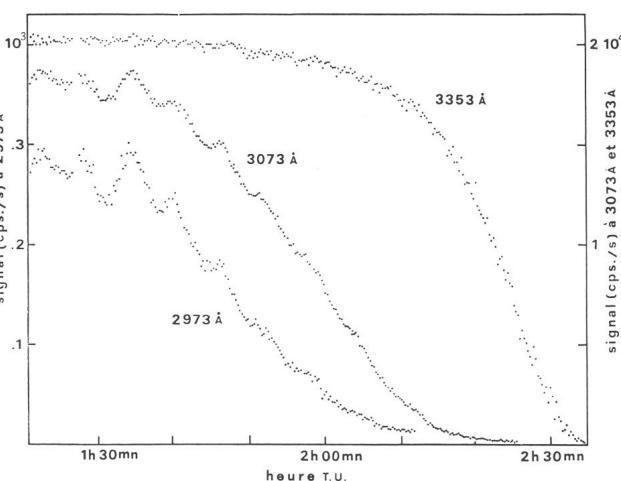


Fig. 8: Signal mesuré séquentiellement à plusieurs longueurs d'ondes au cours de l'occultation d'une étoile par la Terre.

Fig. 8: Registrerungen der Strahlungsstärken eines Sterns in drei verschiedenen Wellenlängenbereichen im Verlauf der Bedeckung des Sterns durch die Erde.

nombre croissant de couches de l'atmosphère. Après déduction de la diffusion moléculaire et de l'absorption des autres constituants, on obtient la quantité du constituant étudié le long de chaque trajet optique, à condition

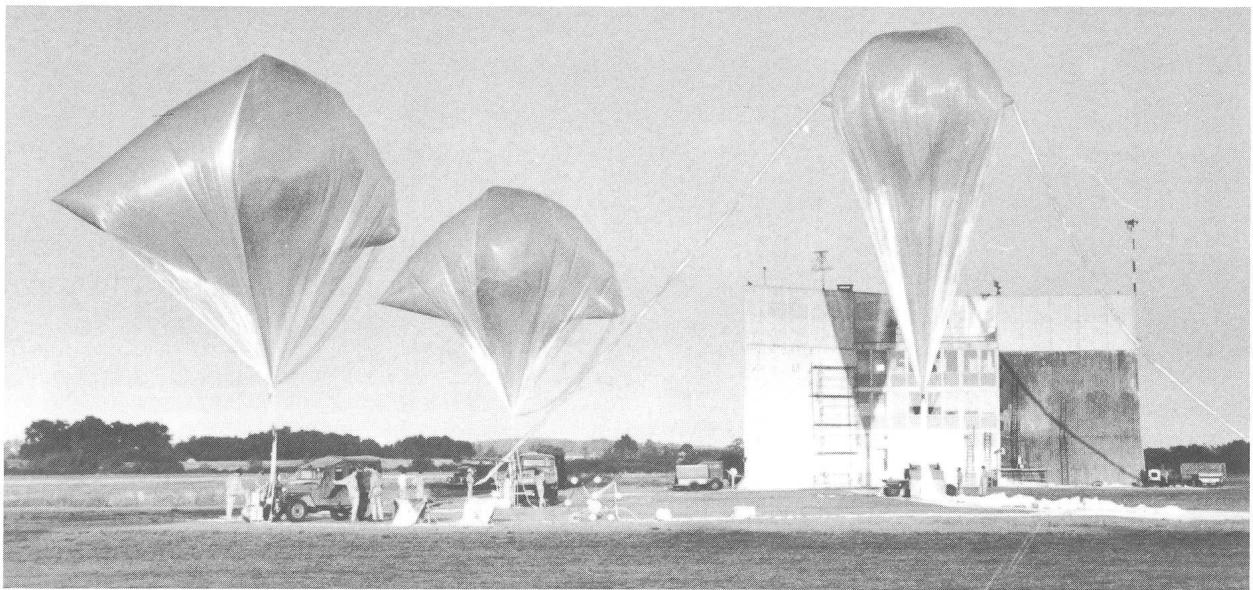


Photo 3: Sur la base de lancement, quelques minutes avant le départ, on achève de gonfler le ballon principal (à droite).

Photo 3: Einige Minuten vor dem Start wird bei der Aufstiegsbasis das Füllen des grossen Ballons vollendet.

contexte d'actualité que l'on connaît, né de l'inquiétude d'une possible destruction d'origine anthropogénique d'une partie de la couche d'ozone (effluents rejetés par les avions supersoniques volant à haute altitude, diffusion vers la haute atmosphère des fréons utilisés dans les «sprays»). Une telle destruction provoquerait un accroissement du flux solaire ultraviolet au niveau du sol avec, en particulier, des effets biologiques mal connus.

A ce jour, malgré de récentes et nombreuses études de la stratosphère effectuées dans plusieurs pays, aucune théorie ne permet de trancher le problème avec certitude. La complexité du milieu stratosphérique laisse le débat ouvert.

Adresse de l'auteur:

JEAN-PIERRE NAUDET, Observatoire de Genève, CH-1290 Sauverny.

Zusammenfassung

Die Erforschung der Zusammensetzung der oberen Atmosphäre

Da sich der grösste Teil des Ozons unterhalb von 30 km Höhe befindet, verschafft uns die Benutzung eines Stratosphärenballons den doppelten Vorteil, dass man dadurch einerseits in den Sternspektren das ferne UV erreicht, und andererseits die Verteilung des Ozons, sowie der Elemente und Moleküle, die bei der Ozonbildung eine Rolle spielen, bestimmen kann. Vor allem diesem letzteren Ziel dienen die vom Genfer Observatorium gemeinsam mit dem Pariser aerodynamischen Universitätsinstitut unternommenen Stratosphärenballon-Aufstiege. Im vorliegenden Artikel werden die zwei Methoden beschrieben, die hierbei in Anwendung kommen: 1. Die Messungen während des Aufsteigens der Gondel und die damit erhaltene Ozondichte in verschiedenen Höhen. 2. Die Beobachtungen der allmählichen Bedeckung eines Sterns durch die Erde bei der Position der Gondel in ihrer maximalen, dann gleichbleibenden Höhe, und die daraus gewonnenen Dichten verschiedener Substanzen.

Im Prinzip handelt es sich darum, dass man die Sternstrahlung in speziell ausgesuchten, engen Spektralbereichen, was mit Hilfe von Interferenzfiltern gelingt, photoelektrisch misst. Durch Vergleich mit der entsprechenden Sternstrahlung außerhalb der Atmosphäre oder durch Vergleich der Strahlung in zwei geeignet gewählten Spektralgebieten kann man bei Kenntnis der Absorptionskoeffizienten des Ozons oder anderer Substanzen unter Berücksichtigung der Lichtschwächung wegen der Streuung an den Luftmolekülen die im Lichtweg wirksame Menge des Ozons oder der andern Substanzen ableiten. Diese Methode funktioniert gut beim Ozon, doch müssen auch hier die Messungen sehr genau sein, da der Effekt klein ist. Bei andern Substanzen, deren Häufigkeit geringer ist als die des Ozons, und deren Absorptionskoeffizienten zudem meist noch

kleiner sind, genügt sie nicht. Hier kommt die zweite Methode in Frage, man muss den Stern sehr nahe beim Horizont beobachten, wo der Lichtweg durch die Atmosphäre viel länger ist, so dass die Absorption grösser wird. Da sich in diesem Fall die Länge des Lichtweges und damit auch die gesamte Absorption mit der Zenitdistanz sehr rasch ändert, erhält man durch die Beobachtung des Sterns während seines Aufgehens oder Untergehens zudem noch die jeweilige Menge der betreffenden Substanz in verschiedenen Höhen in der Atmosphäre.

Der Aufstieg des Ballons, die Messungen in Höhen der Gondel zwischen 25 und 40 km und die Reduktionen nach der ersten Methode werden kurz beschrieben und durch Zeichnungen erläutert. Ausführlicher wird sodann auf die zweite Methode eingegangen. Der Weg der Strahlen durch die Atmosphäre, die man sich in konzentrische Schichten gleicher Dicke zerlegt denkt, bei Zenitdistanzen nahe 90 Grad, die dabei durchgeführten Registrierungen und die Ableitung der Substanzmengen in den erwähnten Atmosphärenschichten werden diskutiert. Als Beispiel sind die Registrierungen der Strahlung des Regulus in drei Wellenlängenbereichen, in denen der Absorptionskoeffizient des Ozons zunimmt, bei seinem Untergehen gezeigt und erklärt. Die Ergebnisse, die nach beiden Methoden für die Ozondichte erhalten wurden, sind in der Fig. 9 dargestellt.

Schliesslich wird noch auf die häufig diskutierten, folgenschweren Möglichkeiten hingewiesen, dass die Ozonschicht durch menschliche Einflüsse verändert werden kann. Die Verhältnisse sind dabei derart kompliziert, dass auch die neusten Überlegungen und Messungen noch keinen Entscheid bringen, ob und wie weit sich solche Einflüsse auswirken.

Prof. H. Müller