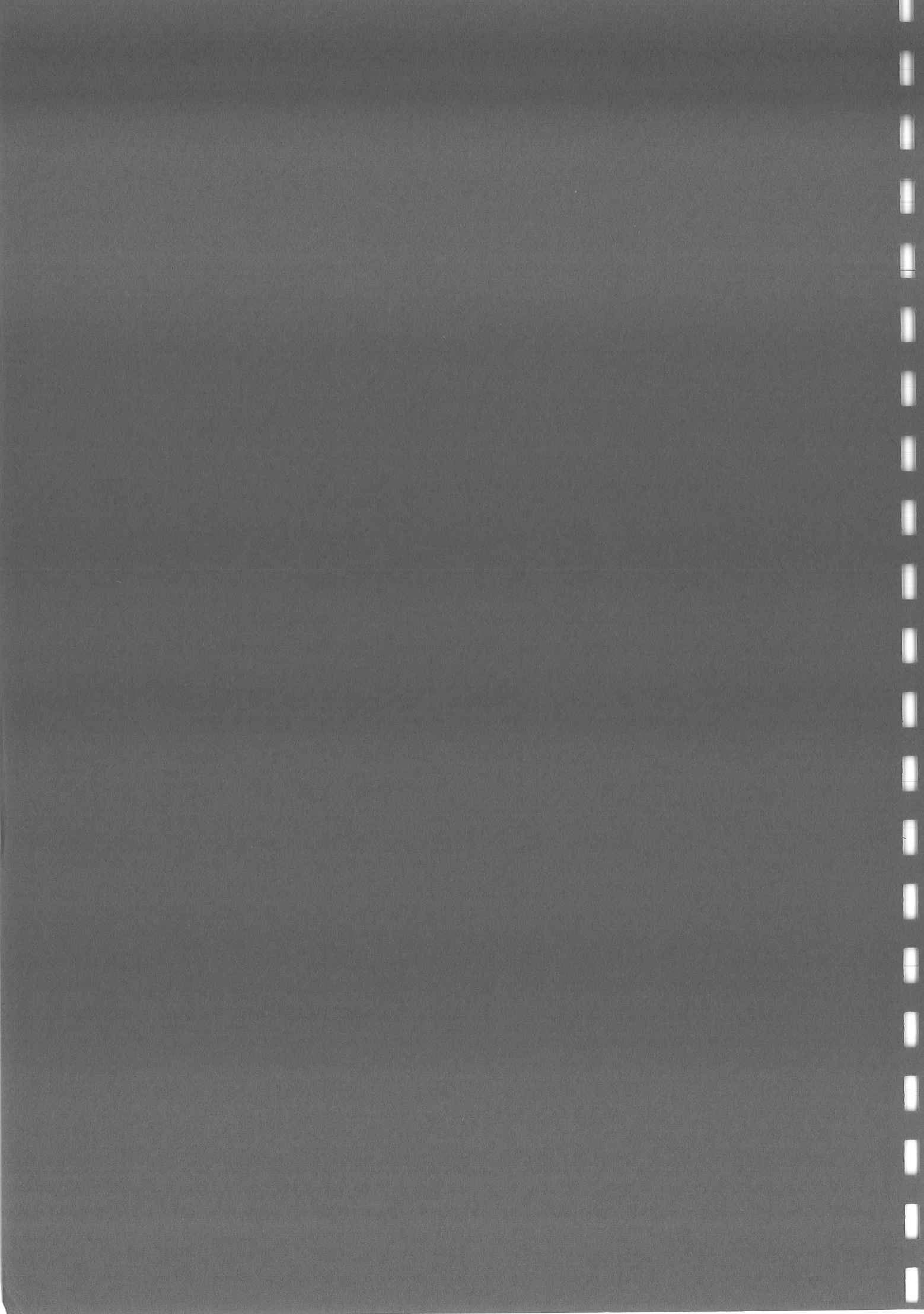


Application de la détection
bolométrique à
l'Astrophysique submillimétrique

Le photomètre SPM
sur PRONAOS

Jean-Pierre TORRE



Détection de rayonnements à très basse température

**3ème Ecole d'Automne
Aussois
du 25 au 29 Novembre 1996**

**Application de la détection bolométrique à
l'Astrophysique submillimétrique**

Le photomètre SPM sur PRONAOS

J-P.TORRE

PRONAOS

c'est un acronyme pour :

PROjet National d'AstrONomie Submillimétrique

C'est un projet commun entre :

- le CNES (maitre d'œuvre de la nacelle et du télescope et l'industrie, constructeur du télescope (Matra)
- le CNRS responsable des instruments focaux et de l'alignement du télescope

Son but

Mettre à la disposition des astronomes une nacelle embarquée sous ballon stratosphérique, permettant d'observer le rayonnement submillimétrique provenant de l'Univers.

Pourquoi sous ballon ?

Au sol, dans le domaine de longueur d'onde entre 200 μm et 1 mm, l'atmosphère est pratiquement opaque dû principalement aux raies de rotation de la vapeur d'eau (transmission au sol <1%), sauf dans deux "fenêtres atmosphériques" à 350 et 450 μm où elle peut atteindre 25% dans les meilleurs cas.

Même dans ces fenêtres, les fluctuations de l'émission atmosphérique sont la cause d'un bruit limitant la sensibilité des mesures.

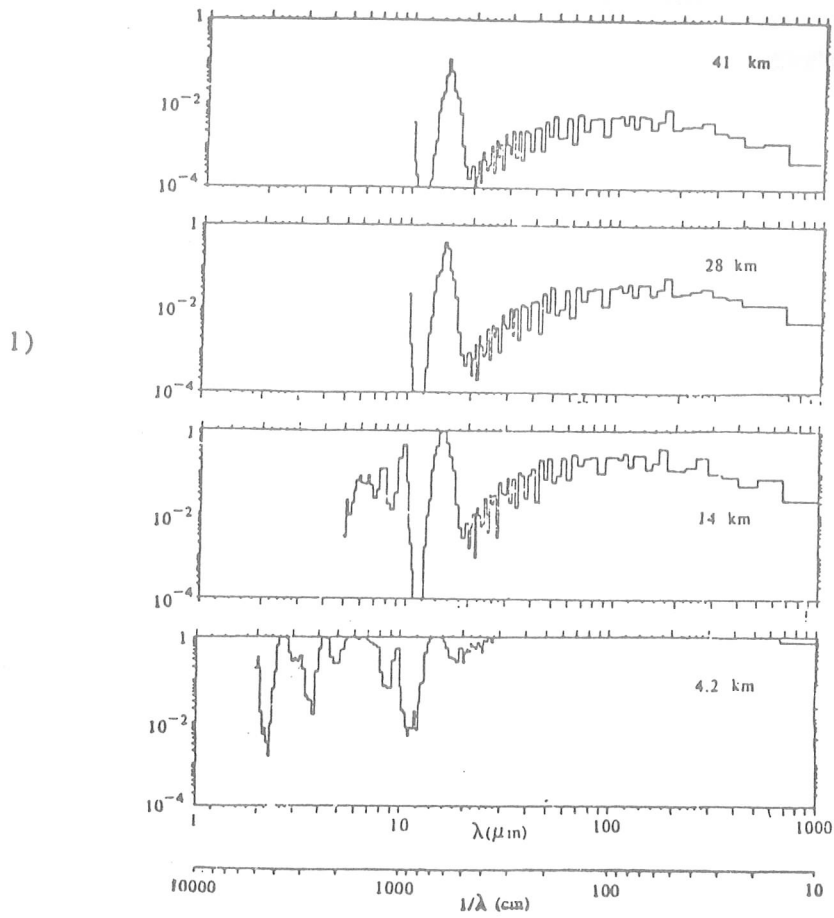
La localisation de la vapeur d'eau dans la basse atmosphère explique que la transmission atmosphérique augmente rapidement avec l'altitude, de sorte que certaines observations impossibles depuis le sol deviennent réalisables à l'altitude d'un avion.

Cependant dans le domaine submillimétrique, l'émission atmosphérique s'améliore, elle, beaucoup moins vite avec l'altitude (elle est réduite d'un facteur 10 environ à 14 Km par rapport à celle des meilleurs sites sur terre à 4,2 Km d'altitude)

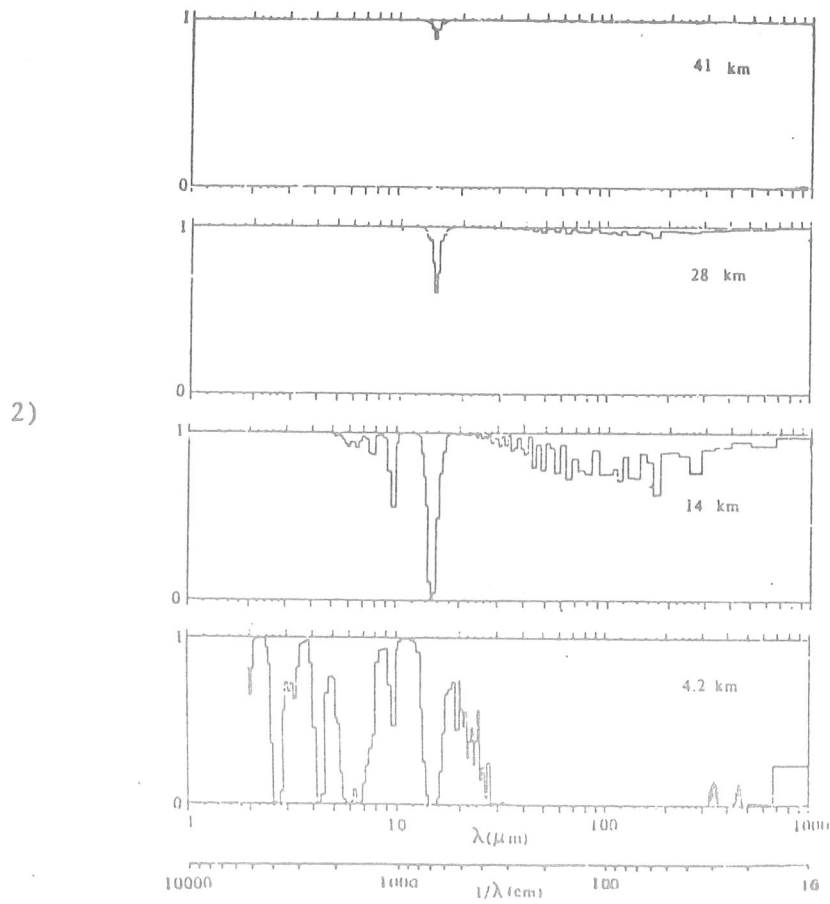
Par contre, aux altitudes de vol des ballons (~ 40 km), cette émission devient inférieure à 0,5% de celle rencontrée aux meilleurs sites sur terre. La transmission elle est pratiquement de 100% (en satellite le problème ne se pose plus!)

Ceci explique que les émissions provenant de l'univers dans le domaine submillimétrique reste aujourd'hui un des domaines du spectre le moins connu.

Emission

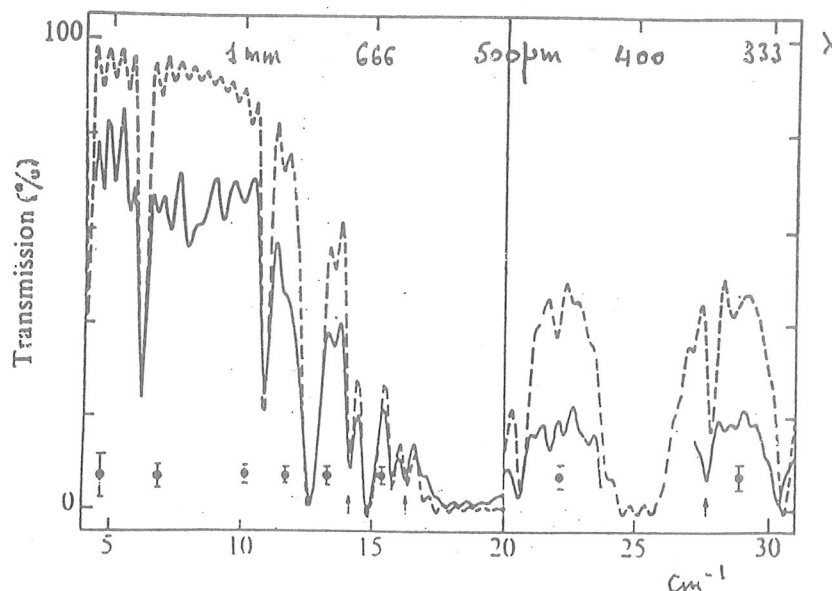


Transmission



Figures 1 et 2: Transmission et emission atmosphérique pour diverses altitudes

Fig. 1 Measurements in January-February 1976 at Mauna Kea (elevation 4.2 km, latitude 19°50', longitude 155°28'). The solid line is an average transmission spectrum for which the mean zenith angle is 55°. The resolution is 0.5 cm⁻¹. Below 20 cm⁻¹ the average is from nine days of observation with a mean water vapour content of 1.9 mm precipitable in the path. Above 20 cm⁻¹ the average is from the four driest days, with 0.9 mm precipitable. The displaced error bars represent the standard deviation of the noise on the spectra. The dotted line shows theoretical predictions in which the small oscillations between known lines come from including the effects of the instrumental 'spectral windows'. Arrows mark O₂ lines, other lines are due to water.



Quel est l'intérêt de ce domaine submillimétrique ?

C'est l'accès à l'observation de " l'Univers froid " (3-20 K) et ceci se réfère à des objets appartenant à presque toutes les échelles de l'Univers :

du rayonnement fossile du "big bang" et ses distorsions, en passant par les objets à très fort "redshift", jusqu'aux atmosphères des planètes géantes.

C'est aussi les nuages denses du milieu interstellaire qui sont le siège de la formation d'étoiles et de systèmes planétaires.

Dans ces nuages, les très abondants grains de poussière empêchent généralement de "voir" les corps qui y sont enfouis. Ce n'est par contre pas le cas dans le **submillimétrique** qui contient de plus une part importante de l'énergie qu'ils rayonnent (proto-étoiles).

Etant données les valeurs extrêmement faibles des flux à mesurer et la taille des objets à observer, il faut donc disposer d'un collecteur de lumière de grande surface ayant de plus une grande résolution angulaire, couplé à un système de pointage très performant. C'est le but que s'est assigné la nacelle PRONAOS.

Nous allons décrire cette nacelle et l'instrument focal SPM constitué d'un photomètre couvrant la gamme spectrale 180 μm à 1,2 mm qui lui a été associé.

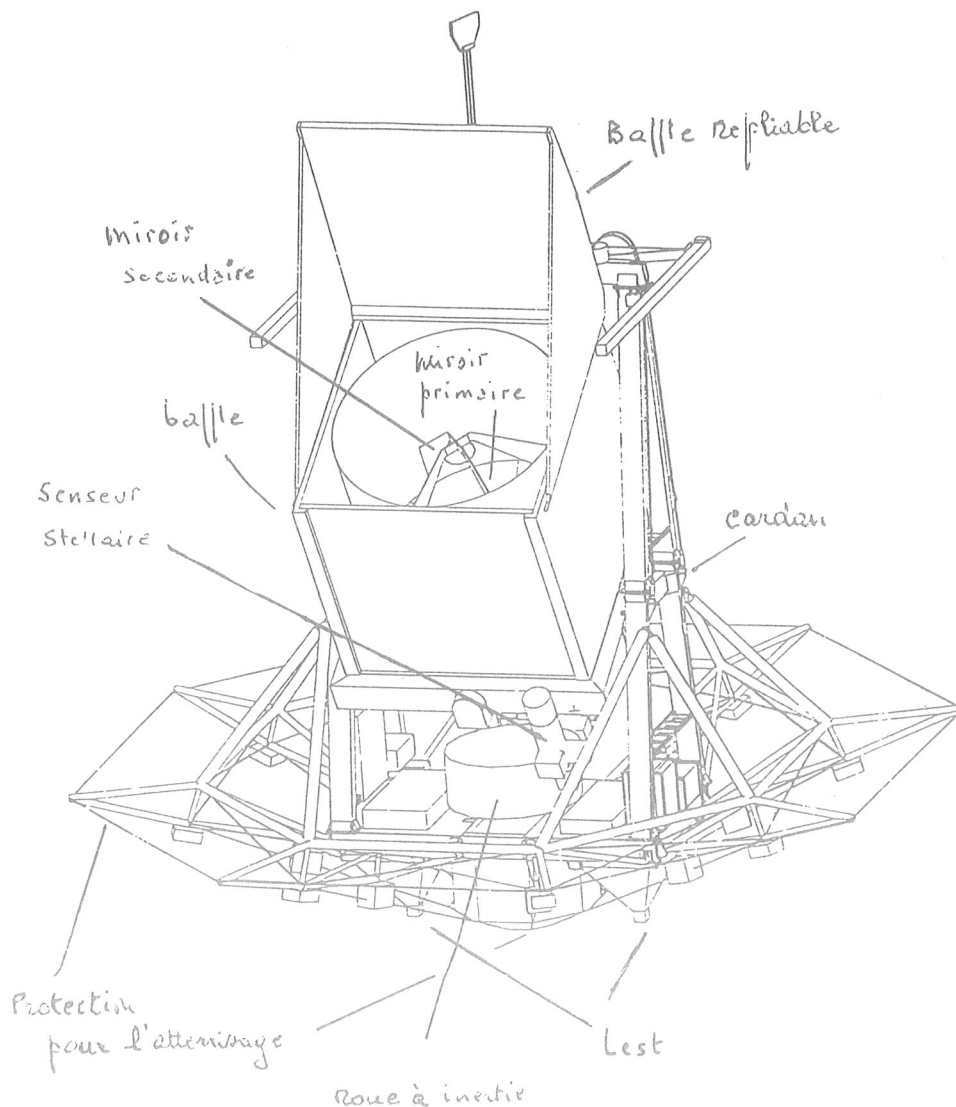
LA NACELLE PRONAOS ET LE TELESCOPE

La nacelle

le rôle de la nacelle est de supporter et de protéger l'ensemble télescope et instrument focal et de l'orienter dans la direction d'observation désiré. C'est une structure, principalement en aluminium, de 7 mètres de haut et d'un poids de 2,6 tonnes qui supporte également:

- le pack d'énergie de bord pour l'instrument scientifique et le pointage du télescope constitué par 100 Kg de batteries lithium
- l'électronique de pointage, de télémétrie et de télécommande, contrôlée par un ordinateur (Crouzet)

La nacelle supporte également 900 Kg de lest et dispose d'un système de protection de l'ensemble ci-dessus lors de l'atterrissage.



Le système de pointage

comporte 2 étages :

- l'un de stabilisation en azimuth qui oriente l'ensemble de la nacelle et amortit les perturbations externes,

- un système de pointage fin qui oriente les 450 Kg constitué par le télescope et l'instrument focal grâce à un montage à la cardan, avec une déviation standard nominale de 5 secondes d'arc. Une plateforme à inertie est utilisée comme senseur à court terme dans la boucle d'asservissement de pointage. Les décalages à plus long terme sont mesurés par un pointeur stellaire pouvant détecter des magnitudes d'ordre 5 et utilisable de nuit comme de jour. Il peut être orienté hors de l'axe de visée du télescope de manière à toujours avoir une étoile de magnitude suffisante dans son champ de vue.

L'équilibre de la masse pointée est maintenue par des masselottes mobiles de manière à compenser les déformations mécaniques et l'évaporation de l'Hélium dans le cryostat.

Le télescope

De type cassegrain a un diamètre du miroir primaire de 2065 mm et une distance primaire-secondaire de 1718 mm. Sa focale est de 20 m et sa masse de 225 Kg

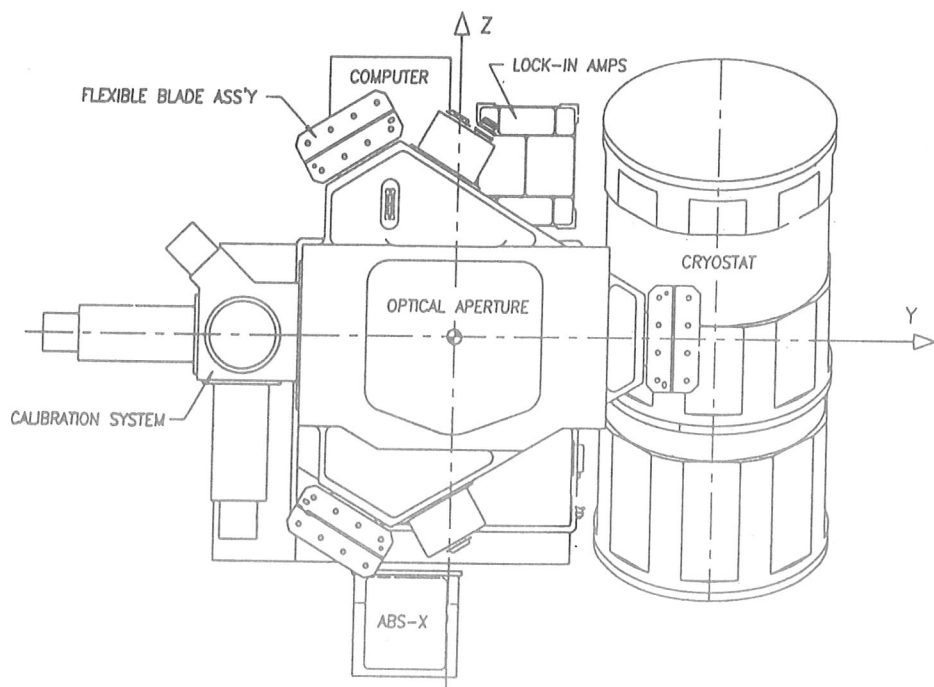
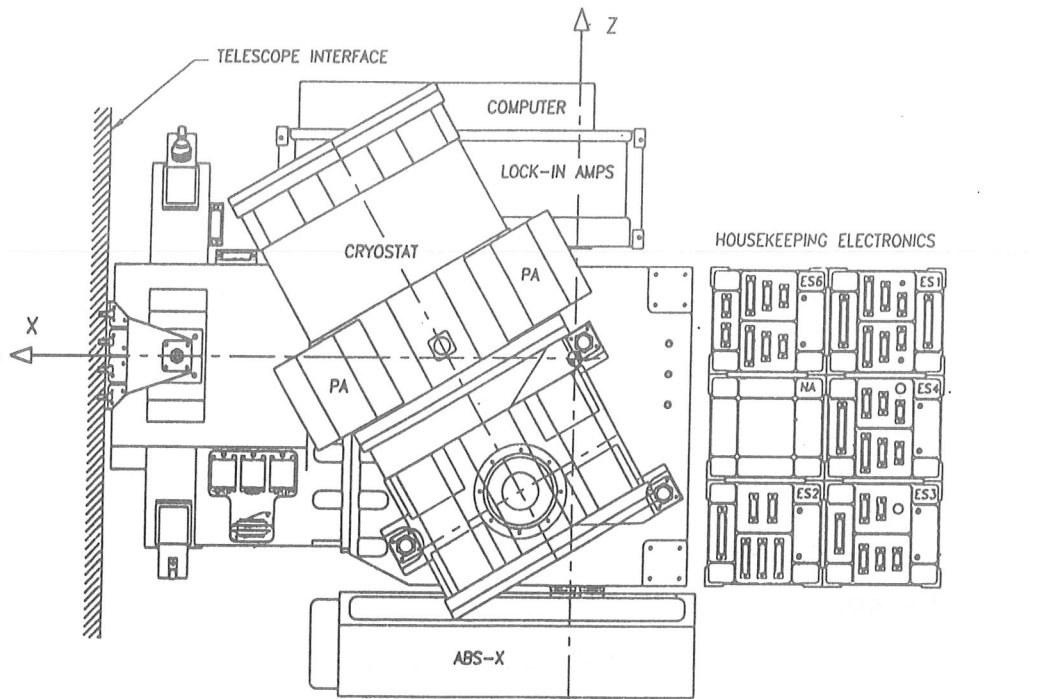
Le miroir primaire est segmenté en 6 pétales faites d'un sandwich de nid d'abeille en fibre de carbone entre 2 feuilles de fibre de carbone. La face avant est dorée pour avoir un fort coefficient de réflexion. le miroir secondaire est supporté par 4 lames en fibres de carbone traités optiquement pour éviter les réflexions parasites.

La position de chaque pétale est ajustée au sol de manière à ce que leur ensemble forme un miroir unique pratiquement parfait. Des senseurs de position associés à des actionneurs qui supportent les pétales permettent de compenser, par une boucle d'asservissement, les effets de la gravité et de la température et de maintenir les déformations à long terme à une valeur de 12 μm RMS.

L'ensemble du télescope est protégé des sources de chaleur provenant du soleil et de la terre par un baffle de mylar aluminisé. Ceci limite le gradient thermique le long du \emptyset du primaire à quelques K.

Ceci est très important pour la qualité des mesures effectuées par le photomètre SPM comme nous le verrons.

Le Photomètre SPM



LE PHOTOMETRE SPM

Objectifs scientifiques :

1/ Univers froid (3-20 K)

- cartographie de nuages de poussières froides du milieu interstellaire, régions de formation d'étoiles

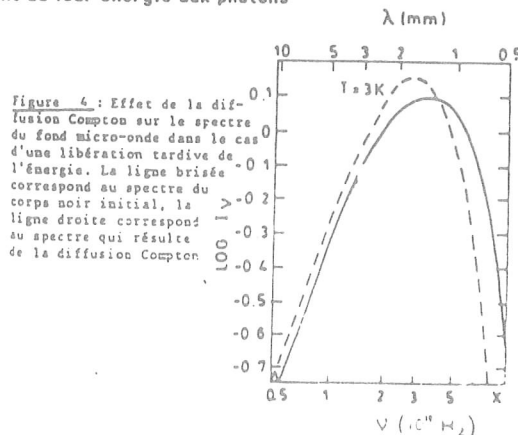
Les étoiles naissent au sein du milieu interstellaire dans de gigantesques nuages de gaz (H_2 et He) et de poussières. Ces nuages sont chauffés par les étoiles environnantes et par l'énergie gravitationnelle qui tend à les condenser. Cependant on constate qu'ils semblent être en équilibre thermique et donc qu'ils se refroidissent simultanément soit en émettant dans l'infrarouge et le submillimétrique soit par par émission de raies atomiques et moléculaires. Le continu de cette émission dans le submillimétrique est dû principalement à l'émission thermique des poussières. La forme du spectre dans ces longueurs d'onde peuvent fournir des informations sur la nature et la quantité de poussière.

2/ Univers lointain

- distorsion du rayonnement fossile \rightarrow effet Sunyaev-Zeldovitch

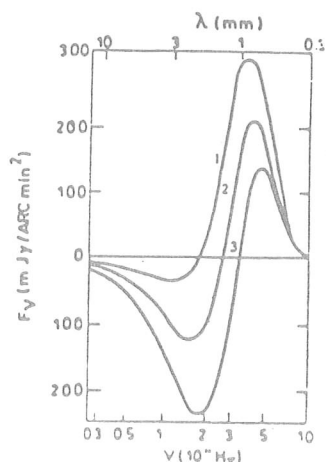
Dans les amas riches de galaxies, on a découvert, par des observations dans les X, la présence d'un gaz chaud sous forme d'un plasma ($T \approx 10^8$ K). Lors de la collision des photons de basse fréquence du rayonnement fossile par les électrons chauds de ce plasma ($kT \gg h\nu$), les électrons vont céder aux photons une partie de leur énergie. Le spectre de rayonnement du corps noir des photons fossiles va donc être distordu vers les hautes fréquences. L'intensité diminue dans la partie Rayleigh-Jeans et augmente dans la partie Wien. Les amas apparaissent comme une "source négative" dans le domaine millimétrique et centimétrique et comme une source brillante dans le submillimétrique. A cet effet se surajoute un effet doppler dû à la vitesse de l'amas. La comparaison du rayonnement du corps noir cosmologique dans la direction des amas très lointains (de même diamètre angulaire que le photomètre) avec celui adjacent sans amas nous renseigne sur leur vitesse radiale. C'est le rôle dévolu à la bande aux plus grande longueur d'onde du photomètre. Notons que cet effet est indépendant de l'émission proche du milieu interplanétaire et interstellaire (la direction de visée est la même).

Rayonnement modifié par diffusion Compton : les électrons cèdent de leur énergie aux photons



MESURE DES VITESSES DES AMAS DANS LE REFERENTIEL COSMOLOGIQUE

Figure 5 : Spectre du rayonnement micro-onde d'un amas de galaxies en fonction de sa vitesse :
 1. $V = 3000$ km/s
 2. $V = 0$
 3. $V = -3000$ km/s.
 Les paramètres sont $kT_e = 5,1$ keV, $T_s = 3K$, $\tau_s = 0,1$



Caractéristiques principales du photomètre SPM

C'est un photomètre couvrant l'intervalle spectral : 180 μm -1,2mm en 4 bandes : 180-240 μm , 240-340 μm , 340-540 μm , 540-1200 μm avec des angles de vue sur le ciel respectivement de 2, 2, 2,5 et 3,5 minute d'arc. Son poids est d'environ 185 Kg et sa plus grande dimension de 1,1m.

Dans ces domaines spectraux, les seuls détecteurs large bande à très hautes performances sont les **bolomètres refroidis** à la plus basse température possible.

Le photomètre comprend donc :

1/ **Une optique de reprise chaude** derrière le télescope, associée à un système de calibration en vol.

La principale difficulté que l'on rencontre dans le domaine de l'instrumentation infrarouge et submillimétrique, provient l'obligation d'une ouverture du cryostat vers l'extérieur à travers des écrans puis d'une fenêtre et la présence d'un instrument, du télescope à température ambiante, de l'atmosphère qui vont rayonner un flux de plusieurs ordres de grandeur supérieur au flux provenant de la source astronomique à observer. Ce flux a de nombreuses conséquences sur le système de détection :

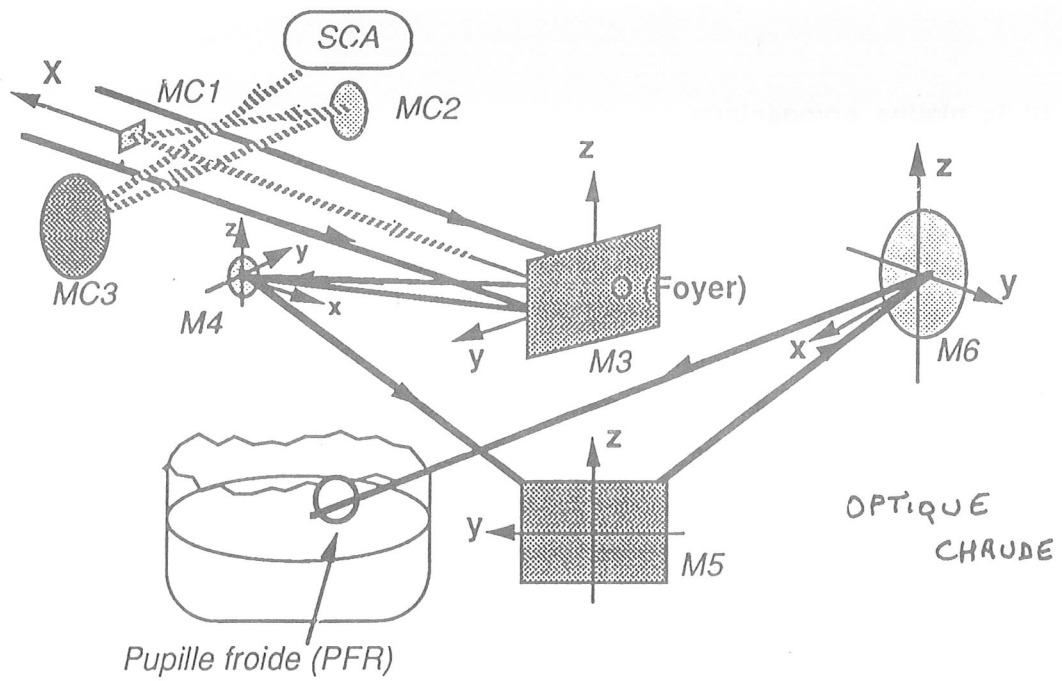
1/ il va apparaître un bruit de photons qui va diminuer sensiblement le rapport S/B

2/ sous l'effet de cette puissance de fond, soit la température du bolomètre va augmenter, diminuant sa réponse on sera obligé de le surpolariser, diminuant encore sa réponse, soit on compensera en augmentant la fuite thermique du bolomètre ce qui diminue aussi sa réponse. Dans les deux cas, le NEP du bolomètre augmentera.

Pour extraire le signal utile de ce fond continu parasite, le photomètre effectue des mesures différentielles entre deux points adjacents sur le ciel séparés par 6 minutes d'arc, compatible avec le champ de vue de chaque canal. Le faisceau réfléchi par le miroir M1 au foyer du télescope, est renvoyé, grâce à un miroir M4 oscillant à une fréquence de 19,5 Hz et situé dans le plan conjugué du secondaire du télescope, via les miroirs M5 et M6, vers la pupille froide d'entrée à l'intérieur du cryostat.

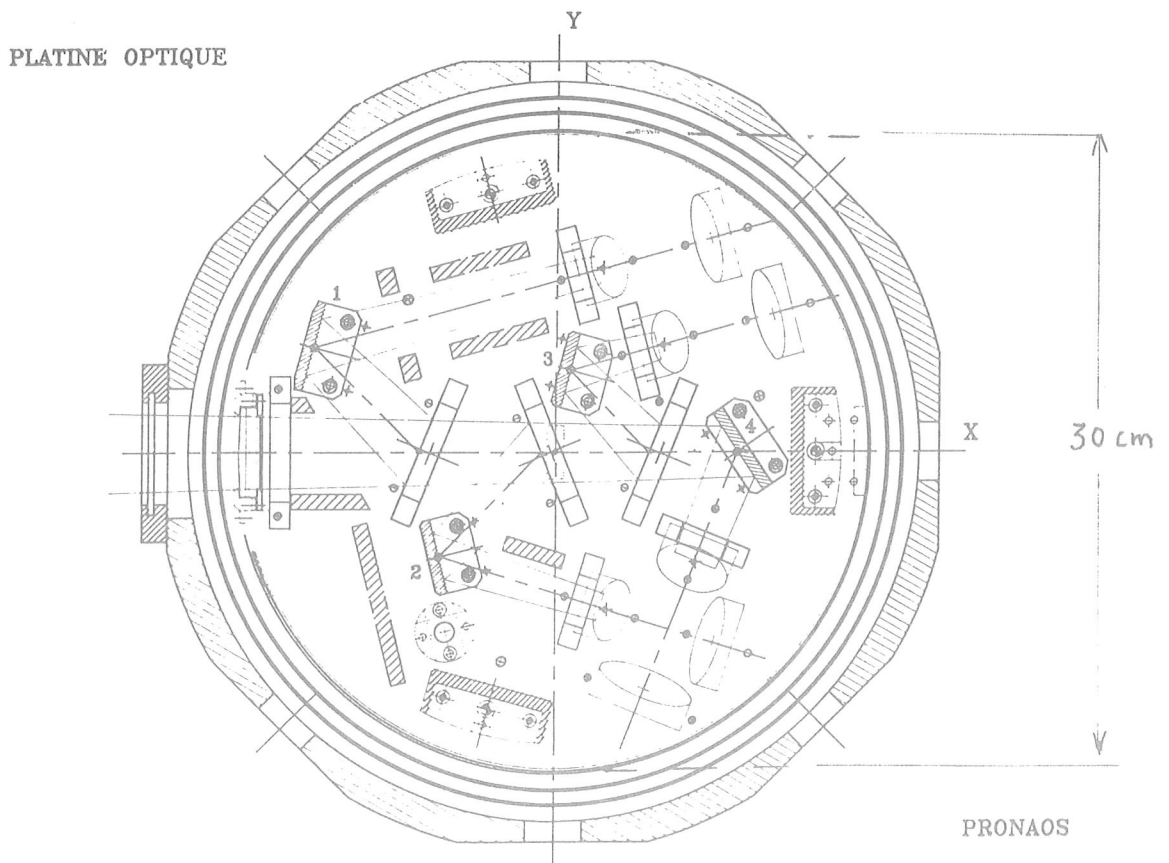
Cependant, de ce fait, pour chacune des deux directions de visée, le faisceau se trouve renvoyé par des parties différentes de l'optique de reprise et du miroir primaire qui peuvent avoir des températures et des émissivités différentes, induisant un possible signal parasite. Pour le supprimer, au moins au 1er ordre, toutes les 40 sec environ, les deux directions de visée sont interverties par basculement de l'ensemble du télescope et du photomètre. Une très grande attention a été portée dans le dessin de cette optique chaude sur la propreté du faisceau en terme de diffraction. à cet effet, tous les miroirs ont été surdimensionnés de manière à limiter le flux provenant par diffraction des l'extérieur des miroirs.

Entre chaque scène d'observation, une calibration a lieu ; un miroir escamotable MC1 est introduit dans le faisceau avec un taux de dilution de 3%, afin que le niveau de BG ne varie pratiquement pas, et renvoie à travers les miroirs MC2 et MC3 le signal différentiel issu de 2 corps noirs (SCA) à des températures respectives de 39 et 103 K.



2/ Un cryostat, contenant 13 litres d'Hélium liquide, comprenant

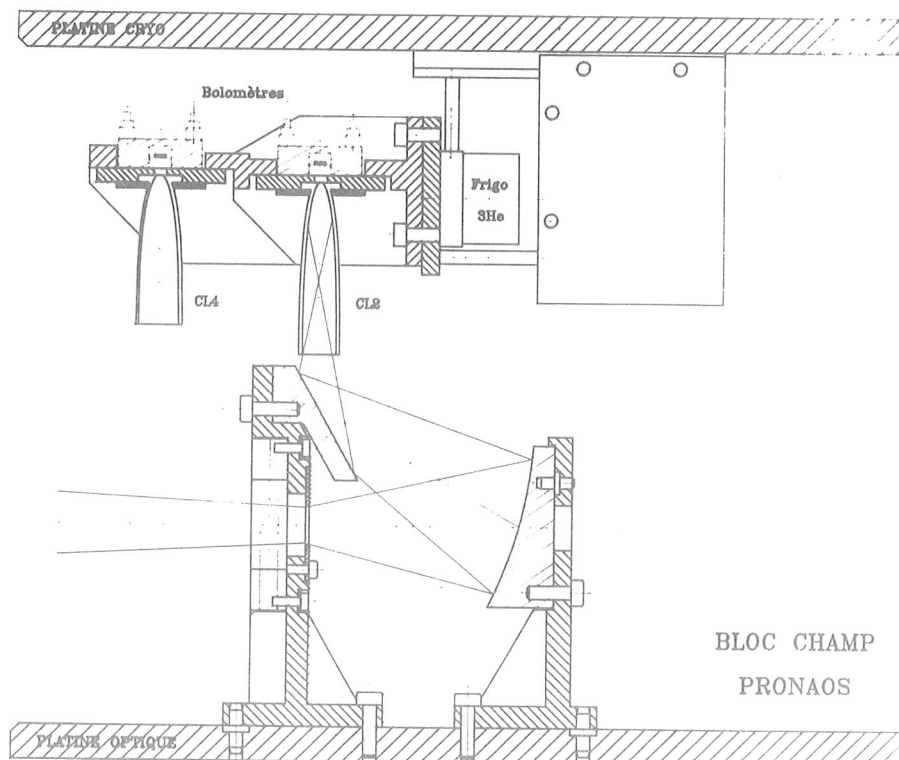
a/ une platine optique refroidie à l'hélium liquide par des colonnes de cuivre, et sur laquelle sont fixés : la pupille circulaire d'entrée, image du secondaire, les différents filtres de blocage des courtes longueurs d'onde et de séparation des voies (dichroïques), et des miroirs paraboliques hors axe qui renvoient l'image de la pupille d'entrée sur les cônes de lumière placés devant les 4 bolomètres.



b/ la platine cryogénique

Elle supporte 2 réfrigérateurs à ^3He hermétiques à pompe à adsorption qui refroidissent, à environ 0,29 K pendant le vol, chacun une lourde platine en cuivre ($\approx 450\text{g}$) portant 2 bolomètres et les cônes de lumières qui leur sont associés. La tenue mécanique de ces platines est assurée par des tubes extrêmement fins en acier inox permettant une bonne isolation thermique par rapport au fond du cryostat à la température de l'hélium liquide. Toutefois, la capacité calorifique de chaque platine et la conductance thermique des tubes de suspension conduisent à une énorme constante de temps de refroidissement à la mise en froid du cryostat. Un interrupteur thermique entièrement passif participe donc à cette suspension et améliore la vitesse de refroidissement d'un facteur 20 environ.

Pour chaque bolomètre, un étage à transistor à effet de champ refroidi (120 K) d'adaptation d'impédance est également fixé sur le fond du cryostat. Un blindage thermique et optique autour de ces FETs permet d'éviter tout rayonnement parasite. Les signaux ainsi traités sont envoyés vers 4 préamplificateurs fixés sur l'enveloppe extérieure du cryostat immédiatement au niveau des prises de sortie.



Bolomètres

Sur les voies 1 et 2 (180-240 et 240-340 μm) les bolomètres sont de provenance commerciale (Infrared Labs). Ils ont été commandés sur cahier des charges en fonction de la puissance de fond (2 à 3 nW) qu'ils devaient supporter. Ils sont constitués classiquement par un cristal de Silicium dopé, collé sur un substrat en diamant de 2 x2 mm, recouvert d'une couche de bismuth absorbant (si son impédance carré est bien respectée) 50% du rayonnement incident lors de la première traversée et réfléchissant 25%. Ce substrat est suspendu par des fils très fins de nylon (?) de très faible conductivité thermique. La fuite thermique elle même est constituée par les 2 fils électriques soudés sur le cristal de silicium. Etant donné le fort niveau de "background", le volume du cristal, environ 1,2 x1 x 0,6 mm, est relativement grand de manière à permettre une assez forte puissance de polarisation sans découplage électrons-phonons trop important dans le cristal. aucune mesure électrique valable n'a pu être faite sur ces bolomètres car ils présentent tous un effet non ohmique aux contacts.

Le bolomètre de la voie 3 (340-540 μm) a été fourni par N. Coron. Il est de construction spécifique à son auteur et aucun détail technique n'a été fourni.

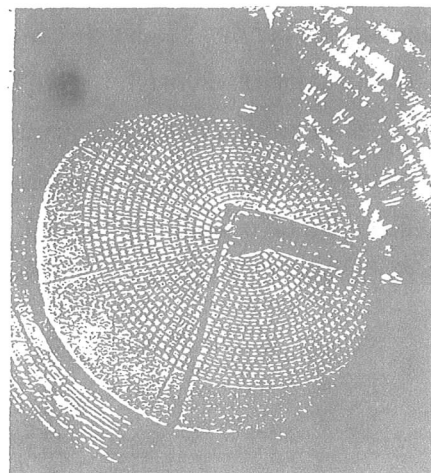
Le bolomètre de la voie 4 aux plus grandes longueurs d'onde est très particulier. il nous a été donné par J. BOCK de Caltech (USA). Dans ce type de bolomètre, le substrat en saphir ou diamant est remplacé par une sorte de toile d'araignée faite à partir d'une membrane de nitrure de silicium. Ce procédé a de multiples avantages :

1/ la capacité calorifique de cette toile est extrêmement réduite. Elle a en effet une épaisseur de l'ordre d'une fraction de μm et son volume est d'environ 5% de celui d'une membrane, de la même épaisseur, non découpée en toile d'araignée.

2/ Du fait de sa construction elle présente une section efficace très faible pour les perturbations extérieures tels que les rayons cosmiques.

3/ la taille des mailles de cette toile (60 μm) pour un \varnothing utile de 2,5 mm, permet de plus de rendre le bolomètre dépendant de la longueur d'onde et de le rendre beaucoup moins sensible aux fuites aux courtes longueurs d'ondes.

Cependant, les conditions de background (1nW) imposées par le photomètre SPM, ne sont pas très bien adaptées à ce type de bolomètre plutôt spécialisé aux conditions de très faible BG . Pour y satisfaire, de la même manière que pour les 2 bolomètres IR Labs, le volume du cristal de germanium dopé (1 x 0,25 x 0,25 mm) a dû être très fortement augmenté pour récupérer de la puissance de polarisation. son impédance est de l'ordre de 2 M Ω à 400 mK, sa température de fonctionnement.



3/ Le photomètre SPM comporte également **Une électronique de bord.**

Celle-ci est construite autour d'un ordinateur de bord qui gère 6 sous systèmes dédiés à la mesure scientifique, à la calibration et aux mesures concernant l'état de l'expérience. Il assure également l'interface avec le calculateur de la nacelle, prépare et transmet les formats de télémétrie et réceptionne et met en œuvre les ordres de télécommande. Cet ordinateur gère également le cyclage des 2 réfrigérateurs ^3He pendant la montée du ballon. Bien que l'autonomie de ces réfrigérateurs soit de 48 h environ, un recyclage en vol reste possible au cas ou !

Dès que les signaux, soit scientifiques à la sortie des préamplificateurs, soit de surveillance et de données techniques de l'instrument, sont d'amplitude suffisante, ils sont convertis en données numériques avec une résolution de 16 bits.

Pour chaque bolomètre, nous l'avons vu plus haut, un étage à JFET refroidi est utilisé. Il est monté en émetteur follower (adaptateur d'impédance) avec un courant drain et une tension-drain source constant, de manière à obtenir un gain rigoureusement unité avec une très grande dynamique. Ce JFET est stabilisé automatiquement en température grâce à la puissance dissipée dans le JFET et dans une résistance de carbone Allen-Bradley qui joue à la fois le rôle de thermomètre et de chauffage. En effet, cette dernière est alimentée à courant constant. Donc si la température tend à diminuer par exemple, sa résistance augmente ainsi que sa puissance dissipée ce qui tend à remonter cette température. Le gain de la chaîne analogique de chaque bolomètre, à la sortie (différentielle) des préamplificateurs fixés sur le cryostat, est de 1000. Ce signal est envoyé alors après conversion analogique-numérique en 16 bits sur une détection synchrone numérique pilotée par le signal provenant du capteur de position du miroir de modulation. Cette détection synchrone comprend un filtre passe bande, un amplificateur à gain programmable, un "déglicheur" et un détecteur de saturation. Le gain maximum de cette chaîne est de $4,5 \cdot 10^5$.

Une électronique universelle a été développée pour la lecture en 4 fils des différents thermomètres donnant les températures des différentes parties du photomètre, qu'elles soient dans le domaine délicat des 0,3 K jusqu'aux températures près de 1000 fois plus élevées données soit par des sondes de carbone soit de platine .

L'autonomie du cryostat, malgré la perte due à la chute de pression pendant la montée du ballon et au cyclage des 2 réfrigérateurs, est telle que même après un vol de très longue durée au plafond, la quantité restante d'hélium liquide est importante. Une vanne télécommandée à la sortie du col du cryostat permet, lors de la descente en parachute (45 min), d'éviter de piéger de l'air solide ou pire de la vapeur d'eau et de risquer l'explosion du cryostat !

Contraintes et conduite des observations

Les objectifs scientifiques assignés au projet SPM-PRONAOS conduisent à souhaiter un vol suffisamment long pour observer un certain nombre d'objets astronomiques intéressants ou/et intégrer longtemps sur des objets de très faible flux. Cependant la visibilité de ces objets dépendra bien sûr du lieu d'observation ; la Croix du Sud n'est évidemment pas visible depuis l'hémisphère nord !

Cette visibilité est aussi déterminée par l'époque à laquelle aura lieu l'observation. Or les vols ballon de longue durée n'ont lieu qu'à 2 périodes dans l'année, au printemps et à l'automne, au moment où les vents à très haute altitude (40 Km) qui pendant une période de l'année (hiver) soufflent très fort d'Ouest en Est s'inversent. C'est un phénomène de mousson qui, à ces époques, descend lentement du Nord au Sud. Il y a donc aux latitudes de vol des ballons, une période de durée indéterminée (de 7 à 20 jours) où soit la vitesse de ces vents devient nulle, soit elle est faible et de direction variable, de sorte que le déplacement moyen du ballon par rapport au sol est lui-même faible.

Mais même si l'époque du vol est en gros connue, la visibilité des objets astronomiques varie néanmoins de jour en jour. Or la date exacte du lancement dépend d'un grand nombre de facteurs : Etat de préparation de l'expérience, conditions de lancement au sol, à moyenne altitude, vitesse et direction des vents au plafond à très haute altitude (40 Km), incidents de dernière minute....

Certains objets par exemple peuvent être visibles pendant la montée du ballon à une période où aucune observation n'est encore possible et ne le seront à nouveau que le lendemain. Or la durée d'un vol et même des observations est quelque chose de très aléatoire ! Elle dépend des conditions de vents régnant aux très hautes altitudes, des performances du ballon lui-même, des incidents éventuels qui peuvent perturber la bonne marche de l'expérience, bref à beaucoup de facteurs qui font que la liste possible d'objets observables résulte de compromis tenant compte par exemple d'un vol écourté.

Ces contraintes qui peuvent à priori sembler déjà difficiles à gérer sont encore compliquées par le fait que pour des raisons évidentes, l'axe du télescope ne doit jamais passer à moins de 100° du soleil et de la terre et que de plus, les temps perdus pour acquérir une autre étoile guide et stabiliser la nacelle lors de chaque changement d'objet observé réduisent d'autant la durée totale d'observation pendant le vol. Il faut donc s'efforcer d'agencer la suite des diverses zones du ciel visées en minimisant les déplacements d'axe du télescope.

Cet exercice est extrêmement fastidieux et mobilise en permanence 2 scientifiques pendant toute la durée d'attente d'un créneau de vol favorable et également pendant celui-ci pour parer aux nombreux incidents qui peuvent émailler le bon déroulement de la collecte des données.

