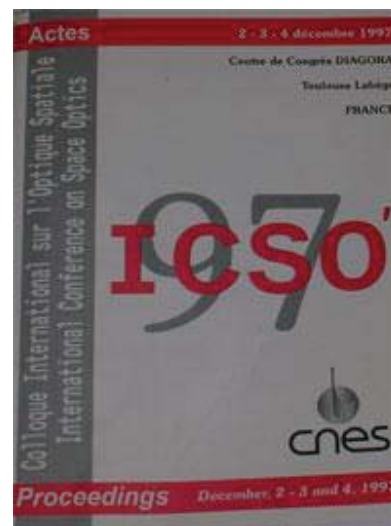


International Conference on Space Optics—ICSO 1997

Toulouse, France

2–4 December 1997

Edited by George Otrio



Fond de ciel stratosphérique mesure par le senseur stellaire de PRONAOS

Pierre Etcheto



icso proceedings



International Conference on Space Optics — ICSO 1997, edited by Georges Otrio, Proc. of SPIE Vol. 10570, 105701N · © 1997 ESA and CNES · CCC code: 0277-786X/18/\$18 · doi: 10.1117/12.2326561

FOND DE CIEL STRATOSPHERIQUE MESURE PAR LE SENSEUR STELLAIRE DE PRONAOS

Pierre ETCHETO

CNES, département d'instrumentation optique
18 av. Edouard Belin. 31401 TOULOUSE CEDEX

RESUME: Au cours du second vol du ballon stratosphérique PRONAOS, son senseur stellaire diurne a correctement fonctionné. Il a aussi fourni des mesures de fond de ciel, qui améliorent notre connaissance de la diffusion du soleil par la stratosphère. Celle-ci avait déjà été estimée et mesurée sur deux expériences, TIFANI et ZEBRA. On présente d'abord PRONAOS, les caractéristiques du senseur stellaire, ses modes de fonctionnement et les étalonnages effectués. Puis on décrit le fonctionnement en vol et les paramètres mesurés, en particulier le fond de ciel stratosphérique. Malgré une certaine dispersion, les mesures de PRONAOS s'accordent dans l'ensemble au modèle pré-vol. Elles sont légèrement supérieures aux mesures de TIFANI, et excèdent nettement les mesures de ZEBRA et la diffusion Rayleigh.

Mots clés: Senseur stellaire, PRONAOS, fond de ciel, stratosphérique, diffusion atmosphérique.

ABSTRACT: *During the 2nd flight of the stratospheric balloon PRONAOS, its daytime star sensor worked well. It also provided background radiance measurements, giving better knowledge on stratospheric scatter of sunlight. This had been previously estimated and measured by 2 experiments, TIFANI and ZEBRA. First we describe PRONAOS, the star sensor and its features, operating procedures and calibrations. Then we deal with the in-flight operations and data, specially with stratospheric background measurements. Despite some dispersion, PRONAOS measurements as a whole fit the pre-flight model. They are somewhat greater than TIFANI data, and clearly exceed ZEBRA measurements and Rayleigh scatter.*

Keywords: *Star sensor, PRONAOS, atmospheric background, stratospheric, atmospheric scatter.*

1- INTRODUCTION

L'instrument PRONAOS est destiné à observer les sources célestes dans le domaine spectral submillimétrique (180 à 1200 μm), entre l'infrarouge et les ondes radio. Ces sources, d'une température inférieure à quelques centaines de °K, constituent l'univers froid. Le premier objectif principal est l'étude de la matière interstellaire (« nuages froids »), nécessaire pour mieux comprendre le processus de formation des étoiles. Le second est l'observation du rayonnement fossile cosmologique à 2.7°K, en particulier la mesure de l'effet Sunaev-Zeldovitch correspondant à une distorsion spectrale de ce rayonnement dans la direction des amas de galaxies.

L'instrument comprend un télescope à optique semi-active de 2 m de diamètre, muni de l'instrument focal refroidi SPM, monté dans une nacelle stabilisée. Comme l'atmosphère absorbe une grande partie du rayonnement submillimétrique, l'instrument PRONAOS est monté sur un ballon stratosphérique, volant à environ 37 Km d'altitude durant les périodes de « turn-around ». Le second vol [8] s'est déroulé au Nouveau Mexique (USA) les 22 et 23 Septembre 1996. PRONAOS est resté au plafond durant 29 h, observant 50 scènes scientifiques dont les résultats, en cours de publication, s'avèrent considérables. Le système de pointage fin, comprenant un senseur stellaire, a également bien fonctionné.

2- LE SENSEUR STELLAIRE

2-1- Principe de pointage

Le pointage de la nacelle [9] demande une précision absolue de 20 secondes d'arc, avec une stabilité à court terme de 5 secondes. Le pointage primaire est assuré par un magnétomètre, des inclinomètres et des moteurs à codeurs angulaires. Le pointage fin est assuré par une centrale inertielle, recalée toutes les secondes par un inclinomètre et un senseur stellaire à haute résolution diurne, visant des étoiles connues. Il est monté dans une tourelle articulée à 2 rotations, qui permet de lui donner un biais par rapport au télescope et autres dépointages (y. ch. 2-4).

La connaissance du dépointage à corriger dépend non seulement de la mesure du senseur, mais aussi des éphémérides, des consignes codeur de la tourelle et du télescope et de l'étalonnage des déformées et mésalignements de la tourelle-senseur et de la charge utile.

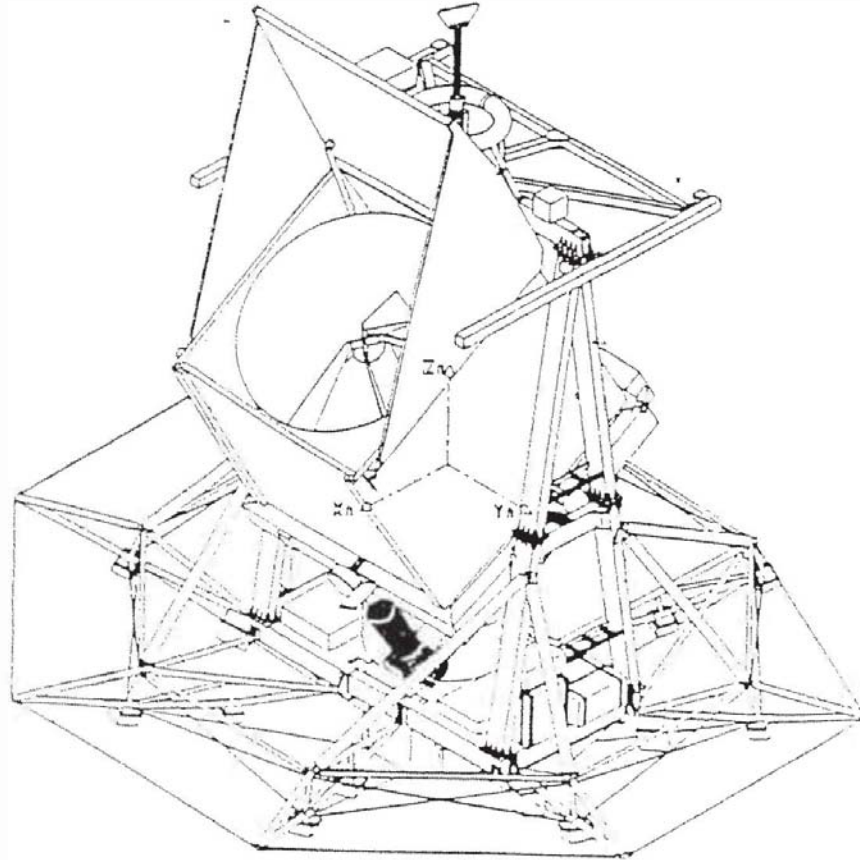


fig. 1: La nacelle PRONAOS

Masse: env. 3000 Kg Dimensions 8 x 6 x 6 m. En noir, le senseur stellaire

2-2: Spécifications fonctionnelles:

Le senseur [1] doit pointer avec une précision relative d'1 seconde d'arc des étoiles de magnitude visuelle inférieure ou égale à 5. Son champ instantané est de 1° par 45 minutes. La position mesurée est moyennée sur 1 seconde. Le fond de ciel dimensionnant correspond à la diffusion du soleil par l'atmosphère à 38 Km d'altitude, pour des elevations de visée de 5 à 65°. Le soleil reste à plus de 38° du senseur. Ce fond de ciel est estimé d'après les expériences précédentes [2], [3], [4], [5], [11].

2-3- Description du senseur

Le senseur stellaire a été conçu et réalisé dans le cadre de la thèse d'Y. André [1]. Le sous-système complet comprend un bloc optique, un baffle, une électronique de proximité et une interface mécanique. L'ensemble pèse environ 8 Kg, dont 500 g pour le seul bloc optique, et mesure 1.4 m de long.

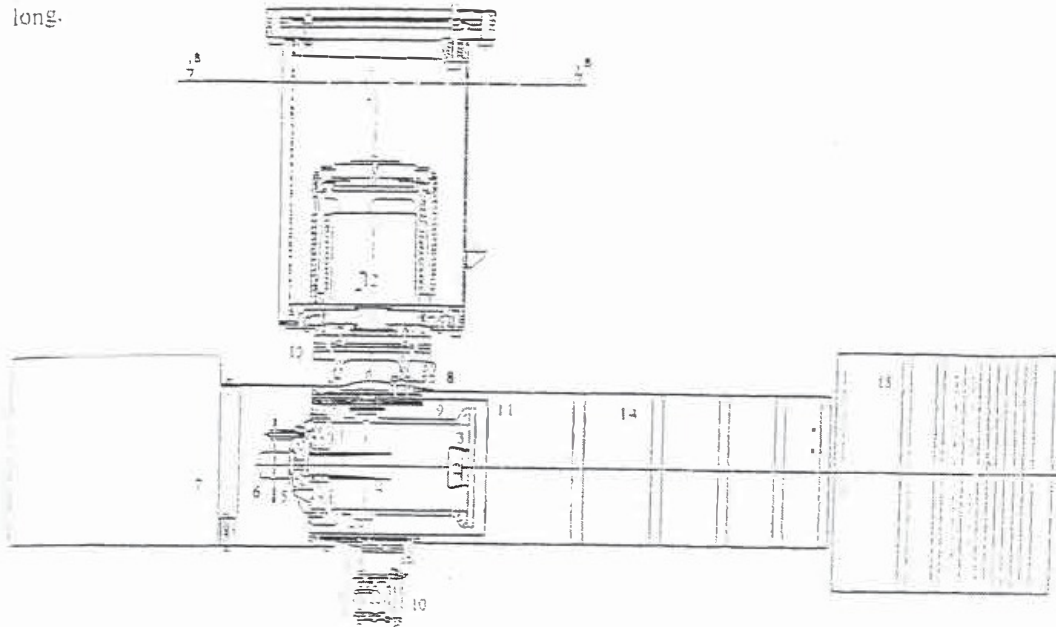


fig. 2: Sous-système Senseur Stellaire

- | | | |
|------------------------|-------------------------|---------------------|
| 1- Miroir primaire | 6- Carte de proximité | 11- Radiateur |
| 2- Miroir secondaire | 7- Coffret Electronique | 12- Axe de rotation |
| 3- Fenêtre d'entrée | 8- Pièce d'interface | 13- Cales biaises |
| 4- Baffles des miroirs | 9- Lames souples | 14- Baffle primaire |
| 5- Détecteur + filtre | 10- Cube de référence | 15- Pare-soleil |

Le **bloc optique** (1-5) est un télescope Ritchey-Chrétien de 500 mm de focale, 85 mm d'ouverture moins l'occultation centrale, d'un champ ≈ 1 degré par 45 minutes. Les pixels ont un champ d'environ 10 secondes. Le temps d'intégration est ajustable de 8 à 250 ms. La bande spectrale va de 700 à 1100 nm.

Le bloc optique est constitué de pièces en céramique Zérodur fixées par adhérence moléculaire. Les miroirs primaire (1) et secondaire (2) ont une dorure protégée. La fenêtre d'entrée (3), en Zérodur transparent, est traitée anti-reflet. Elle porte le miroir secondaire et son baffle, le corps et le passage à travers le miroir primaire sont peints en noir mat. Au dos du miroir primaire sont fixés 3 prismes portant un filtre Schott RG 695 (5), coupant en-dessous de 680 nm, et la fenêtre portant le détecteur. Son détecteur est une matrice CCD Silicium TH 7863, dont les pixels font 23 μm de côté. Le détecteur est défocalisé de 150 μm pour répartir l'image d'une étoile sur plusieurs pixels (v. ch. 2-3).

L'**électronique** du senseur comprend une carte de proximité (6), vissée au bloc optique, qui commande le détecteur et transmet des signaux vidéo au coffret électronique (7). Ce dernier comprend un préamplificateur, un convertisseur analogique-numérique, un traitement d'image calculant la position de l'étoile, et le pilotage des servitudes. L'alimentation, la transmission des télécommandes et des téléméasures ainsi que l'asservissement en pointage sont assurés par la gestion-bord [10].

Le **bafflage** doit atténuer d'un facteur 10^9 le signal parasite du soleil direct ou diffusé par l'atmosphère. Il s'agit de réduire le bruit et ménager la dynamique utile, mais surtout éviter toute tache interprétable comme une étoile. Le bloc optique est, classiquement, muni de deux baffles (4) sur les miroirs et le corps est peint en noir. Le baffle principal comprend 2 étages. Le baffle primaire (14) limite la vue du capteur à 15° de l'axe. Le pare-soleil (15) arrête le soleil à plus de 35° de l'axe, l'empêchant d'éclairer les arêtes du baffle interne. Il n'est pas vu directement du capteur, tous deux sont en aluminium peint en noir mat et munis de diaphragmes supprimant toute diffusion au premier ordre vers le capteur. Ce bafflage a été validé par des essais d'éclairement solaire sous vide [6]. Les performances s'avèrent acceptables jusqu'à 26° de l'axe, et d'après le plan de vol le soleil n'est jamais à moins de 38° .

L'**interface mécanique** (8) est assurée par l'intermédiaire de trois lames souples (9) absorbant l'effet de la dilatation. Cette pièce tient aussi le baffle, le coffret électronique et un cube de référence (10). Elle se monte sur la tourelle (12) avec des cales biaisées (13) permettant l'alignement.

Le **contrôle thermique** est actif: le capteur est entouré d'un radiateur (11) muni de chauffettes, asservies passivement à $\pm 1^\circ\text{C}$ par des bilames. Pour plus d'efficacité il est peint en noir vers le capteur et réfléchissant vers l'extérieur. Des thermocouples indiquent la température du bloc optique, de la carte de proximité et des principales cartes du coffret de proximité.

2-4- Modes de fonctionnement

Afin d'améliorer la **résolution** [1], le capteur est légèrement défocalisé: la tache image est répartie sur plusieurs pixels, typiquement 6 à 12. Son barycentre énergétique est déterminé avec une précision de l'ordre de 0,5 secondes. Pour isoler une étoile faible sur un **fond de ciel** fort et variable, un simple seuillage ne suffit pas. On acquiert deux images décalées de 6 minutes d'arc par rotation de la tourelle. On les soustrait, ce qui élimine la plus grande partie du fond de ciel. On seuille le bruit et les variations locales du fond de ciel, isolant ainsi le « lobe » positif de l'étoile.

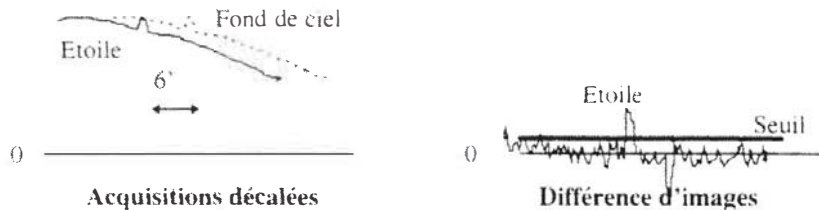


Fig. 3- Détection d'une étoile

L'action du capteur est programmée par le **plan de vol**. Les observations de PRONAOS se décomposent en scènes, d'une durée d'1/4h à 2h, durant lesquelles le télescope balaye une zone de l'espace froid tandis que le capteur assure le pointage en visant une étoile guide. Celle-ci est choisie dans le catalogue HIPPARCOS [1], en fonction de sa magnitude, de sa proximité à la scène visée et de l'absence de voisines gênantes. Le capteur suit le télescope dans son balayage de la scène. L'étoile parcourt son champ, ce qui limite la taille des scènes. La tourelle compense la rotation de la terre et assure le dépointage entre l'étoile guide et la scène observée.

En début de scène, le capteur acquiert automatiquement [11] dans tout le champ pour ajuster le temps d'intégration (8 à 255 ms), puis effectue une différence d'images pour ajuster le seuil et acquérir l'étoile. Au besoin on peut ajuster manuellement ces paramètres. Ensuite on poursuit l'étoile sur une fenêtre restreinte, en moyennant les acquisitions sur 1 seconde. Le signal étoile intégré et le nombre de pixels utiles sont les seuls observables durant la scène. Si l'acquisition se perd, le pointage inertiel continue mais dérive rapidement.

3- ETALONNAGE

3-1- Sensibilité sur source large

Le dimensionnement du senseur reposait sur une estimation des composants pris isolément [1]. La sensibilité des détecteurs et la dépendance en température ont été mesurés. Une visée nocturne d'étoiles [1] a confirmé l'ordre de grandeur, mais l'incertitude sur la nébulosité interdisait toute précision absolue. Afin de valider les performances du senseur et de le suivre d'un vol à l'autre, trois étalonnages [6], [7] sur des sources larges ont été effectués en 1995, 96 et 97.

Le senseur est placé face à une sphère intégrante. L'uniformité, de 2% dans l'étendue géométrique du senseur, est acceptable. La source est étalonnée par un luminancemètre, précis à 1% dans des bandes spectrales étroites à 765, 865 nm et 910 nm. On extrapole la luminance spectrale, linéairement ou par un corps noir (le résultat est le même à 1% près) et on la multiplie par la réponse spectrale relative du détecteur et du filtre, toutes deux standard (fig. 3-1). En l'intégrant dans la bande spectrale du senseur, on obtient une luminance moyenne équivalente L_e . On définit la sensibilité K du senseur [6] par:

- (a) $K = Spup (m^2) \times T\theta (transm. \text{ max de l'optique}) \times \sigma\theta (sensibilité \text{ pixel}) / Spix (m^2)$
 (b) $\langle S \rangle (mV) = K (mV.m^2/J) \times L_e (W/m^2/sr) \times Tint (s) \times Spix (m^2) / F^2 (m^2)$

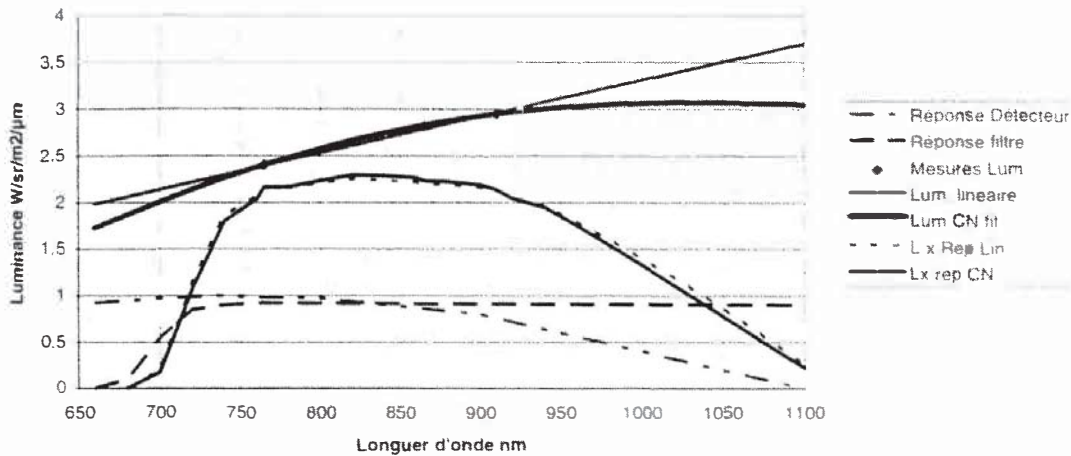


Fig. 4: Sensibilité spectrale du senseur

On fait acquérir la source par le senseur et on relève le signal moyen dans le champ $\langle S \rangle$. On lui soustrait le signal d'obscurité, mesuré dans les mêmes conditions. Pour trouver une dynamique compatible entre le senseur et le luminancemètre, on doit appliquer des temps d'intégration faibles, de l'ordre de 8 à 30 ms. Pour le calcul il faut tenir compte des 8 ms résiduelles s'ajoutant à la consigne. Compte tenu des différents approximations et facteurs d'erreur, cet étalonnage est fiable à +/- 10%. Ses résultats sont:

K théorique [1]	Mesure 1995	Mesure 1996 [6]	Mesure 1997
$1.22 \cdot 10^{13}$	$1.21 \cdot 10^{13}$	$1.44 \cdot 10^{13}$	$1.28 \cdot 10^{13}$
Moyenne des mesures: $1.31 \cdot 10^{13}$			

On retiendra comme sensibilité sur source large $K = 1.31 \cdot 10^{13} \text{ mV.m}^2/\text{J}$. C'est cette valeur qui intervient dans la mesure du fond de ciel, effectuée dans les mêmes conditions.

3-2- Sensibilité sur source ponctuelle

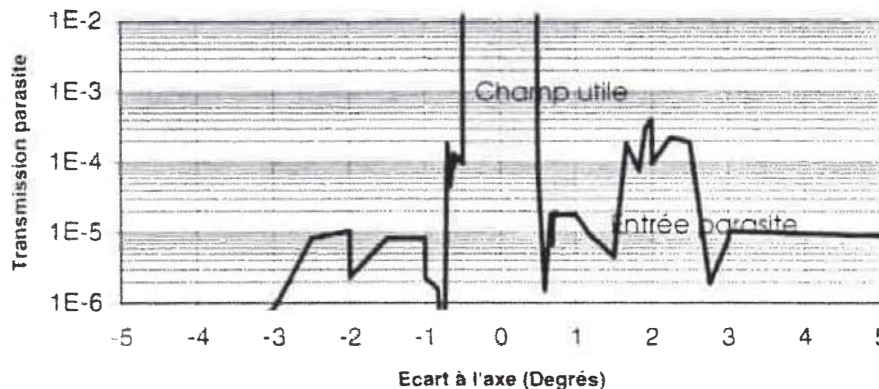
Le signal d'une étoile, intégré sur plusieurs pixels, peut être estimé à partir de sa magnitude. Mais lors du vol on a constaté (cf ch. 4) que les signaux étoiles mesurés étaient inférieurs, d'un facteur 0,65 en moyenne aux signaux théoriques. On a donc étalonné le senseur sur une source ponctuelle, un collimateur, étalonné comme précédemment par le luminancemètre. Plusieurs difficultés se posent:

Le champ du collimateur ne couvre pas celui du luminancemètre. Pour interpréter son signal comme une luminance, on a mesuré la taille angulaire du faisceau avec un théodolite. D'autre part la dynamique du luminancemètre étant incompatible avec celle du senseur, on a muni le collimateur d'une densité optique variable étalonnée. De plus il a fallu employer des trous source de 0,3 à 1 mm, produisant des taches images trop larges pour être traitées comme des étoiles. Pour obtenir le signal « étoile » intégré, il a fallu dresser un histogramme de la tache en faisant varier le seuil et en relevant le nombre de pixels supérieurs au seuil. L'intégrale varie beaucoup en fonction du seuil minimal retenu.

Les résultats de cet essai, en cours de dépouillement, sont d'une précision limitée, de l'ordre de 15 ou 20%. Cependant ils confirment la tendance constatée en vol: la sensibilité sur une source ponctuelle est inférieure à celle sur une source large, d'un facteur 0,6 environ, et dépend largement du seuil et du nombre de pixels utiles.

Il est difficile de justifier cet écart de sensibilités (fig. 5). Deux explications sont envisagées: d'une part la troncature par seuillage de la tache image élimine des pixels à faible signal mais nombreux. D'autre part, un défaut du bafflage interne fait que le senseur est sensible à des flux parasites localisés provenant des environs immédiats du champ (fig. 3-2). Ce flux fausserait l'étalonnage sur source large. Quoi qu'il en soit, le fond de ciel est mesuré dans les mêmes conditions que l'étalonnage en source large, pour lequel la mesure de sensibilité peut être considérée comme fiable.

Fig. 5: Entrées parasites proches du champ



3-3- Signal d'obscurité

Le flux de l'étoile, localement fort, reste négligeable par rapport au signal intégré dans le champ. En conséquence le signal moyen est représentatif du fond de ciel diurne, à condition de lui soustraire le signal d'obscurité. Pour bien évaluer le fond de ciel, il est capital d'estimer précisément le signal d'obscurité. Celui-ci, du au détecteur et à toute sa chaîne d'acquisition, dépend de la nature du détecteur, du temps d'intégration et de la température du CCD. La loi est de la forme:

$$(c) \quad I_{obs} (mV) = I_{off} + B \times T_{int} (ms) \times T^{M2} (^{\circ}K) \cdot e^{(-T_{int}/T)}$$

I_{off} est l'offset de la chaîne de détection. Avec B et T₀, il a été déterminé expérimentalement, par des mesures au sol et par le signal moyen durant la nuit du vol 2. Il faut d'abord connaître la température de mesure. La sonde du CCD donne une information au pas d'1,6°C, avec un biais mal connu. En lissant les mesures en vol et en les recalant par rapport à des sondes plus précises au sol, on a estimé la température en vol à environ 0,3°C:

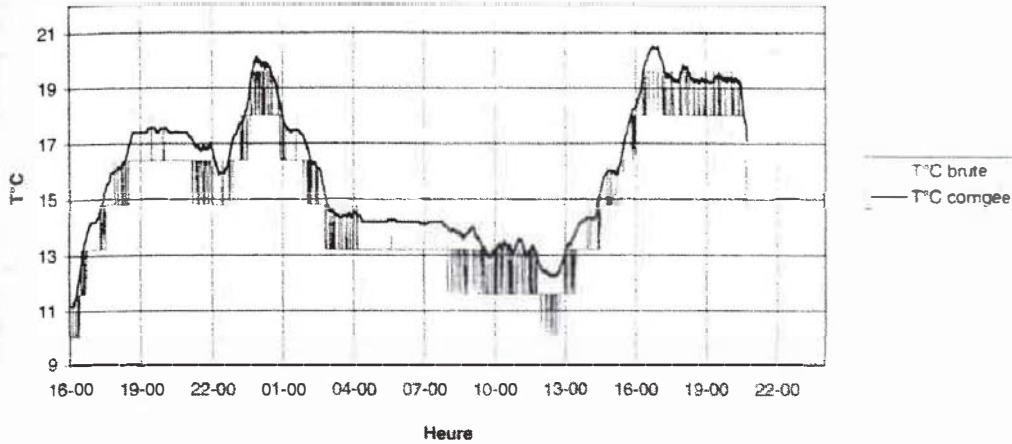


Fig. 6: Température du détecteur

Les essais thermiques du détecteur donnent T₀. On ramène en conséquence les mesures sol et vol à 20°C. Une régression linéaire donne I_{off} et B. Le modèle adopté est: I_{off} = 11,9 mV, B = 0,047 mV/ms. °K^{-2/3} et T₀ = 6893 °K. Les signaux moyens nocturnes lui correspondent à 0,6 mV eqm:

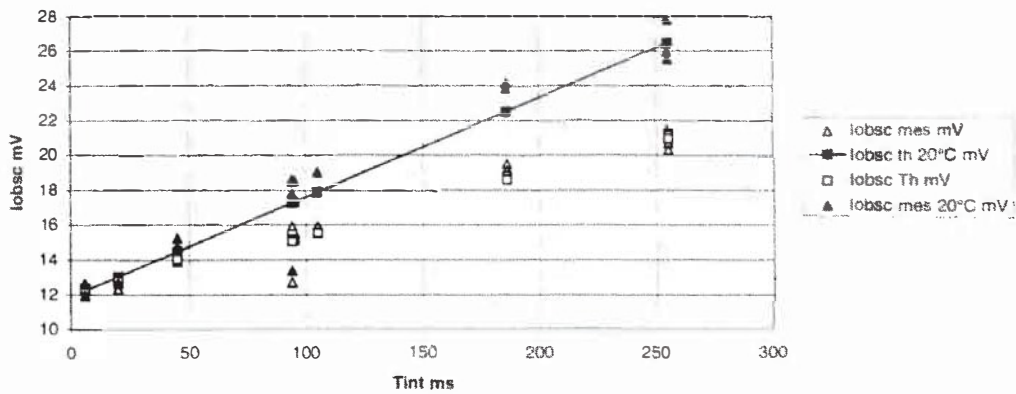


Fig. 7: Signal d'obscurité Vol 2

4- FONCTIONNEMENT EN VOL

4-1- Déroulement du vol

Lors du deuxième vol, le senseur a fonctionné correctement durant la quasi-totalité des 27 heures de temps d'observation [8], [7]. Il a assuré le pointage fin de jour comme de nuit, acquis 29 étoiles guides différentes pour 53 scènes, ainsi que 9 références sur l'étoile polaire. Sa conception et les modifications apportées après le 1er vol sont ainsi validées.

Une dizaine de scènes a été perturbée ou reportée pour des causes extérieures, principalement des turbulences interdisant toute stabilisation. Les seules anomalies clairement liées au senseur [7] sont un refus d'acquisition, résolu par un changement d'étoile guide, et une perte d'acquisition partielle sur deux scènes, qui ont été complétées sur pointage inertiel. Ceci a entraîné retards et interrogations, mais aucune perte de scène. Elles semblent dues les unes à une étoile gênante proche de la guide, malgré la sélection automatique, les autres à la lumière parasite (cf ch. 4-4).

4-2- Conditions de mise en oeuvre

Les temps d'intégration dans le plan de vol [7] ont été appliqués à presque toutes les scènes: ils variaient de 3 à 250 ms. Le seuil minimal, 3 pas, convenait à la plupart des scènes. Il a parfois fallu l'augmenter manuellement à 7 à 20 pas pour assurer une acquisition stable. Les diverses perturbations ont fait remanier souvent le plan de vol, pour réagencer des scènes ou changer d'étoile guide. La température du senseur, du détecteur et des cartes électroniques est restée dans les plages nominales, avec des écarts moindres qu'au premier vol grâce à l'amélioration du radiateur.

4-3- Signaux des étoiles

Le signal maximal dépend de la magnitude de l'étoile, mais aussi de sa répartition sur les pixels (fig. 3), typiquement 4 à 12. Le temps d'intégration est calculé [10] sur une répartition concentrée, pour éviter toute saturation. Durant le vol le signal maximal (fig. 8) [7] a varié typiquement de 200 à 500 mV, mais la saturation à 1V été frôlée à 3 reprises. La dynamique était donc sous-employée mais les précautions vis à vis de la saturation s'avèrent justifiées. Il était possible d'ajuster manuellement le temps d'intégration, mais cela n'a jamais paru nécessaire.

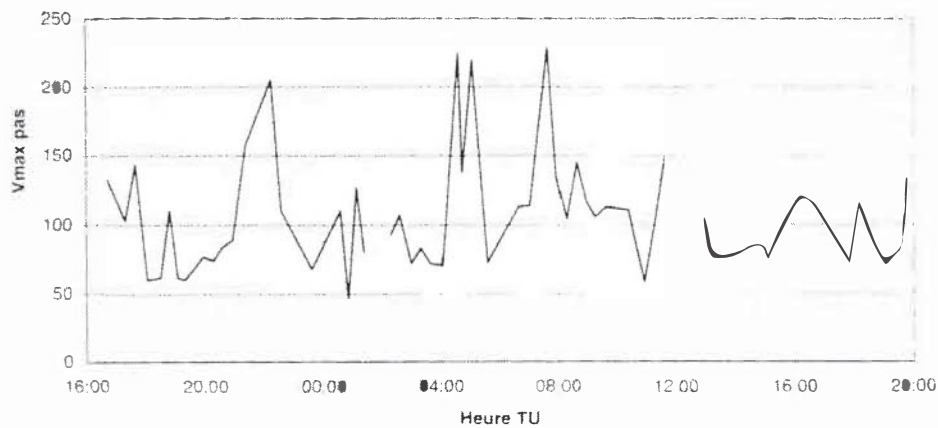


Fig. 8: Dynamique du signal maximal

Le signal étoile est la grandeur caractérisant l'étoile. Il est défini comme le signal intégré sur les pixels utiles, ramené en mV/s. Le signal étoile théorique (SETh) se déduit théoriquement de la magnitude et de la sensibilité estimée du senseur. A la magnitude visuelle tirée du catalogue d'HIPPARCOS on ajoute une correction spectrale, qui a été calculée pour 70 catégories d'étoiles [1]. Le signal étoile mesuré (SEM) [7] a varié de 2200 à 12000 mV (fig. 9), soit des magnitudes de 1 à 4,3. Le senseur n'a jamais été gêné par la faiblesse d'une étoile. Durant une scène le signal variait aléatoirement de 10% au gré de la répartition de la tache sur les pixels.

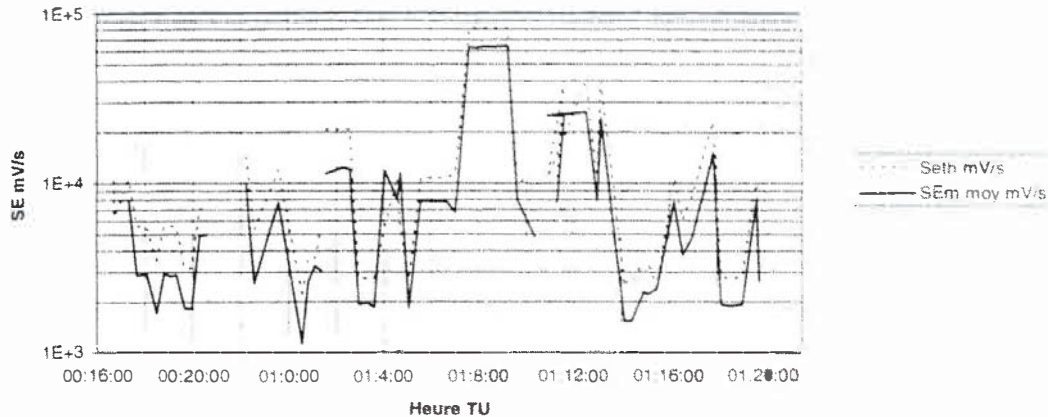


Fig. 9: Signal étoile théorique et mesuré

Le rapport Mesure/Théorie (fig. 10) est assez variable, entre 60 à 80%. Les rapports très élevés, sur Antares et Andromède, correspondent à des acquisitions perturbées. La dispersion s'explique sans doute par l'incertitude sur la magnitude et les conditions d'acquisition. Reste que la sensibilité sur les étoiles a été globalement surestimée, d'1/3 environ.

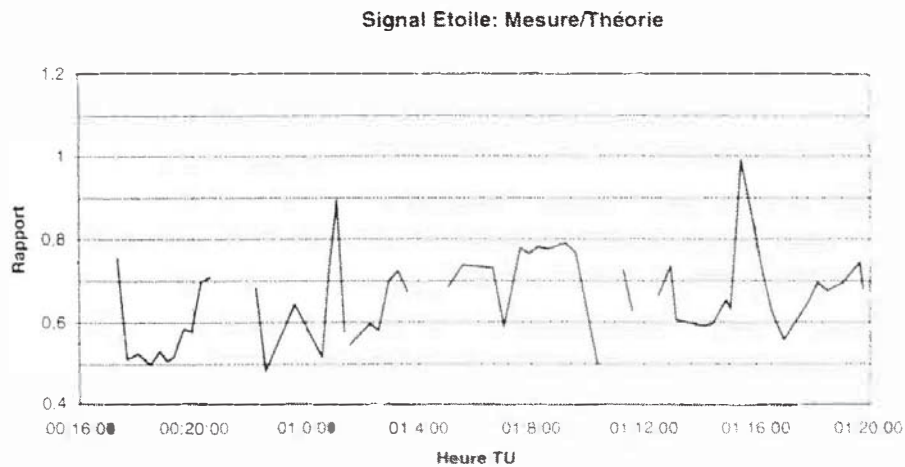


Fig. 10: Signal étoile, rapport Mesure / Théorie

Après le vol on a effectué des étalonnages sur source large et source ponctuelles, qui ont confirmé le phénomène (cf ch. 2-2). Leur dépouillement est en cours. Quoiqu'il en soit, ceci pris en compte, les signaux étoile attendus ont été dans l'ensemble retrouvés en vol. Ceci garantit le bon fonctionnement du senseur, mais aussi l'identification de l'étoile guide.

4-1- Lumière parasite

Le baffle avait été caractérisé et les éventuelles réflexions solaires dans la nacelle étudiées. Pourtant il semble que certaines des anomalies du second vol soient dues à des non uniformités, faibles mais localisées, du fond de ciel. Or les configurations incriminées se distinguent par un angle transverse tourelle important et une élévation tourelle positive.

Le champ du senseur frôle alors certaines isolations thermiques du télescope. Or on a vu (ch. 2-3) que le senseur avait des entrées parasites proches du champ. Ces isolations sont revêtues de mylar réfléchissant et plissé mais, n'étant jamais directement éclairées par le soleil, elles n'avaient pas été jugées critiques. Il faut pourtant supposer que les plis des revêtement faussent la direction des réflexions, et que l'éclairage solaire indirect est encore excessif. De nuit, ces parties critiques peuvent être éclairées par la Lune.

Il est possible qu'en plus des anomalies constatées, la lumière parasite ait fait surestimer la mesure du fond de ciel pour certaines scènes. N'ayant pas accès à l'image du senseur, ceci reste invérifiable.

5- SIGNAL DE FOND DE CIEL

5-1- Théorie

Le fond de ciel est dû à la diffusion du soleil par les molécules constituant l'air, dite diffusion de Rayleigh, et par d'éventuels aérosols. Ces derniers sont mal connus dans la stratosphère. C. Peyron [2] D. Huguenin [11] puis Y. André [1], [5] ont essayé de l'estimer à partir d'estimations théoriques de la diffusion de Rayleigh et de mesures effectuées par un photomètre U-B-V-R et des senseurs stellaires de TIFANI [2], [3] et ZEBRA [4], [5]. Sans entrer dans leur justification, on peut distinguer plusieurs paramètres influençant le fond de ciel:

- **L'altitude:** La diffusion dépend de la densité de l'air, qui varie exponentiellement avec l'altitude. D'après [2] et [11] elle est proportionnelle à $e^{-\text{Altitude}/7.5}$, exprimée en Km.
- **L'élévation de la visée,** qui détermine l'épaisseur d'air diffusant vers le senseur. D'après [1] et [11], elle est proportionnelle à $1/\sin(\text{élev.})$.
- **L'angle soleil-senseur (θ),** car la diffusion des gaz étant fortement anisotrope. D'après [1] et [2], la diffusion de Rayleigh est proportionnelle à $1+\cos^2(\theta)$. Cependant les mesures de TIFANI sont bien plus élevées aux petits angles, ce qui est attribué aux aérosols [5]. D'après [1] et [5] il faut multiplier la valeur par $(1/\sin\theta)^p$ lorsque l'angle est inférieur à 90° .
- **La réponse spectrale** du senseur: On s'en affranchit en exprimant la sensibilité vis à vis d'une luminance intégrée équivalente (cf ch. 2-1). Un facteur de conversion est nécessaire entre instruments.
- **L'élévation du soleil:** A l'aube et au crépuscule, il est partiellement masqué par la terre, ce qui modifie la luminance. Vu les conditions de mesure, nous n'étudierons pas ce paramètre.

Pour dimensionner le senseur stellaire de PRONAOS [1], Y. André a élaboré un modèle approximatif [5], basé sur l'expérience de TIFANI et prenant en compte les dépendances évoquées, ainsi qu'une marge inspirée de [11], pour garantir le fonctionnement dans toute la plage angulaire. Ce modèle, purement utilitaire, est de la forme:

$$(d) \quad I_{\text{fde}} \text{ (W/m}^2\text{/sr)} \cong 0,0021 \cdot e^{138 \cdot \text{Altitude}/7,5} \cdot 1/\sin(\text{Elév.}) \cdot (1+\cos^2\theta) \cdot (1/\sin\theta)^{1,8} \text{ (si } \theta < 90^\circ)$$

5-2- Mesures et traitements

Le fond de ciel est mesuré au début de chaque scène, lorsqu'on acquiert le signal moyen sur tout le champ: on lui soustrait le signal d'obscurité, estimé d'après le temps d'intégration et la température corrigée. Ce signal est ramené de pas de quantification (3,98 mV) en mV/s puis en luminance, compte tenu de la sensibilité mesurée du senseur sur source large (cf ch 2-1).

On calcule le fond de ciel théorique dans la même configuration, pour analyser le rapport. Afin de vérifier la dépendance en élévation, on ramène mesures et modèle 37 Km d'altitude et $\theta = 90^\circ$ en inversant (d). Afin de vérifier la dépendance en θ et de comparer aux autres expériences, on les ramène à 37 Km d'altitude et une élévation de $30,6^\circ$ [5]. On a aussi essayé d'ajuster les paramètres P et L_0 pour affiner le modèle.

Le **signal minimum** représente le signal d'obscurité plus le fond de ciel minimal. De nuit il coïncide avec le signal moyen: le signal d'obscurité est uniforme. De jour il représente typiquement la moitié du signal moyen. C'est la seule information disponible sur l'uniformité du fond de ciel.

5-3- Résultats bruts

Les mesures ont été effectuées les 22 et 23 Septembre 1996 entre 36 et 38 Km d'altitude, aux environs de Fort Sumner au Nouveau Mexique (USA) $34,5^\circ\text{N}$, $104,2^\circ\text{W}$. On donne ici les luminances de fond de ciel mesurées dans la bande passante du senseur PRONAOS (cf fig. 4), sans chercher à les extrapoler à tout le spectre. Figurent aussi les mesures nocturnes, crépusculaires et perturbées, bien qu'elles ne soient pas exploitées par la suite.

Table 1: Mesures de fond de ciel PRONAOS

Référence		Rem.	Conditions					Signaux				
Scène	Heure		Tint	T° corr.	Alt.	Elév. Soleil	Elev. visée	SST/Soleil	Iobsc Th	FDC mes	FDC Th	Mes/Th
	TU		ms	°C	Km	Degres	Degres	Deg	W/sr/m2	W/m2/sr	W/m2/sr	SD
ADR	00:16:43		94	13.7	37.7	45.2	34.2	93.9	1.61E-3	4.03E-3	3.88E-3	1.04
M82-1	00:16:44	Anomalie	158	13.7	37.7	45.3	34.2	93.9	1.62E-3	3.14E-3	3.90E-3	0.81
ADR	00:17:20		94	14.8	37.6	50.1	35.6	92.2	1.74E-3	4.19E-3	3.81E-3	1.10
M82-1	00:17:40		177	15.7	37.7	52.2	39.1	88.2	1.84E-3	3.25E-3	3.47E-3	0.94
M82-2	00:18:04		177	16.1	37.8	54.1	38.5	87.4	1.90E-3	3.19E-3	3.46E-3	0.92
M82-3	00:18:49		177	17.4	37.6	55.4	49.6	72.5	2.07E-3	3.02E-3	3.76E-3	0.80
M82-4	00:19:05		177	17.4	37.3	55.1	37.1	84.3	2.07E-3	3.79E-3	3.95E-3	0.96
M82-5	00:19:19		177	17.6	37.4	54.5	36.7	83.5	2.10E-3	3.77E-3	3.92E-3	0.96
A2142-1	00:19:39		255	17.4	37.3	53.3	49.9	66.5	2.07E-3	3.33E-3	4.63E-3	0.72
A2142-2	00:19:57		255	17.6	37.3	51.7	53.6	66.3	2.10E-3	3.25E-3	4.45E-3	0.73
FA2142-1	00:20:17		141	17.4	37.3	49.5	31.3	89.3	2.07E-3	4.53E-3	4.42E-3	1.03
FA2142-2	00:20:36		141	17.4	37.4	47.1	35.1	89.3	2.07E-3	4.14E-3	3.98E-3	1.04
R7	00:20:56		4	17.4	36.9	44.2	20.8	76.5	2.07E-3	1.04E-2	8.00E-3	1.30
Ro Oph	00:21:23		4	16.9	36.4	39.8	23.8	76.2	2.01E-3	1.05E-2	7.56E-3	1.39
NCS	00:22:14		67	16.1	35.9	30.8	31.4	113.7	1.90E-3	6.40E-3	6.18E-3	1.04
Serpentus	00:22:34		185	16.1	36.3	27.0	36.2	96.7	1.90E-3	4.41E-3	4.52E-3	0.98
M17	00:23:36		86	19.8	36.2	14.7	22.6	103.6	2.45E-3	6.09E-3	7.37E-3	0.83
M17-2	01:0:34	Crépusc.	255	19.4	36.5	2.9	41.2	95.2	2.38E-3	3.13E-3	3.36E-3	0.93
G34-2	01:0:50		255	18.5	36.3	-0.3	47.5	108.4	2.25E-3	2.94E-3	2.47E-3	1.19
VGA	01:1:07	Perturbe	183	17.6	36.3	-3.8	47.7	103.0	2.11E-3	2.61E-3	1.34E-3	1.95
VGB	01:1:22		183	17.4	36.1	-6.9	47.3	103.5	2.07E-3	7.67E-4	5.88E-4	1.30
A2163-1	01:1:33	Nuit	45	17.5	36.0	-9.2	46.6	103.5	2.09E-3	8.03E-4		
A2163-2	01:2:17		45	16.3	35.9	-18.1	30.7	69.3	1.92E-3	1.58E-4		
A2163-3	01:2:35		45	16.0	35.7	-21.7	27.5	69.2	1.89E-3	0.00E+0		
FA2613-1	01:2:58		255	14.6	35.5	-26.2	41.9	85.5	1.71E-3	0.00E+0		
FA2613-2	01:3:18		255	14.4	35.4	-30.0	38.3	85.5	1.70E-3	0.00E+0		
FA2613-3	01:3:37		255	14.4	35.2	-33.5	34.7	85.6	1.70E-3	0.00E+0		
NgC891-1	01:4:03		186	14.5	35.3	-38.2	33.9	121.6	1.71E-3	1.36E-4		

ADR	01:4:35		94	14.2	35.4	-43.5	34.6	86.9	1.67E-3	1.77E-4		
NgC891-2	01:4:43		186	14.2	35.5	-44.7	41.0	122.7	1.67E-3	9.59E-5		
Saturne	01:5:04		255	14.2	35.3	-47.8	39.6	168.8	1.67E-3	7.24E-5		
ADR	01:5:35	Perturbé	94	14.3	35.0	-51.7	33.5	95.2	1.68E-3	1.68E-4		
ADR	01:6:39	Perturbé	94	14.2	35.2	-56.0	34.7	90.7	1.67E-3	2.01E-3		
Cygne B	01:7:02	Anomalie	89	14.1	35.3	-56.1	49.0	124.6	1.66E-3	2.03E-3		
A478-1	01:7:38		6	14.2	35.8	-54.6	36.1	107.6	1.67E-3	0.00E+0		
A478-2	01:7:56		6	14.1	35.9	-53.3	39.9	108.1	1.66E-3	0.00E+0		
A478-3	01:8:16		6	13.9	36.0	-51.3	44.0	108.8	1.64E-3	0.00E+0		
FA478-1	01:8:37		6	13.7	36.1	-48.7	48.4	109.9	1.61E-3	0.00E+0		
FA478-2	01:8:56		6	13.9	36.2	-46.0	52.3	110.6	1.64E-3	0.00E+0		
FA478-3	01:9:14		6	13.6	36.3	-43.2	55.9	111.4	1.61E-3	0.00E+0		
Combitel	01:9:37		95	13.1	36.2	-39.4	34.8	96.8	1.55E-3	1.43E-4		
Betelg	01:10:22		105	13.4	36.4	-31.3	51.8	92.5	1.59E-3	1.20E-4		
ADR	01:10:54	Perturbé	94	13.4	36.7	-25.1	44.7	92.9	1.58E-3	0.00E+0		
ADR	01:11:18	Perturbé	94	13.0	36.9	-20.4	34.7	97.9	1.54E-3	2.31E-5		
M42	01:11:36		20	13.3	36.7	-16.8	47.3	92.2	1.58E-3	0.00E+0		
Orion-NF-1	01:12:32	Aube	15	12.3	36.8	-5.3	47.4	92.4	1.48E-3	2.75E-3		
ADR	01:12:59		94	13.1	37.5	0.4	46.2	94.3	1.55E-3	3.11E-3	2.12E-3	1.37
Orion-NF-2	01:13:10		15	13.4	38.2	2.7	45.2	93.5	1.58E-3	2.64E-3	2.43E-3	1.00
A478-5	01:14:08	Jour fait	255	14.3	38.3	14.6	35.6	120.9	1.68E-3	3.67E-3	4.38E-3	0.84
A478-6	01:14:27		255	15.1	38.2	18.5	31.6	121.2	1.78E-3	4.12E-3	4.92E-3	0.84
FA478-5	01:14:57		255	16.0	38.3	24.4	33.1	99.4	1.88E-3	3.41E-3	3.80E-3	0.90
FA478-6	01:15:06		255	16.0	38.4	26.2	31.5	99.0	1.88E-3	3.47E-3	3.90E-3	0.89
Taurus-N	01:15:29	Anomalie	255	17.0	38.4	30.6	32.4	114.8	2.02E-3	3.82E-3	4.35E-3	0.88
ADR	01:16:14		94	19.0	38.2	38.8	31.3	104.7	2.32E-3	3.75E-3	4.21E-3	0.89
IRAS 15	01:16:35		162	20.3	38.4	42.2	31.4	77.1	2.54E-3	4.15E-3	4.39E-3	0.95
A2218-1	01:16:59		118	20.4	38.3	45.9	28.1	85.4	2.55E-3	4.15E-3	4.37E-3	0.95
FA2218-1	01:17:52		39	19.4	38.5	52.3	18.8	94.8	2.38E-3	7.24E-3	6.17E-3	1.17
M82-10	01:18:12		255	19.7	38.6	53.8	42.5	83.8	2.43E-3	2.91E-3	2.97E-3	0.98
M82-11	01:18:32		255	19.3	38.5	54.7	42.1	82.7	2.37E-3	2.98E-3	3.07E-3	0.97
M82-12	01:19:05		255	19.2	38.7	54.9	41.7	80.7	2.36E-3	2.99E-3	3.09E-3	0.97
M82-13	01:19:48	Perturbé	252	19.4	38.6	52.7	41.9	71.7	2.38E-3	3.02E-3	3.83E-3	0.79

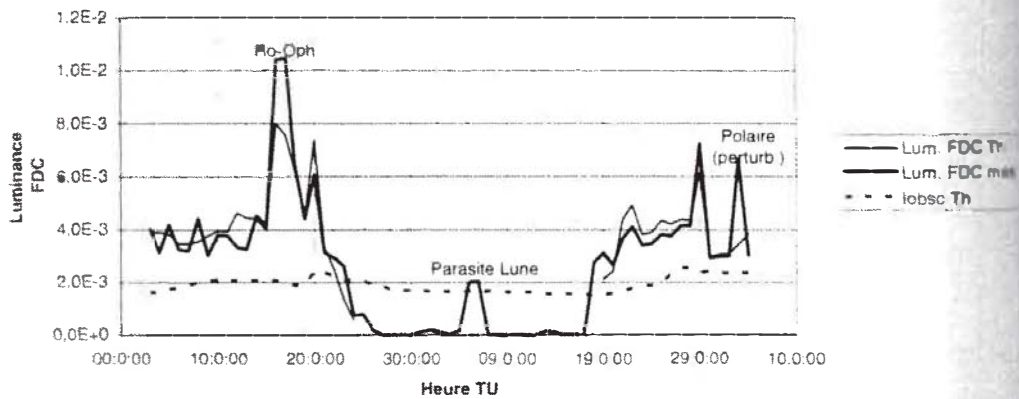


Fig. 11: Fond de ciel théorique et mesuré

Le fond de ciel varie largement en fonction de la configuration angulaire (fig.11). Dans l'ensemble, les mesures s'accordent bien avec le modèle: de jour, la moyenne des écarts est de 2%. On note

quelques valeurs anormalement élevées, dues à des acquisitions perturbées par ailleurs. De nuit, on note un fond de ciel élevé, probablement dû à une réflexion parasite de la lune près du champ du sensor. On note aussi que le fond de ciel représente typiquement le double du signal d'obscurité. On n'a pas rencontré de configuration dimensionnante avec une visée basse et un soleil proche. A aucun moment durant le vol le niveau du fond de ciel n'a été gênant.

5-3- Comparaison au modèle PRONAOs

Le rapport Mesure/théorie, si sa moyenne est proche de 1, présente en revanche une importante dispersion, (fig. 12) typiquement entre 0.8 et 1.2 (hors mesures perturbées). Notons qu'on dispose surtout de mesures pour des fonds de ciel moyens. Aucune dépendance en fonction du niveau ou du temps d'intégration n'a été mise en évidence.

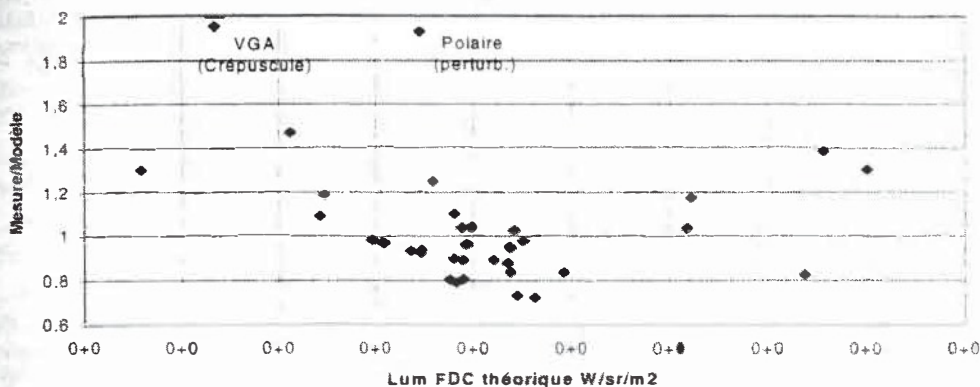


Fig. 12: Rapport Fond de ciel, mesuré / théorique

Dépendance en élévation de la visée: lorsqu'on ramène les mesures à un angle soleil-senseur de 90° (fig. 13) on constate qu'elles sont sensiblement de part et d'autre du modèle, légèrement inférieures. Vu leur dispersion il est difficile d'affiner le modèle.

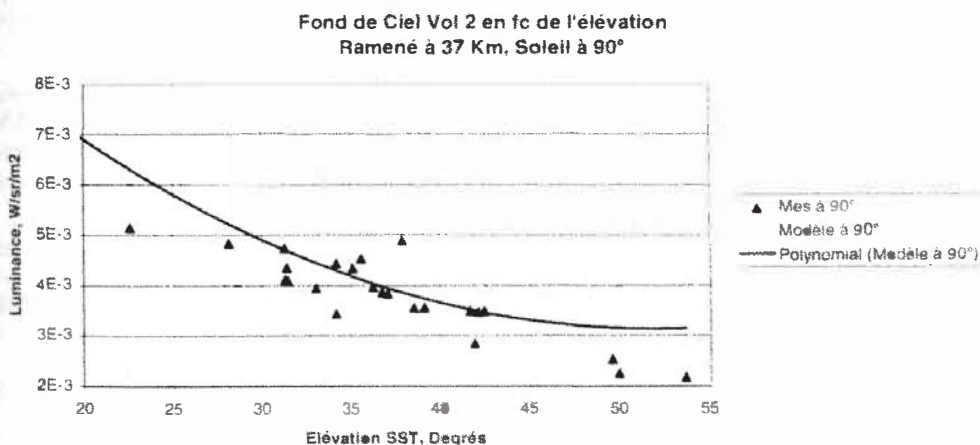


Fig. 13: Dépendance de l'élévation de visée

5-4- Comparaison PRONAOS - TIFANI - ZEBRA

On a ramené (fig. 14) les différentes mesures et modèles à une altitude et une élévation commune. TIFANI ayant la même réponse spectrale que PRONAOS, ses mesures sont directement comparables [5]. Par contre les mesures de ZEBRA, dont la bande passante est différente, sont corrigées [5] d'une magnitude -0.055 . En noir: PRONAOS, en grisé TIFANI, contours ZEBRA. Pour comparaison, la diffusion de Rayleigh [2], [5] est indiquée en pointillés.

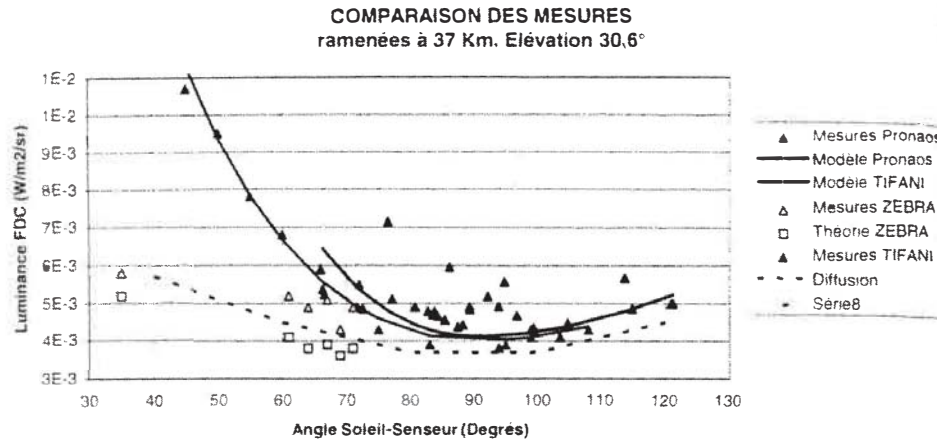


Fig. 14: Comparaison mesures-modèles

On constate que les mesures de PRONAOS sont comparables à celles de TIFANI, quoique légèrement supérieures. Elles sont plus dispersées, ce qui peut s'expliquer par les perturbations de lumière parasite ou, simplement, par le grand nombre de points. Ces mesures, toutes dans une plage de 65 à 115°, sont proches du minimum de la courbe à 90°. Il est donc hasardeux de les extrapoler aux angles plus faibles.

Dès qu'on s'écarte de 90°, les mesures de TIFANI et de PRONAOS sont nettement supérieures à celles de ZEBRA, lesquelles (entre 35 et 70°) s'accordent bien à la diffusion de Rayleigh. Sans doute peut-on en déduire que les vols de TIFANI et PRONAOS ont rencontré une quantité significative d'aérosols, contrairement à ZEBRA.

6- CONCLUSIONS

Le second vol de PRONAOS a pleinement validé le dimensionnement et le fonctionnement de son capteur stellaire. Le signal de fond de ciel est toujours resté faible, de sorte que des étoiles mêmes faibles étaient acquises sûrement et dans de bonnes conditions. Ce sont plutôt les inhomogénéités du fond de ciel, probablement dues à des réflexions parasites dans la nacelle, qui peuvent gêner les acquisitions, sans d'ailleurs pénaliser la stabilisation.

Le capteur stellaire est fondamentalement un imageur à haute résolution, fonctionnant selon un mode très particulier. En extraire des données radiométriques a nécessité un travail complexe d'étalonnage et de traitement, d'une précision limitée. Par ailleurs la plage explorée est réduite, tant en élévation de visée qu'en angle soleil-senseur. Du nuage de points résultant il est difficile de tirer un modèle, en particulier aux faibles angles. Il sort du cadre de cet article d'interpréter physiquement les résultats constatés mais, à la précision d'étalonnage et de mesure près, les mesures de PRONAOS semblent conforter celles de TIFANI dans la plage 65-115°.

On a ainsi un ordre de grandeur utilisable pour dimensionner les senseurs. Pour les angles plus faibles on se basera plutôt sur les mesures de TIFANI, plus dimensionnantes que celles de ZEBRA. Enfin, il semble se confirmer que lors d'un vol stratosphérique, selon les circonstances, une diffusion notable par les aérosols puisse s'ajouter à la diffusion de Rayleigh.

7- REFERENCES

- [1]: « Conception et développement de senseurs stellaires diurnes embarqués à bord de nacelles de ballons stratosphériques »
Y. André, Mémoire de thèse N°736, Oct 1990
- [2] « Etude et réalisation d'un senseur stellaire diurne embarqué à bord de ballon stratosphérique »
C. Peyron, Mémoire de thèse de docteur-ingénieur, 1984.
- [3] « Performance of a day-time star sensor for stabilized balloon platform ».
E. Rossi, G. di Cocco, A. Donati, A. Traci, E. Quadrini, G. Villa, T. Ashton, A.J. Court, IEEE Transaction on nuclear science vol. 36 N°1, Feb 1989.
- [4] « The in flight performance of the ZEBRA day-time star sensor ».
E. Rossi, J.B. Stephen, G. di Cocco, A. Donati, A. Traci, E. Quadrini, G. Villa, T. Ashton, A.J. Court, NASA IAA journal, adv. Space Res. vol.13, N°2, 1993.
- [5] « Luminance du ciel diurne stratosphérique, comparaison mesure/modèle »
Y. André, PR-NT 125.7-CN, 28/11/94
- [6] « PRONAOS, Essais sur le senseur stellaire pour le second vol »
P. Etcheto, PR-PE-125.4-CN, 19/8/95.
- [7] « PRONAOS, Senseur stellaire, exploitation du vol 2 »
P. Etcheto, PR-RE-125.14-CN, 1/4/97
- [8] « The PRONAOS project: Design, development and flight results »
F. Buisson, I. Ristorcelli, S. Berrivin, A. Laurens, C. Sirmain, G. Serra, J. M. Lamarre, G. Recouvreur, F. Pajot, J.P. Torre.
- [9]: « The PRONAOS pointing and stabilisation system ».
S. Berrivin, M. Ledu, A. Robert, 3rd ESA conference on spacecraft guidance, navigation and control system., ESTEC, 26-29 Nov. 1996
- [10] « PRONAOS flight software: a real-time application for a balloon-borne scientific gondola »
A. Laurens, Proceedings of « systèmes informatiques temps réels pour les applications spatiales », Nov. 1992, ed. Cepadûes.
- [11]: « Radiance du ciel de jour dans la stratosphère »
D. Huguenin, Observatoire de Genève, 16/1/87 (note interne)