

MESURE DE LA CONCENTRATION D'OXYGENE ATOMIQUE DANS LA THERMOSPHERE AU
MOYEN DE LACHERS DE GAZ

par

D. FRIMOUT, C. LIPPENS, P. SIMON, E. VAN HEMELRIJCK, E. VAN RANSBEECK

Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique

A. REHRI

Centre National d'Etudes Spatiales

RESUME

Le lâcher d'une quantité connue de monoxyde d'azote dans la thermosphère inférieure permet la détermination de la concentration de l'oxygène atomique par la mesure de la photoluminescence de la réaction $\text{NO} + \text{O} \rightarrow \text{NO}_2 + \text{hv}$. Une telle expérience a été conçue à l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique (IASB) et a pu être réalisée grâce à la collaboration du Centre National d'Etudes Spatiales (CNES).

La charge utile était composée de quatre bonbonnes de monoxyde d'azote qui devaient être ouvertes à des altitudes différentes entre 80 et 110 km. L'ouverture des bonbonnes se faisait par pyrotechnie afin d'obtenir des nuages quasi sphériques. Un programmeur déterminait dans le temps l'éjection du monoxyde d'azote. L'observation se faisait à partir de quatre stations au sol situées sur une base d'environ 100 km.

Les stations comportaient deux types d'instruments :

- 1° pour la mesure de l'intensité lumineuse
- 2° pour la mesure de la position des nuages.

Les instruments étaient préorientés et recevaient des corrections calculées en temps réel à partir des mesures radar de la trajectoire de la fusée.

Trois charges utiles ont été lancées par des fusées Centaure II C à partir du Centre Spatial Guyanais. Les résultats obtenus permettront la détermination de la distribution verticale de l'oxygène atomique après le crépuscule du soir.

ABSTRACT

The release of a known quantity of nitric oxide in the lower thermosphere allows the determination of the concentration of atomic oxygen by measuring the post luminescence of the reaction $\text{NO} + \text{O} \rightarrow \text{NO}_2 + \text{hv}$. Such an experience was projected by the Belgian Institute for Space Aeronomy (IASB) and has been realised in collaboration with the Centre National d'Etudes Spatiales (CNES).

The payload was composed of four bottles of NO, which had to be opened at different altitudes between 80 and 110 km. The bottles were opened by a pyrotechnic system so that quasi spherical clouds were obtained. These releases were programmed in function of time.

The observation happened from four ground based stations located on a base line of about 100 km. They were equipped with two types of instruments

- 1° to mesure the light intensity
- 2° to mesure the exact positions of the clouds.

The instruments where preoriented and received a correction calculated in real time from the radar measurement of the trajectory of the rocket itself.

Three payloads has been launched with Centaure II C rockets from the Centre Spatial Guyanais launching range. The results obtained will allow the determination of the vertical distribution of the atomic oxygen after sunset.

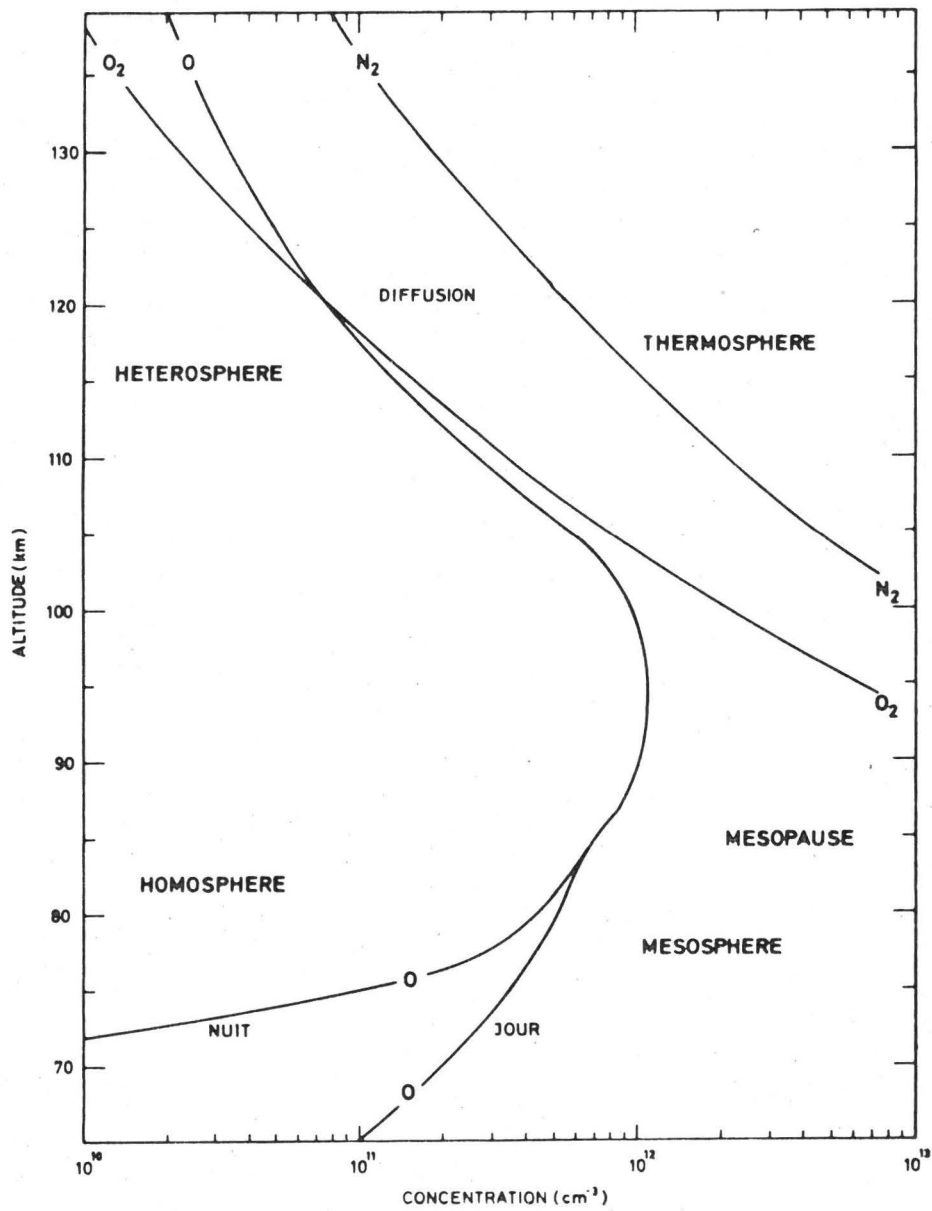
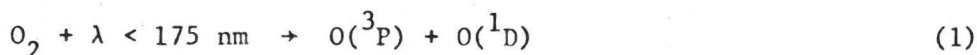


Fig 1 : Distribution des constituants entre 70 et 130 km

1. INTRODUCTION

La basse thermosphère entre 85 et 110 km est aussi la zone de transition entre l'homosphère et l'hétérosphère. Dans cette zone la masse moléculaire moyenne diminue principalement parce que l'oxygène atomique devient un constituant important de l'atmosphère (fig. 1). Celui-ci est en effet produit par la photodissociation de l'oxygène moléculaire par le rayonnement solaire de longueur d'onde inférieur à 175 nm au-dessus de 120 km d'altitude :



L'oxygène atomique peut disparaître par plusieurs processus, notamment par la collision triple avec un troisième corps



Néanmoins en examinant les conditions aéronomiques qui existent à ces altitudes on constate que le nombre de processus qui mène à la dissociation de l'oxygène moléculaire ne peut jamais être égal au nombre de processus de recombinaison. L'équilibre photochimique n'est donc jamais atteint. Pour cette raison, la distribution verticale de l'oxygène atomique dépend plus des conditions de transport que des conditions de perte et de production. Les atomes d'oxygène ne se recombinaient pas à l'altitude où ils ont été produits, mais subissent un courant de diffusion vers la basse thermosphère, où la concentration atmosphérique est suffisante pour faire disparaître l'oxygène atomique par la réaction (2). La molécule O_2 par contre a un temps de vie qui est suffisant pour être transporté vers des altitudes plus élevées par diffusion moléculaire ou turbulente.

Il s'établit donc un équilibre de diffusion avec comme conséquence un maximum d'oxygène atomique de 5×10^{11} atomes par cm^3 vers 97 km.

Pendant la nuit la situation est différente étant donné l'absence de production de l'oxygène atomique. Comme le mécanisme de recombinaison de l'oxygène atomique se fait principalement par triple collision, il est plus efficace pour des pressions relativement plus élevées, c'est-à-dire en-dessous de 80 km. Les buts de l'expérience décrite dans ce travail sont la détermination du profil de concentration de l'oxygène atomique et l'étude de son mécanisme de disparition après le coucher du soleil au moyen de lâchers de monoxyde d'azote. Celui-ci réagit avec l'oxygène atomique suivant la réaction



la luminescence produite étant un continuum de longueurs d'onde comprises entre 400 nm et $1,2 \mu\text{m}$, avec un maximum d'intensité vers 620 nm. La formation de globules de NO juste après le coucher du soleil, à des altitudes comprises entre 80 et 105 km et la répétition de l'expérience à différents moments de la nuit, soit un deuxième tir une heure après le premier lancement et un troisième tir tard dans la nuit devait permettre d'atteindre ces objectifs (Ackerman, 1969). La luminescence devait être observée par des instruments optiques à partir du sol.

L'expérience qui est le fruit de la collaboration entre l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique (IASB) et le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) a été lancée avec succès depuis le Centre Spatial Guyanais (CSG) en septembre 1974 et ce travail décrit les moyens mis en oeuvre tant du point de vue fusée et charges utiles que du point de vue instruments d'observation.

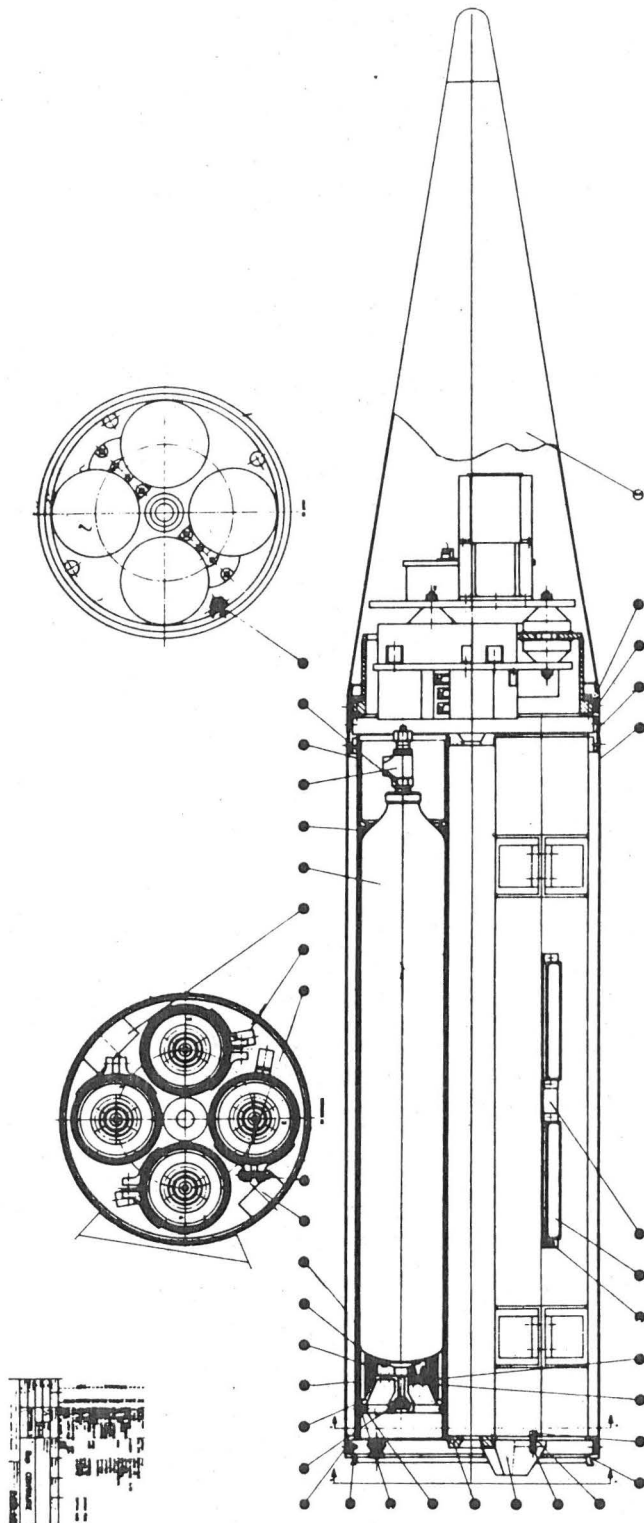


Fig 2 : La charge utile

2. MOYENS MIS EN OEUVRE

Outre les moyens propres et permanents du CSG, les moyens suivants ont été utilisés pour réaliser cette mission :

a) la fusée et l'environnement :

Les trois lancements ont été effectués par des fusées sondes Centaure type IIC. Elles ont été lancées à partir d'une rampe SERMIAT type R2.

Le Centaure IIC est dérivé des éléments de la famille 1 de fusées sondes, développée pour le CNES par la Société Nationale Industrielle Aérospatiale (SNIAS).

Il est constitué de deux étages propulsifs à poudre stabilisés par des empennages fixes, et réunis par un interétage. Le diamètre extérieur des enveloppes est de 280 mm pour le 1er étage et de 305 mm pour le second. La longueur totale sans pointe est de l'ordre de 5 mètres. La fusée est mise en rotation dès la sortie de rampe par deux impulseurs à poudre fixés à la corde extérieure de deux empennages opposés du 1er étage. La séparation et l'allumage du deuxième étage sont commandés par une minuterie démarrée par la mise en pression du 1er étage.

Le Centaure IIC est capable d'emporter des charges utiles cylindres côniques, de 30 à 85 kg à des altitudes variant de 200 à 110 km.

Les charges utiles (fig. 2)

Les trois charges utiles identiques comprenaient principalement :

- une structure interne tubulaire recevant les quatre bouteilles de 4 litres remplies de monoxyde d'azote (NO) sous une pression de 50 bars. Cette structure sert également de support aux boîtiers contenant des relais pyrotechniques à retard de 6 secondes.
- les bouteilles qui sont chacune munies, à l'avant d'une valve pour le remplissage, et à l'arrière du système pyrotechnique d'ouverture des bouteilles. Ce système se compose d'une partie centrale servant de support à l'explosion et recevant à l'arrière le détonateur, et d'un "écran onde de choc" composé de tubes cylindriques coaxiaux entourant la partie centrale.
- deux plateaux suspendus par amortisseurs, situés à l'avant, et recevant les équipements suivants :
 - un répondeur radar
 - un programmeur électronique destiné à délivrer les ordres de séparation pointe-véhicule, et l'initialisation de la chaîne de relais pyrotechniques à retard et de l'ouverture de la première bouteille.
 - un boîtier de sécurité empêchant au sol le passage des ordres délivrés par le programmeur.
 - des blocs de batteries destinées à l'alimentation des équipements électroniques et au fonctionnement des dispositifs pyrotechniques.
- un cône de protection, et une peau cylindrique sur laquelle sont fixés :
 - deux antennes pour le répondeur radar
 - une prise de test et de commande du sol
 - une prise équipée d'un bouchon qui peut être de sécurité (assure le court-circuit des étoupilles pyrotechniques de séparation et d'ouverture de bouteilles), de test (permet de contrôler d'une part la continuité dans les étoupilles, et d'autre part, l'absence de tension sur le circuit situé en amont des étoupilles), ou de vol.
- un cadre arrière permettant la fixation au véhicule par sangle éjectable.

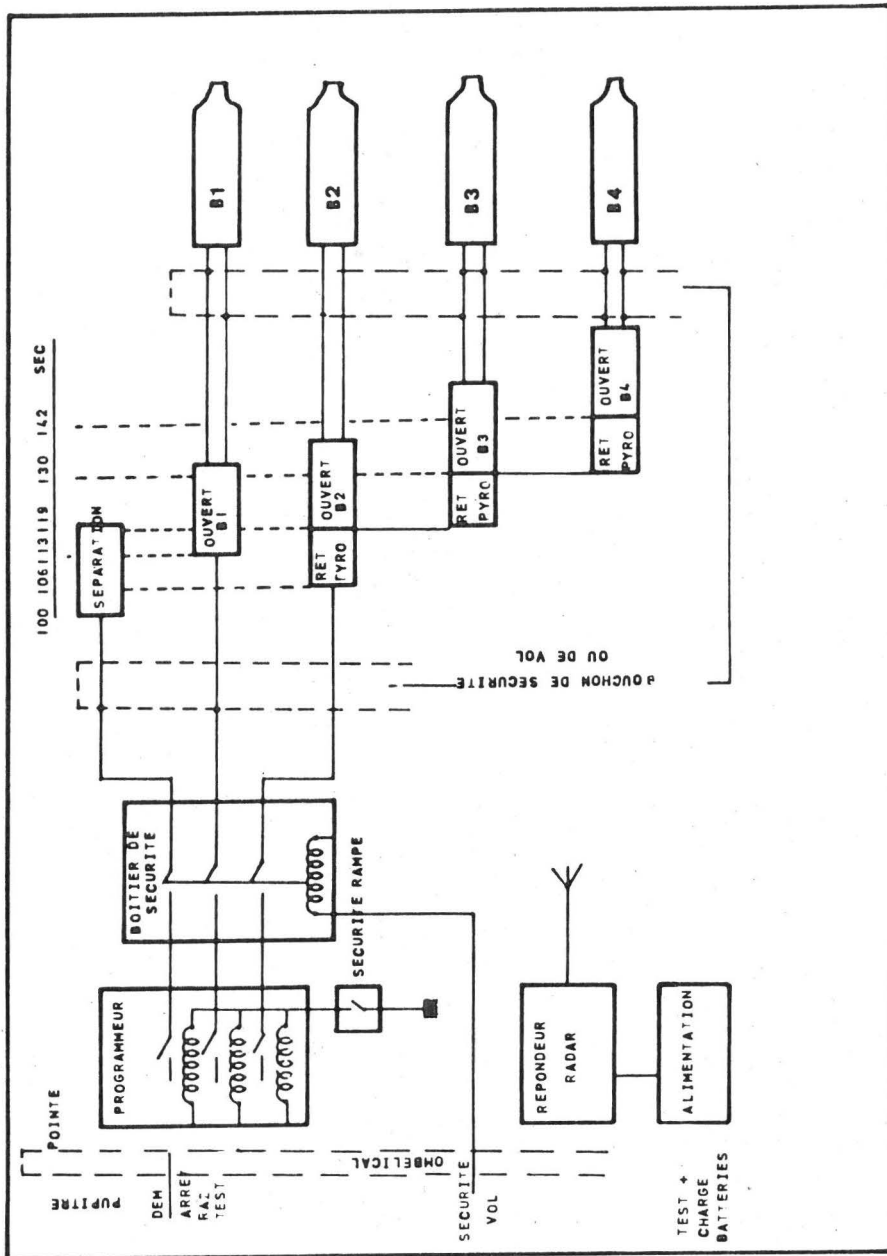


Fig3: Schéma fonctionnel de la pointe

Un premier projet comprenait un programmeur donnant à des temps prédéterminés les cinq ordres nécessaires pour la séparation et l'ouverture des quatre bouteilles. Après les premiers essais cette solution a dû être abandonnée : l'ouverture instantanée des bouteilles nécessitait un système pyrotechnique important qui provoquait un choc important sur toute la structure de la charge utile et qui ne pouvait pas être absorbé par les amortisseurs (4000 g pendant 1.5 milliseconde). Ceci constituait une contrainte trop importante pour l'électronique standard utilisée pour cette expérience. De ce fait aucun système électronique ou électromécanique était encore fiable après l'ouverture de la première bouteille. La solution finale adoptée fut donc l'utilisation de retards pyrotechniques (fig. 3). Le programmeur a été gardé pour la séparation engin-charge utile, l'ouverture de la première bouteille et l'initialisation d'une chaîne de retards pyrotechniques, ce dernier ordre passant avant l'ouverture de la première bouteille. Trois chaînes de deux retards pyrotechniques de 6 sec. furent montées en série. L'utilisation de ces retards fixes limitait le choix des moments d'ouverture. Néanmoins, comme ce système permettait de choisir le moment de l'ouverture de la première bouteille et que chaque explosion était séparée d'environ 12 sec. la couverture du domaine d'altitude à étudier était garantie compte tenu des performances de la fusée.

Un autre problème très important concernait la sécurité. La pointe comportait des bonbonnes d'un gaz extrêmement toxique et un système pyrotechnique dangereux. Par conséquent il était indispensable de prévoir des sécurités qui permettaient de faire les préparations du vol et le lancement sans aucun risque pour le personnel. De plus, le monoxyde d'azote ne se conservant pas à des pressions élevées pendant de longues périodes, il a été transporté dans des bonbonnes de 20 litres sous une pression de 10 bars et transféré dans les bonbonnes de vols de 4 litres sous une pression de 50 bars à la base de lancement quelques semaines avant les vols. Après le remplissage, les bouteilles sont restées sous une surveillance constante : toutes les deux heures des mesures avec des détecteurs de fuite de NO_2 (à la pression ambiante le NO se transforme immédiatement en NO_2) étaient effectuées.

Les étoupilles des charges explosives qui devaient couper la bouteille étaient réalisées avec des connections doubles : une fiche permettait de les court-circuiter le plus près possible de la charge pendant le montage et pendant le stockage. Ces court-circuits étaient enlevés seulement pour l'assemblage final de la pointe sur l'engin. De plus, une prise de peau permettait la convection d'un bouchon de sécurité, de test ou de vol. Le bouchon de sécurité court-circuitait toutes les étoupilles des charges explosives et permettait de tester tout l'équipement standard sans aucun danger. Le bouchon de test permettait de mesurer la résistance des étoupilles et l'absence de tension sur les fils venant du programmeur avant de les interconnecter avec le bouchon de vol. De plus, les relais des retards pyrotechniques étaient interconnectés de telle façon que les étoupilles étaient protégées par deux court-circuits. En plus de toutes ces précautions les pointes étaient équipées d'un boîtier de sécurité standard du CNES qui était actionné à partir du pupitre de commande et qui interdisait la transmission des ordres du programmeur jusqu'à la mise en position vol, c'est-à-dire 1 minute avant le départ de la fusée.

Finalement le programmeur lui-même était muni d'une sécurité "rampe", qui par l'intermédiaire d'un court-circuit dans le cordon ombilical bloquait les relais commandés par le programmeur.

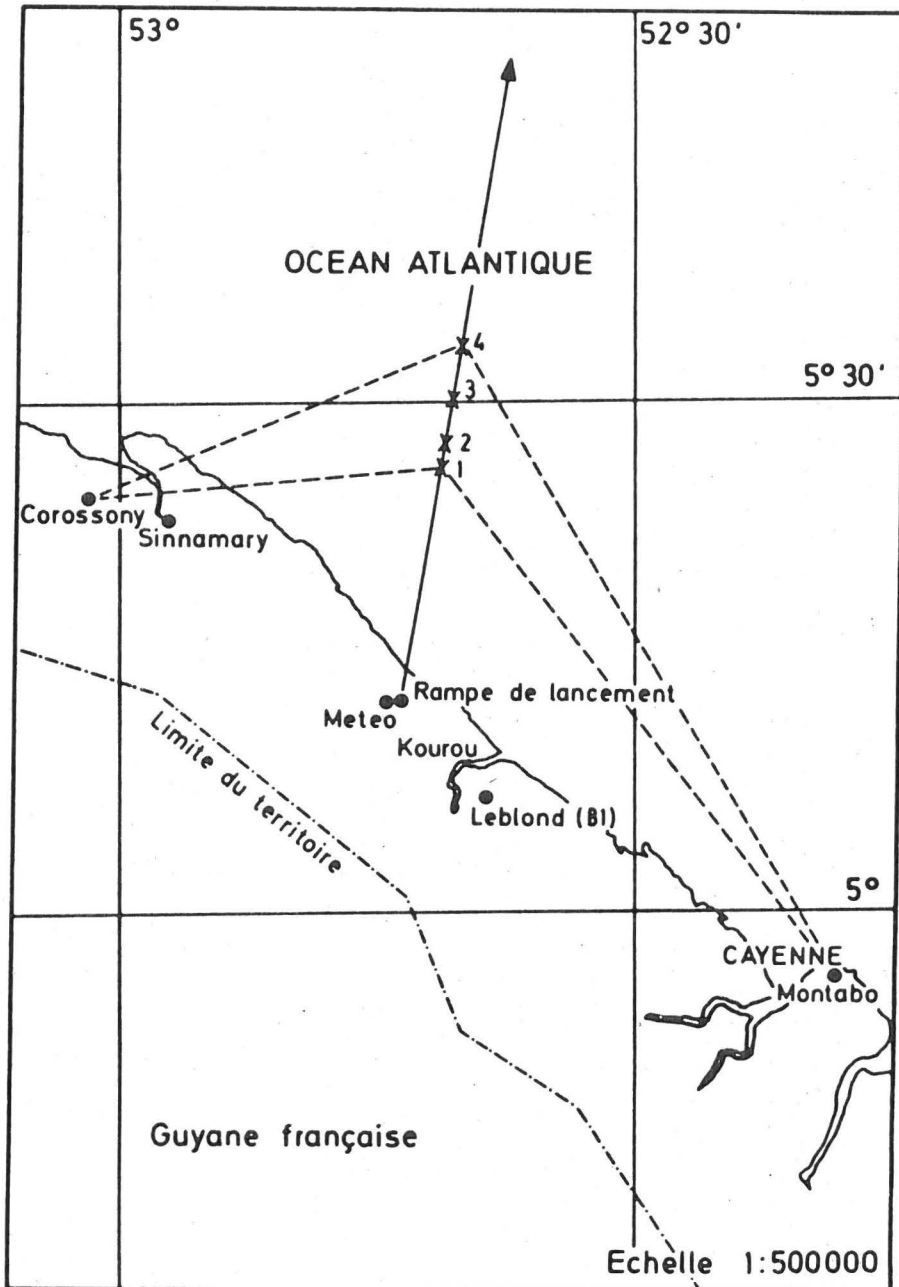


Fig4: Les stations d'observations

c) Les stations d'observation (fig. 4)

Les moyens optiques utilisés et leurs implantations au sol devaient permettre d'enregistrer les informations nécessaires à la détermination de l'altitude des nuages, de leur intensité lumineuse et de leur évolution au cours du temps. De ce fait, il existait une contrainte météorologique très sévère, le ciel devant être parfaitement dégagé aux différents points d'observation en direction des nuages et ceci du début à la fin d'une même nuit.

Grâce à une bonne préparation et une étroite collaboration avec le CSG les instruments d'observation ont pu être utilisés avec la plus grande efficacité.

L'emplacement des stations d'observation a été choisi en fonction des missions et des caractéristiques des différents appareils optiques avec en plus, pour chaque station, des impératifs évidents tels que vue dégagée et absence de lumière parasite en direction de la zone probable d'apparition des nuages.

Ainsi, les stations de Montabo et de Corossony, distantes d'une centaine de kilomètres ont été choisies pour la triangulation. Celles de Météo et Leblond, plus proches du plan de tir ont été retenues pour les appareils à faible champ. De plus, l'avantage essentiel de la station Leblond, était la possibilité de fixer directement un instrument sur la tourelle du radar Bretagne 1 (B1) et ainsi d'en assurer automatiquement le pointage sur les nuages artificiels.

L'implantation des instruments aux différentes stations est décrite dans le tableau ci-dessous. A l'exception de la caméra TV de la station Leblond, les divers instruments étaient installés sur des supports individuels fixés sur des socles en béton, et comportant un dispositif manuel d'orientation en site et en gisement.

IMPLANTATION DES MOYENS D'OBSERVATION

Stations	Corossony	Météo	Leblond	Montabo
Caméra de triangulation	x			x
Caméra TV		x	x	
Caméra Gianini		x		x
Appareils Hasselblad				x

Indépendamment des appareils destinés à l'observation des nuages de NO, la station Météo disposait d'un photomètre appartenant à l'Institut d'Astrophysique de Paris (IAP). Cet appareil permettait la mesure de l'émission du ciel nocturne à 5577 Å, valeur caractéristique de l'oxygène atomique à son maximum de concentration. L'utilité de cette mesure était de déterminer pour le cas où les lancements ne pouvaient avoir lieu dans la même nuit, la variation relative de la concentration globale moyenne de l'oxygène atomique d'une nuit à l'autre.

Citons encore pour mémoire l'électronique associée aux instruments et permettant le déclenchement automatique des séquences de prise de vue, et, pour les caméras TV, l'enregistrement sur magnétoscope des prises de vue, d'une base de temps et du top décollage.

Les principales caractéristiques optiques des instruments d'observation sont données dans le tableau ci-dessous.

CARACTERISTIQUES OPTIQUES DES INSTRUMENTS

Instrument	Ouverture	Focale	Support	Champ	Codes
Caméra de Triangulation	F/5	500 mm	Plaques 103F KODAK 20x25 mm	22°x28°	1 pose de 5 min
Caméra TV	F/4,5	500 mm	-	5°	50 i/s
Caméra Gianini	F/0,87	76 mm	Film 35 mm KODAK 2485 (8000 ASA)	18°x26°	Poses 2 à 5 sec
Appareil Hasselblad	F/2,8	80 mm	Film 70 mm KODAK 2485 (8000 ASA)	52°	2 à 10 sec

Notons que les caméras de triangulation sont en fait des chambres photographiques à obturateur électrique.

Quant aux caméras TV Westinghouse, la première est du type SIV 614, et possède un détecteur SEC WL-30691 avec une photocathode 820 couplé par fibres optiques à un intensificateur d'image WL 30677; la seconde de type TEM 801 E possède le même intensificateur, mais son détecteur type WX - 31792 EBS également avec une photocathode S20, lui donne une sensibilité 2,5 fois plus élevée. La résolution de ces deux caméras est de 625 lignes.

La formation des nuages était déterminée par un programmeur déclenché quelques instants avant la mise à feu de la fusée, et réglé de telle sorte que pour un fonctionnement nominal, les nuages se produisent en des points de coordonnées (x_i, y_i, z_i) où $i = 1, 2, 3, 4$, le premier nuage se produisant à un instant T_1 par rapport au démarrage de la minuterie, et le dernier à l'instant T_4 .

Le pointage nominal des appareils d'observation consistait donc à aligner l'axe optique des appareils sur le point de coordonnées $(\frac{x_1 + x_4}{2}, \frac{y_1 + y_4}{2}, \frac{z_1 + z_4}{2})$ où, ce qui revient quasiment au même à viser un point (X, Y, Z) de la trajectoire nominale correspondant à un instant T tel que $T_1 < T < T_4$, où T est toujours compté par rapport au démarrage du programmeur.

Toutefois, à cause de dispersions sur les instants de démarrage de la minuterie, et de la mise à feu de la fusée d'une part, et de la dispersion propre de la fusée d'autre part, le point moyen de formation des nuages peut être sensiblement différent du point visé nominal (X, Y, Z) , et le pointage des appareils doit être modifié en conséquence pour que les quatre nuages soient dans leur champ. Le pointage correct des appareils uniquement à partir d'observations visuelles en temps réel étant pratiquement impossible une procédure d'orientation utilisant au mieux les moyens du CSG a été mise en place.

Les appareils étant préorientés sur le point visé nominal (X, Y, Z) de la trajectoire nominale correspondant au temps T, le système de localisation définit la trajectoire réelle de la fusée. Un ordinateur IBM 360/44 traite les informations trajectographiques après la phase propulsée pour calculer une prédiction de la position de la fusée (X_p, Y_p, Z_p) à l'instant T. Par comparaison avec les valeurs nominales (X, Y, Z), il en déduit les corrections à apporter au pointage des instruments. Les informations relatives à la station Leblond, permettent un parallaxage automatique de la tourelle du radar Bretagne 1 qui supporte une caméra TV. Les autres informations sont transmises par moyens filaires et hertziens aux stations Corossony, Météo et Montabo; les corrections en site et gisement par rapport au prépointage y sont visualisés sur télétype, à l'aide d'un message télex doublé pour palier à un défaut de transmission.

On trouvera ci-dessous les instants caractéristiques au cours d'un lancement, qui conduisent à un temps disponibles pour les opérateurs égal à 26 s pour effectuer les corrections de pointage.

$H_0 - 30$ s		- démarrage minuterie (programmeur)
		- initialisation du programme de calcul sur IBM 360/44
H_0		- décollage de la fusée
		- émission d'un top pris en compte par le calculateur
$H_0 + 34$ s		- fin de propulsion du 2 ^e étage
	$\Delta t = 6$ s	- lissage et confirmation de la trajectoire réelle
$H_0 + 40$ s		
	$\Delta t = 21$ s	- élaboration, transmission et visualisation des éléments de correction de pointage
$H_0 + 61$ s		
	$\Delta t = 26$ s	- temps de correction de pointage disponible
$H_0 + 87$ s		- émission du premier nuage NO
$H_0 + 125$ s		- émission du quatrième nuage NO

3. FONCTIONNEMENT DES MOYENS

La tableau ci-dessous rassemble les jours et heures des trois lancements, et les nuages observés :

N° du lancement	Jour	Heure	N° des nuages observés
1	12.09.74	22h20 mm 32 s	1 - 2
2	12.09.74	23h26 mm 19 s	1
3	13.09.74	22h23 mm 05 s	1 - 2 - 3

Les premier et second lancements ont été effectués aux heures prévues. L'analyse immédiate montrait qu'au premier lancement, deux nuages avaient été observés et qu'au second lancement, seul le premier avait été observé d'où deux hypothèses :

- l'heure du second lancement était telle que la concentration en oxygène atomique avait fortement baissé auquel cas, le troisième lancement devenait inutile.
- les bouteilles nrs. 2 - 3 et 4 ne s'étaient pas ouvertes et dans ce cas, l'intérêt du troisième lancement était fortement diminué.

Par ailleurs, d'intéressants phénomènes de turbulence ayant été mis en évidence au premier lancement, la décision a été prise de reporter le troisième lancement au lendemain, à l'heure du premier lancement.

Aucune anomalie n'a été constatée concernant le fonctionnement des fusées sondes Centaure 2C sinon des performances légèrement supérieures aux prévisions.

D'autre part, le fonctionnement des charges utiles a été satisfaisant du point de vue répondeur radar, boîtier de sécurité, programmeur, séparation pointe-véhicule. Quant à l'ouverture des bouteilles, on constate un taux de panne de 50%. Ceci est probablement dû à une fiabilité insuffisante du bouchon de vol, système qu'il était indispensable de maintenir pour des raisons de sécurité, et dont la fiabilité ne pouvait être augmentée pour des raisons de délais.

Enfin, le fonctionnement des moyens optiques a été extrêmement satisfaisant, en effet pour tous les nuages émis, l'ensemble des objectifs des observations a pu être rempli, c'est-à-dire mesure des vents et la détermination de l'altitude, la mesure de l'intensité lumineuse et l'observation de la turbulence atmosphérique.

CONCLUSIONS

Les résultats obtenus par les trois tirs de fusée Centaure 2C les 12 et 13 septembre 1974 à partir du Centre Spatial Guyanais permettent donc une détermination du profil de concentration de l'oxygène atomique entre 80 et 105 km d'altitude. D'autre part, la décroissance de la concentration après le coucher du soleil pourra être estimée pour une altitude, à partir des résultats du deuxième tir. Enfin, des informations intéressantes ont été recueillies sur la turbulence dans la basse thermosphère. Les moyens mis en oeuvre se sont donc révélés suffisamment fiables pour atteindre la presque totalité des objectifs scientifiques et ceci grâce notamment à une charge utile de conception simple et de plus peu coûteuse. D'autre part, l'utilisation des moyens existant au Centre Spatial Guyanais a permis une utilisation efficace des instruments d'observation des nuages artificiels.

Etant donné l'efficacité des moyens mis en oeuvre et le faible coût de l'expérience, il serait intéressant de procéder à des tirs complémentaires. Il faut malheureusement noter que du fait de la suppression des divisions fusée-sonde aussi bien au Centre Européen de Recherches Spatiales (CERS-ESRO) qu'au Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) d'une part et du fait de la mise en sommeil de la base de lancement de Kourou d'autre part, les laboratoires européens se voient priver d'un outil encore indispensable pour l'étude de l'atmosphère.