

L'astrométrie appliquée aux nuages artificiels

par H. DEBEHOGNE (*) et E. VAN HEMELRIJCK (**)

1. Introduction.

Le but du présent travail est la description de nos travaux astrométriques concernant deux expériences de création de nuages artificiels réalisées, la première par l'Institut d'Aéronomie Spatiale (IAS) en Sardaigne (juillet 1969), et la seconde par la NASA et le Max Planck Institut de Garching près de Munich (septembre 1971), sous le nom de Barium Ion Cloud Project, que nous avons observée de l'Observatoire de l'Université de Coimbra (Portugal).

L'astrométrie détermine les positions d'objets célestes, comme les étoiles, les planètes, les astéroïdes, les comètes, les satellites artificiels et naturels, ... Cette opération s'appelle *réduction*. L'étude complète des nuages artificiels demande la réduction des clichés de tels nuages. On appelle *nuages artificiels* le résultat du lâcher de gaz constitués de molécules, d'atomes ou d'ions.

2. Historique.

C'est à la suite d'une proposition de Bates (1950) que la première expérience de création de nuages artificiels dans la haute atmosphère, au moyen de fusées sondes, eut lieu à partir de la base de White Sands, dans le Nou-

(*) Observatoire Royal de Belgique.

(**) Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique.

veau Mexique. Réalisée par Edwards, Bedinger, Manring et Cooper (1955), au moyen d'une fusée Aerobee, elle consistait en un lâcher de 3 kg de vapeur de sodium à des altitudes variant de 70 à 113 km. Depuis lors de nombreuses expériences ont été exécutées. Rosenberg en a donné une description détaillée (1966).

Les lâchers peuvent se faire à des altitudes très différentes : 60 km, 100 km, 1000 km, 32.000 km, 72.000 km. Les buts d'étude poursuivis sont tout aussi variés : vitesse et direction des vents, température de l'atmosphère, coefficients de diffusion, composition chimique, rapports de réaction, réflexion des ondes électromagnétiques, dissipation de l'énergie des ondes acoustiques, étude des champs magnétiques et électriques, d'autres encore et certains qui restent à imaginer.

La création de nuages artificiels s'effectue ponctuellement, par section brusque des récipients contenant le liquide ou le gaz, ou le long d'une trajectoire en lâcher continu avec orifice approprié au flux désiré.

L'observation n'est possible que si les gaz absorbent et réémettent le rayonnement solaire (fluorescence) ou réagissent avec les atomes ou les molécules de l'atmosphère pour créer des constituants visibles (chémiluminescence).

Rosenberg (1966) distingue quatre grandes catégories de nuages artificiels :

- 1°) ceux qui émettent sous l'action du rayonnement solaire; on utilise des métaux alcalins, des métaux alcalino-terreux, le triméthylaluminium, l'ammoniac, des mélanges de méthane et d'oxygène, etc.;
- 2°) ceux qui émettent dans le cône d'ombre de la Terre; on utilise l'oxyde nitrique, le triméthylaluminium, l'éthylène et l'acétylène réagissant avec l'oxygène atomique, etc.;
- 3°) ceux qui modifient la concentration électronique ambiante; le césium, à cause de son faible potentiel d'ionisation (3,9 eV), est le plus souvent utilisé ainsi que le barium;
- 4°) ceux qui s'accompagnent de la formation d'une onde de choc ou d'une onde acoustique par explosion de charges (grenades) ou expansion brusque d'un gaz à forte pression et à haute température en vue de déterminer la température atmosphérique et les profils des vents.

Les expériences dont il sera parlé ici appartiennent aux première et troisième catégories : l'expérience de Sardaigne à la première (méthane plus oxygène), le « Barium Ion Cloud Project », à la troisième.

3. Expériences IAS de Sardaigne (6 et 13 juillet 1969).

Sous le nom d'expérience S-64, l'IAS, en collaboration avec l'ESRO (European Space Research Organisation), a procédé, à partir de la base de lancement de Salto di Quirra, à deux lancers de fusées Skylark construites

par la British Aircraft Corporation (BAC). Le matériel nécessaire aux expériences fut transporté par la Force Navale Belge (dragueur de mines Truffaut M 908) pour ce qui concerne la charge utile et par la Force Aérienne pour le matériel d'observation (avions DC4 et C119 qui emportèrent également le personnel).

Le but de ces expériences visait l'exploration de l'atmosphère à deux altitudes voisines de 150 et 250 km. Les résultats obtenus ont été précédemment décrits (Ackerman et al., 1971; Ackerman et Simon, 1971; Simon, 1971; Ackerman et Van Hemelrijck, 1971); on a notamment pu déterminer la vitesse des vents aux altitudes indiquées, ce qui constituait « une première » pour l'altitude de 250 km.

3.1. *Description des phases de lancement.*

Puisque deux altitudes différentes devaient être explorées, les fusées et la charge utile furent agencées de telle sorte qu'un même lancer puisse donner les deux nuages et cela aux dates auxquelles les expériences eurent lieu (6 et 13 juillet 1969). La charge utile comportant dix bonbonnes, cinq de méthane et cinq d'oxygène, fut divisée en deux parties. La partie supérieure, constituée de quatre bonbonnes (deux d'oxygène et deux de méthane), fut séparée du restant de la charge utile, toujours lié à la fusée, à 100 km d'altitude. A 150 km d'altitude, les bases des quatre bonbonnes furent coupées par des charges circulaires creuses entourant ces bases; dispositif et charges avaient été étudiés puis réalisés en collaboration avec les Poudreries Réunies de Belgique. Le premier nuage était ainsi créé. Le reste du train, qui avait suivi à distance suffisante (200 m) pour ne pas être affecté par les explosions des charges, continuait sa course jusqu'à la deuxième altitude à atteindre (250 km) où le deuxième nuage se formait à son tour au moyen des six bonbonnes restantes.

Les deux expériences S 64-1 et S 64-2 eurent lieu alors que le Soleil se trouvait à environ 10° sous l'horizon. Les phénomènes observés furent à peu près identiques au cours des deux expériences. La première explosion donna une luminosité de forme sphérique et de couleur verdâtre. Le diamètre angulaire du nuage était, au début, de l'ordre du degré. Ce premier nuage artificiel resta visible pendant environ un quart d'heure. La deuxième explosion donna lieu à un phénomène analogue de durée plus courte (trois minutes) et une couleur moins marquée. Détail piquant, les deux nuages visibles de Rome (à environ 350 km de la base de lancement) y furent pris pour des soucoupes volantes.

3.2. *Caractéristiques des fusées Skylark.*

Éléments	: 1 ^{er} étage, accélérateur Cuckoo 1 A
	: 2 ^d étage, moteur Raven VI
Longueur totale	: \approx 8,2 m
Diamètre intérieur	: \approx 0,44 m
Poussée	: \approx 8,2 tonnes (Cuckoo)
	: \approx 5,5 tonnes (Raven)
Temps de combustion	: \approx 5 s (Cuckoo)
	: \approx 30 s (Raven)
Masse totale du combustible	: \approx 1150 kg
Masse totale de la fusée	: \approx 1450 kg.

3.3. *Stations d'observation.*

La détermination des altitudes par triangulation dépend de la connaissance d'au moins deux directions simultanées de visée, liées à une base fixe. Cette liaison exige de photographier simultanément les nuages artificiels à partir de stations d'observations (deux ou plus) dont les positions (latitudes géographiques ou géocentriques, longitudes, altitudes par rapport au niveau de la mer, rayons du géoïde) doivent être connues pour déterminer la base. Le tableau I donne les coordonnées des stations d'observation de Sardaigne.

TABLEAU I : *Coordonnées des stations d'observation de l'IAS.*

Station	φ (lat. géogr.)	φ (lat. géoc.)	λ (long.)	Z (altit.)	ρ (rayon)
Monte Cardiga	39°34'00"	39°22'37"	9°30'04"	676 m	6369,698 km
Valico Nuraxi	38°56'32"	38°45'12"	8°48'31"	348 m	6369,967 km

Quant aux éléments angulaires de la triangulation, pour obtenir (suivant la précision requise) des directions de visée valables, la condition première réside dans le choix d'un équipement photographique approprié.

3.4. *Caméras d'observation.*

La puissance effective d'un télescope, dépendant des surfaces de la lentille de l'objectif et de l'image (cercle de dispersion), s'exprime par ϕ^2/d^2 (Massevitch, 1962) où ϕ et d représentent les diamètres de la lentille et de l'image. Pour un mobile, cette puissance effective vaut ϕ^2/df , f étant la distance focale.

Les instruments astrométriques présentent en général une distance focale de 2 mètres et plus et un champ souvent inférieur à 10° sur 10° . Au cours des quinze dernières années, des caméras photographiques à courte distance focale (100 à 300 mm) et à grand champ ($30^\circ \times 30^\circ$ à $75^\circ \times 75^\circ$) ont aussi été utilisées pour déterminer les directions des satellites ou des nuages luminescents créés dans l'atmosphère (Brown, 1962). Pendant la deuxième guerre mondiale, des « caméras balistiques » servirent à déterminer les positions, les trajectoires et les vitesses des bombes. Une précision de l'ordre de $10''$ à $20''$ fut obtenue (caractéristiques : $f = 300$ mm, $\phi = 37,5$ mm, champ = $20^\circ \times 30^\circ$). A l'Observatoire Royal de Belgique, on a des réductions où le résidu moyen arithmétique sur les étoiles tests vaut de $3''$ à $4''$ (champ = $36^\circ \times 36^\circ$, $f = 300$ mm) (Debehogne, 1970). Ces derniers temps le résidu moyen a été réduit à environ $1'',25$ pour la caméra IAS. Ces caméras se caractérisent aussi par une optique de haute qualité.

Lors du lancement des premiers satellites, la plupart des pays utilisaient les caméras d'aviation existantes. Les deux caméras de triangulation utilisées au cours de l'expérience S 64-1 et 2 de l'IAS ($f = 500$ mm, $\phi = 100$ mm, champ = $22^\circ \times 28^\circ$, monture azimutale, sans lunette guide) furent réalisées à l'Institut. La précision moyenne obtenue ($3''$ sur les étoiles) dans les conditions particulières de cette expérience sera discutée dans un travail futur. Nous avons démontré (Debehogne, 1970) que l'optique de la caméra IAS ne présente aucune distorsion.

A côté de ces deux caméras, destinées à déterminer l'altitude des nuages artificiels et leur mouvement à environ 150 km, d'autres instruments devaient permettre de connaître les déplacements et expansions de ces nuages :

- une caméra électrique Gianini ($f = 76$ mm, $\phi = f/0,86$);
- six caméras électriques Hasselblad ($f = 80$ mm, $\phi = f/2,8$), commandées électroniquement;
- une caméra de 16 mm ($f = 25$ mm, $\phi = f/1,4$).

L'installation des caméras aux stations d'observation demande beaucoup de travail et de soins : le montage doit assurer une rotation aisée et un pointer rapide dans la direction de visée (azimut et élévation), calculée à l'avance à partir des coordonnées de la station d'observation et de la trajectoire prévue pour la fusée; les supports des caméras sont stabilisés et des précautions évitent les vibrations lors de la prise de vue; en Sardaigne, un socle en béton assurait la stabilité de chaque caméra; scellée dans ce socle, une plaque métallique munie de trois boulons permettait la mise de niveau du pied en aluminium, support de la caméra.

L'obturation des caméras de triangulation se réalise manuellement (temps de pose : 5 min). Des cercles gradués, solidaires du pied et de l'instrument, permettent un pointage à $10'$ près.

3.5. Films et plaques photographiques.

Pour qu'un film ou une plaque photographique permette le calcul de la direction d'un point d'un nuage artificiel, il faut :

1. un nuage très contrasté avec le fond,
2. un fond du ciel faible,
3. des images d'étoiles sur le cliché.

La brillance du nuage et celle du fond continu varient parfois dans de telles proportions qu'il est nécessaire de prendre un large éventail de temps de pose au cours d'une même expérience. Evidemment, les tirs du matin se présentent dans des conditions plus difficiles, puisqu'en même temps la luminosité du nuage diminue et la brillance du fond du ciel augmente (Blamont et Baguette, 1961). Le choix d'un film ou d'une plaque doit satisfaire à ces exigences. Pour les caméras de triangulation de l'IAS, des plaques Kodak 103-F de dimensions 20 cm × 25 cm ont été utilisées.

Dans ce qui suit, nous donnons quelques aspects de la photographie scientifique : la définition de la courbe caractéristique et son exploitation du point de vue pratique, ainsi que le problème de l'exposition.

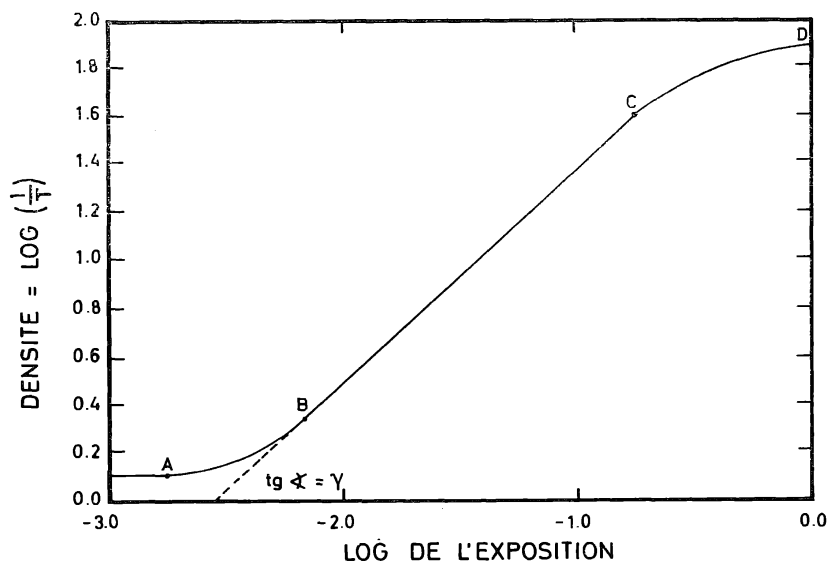


Fig. 1. — Les quatre parties d'une courbe caractéristique obtenue en laboratoire sur un cliché test :

1. jusqu'en A, l'ordonnée représente le voile total (gradient nul) ;
2. de A à B, le gradient croît (maximum en B) ;
3. de B à C, le gradient reste constant ;
4. au-delà de C, le gradient décroît jusqu'à des valeurs négatives (zone de renversement après le maximum D).

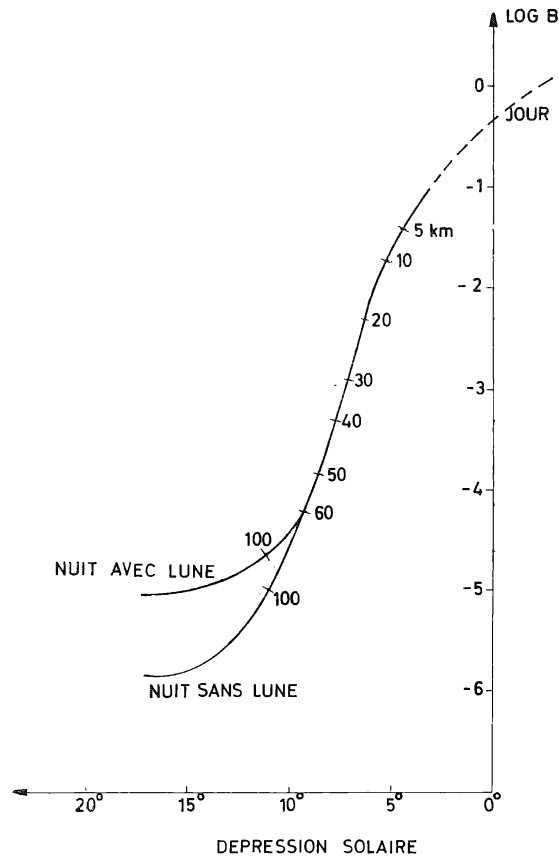


Fig. 2. — La variation de l'intensité du fond du ciel mesurée au zénith en fonction de l'abaissement du Soleil sous l'horizon. Résultats obtenus par l'Observatoire Géophysique de Léningrad (1959).

La sensitométrie mesure les propriétés photographiques des matériaux sensibles et les représente par la courbe caractéristique (densité D en fonction du logarithme de l'exposition E), appelée aussi courbe de « Hurter et Driffield » ou courbe « $D - \log E$ » (Eastman Kodak Company, 1967; Levy and Manring, 1961), avec :

$$\text{Densité } (D) = \log 0 = \log \left(\frac{1}{T} \right) \quad (1) \text{ et } (2)$$

où T désigne la transmission et 0 l'opacité. L'exposition, énergie lumineuse totale, s'exprime en mètre-candella-seconde. La courbe caractéristique présente quatre parties (fig. 1). Le contraste, pente γ de BC , dépend du temps de développement. Signalons que le temps de développement donné par les fabricants, pour 20°C , doit être écourté d'environ 3 % par degré de tem-

pérature en plus. La droite BC, partie essentielle de la courbe, dicte le choix de l'émulsion selon l'exposition ou la densité désirée (0,6 souvent en astronomie).

Pour déterminer cette exposition, nous avons, dans la pratique, étudié les résultats obtenus pour divers temps de pose et choisi celui qui s'est révélé le meilleur. Lors des lâchers de gaz, l'exposition la plus favorable place le niveau du ciel à une densité photographique de 0,2 à 0,4 au-dessus du voile chimique (voile total dû à l'émulsion et au temps de développement); ainsi, les parties de luminosité faible se détecteront encore, même avec une légère sous-exposition. Pour éviter le renversement des parties d'images très lumineuses, on écourte l'exposition et, ceci de façon à étudier aussi bien les parties de faible que de grande luminosité, on cherche à obtenir γ faible en diminuant le temps de développement ou en utilisant une émulsion moins contrastée. Pour un fond de ciel brillant, on choisit une ouverture plus petite, une exposition plus faible, une émulsion plus lente (à grains petits), un filtre, ou une combinaison de ces quatre correctifs. La figure 2 montre la variation de l'intensité du fond du ciel au zénith et l'altitude en km de l'ombre terrestre en fonction de l'abaissement du Soleil sous l'horizon.

Remarque : sur les clichés obtenus (plaques en verre), le déplacement du centre du nuage a été mesuré en utilisant un isodensitracteur à quatre couleurs de marque Joyce & Loeb.

3.6. Formules de transformation.

Dans le cas des expériences spatiales de juillet 1969 en Sardaigne, la direction (l'ascension droite et la déclinaison) des points d'explosion devait être déterminée à un instant donné par rapport à la direction connue des étoiles. Les méthodes de réduction des plaques établissent une correspondance entre le cliché (plan des coordonnées mesurées x , y) et le plan tangent à la sphère céleste (plan des coordonnées standard X , Y) (fig. 3) (Arend, 1960). Cette correspondance est déterminée par la méthode des moindres carrés au moyen d'un nombre adéquat d'étoiles de référence dont les coordonnées standard se déduisent des ascensions droites et des déclinaisons (coordonnées équatoriales) obtenues dans des catalogues et dont on mesure les images sur le cliché. Les positions réelles ont subi l'influence de différents facteurs : imperfections photographiques, optiques ou mécaniques, aberration, réfraction, ... (Debehogne et Van Hemelrijck, 1972). Les formules de transformation doivent en tenir compte; elles permettent de déterminer ensuite X et Y d'un objet inconnu à partir des coordonnées mesurées x et y de l'image de cet objet. Les coordonnées équatoriales de l'objet peuvent alors être calculées à partir de la connaissance de ses coordonnées standard.

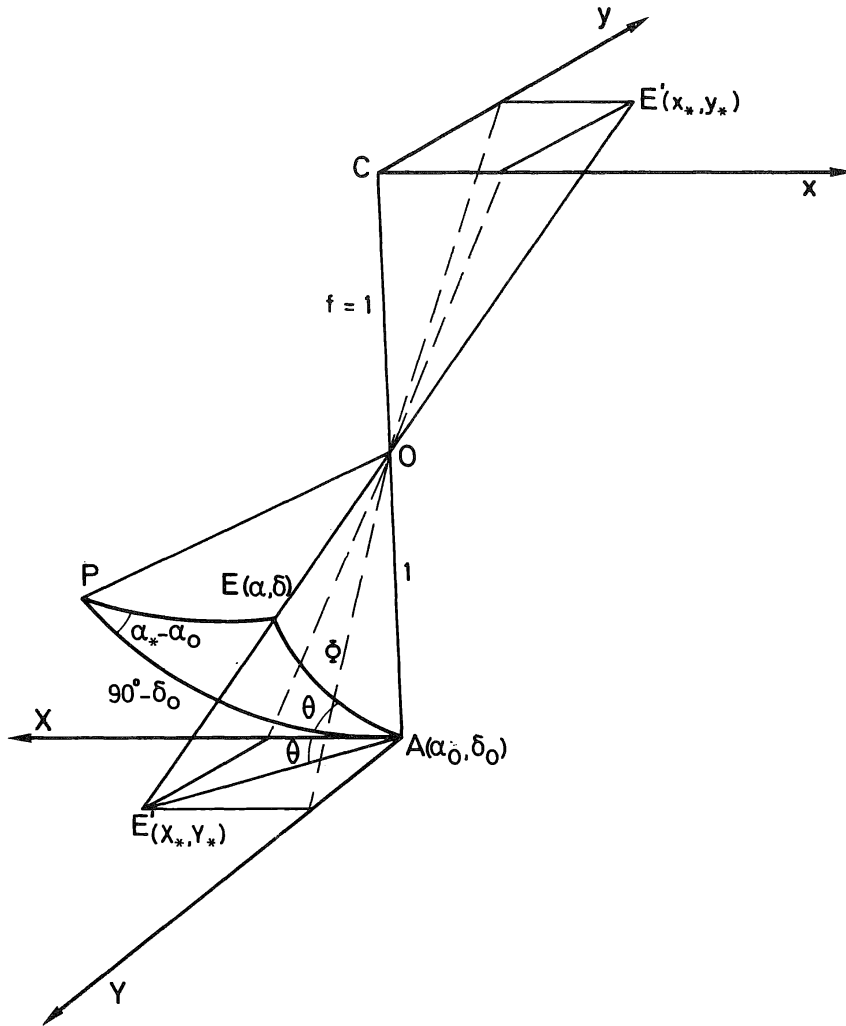


Fig. 3. — Correspondance entre le plan des coordonnées standard X, Y (tangent à la sphère unitaire au point $A(\alpha_0, \delta_0)$ de l'axe optique de l'instrument) et le plan des coordonnées mesurées x, y (tangent à la sphère unitaire au point C de l'axe optique), le point P représente la projection du pôle céleste sur la sphère unitaire à partir du centre optique O .

Les relations connues entre les coordonnées équatoriales α_*, δ_* et les coordonnées standard X_*, Y_* d'une étoile de base sont les suivantes :

$$X_* = \frac{\cos \delta_* \sin (\alpha_* - \alpha_0)}{\sin \delta_* \sin \delta_0 + \cos \delta_* \cos \delta_0 \cos (\alpha_* - \alpha_0)} \quad (3)$$

$$Y_* = \frac{\sin \delta_* \cos \delta_0 - \cos \delta_* \sin \delta_0 \cos (\alpha_* - \alpha_0)}{\sin \delta_* \sin \delta_0 + \cos \delta_* \cos \delta_0 \cos (\alpha_* - \alpha_0)}, \quad (4)$$

α_0, δ_0 étant les coordonnées équatoriales de l'étoile prise comme origine.

Pour un grand nombre d'étoiles dépassant parfois la centaine, on peut donc calculer X_* et Y_* (α_* , δ_* , α_0 et δ_0 sont donnés dans les catalogues d'étoiles). D'autre part les coordonnées X_* et Y_* peuvent être liées aux coordonnées mesurées x_* et y_* par les relations suivantes :

$$X_* = \sum_{i+j=0}^n a_{ij} x_*^i y_*^j \quad (5)$$

$$Y_* = \sum_{i+j=0}^n b_{ij} x_*^i y_*^j, \quad n \text{ entier positif}, \quad (6)$$

où a_{ij} et b_{ij} , appelées constantes du cliché, sont à déterminer (leur nombre, lié à la valeur de l'exposant n , et leurs liaisons éventuelles doivent être précisés par des études expérimentales et théoriques). On peut calculer, par la méthode des moindres carrés, les coefficients a_{ij} et b_{ij} [formules (5) et (6)].

Pour les centres des nuages artificiels, on obtient alors :

$$X_N = \sum_{i,j}^n a_{ij} x_N^i y_N^j \quad (7)$$

$$Y_N = \sum_{i,j}^n b_{ij} x_N^i y_N^j \quad (8)$$

Connaissant X_N et Y_N , on détermine α_N et δ_N à partir des formules suivantes :

$$\operatorname{tg} (\alpha_N - \alpha_0) = \frac{X_N}{\cos \delta_0 - Y_N \sin \delta_0} \quad (9)$$

$$\operatorname{tg} \delta_N = \frac{\cos (\alpha_N - \alpha_0) (\sin \delta_0 + Y_N \cos \delta_0)}{\cos \delta_0 - Y_N \sin \delta_0} \quad (10)$$

Les formules (9) et (10) peuvent être facilement déduites de la figure 3.

L'étude détaillée de la meilleure forme à donner aux transformations des coordonnées mesurées en coordonnées standard est exposée dans un travail qui sera présenté ultérieurement. L'étude des erreurs au point de vue théorique et au point de vue expérimental a déjà été réalisée (Debehogne et Van Hemelrijck, 1972).

3.7. Détermination de l'altitude du nuage.

Au moyen des clichés pris à partir des deux stations de Monte Cardiga (C) et de Valico Nuraxi (T), on calcule, par les formules (9) et (10), $\alpha_{N(C)}$, $\delta_{N(C)}$, $\alpha_{N(T)}$ et $\delta_{N(T)}$, ascensions droites et déclinaisons du point d'éjection du nuage artificiel vu respectivement à partir des stations C et T.

Pour chaque station, on exprime les distances zénithales z et les azimuts A en fonction des ascensions droites et déclinaisons (Van Hemelrijck, 1969); à titre d'exemple, transformons $\alpha_{N(C)}$ et $\delta_{N(C)}$ en distance zénithale $z_{N(C)}$ et azimut $A_{N(C)}$ par les formules :

$$\cos z_{N(C)} = \sin \varphi'_C \sin \delta_{N(C)} + \cos \varphi'_C \cos \delta_{N(C)} \cos H_{N(C)} \quad (11)$$

$$\sin A_{N(C)} = \frac{\cos \delta_{N(C)} \sin H_{N(C)}}{\sin z_{N(C)}} \quad (12)$$

la formule (12) étant complétée par la suivante qui permet de déterminer le quadrant dans lequel on doit prendre $A_{N(C)}$:

$$\cos A_{N(C)} = \frac{-\cos \varphi'_C \sin \delta_{N(C)} + \sin \varphi'_C \cos \delta_{N(C)} \cos H_{N(C)}}{\sin z_{N(C)}} \quad (13)$$

$H_{N(C)}$ et φ'_C étant respectivement l'angle horaire du point d'éjection du nuage artificiel, vu à partir de la station d'observation C , et la latitude de cette station C ; $H_{N(C)}$ est calculé par :

$$H_{N(C)} = t_{s(C)} - \alpha_{N(C)} \quad (14)$$

où $t_{s(C)}$ désigne le temps sidéral en C .

On peut déterminer ensuite les coordonnées géocentriques λ_N et φ'_N de la projection N du point d'éjection sur une sphère de rayon unitaire, à partir des directions du nuage obtenues aux deux stations d'observation T et C , des longitudes (λ_T , λ_C) et des latitudes géocentriques (φ'_T , φ'_C) de ces deux stations. (Les projections des points correspondant aux stations d'observation et au nuage sont désignées par T , C et N). En effet, dans le triangle sphérique PTC (fig. 4), on a, si l'on désigne par n , C , T , respectivement le côté CT et les angles TCP , PTC :

$$\cos n = \sin \varphi'_C \sin \varphi'_T + \cos \varphi'_C \cos \varphi'_T \cos (\lambda_C - \lambda_T) \quad (15)$$

$$\cos C = \frac{\sin \varphi'_T - \cos n \sin \varphi'_C}{\sin n \cos \varphi'_C} \quad (16)$$

$$\cos T = \frac{\sin \varphi'_C - \sin \varphi'_T \cos n}{\cos \varphi'_T \sin n} \quad (17)$$

Il est aisé d'obtenir, en fonction des azimuts $A_{N(T)}$, $A_{N(C)}$, et des angles C , T , les angles CTN , NCT que nous désignerons par T_1 , C_1 ; la connaissance des angles C_1 , T_1 permet, par utilisation de (15), de calculer successivement les seconds membres des formules suivantes (triangle sphérique TCN , fig. 4), où N_1 représente l'angle TNC , c et t , les côtés TN et CN :

$$\cos N_1 = \sin T_1 \sin C_1 \cos n - \cos T_1 \cos C_1 \quad (18)$$

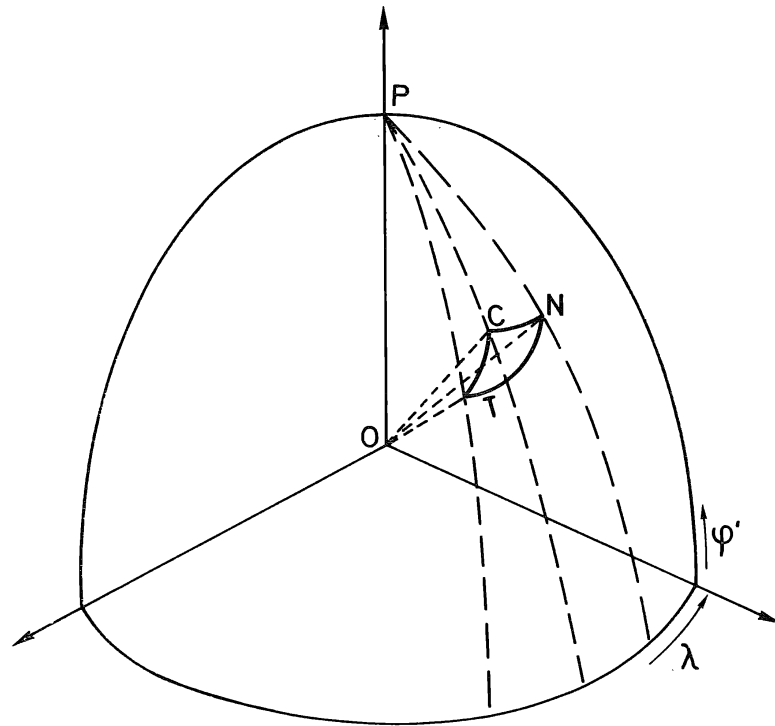


Fig. 4. — Détermination de la projection N du point d'éjection du nuage artificiel.

$$\sin c = \frac{\sin n \sin C_1}{\sin N_1} \quad (19)$$

$$\sin t = \frac{\sin n \sin T_1}{\sin N_1} \quad (20)$$

Finalement, dans le triangle TPN, où l'angle NTP = T_2 , l'arc PT = $90^\circ - \varphi'_T$ et l'arc TN = c sont connus, on a :

$$\sin \varphi'_N = \sin \varphi'_T \cos c + \cos \varphi'_T \sin c \cos T_2 \quad (21)$$

$$\cos (\lambda_N - \lambda_T) = \frac{\cos c - \sin \varphi'_N \sin \varphi'_T}{\sin \varphi'_N \cos \varphi'_T} \quad (22)$$

formules qui donnent les coordonnées géocentriques φ'_N et λ_N de la projection N du point d'éjection du nuage artificiel.

Les rayons du géoïde ρ_T en la station d'observation T de Valico Nuraxi et ρ_N en la projection du centre N du nuage artificiel sur l'ellipsoïde de Hayford ayant été calculés par :

$$\rho_I = \frac{a \sec \varphi'_I}{\left[1 + \frac{a^2}{b^2} \operatorname{tg}^2 \varphi'_I\right]^{1/2}} \quad (23)$$

où I est remplacé par T ou N et où a et b sont respectivement le rayon à l'équateur et le rayon polaire dans l'ellipsoïde de Hayford (de précision suffisante dans les présentes expériences); on peut maintenant déterminer l'altitude Z_N du centre du nuage artificiel (fig. 5) par rapport au niveau de la mer.

Soient

O : centre de la Terre,

T_{EH} : projection de la station d'observation T (Valico Nuraxi) sur l'ellipsoïde de Hayford,

N_{EH} : projection du centre N du nuage artificiel sur l'ellipsoïde de Hayford,

$\overline{OT_{EH}} = \rho_T$: rayon du géoïde au point T ,

$\overline{T_{EH}T} = Z_T$: altitude de T au-dessus du niveau de la mer,

$\overline{ON_{EH}} = \rho_N$: rayon du géoïde au point N .

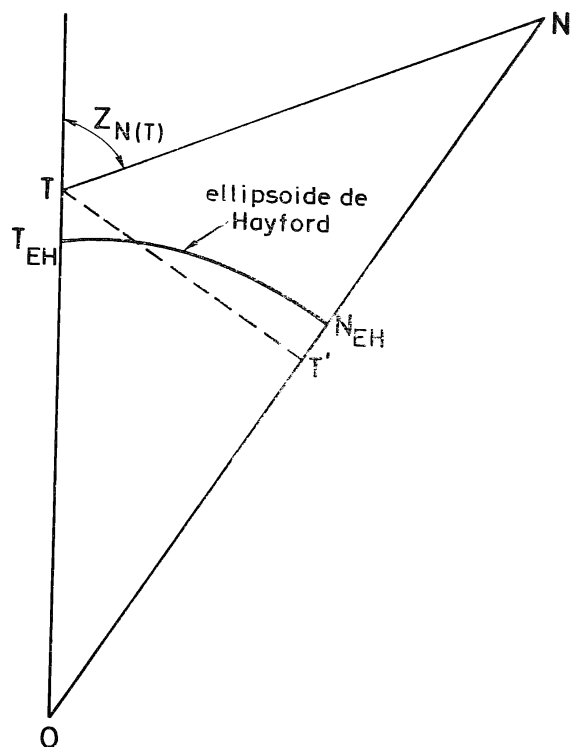


Fig. 5. — Détermination de l'altitude du centre du nuage artificiel.

Dans le triangle OTN, on a :

$$ON = OT (\cos O + \sin O \cotg N) \quad (24)$$

d'où l'on déduit, puisque $Z_N = N_{EH} N = ON - \rho_N$ et que l'angle O vaut l'arc $TN = c$ de la figure 4 :

$$Z_N = (\rho_T + Z_T) [\cos c + \sin c \cotg (Z_{N(T)} - c)] - \rho_N \quad (25)$$

Il est évident que l'on peut aussi déterminer Z_N à partir de la station d'observation C (Monte Cardiga), en substituant C à T dans la formule (25).

Les calculs ont donné les altitudes de 157,8 km et 274,5 km pour le tir du 6 juillet, et de 154,7 km et 278,0 km pour le tir du 13 juillet, tirs effectués à partir de Salto di Quirra.

Dans les paragraphes suivants sera décrit le « Barium Ion Cloud Project ».

4. Barium Ion Cloud Project.

L'étude du champ magnétique terrestre à partir de magnétomètres emportés par des satellites ou des sondes spatiales a considérablement augmenté nos connaissances de la topologie générale de ce champ magnétique et de ses distorsions dues au vent solaire. Une limitation d'une telle étude, faite point par point sur des trajectoires simples, réside dans la non-séparation entre les inhomogénéités spatiales et les fluctuations dans le temps. Dans le but de remédier à cette limitation, des nuages artificiels de vapeurs métalliques peuvent être créés de façon à permettre, par l'étude de leurs formes et de leurs mouvements, une description des lignes du champ magnétique et de la convection introduite par les champs électriques existants. La National Aeronautics and Space Administration (NASA) et le Bundesministerium für Bildung und Wissenschaft (BMBW) de la République fédérale d'Allemagne ont réalisé conjointement le « NASA/MPE Barium Ion Cloud Project ». Le Max-Planck-Institut für Physik und Astrophysik, Institut für extraterrestrische Physik (MPE), de Garching, près de Munich, a conçu et équipé la charge utile, la NASA fournissant la fusée Scout et les services de lancement installés à Wallops Island en Virginie (U.S.A.).

Le 18 mars 1969, le MPE réalisait à partir du satellite ESRO, HEOS-1, un nuage artificiel, à 74.000 km, à partir d'un mélange de barium et d'oxyde de cuivre (2,4 kg). Le nuage fut observé pendant 25 minutes dans les stations établies en Amérique (du Sud et du Nord). La présente expérience reproduit la précédente, à 32.000 km d'altitude, à partir d'un mélange de 16 kg de Ba et de CuO.

4.1. Description et but du « Barium Ion Cloud Project ».

La position du nuage et le vecteur du champ électrique dans le temps devaient être déterminés par triangulation à partir des différentes bases d'observation. Ainsi, on obtiendrait certains paramètres de la magnétosphère à cinq rayons terrestres d'altitude : le champ électrique d'après la dérive du nuage de plasma et le champ magnétique d'après sa forme géométrique. De plus, on aurait à étudier le comportement d'un nuage d'ions dans un plasma sans collisions en observant la vitesse d'expansion, l'accélération, le développement de la structure fine et la perturbation du milieu ambiant causée par le nuage.

L'intensité lumineuse initiale du nuage de barium neutre était prévue comme devant donner un point brillant de magnitude deux. La luminosité devait alors décroître rapidement par suite de l'expansion sans collisions et de la photo-ionisation.

Le nuage d'ions devait donner une intensité de radiation dix fois moindre que le nuage neutre, intensité qui décroîtrait en raison inverse du temps puisque, essentiellement, le nuage se développe uniquement le long des lignes de force. Pendant 20 minutes environ, le phénomène resterait visible à l'œil nu et il pourrait être observé, durant deux heures à peu près, par les caméras spéciales munies d'intensificateurs d'image. Les principales caractéristiques prévues du nuage, créé par les 16 kg de barium et d'oxyde de cuivre, sont les suivantes :

Altitude de création	32.000 km
Poids du mélange Ba-CuO	16 kg
Masse d'ions de barium	320 gr
Temps nécessaire à l'ionisation	20 s
Rayon du nuage d'ions	40 km
Vitesse d'expansion	1,2 km s ⁻¹
Diamètre angulaire du nuage	9'
Longueur du nuage après t secondes	$2,3 \cdot 10^{-3} t$ degrés

La réalisation de l'expérience eut lieu dans la nuit du 20 au 21 septembre 1971, avec création du nuage au-dessus d'un point situé par 6°,77 de latitude nord et 74°,26 de longitude ouest (Colombie).

La décision de lancement ne fut prise qu'au dernier moment alors que la fenêtre de tir prévue s'étendait du 15 au 25 septembre 1971. Les observateurs devaient donc rester à l'écoute des émissions de la station WWV sur 2,55, 5, 10, 15, 20 et 25 MHz, qui transmettait chaque heure les informations des promoteurs de l'expérience par le canal du « Standard Frequency and Time Service » du « National Bureau of Standards » (Washington).

La fusée Scout, lancée de Wallops Island (Virginie), comportait quatre étages; ses quatre moteurs, Algol, Castor, Antares et Altair, étaient réunis par des sections de transition contenant des instruments de contrôle, de guidage et de mise à feu, les systèmes de séparation et les gyroscopes nécessaires à la stabilisation du quatrième étage. Haute d'environ 22,25 m, la « Scout » pèse 17.144 kg au départ; c'est une fusée à propergol solide. Nous donnons ci-dessous les principales phases de lancement de la fusée Scout.

Phases	Temps (sec)
Départ	0,00
Fin de fonctionnement du moteur du premier étage et allumage du deuxième	68,47
Fin de fonctionnement du moteur du deuxième étage	108,83
Allumage du troisième étage	113,83
Fin de fonctionnement du troisième étage	150,52
Mise en rotation	164,17
Séparation du troisième étage	165,67
Allumage du quatrième étage	170,52
Fin de fonctionnement du quatrième étage	205,99
Libération du barium	12.843,70

4.2. Base d'observation IAS et résultats obtenus à partir des observations de Coimbra.

La description de la base d'observation établie à l'Observatoire de l'Université de Coimbra par l'Institut d'Aéronomie Spatiale, le travail d'observation effectué dans cette base et les principaux résultats obtenus d'après ces observations ont fait l'objet d'un article publié dans « Ciel et Terre » (Van Hemelrijck et Debehogne, 1972).

Nous présentons (fig. 6) le développement du nuage de barium dans les premières minutes qui ont suivi la libération du gaz, tel qu'il a été photographié à Coimbra.

Pour la réduction du cliché, les formules suivantes ont été utilisées, après l'étude systématique signalée au paragraphe 3.6 et portant sur plusieurs polynômes de transformation :

$$X = a_{00} + a_{10}x + a_{01}y + a_{20}x^2 + a_{11}xy + a_{02}y^2$$

$$Y = b_{00} + b_{10}x + b_{01}y + b_{20}x^2 + b_{11}xy + b_{02}y^2$$

La figure 7 montre les étoiles qui ont servi à calculer les coefficients (constantes du cliché) a_{ij} et b_{ij} .

Conclusion.

La précision obtenue sur les positions astrométriques s'est grandement améliorée au cours des réductions successives effectuées sur la suite des clichés pris lors des deux expériences (IAS et de la NASA) ayant fait l'objet des travaux décrits dans ce présent travail : la moyenne arithmétique des résidus sur les étoiles de référence a été abaissée de 5'' à 1'',25.

Cependant, pour assurer cette dernière précision dans tous les cas de réduction, outre le maintien des précautions nécessaires et l'obtention de clichés de haute qualité, il faut rechercher les formules de transformation les meilleures pour le traitement des clichés fournis par la caméra IAS.

Ce sera le but d'une étude en cours qui prolongera le présent travail.

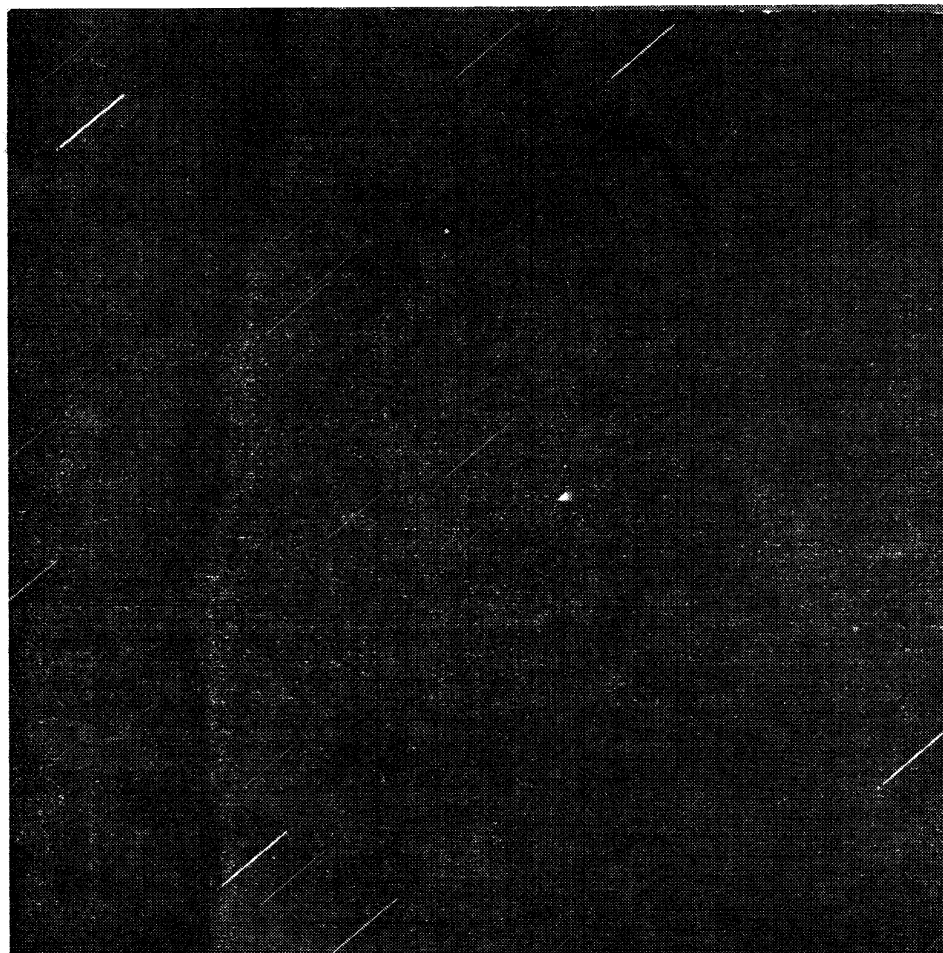


Fig. 6. — Développement du nuage de barium dans les premières minutes ayant suivi la libération du gaz tel qu'il a été photographié à Coimbra.

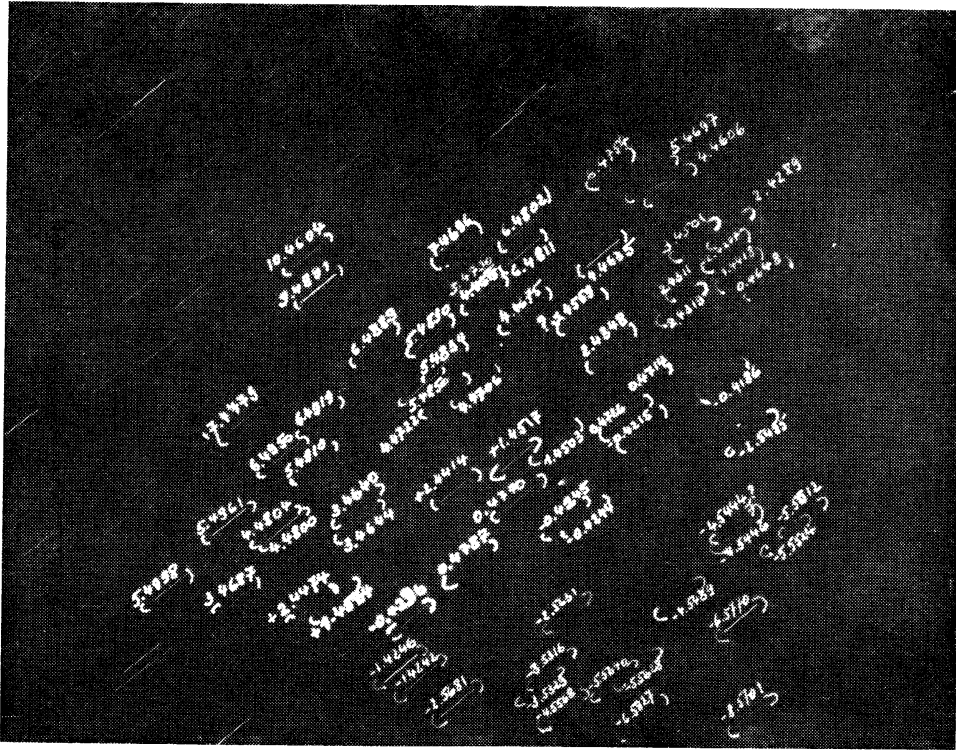


Fig. 7. — Etoiles de référence utilisées.

Le nombre important d'étoiles de référence choisi permet de réduire les effets des erreurs de mesure et de catalogue dans une proportion de 65 à 90 % suivant la position des étoiles (Debehogne, 1972).

REFERENCES

- ACKERMAN, M., GLEIZES, F. et SIMON, P., Observation de phénomènes résultant de lâchers de méthane et d'oxygène à 160 et à 270 kilomètres d'altitude. Détermination de températures thermosphériques, *Ann. Géophys.*, 27, 407, 1971.
- ACKERMAN, M. and SIMON, P., Upper atmospheric densities between 155 and 165 km by observation of AIO clouds, *Planet. Space Sci.*, 19, 1193, 1971.
- ACKERMAN, M. and VAN HEMELRIJCK, E., Measurement of upper atmospheric winds at 160 and 275 kilometers, *J. Geophys. Res.*, 76, 3162, 1971.
- AREND, S., Aspects particuliers des méthodes de réduction de position d'astres errants utilisées à l'O.R.B. Application à la détermination de la position astrographique d'un satellite artificiel. Publ. Sci. et Techn. du Min. de l'Air, NT 99, Paris, 1960.
- BATES, D.R., A suggestion regarding the use of rockets to vary the amount of atmospheric sodium, *J. Geophys. Res.*, 55, 347, 1950.
- BLAMONT, J.E. et BAGUETTE, J.M., Mesures déduites des déformations de six nuages de métaux alcalins formés par fusées dans la haute atmosphère. *Ann. Géophys.* 17, 319, 1961.

- BROWN, D.C., Notes on the reduction of stellar plates for determination of directions of flashing-light beacons, Proceedings of the first international symposium on the use of artificial satellites for geodesy, Washington, D.C., 163, 1962.
- DEBEHOGNE, H., Discussion de diverses méthodes de réduction des clichés, *Astron. and Astrophys.*, 8, 189, 1970.
- DEBEHOGNE, H., Effet d'une erreur dans les réductions de cliché, *Astron. and Astrophys. Suppl.*, 5, 185, 1972.
- DEBEHOGNE, H. et VAN HEMELRIJCK, E., Formules de base pour la détermination de l'altitude des nuages artificiels, *Bull. Acad. Roy. de Belgique, Cl. Sc.*, 513, 1972.
- EASTMAN KODAK COMPANY, Kodak plates and films for science and industry, 1967.
- EDWARDS, H., BEDINGER, J., MANRING, E. and COOPER, C., Aurora and Airglow, E.B. Armstrong and A. Delgado, Eds., Pergamon, New York, 122, 1955.
- LEVY, R.J. and MANRING, E.R., Photography of luminous extended objects against a twilight sky, *GCA Technical Report, 61-4-N*, 1961.
- MASSEVITCH, A.G., Optical observation techniques, Proceedings of the first international symposium on the use of artificial satellites for geodesy, Washington, D.C., 123, 1962.
- ROSENBERG, N.W., Chemical releases at high altitudes, *Sciences*, 152, 1017, 1966.
- SIMON, P., Détermination de la densité de la thermosphère terrestre par l'observation de la fluorescence de nuages artificiels d'oxyde d'aluminium, *Bull. Acad. Roy. de Belgique, Cl. Sc.*, 57, 154, 1971.
- VAN HEMELRIJCK, E., Détermination de l'altitude d'éjection de nuages artificiels dans l'atmosphère - Application à l'expérience S - 64, *Aeronomica Acta C*, 28, 1969.
- VAN HEMELRIJCK, E. et DEBEHOGNE, H., Observations au Portugal de phénomènes lumineux se rapportant à une expérience de lâcher de barium dans la magnétosphère, *Ciel et Terre*, 4, 1972.