La camera Gianini : un instrument à courte distance focale qualifié pour la détermination précise des vents thermosphériques

par

E. VAN HEMELRIJCK

Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique Avenue Circulaire 3 – 1180 Bruxelles (Belgique)

RESUME. – Lors de l'expérience NO-II de lâcher de gaz, réalisée par l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique en 1974, des caméras Gianini à courte distance focale ont été installées en deux stations d'observation.

Les caméras, équipées d'un objectif Super-Faron de 77 mm de distance focale ouvert à $F/_D = 0.87$, sont munies d'un film 36 mm, type Kodak 2485, le champ étant environ $18 \times 26^\circ$. La monture de la caméra est du type équatorial et sa tourelle est fixée sur un pied en aluminium ayant comme base un socle en béton.

Bien que ces caméras étaient essentiellement réservées à des études isodensitométriques, elles se sont révélées comme des instruments de triangulation de haute qualité vu la précision extrêmement élevée avec laquelle les altitudes des nuages artificiels et les vitesses des vents ont pu être déterminées, notamment (40 ± 10) m et de l'ordre de 1 ms⁻¹ pour un intervalle de temps écoulé entre deux positions déterminées du nuage de 30 à 50 secondes.

Dans cet article, quelques résultats relatifs au comportement dynamique de la thermosphère inférieure sont également discutés.

ABSTRACT. – During the NO-II gas release experiment, realised in 1974 by the Belgian Space Aeronomy Institute small focal length Gianini cameras were installed at two different observing sites.

These cameras are equiped with a 77 mm focal length Super-Faron lens, opened at $F/_D = 0.87$, and a 36 mm Kodak 2485 film. The field of view is about $18 \times 26^\circ$. They are supplied with a so-called equatorial frame fixed on an aluminium support, the latter being sealed to a concrete base.

Although essentially reserved to isodensitometrical studies, they have revealed themselves as high quality triangulation instruments in view of the extremely high accuracies with which the altitudes of the artificial clouds and the wind speeds have been obtained, respectively (40 \pm 10) m and of the order of 1 ms⁻¹ for time intervals from 30 to 50 seconds between two successive position determinations of the cloud.

In this paper, a few results with respect to the dynamical behaviour of the lower thermosphere are also discussed.

1. Introduction

L'expérience NO-II, réalisée par l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique (IAS) les 12 et 13 septembre 1974 à partir de la base de lancement du Centre Spatial Guyanais (Kourou), consistait en des lâchers ponctuels d'une quantité connue de monoxyde d'azote dans la thermosphère inférieure.

Les trois charges utiles, lancées par des fusées Centaure II-C, se composait de quatre bonbonnes contenant le gaz à éjecter et devant être ouvertes à des altitudes différentes entre 80 et 105 km.

Le but principal était la détermination de la distribution verticale de l'oxygène atomique pendant la nuit par la mesure de la chimiluminescence de la réaction NO + O \rightarrow NO₂ + $h\nu$.

Par l'application des méthodes astrométriques et sensitométriques d'autres résultats intéressants ont été obtenus tels que les altitudes des nuages et leurs dimensions en fonction du temps, la vitesse et la direction des vents.

L'altitude est un des paramètres dont une détermination très précise s'avère indispensable pour procéder au dépouillement des données acquises à partir du sol. D'autre part, l'observation optique du mouvement ou de la distorsion des nuages artificiels, nécessitant une mesure de la position et de l'altitude à des temps séparés, conduit au calcul des vents. Dans cet article, nous nous bornerons essentiellement à quelques aspects dynamiques de l'expérience en question.

Bien que la seule utilisation des caméras de triangulation de l'IAS (Debehogne, Lippens, Van Hemelrijck et Van Ransbeeck, 1976) permette déjà d'obtenir les altitudes et les vitesses des vents, il ne faut pas écarter la possibilité d'un mauvais fonctionnement de ces caméras par suite de circonstances imprévues (pannes mécanique, électronique ou optique, pointage incorrect, manipulation mauvaise, etc.). Il s'avère donc indispensable de disposer d'instruments photographiques pour doubler les caméras défectueuses ou fournir des résultats supplémentaires.

La mise en service de la caméra Gianini à courte distance focale répond à cette exigence.

Toutefois, son usage est réservé essentiellement à des études isodensitométriques permettant de déduire les dimensions des nuages artificiels en fonction du temps et de déterminer la concentration de certains constituants de la haute atmosphère.

Dans ce qui suit, nous décrivons la caméra et nous présentons quelques résultats de la réduction des clichés obtenus.

2. Description de la caméra

Les deux caméras Gianini (Fig. 1), fortement modifiées, dont l'IAS dispose, sont équipées d'un objectif Super-Faron de 77 mm de distance focale (valeur indiquée sur l'objectif), ouvert à $F/_D = 0.87$, traduisant un système optique très lumineux. Notons que par une méthode astrométrique, mise au point par Justus, Edwards et Fuller (1964) des distances focales respectivement de 76.9 et 77.3 mm ont été obtenues. Ces caméras sont pourvues d'un obturateur et le déplacement du film se commande par impulsion électrique. La séquence de prise de vue est déterminée par la vitesse de déroulement du film. Les temps de pose disponibles sont respectivement 1, 2, 5, 10 et 20 secondes. Ces caméras sont munies d'un film 36 mm, type Kodak 2485 (sensibilité : 8000 ASA), contenu dans un magasin dont la capacité permet un temps d'observation de plus d'une heure pour un rythme de 1 photo toutes les deux secondes. Le format des négatifs est de 24 × 36 mm, représentant un champ approximatif de 18 × 26° (l'échelle valant $1'' = 0.4 \,\mu\text{m}$).

Le circuit électrique des caméras est alimenté par une tension de 110 V ; une tension de 20 V est nécessaire pour les impulsions.

La monture de la caméra est du type équatorial et sa tourelle est fixée, comme dans le cas des caméras de triangulation, sur un pied en aluminium ayant la forme d'un cône tronqué. Un socle en béton assure la stabilité ; scellée dans ce socle une plaque métal-



Fig. 1

Vue générale de la caméra Gianini avec sa tourelle bidimensionnelle permettant l'orientation selon deux axes (azimut et élévation). La tourelle elle-même est montée sur un pied en aluminium sous forme d'un cône tronqué d'une hauteur d'environ 1.25 m.

lique, munie de trois boulons, permet la mise de niveau. L'ensemble est étudié de manière à assurer une rotation facile et un pointage rapide.

Ce pointage, à 10' près dans la direction de visée, prévue et calculée à partir des coordonnées des stations d'observation et de la trajectoire théorique des fusées, s'effectue à l'aide de cercles gradués permettant également une remise à zéro.

3. Réduction des clichés

Plusieurs clichés, 52 au total, ont été réduits en vue de déterminer l'altitude des nuages artificiels et la vitesse des vents règnant aux altitudes d'éjection.

Le format des négatifs étant relativement petit l'identification des étoiles, figurant sur les images photographiques, a posé des problèmes non-négligeables; une quarantaine d'étoiles seulement ont été reconnues de sorte que nous n'avons pas pu appliquer la méthode des étoiles-tests (Debehogne et Van Hemelrijck, 1974). Toutes les étoiles mesurées ont été traitées comme des étoiles de base (ou de référence) et, en conséquence, la moyenne arithmétique des résidus, représentant les différences entre les coordonnées équatoriales (ascension droite α et déclinaison δ) calculées et celles données par les catalogues, n'est qu'une mesure de l'erreur interne de la réduction effectuée par une transformation polynômiale complète du 3^e degré.

Tenant compte de la courte distance focale de l'instrument photographique, la précision moyenne se révèle très satisfaisante, particulièrement pour calculer l'altitude des nuages artificiels. En effet, pour la caméra installée à la station d'observation Météo on a obtenu, respectivement en α et δ , $(8.7 \pm 0.6)''$ et $(8.2 \pm 0.8)''$; les précisions de l'instrument situé à Montabo étaient de $(8.7 \pm 0.5)''$ et $(6.7 \pm 0.5)''$.

A titre d'information, mentionnons que De Jager (1961) a fait état d'une précision sur les deux coordonnées équatoriales de l'ordre de 14" avec une caméra Schmidt ($F = 85 \text{ mm}, F/_D = 0.7$) comparable, en conséquence, à la caméra Gianini.

3.1. Les altitudes des nuages artificiels

Les altitudes des nuages artificiels en fonction du temps ont été déterminées par une méthode numérique mise au point par Debehogne et Van Hemelrijck (1972, 1973). Les résultats obtenus au temps t = 0 (moment du lâcher de gaz) sont reportés au tableau 1.

Tableau 1

Valeurs des altitudes obtenues au temps t = 0 avec les caméras Gianini lors de l'expérience NO-II. Le premier chiffre après la spécification NO-II se rapporte au numéro du nuage formé. Les colonnes 2 et 3 présentent les altitudes Z(1) et Z(2)déterminées respectivement à partir des deux stations d'observation. La colonne 4 donne l'altitude moyenne : Z = [Z(1) + Z(2)]/2; la colonne 5 montre la précision sur l'altitude : $\Delta Z = |Z(1) - Z(2)|/2$.

Nuage	Z(1)	Z (2)	Z	Δ <i>Ζ</i>
	(km)	(km)	(km)	(m)
NO-II-1-1	85.492	85.533	85.513	21
NO-II-1-2	90.940	90.776	90.858	82
NO-II-2-1	80.723	80.770	80.747	24
NO-II-3-1	83.730	83.817	83.774	44
NO-II-3-2	89.199	89.148	89.174	26
NO-II-3-3	104.470	104.371	104.421	50

A l'examen de ce tableau il s'ensuit que la précision moyenne $\Sigma \Delta Z/n$ sur toutes les altitudes est égale à (40 ± 10) m, l'écart de 10 m traduisant l'erreur moyenne sur la précision moyenne. A notre connaissance, une telle précision sur l'altitude n'a jamais été signalée dans la littérature. En général, on trouve une précision de l'ordre de 100 m jusqu'à 100 km (Llyod, 1971; Bedinger, 1972). Pour rappel, la précision obtenue avec la caméra de triangulation lors de la même expérience était de (90 ± 5) m. Il convient de souligner que de telles valeurs peuvent seulement être obtenues au-dessous de la turbopause, là où les détails sont mieux précisés à cause de la turbulence atmosphérique.

Nous avons constaté que la distribution de la précision moyenne sur l'altitude présente une corrélation avec le temps après la formation du nuage artificiel (Fig. 2).



Précision moyenne sur l'altitude des nuages artificiels formés entre 80 et 105 km en fonction du temps après éjection du gaz.

La droite de corrélation, calculée par la méthode des moindres carrés, donne lieu à une diminution de la précision de l'ordre de 100 % (ou de 40 à 80 m) lorsque le temps accroît de 0 à 30 secondes. Le décroissement de la précision observée est incontestablement lié aux difficultés rencontrées pour déterminer exactement la position du centre du nuage artificiel en fonction du temps. En effet, les vitesses d'expansion et de diffusion augmentent progressivement le diamètre du nuage et, en conséquence, le centre de son image devient de plus en plus difficile à localiser. Parmi les autres causes d'erreurs de positionnement citons encore un effet de distorsion dû au cisaillement par les vents atmosphériques, une illumination inégale du rayonnement solaire au cas d'une réaction chimiluminescente et une structure irrégulière du nuage.

Tous les négatifs ont été analysés à l'aide d'un isodensitraceur à quatre couleurs de la marque Joyce et Loebl afin de déterminer, non seulement le profil de la densité optique, mais aussi la variation du rayon du nuage en fonction du temps.

Chaque image isodensitométrique est étudiée suivant quatre axes à 45°, correspondant à 8 rayons, le centre du nuage étant pris comme origine de ces axes.

Le rayon du nuage sur le tracé isodensitométrique est défini comme étant la distance pour laquelle l'expo-



Fig. 3

Rayon moyen (R) des nuages artificiels formés entre 80 et 91 km en fonction du temps après éjection du gaz.

sition énergétique est inférieure à la valeur maximale par un facteur e. Le rayon réel du nuage est proportionnel au rayon sur le tracé d'isodensité. On le calcule en tenant compte de l'agrandissement de l'image originale par l'isodensitraceur (200 fois), de la distance caméra-nuage artificiel et enfin de la distance focale de l'objectif utilisé. Les rayons moyens R obtenus en fonction du temps sont représentés à la figure 3.

A l'examen des figures 2 et 3 il en résulte que la précision moyenne sur la détermination de l'altitude est approximativement égale à la moitié du rayon moyen du nuage artificiel en fonction du temps.

3.2. La vitesse des vents

Comme nous l'avons déjà signalé précédemment, la vitesse des vents a été déterminée par la réduction de 52 photos prises avec les caméras Gianini. L'intervalle de temps entre deux photos successives est de 2 et 5 secondes respectivement pour le premier et le troisième tir. Lors du deuxième tir, l'intensité lumineuse du nuage était très faible ; ne disposant que d'une photo dépouillable la vitesse du vent à 80.7 km n'a pas pu être calculée.

Le tableau II représente des valeurs moyennes obtenues de la combinaison des différentes photos prises du même nuage.

De l'analyse de ce tableau on peut tirer les conclusions suivantes :

1) Les vents verticaux, généralement difficiles à mesurer et étant normalement d'une magnitude plus petite que les vents horizontaux, sont faibles et même négligeables à 83.7, 85.5 et 90.9 km. Toutefois, il ne s'agit pas d'une règle générale. En effet, en 1969, des vitesses relativement élevées, notamment 25 et 35 ms⁻¹ ont été observées à l'altitude de 160 km (Ackerman et Van Hemelrijck, 1971). A cette époque, ces vitesses étaient les plus importantes jamais déterminées. Depuis lors, quelques valeurs encore plus élevées ont été signalées dans la littérature : 42 ms^{-1} (Rieger, 1974), 65 ms⁻¹ (Knutson, Kayser et Potter, 1977) et même 80 ms⁻¹ (Spencer, Theis, Wharton et Carignan, 1976).

2) Lors des tirs la thermosphère inférieure, dans la zone étudiée, était très stable, le cisaillement du vent ne dépassant jamais une valeur de 0.008 s^{-1} . Par définition, le cisaillement se traduit par la variation de la vitesse horizontale en fonction de l'altitude. A titre d'information, on trouve pour ces cisaillements une valeur moyenne d'environ 0.03 s^{-1} bien que des valeurs proches de 0.1 s^{-1} ne soient pas exclues (Bedinger, 1972).

Tableau II

Valeurs numériques des différentes composantes de la vitesse des vents en fonction de l'altitude. Le chiffre entre parenthèses, accompagnant l'indication de l'altitude, désigne le numéro du tir. Les tirs ont été réalisés respectivement à $22^{h}22^{m}(1)$ et $22^{h}24^{m}(3)$ temps universel. La vitesse verticale précédée d'un signe négatif représente un mouvement descendant.

Altitude (km)	Vitesse totale du vent (ms ⁻¹)	Vitesse verticale (ms ⁻¹)	Vitesse horizontale (ms ⁻¹)	Vent méridional $(S \rightarrow N)$ (ms^{-1})	Vent zonal $(O \rightarrow E)$ (ms^{-1})
83.7 (3)	53	6	53	- 48	22
85.5 (1)	78	-7	78	- 4	78
89.2 (3)	34	12	32	- 27	- 18
90.9 (1)	36	2	36	- 23	- 28
104.5 (3)	46	14	44	43	- 8

3) La structure en spirale, caractérisant souvent les profils verticaux des vents horizontaux notamment dans la basse thermosphère, et suivant laquelle le vecteur vent tourne dans le sens anticyclonique (du moins dans l'hémisphère nord) lorsque l'altitude augmente a été mise en évidence au cours du troisième tir pour lequel la vitesse a été obtenues à trois altitudes différentes (Fig. 4).



Hodographe de la vitesse horizontale des vents (expérience NO-II-3). Le nombre, affectant l'extrémité de chaque vecteur, donne l'altitude à laquelle la vitesse du vent est mesurée.

Le phénomène de stratification, autre caractéristique des vents dans la thermosphère inférieure, n'a pas été détecté car son observation ne s'avère possible que par des éjections sous forme de traînées.

Le déplacement du nuage artificiel étant obtenu à partir de deux déterminations d'altitude, il en résulte (Bedinger, 1972) que la précision sur la valeur absolue du déplacement est égale à 2x, x étant la précision sur l'altitude. Pour un intervalle de temps de ysecondes la précision sur la vitesse du vent vaut donc 2x/y.

En supposant, pour l'expérience NO-II, une précision optimale sur l'altitude de (40 ± 10) m, la courbe (Fig. 5) représentée par des croix montre la précision moyenne avec les barres d'erreur correspondantes sur la vitesse du vent horizontal en fonction de l'intervalle de temps entre deux positions déterminées du nuage.

D'autre part, en calculant l'écart moyen entre la vitesse horizontale moyenne (Tableau II) et toutes les vitesses obtenues de la combinaison des différents clichés à intervalle de temps constant, nous obtenons les valeurs représentées par des points. Par tous ces



Fig. 5

Précision moyenne de la vitesse horizontale du vent en fonction de l'intervalle de temps écoulé entre deux positions déterminées du nuage.

points ainsi obtenus une courbe moyenne a été tracée (Fig. 5).

A l'examen de cette figure, trois constatations peuvent être faites. La première est que la courbe expérimentale donne des précisions meilleures que celles obtenues par la relation 2x/y. L'écart résulte vraisemblablement d'une différence d'interprétation du terme "précision". En effet, il ne faut pas perdre de vue, que la courbe représentée par les croix traduit plutôt une précision minimale, tandis que celle tracée par les points correspond à une précision vraie (ou observée).

D'autre part, pour des intervalles de temps dépassant environ 15 secondes des précisions moyennes supérieures à 3 ms^{-1} ont été constatées.

Enfin, la précision maximale tend vers une valeur de 1 ms^{-1} entre 30 et 50 secondes. Cette valeur est supérieure à celles (3 à 5 ms⁻¹) rapportées dans la littérature (Rosenberg et Justus, 1966; Murphy et Bull, 1968; Bedinger, 1972; Rieger, 1974; Bedinger, 1977).

4. Conclusions

Pour qu'un instrument photographique puisse servir comme caméra de triangulation, il doit satisfaire à une série de conditions techniques sévères dont les principales sont (Massevitch, 1962; Futailly, 1974): un système optique très lumineux impliquant, en général, une grande ouverture et une distance focale moyenne, un objectif ne présentant pas de distorsion (radiale ou tangentielle), des temps d'ouverture et de fermeture égaux, une précision sur le temps supérieure à la milliseconde, une monture assurant une rotation aisée et un pointage rapide dans la direction de visée, un support stabilisé, ainsi que des dispositifs évitant des vibrations lors de la prise de vue. Enfin, le transport et le montage de la caméra à la station d'observation ne peuvent pas poser de difficultés sérieuses.

Malgré sa courte distance focale, la caméra Gianini répond à l'ensemble des exigences mentionnées cidessus. Bien que des caméras de ce genre sont peu utilisées pour la détermination de paramètres aéronomiques de la haute atmosphère terrestre, la Gianini s'est révélée comme un instrument de très haute qualité vu la précision extrêmement élevée avec laquelle les altitudes des nuages artificiels et les vitesses des vents ont pu être déterminées. Cette précision dépend dans une large mesure des incertitudes sur la localisation du centre du nuage. L'expérience nous a montré qu'elles peuvent être minimisées en imposant les impératifs suivants :

a) Des temps de pose relativement courts (2 à 5 secondes) au début du lâcher du gaz. L'image du nuage sur le cliché photographique est, par conséquent, ponctuelle (ou plus exactement circulaire) permettant ainsi une mesure plus précise.

b) Des analyses du cliché poussées à des niveaux très élevés, par exemple par un choix de formules de transformation polynômiales bien adaptées à la caméra et au champ stellaire traité.

c) Des études densitométriques très soignées.

Ces trois règles demandent évidemment des travaux élaborés et fastidieux, mais permettent de gagner quelques dixièmes et parfois même quelques secondes d'arc dans la détermination de la position du nuage. Toutefois, l'application pratique n'est recommandée que si le nombre de clichés à réduire est restreint (cas des nuages artificiels). Dans le cas contraire (satellites artificiels par exemple), on est obligé de sacrifier une très haute précision à une automatisation éventuelle qui, elle aussi, peut donner des résultats satisfaisants (Barlier, 1970).

Manuscrit reçu le 25.06.80 sous sa forme définitive le 2.07.80

References

Ackerman M. and E. Van Hemelrijck, "Measurements of upper atmospheric winds at 160 and 275 km", J. Geophys. Res., 76, 3162-3163, 1971.

- Barlier F., "Méthode de réduction photographique utilisée à l'Observatoire de Meudon. Cas d'un cliché à grand champ", COSPAR Transactions, 7, 217-225, 1970.
- Bedinger J.F., "Thermospheric motions measured by chemical releases", Space Research, 12, 919-934, 1972.
- Bedinger J.F., "Observation of neutral winds during an equatorial electrojet", J. Atm. Terr. Phys., 39, 241-242, 1977.
- Debehogne H., C. Lippens, E. Van Hemelrijck et E. Van Ransbeeck, "La caméra de triangulation de l'IAS", Ann. Géophys., 32, 195-201, 1976.
- Debehogne H. et E. Van Hemelrijck, "Formules de base pour la détermination de l'altitude des nuages artificiels", Bull. Ac. Sci. Belgique, Cl. Sci., 58, 513-535, 1972.
- Debehogne H. et E. Van Hemelrijck, "L'astrométrie appliquée aux nuages artificiels", Ciel et Terre, 89, 91-109, 1973.
- Debehogne H. et E. Van Hemelrijck, "Méthode des moindres carrés appliquée à la réduction des clichés astrométriques", Acta Astronomica, 24, 309-317, 1974.
- De Jager C., "Satellite photography by means of small Schmidt cameras", Space Research, 2, 47-49, 1961.
- Futaully R., "Techniques, apports et avenir des principales méthodes de photographie des satellites artificiels. Mise en œuvre d'une caméra Baker-Nunn". Thèse présentée pour l'obtention du titre de docteur de l'Université de Paris VI, 1974.
- Justus C.G., H.D. Edwards and R.N. Fuller, "A method employing star backgrounds for improving the accuracy of the location of clouds or objects in space", *Photogram. Engng.*, 30, 594-607, 1964.
- Knutson J.R., D.C. Kayser and W.E. Potter, "Mass spectrometric measurement of thermospheric wind", J. Geophys. Res., 82, 5253-5256, 1977.
- Llyod K.H., "Concise method for photogrammetry of objects in the sky", WRE-Technical Note-72, 1971.
- Massevitch A.G., "Optical observation techniques", Proceedings of the first international symposium on the use of artificial satellites for geodesy, Washington, D.C., 123-140, 1962.
- Murphy C.H. and G.V. Bull, "Ionospheric winds over Yuma, Arizona, measured by gun-launched projectiles", J. Geophys. Res., 73, 3005-3015, 1968.
- Rieger E., "Neutral air motions deduced from barium releases experiments -1. Vertical winds", J. Atm. Terr. Phys., 36, 1377-1385, 1974.
- Rosenberg N.W. and C.G. Justus, "Space and time correlations of ionospheric winds", Radio Science, 1, 149-155, 1966.
- Spencer N.W., R.F. Theis, L.E. Wharton and G.R. Carignan, "Local vertical motions and kinetic temperature from AE-C as evidence for aurora-induced gravity waves", *Geophys. Res. Lett.*, 3, 313-316, 1976.