HAL
open science

Caractérisation et étalonnage de la caméra de l'expérience ballon PILOT (Polarized Instrument for Long wavelength Observation of the Tenuous interstellar medium)

Vincent Buttice

To cite this version:

Vincent Buttice. Caractérisation et étalonnage de la caméra de l'expérience ballon PILOT (Polarized Instrument for Long wavelength Observation of the Tenuous interstellar medium). Autre. Université Paris Sud - Paris XI, 2013. Français. NNT : 2013PA112203 . tel-01023005

HAL Id: tel-01023005

https://theses.hal.science/tel-01023005v1

Submitted on 11 Jul 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITE PARIS-SUD

Ecole Doctorale Astronomie et Astrophysique d'Ile-de-France
Institut d'Astrophysique Spatiale

Discipline : Astrophysique

THESE DE DOCTORAT

Présentée par

Vincent BUTTICE

Caractérisation et étalonnage de la caméra de l'expérience ballon PILOT

Polarized Instrument for Long wavelength
Observation of the Tenuous interstellar medium

Soutenue le 30 septembre 2013, devant le jury :

Président	Pr.	Alain ABERGEL	Université Paris-Sud, Orsay
Directeur de thèse	Dr.	François PAJOT	IAS, Orsay
Rapporteurs	Dr.	Jean-Christophe HAMILTON	APC, Paris
	Dr.	Alessandro MONFARDINI	Institut Néel, Grenoble
Examinateurs	Dr.	Yves ANDRE	CNES, Toulouse
	Dr.	Jean-Philippe BERNARD	IRAP, Toulouse
Invité	Pr.	Michel PIAT	APC, Paris

UNIVERSITE PARIS-SUD

Ecole Doctorale Astronomie et Astrophysique d'Ile-de-France
Institut d'Astrophysique Spatiale

Discipline : Astrophysique

THESE DE DOCTORAT

Présentée par

Vincent BUTTICE

Caractérisation et étalonnage de la caméra de l'expérience ballon PILOT

Polarized Instrument for Long wavelength
Observation of the Tenuous interstellar medium

Thèse du Centre National d'Etudes Spatiales
cofinancée par Thales Alenia Space

Remerciements

Je souhaite remercier ici, par quelques mots, des personnes qui m'ont aidé et grâce à qui ma thèse s'est passée dans les meilleures conditions. Cependant ces mots ne représentent qu'une infime partie de ma considération envers elles. Je suis conscient et profondément touché d'avoir été vraiment soutenu, entouré, aidé lors de ma thèse, aussi bien dans les moments de satisfaction que dans les moments bien plus difficiles. Cette thèse a été une période importante, une suite d'instants uniques chargée de ressentis et d'émotions très particulières propres à une thèse.

Je remercie mon directeur de thèse, François Pajot, pour la confiance et la liberté qu'il m'a accordées. J'ai énormément appris en travaillant avec lui et j'admire sa méthodologie de travail. Merci à lui pour son aide, ses encouragements, ses nombreux conseils et de m'avoir guidé sur la bonne voie à suivre.

Je remercie l'équipe PILOT de l'IAS, Jean-Pierre Dubois, Maryse Charra, Bernadette Leriche, Yuying Longval, Mehdi Bouzit, Amandine Caillat, Mireille Chaigneau et Bruno Crane. Cette équipe, en plus d'avoir eu une conscience professionnelle en a eu une humaine et cela a été un plaisir et un enrichissement de travailler ensemble. Un grand merci à Maryse et Jean-Pierre pour les longues journées de travail, pour l'aide qu'ils m'ont apportée lors de la thèse, de la rédaction et de la préparation de la soutenance, n'hésitant pas à s'investir personnellement. Merci à Bernadette pour son enthousiasme et le partage de son expérience et à Yuying pour ses encouragements qui m'ont si bien motivé.

Je remercie l'ensemble du jury de soutenance. Tout d'abord Alain Abergel de l'avoir présidé, ce qui fut une grande joie pour moi, puis Jean-Christophe Hamilton et Alessandro Monfardini d'avoir accepté d'être les rapporteurs de ma thèse et enfin Yves André, Jean-Philippe Bernard et Michel Piat pour leur participation.

Je remercie aussi mon tuteur du CNES, Oliver La Marle, de son soutien et de sa présence à ma soutenance, mon tuteur de Thales Alenia Space, Bernard Collaudin, pour son intérêt du sujet et les nombreux échanges d'emails motivants, surtout lors de la phase de cryogénie.

Je remercie également toutes les personnes avec qui j'ai eu la chance de collaborer et dont les interactions ont été nombreuses et constructives :

— L'équipe PILOT de l'IRAP : Jean-Philippe Bernard, Céline Engel, Christophe Marty, Wilfried Marty, Ruka Misawa, Baptiste Mot, Jacques Narbonne, Damien Rambaud, Isabelle Ristorcelli, Gilles Roudil et Gilles Versepuech.

— L'équipe PILOT du CNES : Yves André pour cette belle phrase « Je suis ici et

maintenant. », François Bousquet, Stephan Maestre et Olivier Simonella.
— L'équipe PILOT du CEA : Olivier Boulade, Eric Doumayrou et Louis Rodriguez.
— Et enfin l'équipe PILOT de la Sapienza de Rome : Paolo De Bernardis et Maria Salatino.

Mes remerciements vont également à mes anciens collègues de l'équipe Planck, entre autres, Jean-Loup Puget, Edgardo Montes de Oca et Claude Mercier de m'avoir encouragé à faire cette thèse, plus particulièrement, Karin Dassas pour avoir toujours été présente, pour m'avoir motivé et soutenu sans faille.

Un remerciement particulier à mes collègues de l'IAS avec qui j'ai partagé des moments de rires, de soutiens et d'enrichissement humains qui m'ont sincèrement aidé durant ma thèse, par ordre alphabétique : Pablo Alingery, Daniel Altenburger, Hervé Ballans, Frédéric Baudin, Rosario Brunetto, Fanny Cabe, Stéphane Caminade, Martine Chane-Yook, Noël Coron, Catherine Cougrand, Morgan Cousin, Marie Godard, Chloé Guallar, Chloé Guennou, Boualam Hasnoun, Véronique Hervier, Matthieu Husson, Jérémie Jacob, Patricia Jeauneau, François Langlet, Jean-Christophe Le Clec'h, Marie-Charlotte Leprince, Pierre de Marcellus, Lionel Meslier, Kaen Nguyen-Kim, Marc Nicolas, Anne Philippon, Gilles Poulleau, Frédéric Rouesnel, Claudia Ruiz de Galarreta Fanjul, Véronique Sarrazin, Elie Soubrié, Noémie Thoores et Nesrine Zahaf.

Une pensée également à mes amis du master : Christophe Clergeon, Norma Hurtado, Florent Mertens, Jeanne Treuttel et Arnaud Vacelet.

Merci à vous tous...

Résumé

Caractérisation et étalonnage de la caméra de l'expérience ballon PILOT (*Polarized Instrument for Long wavelength Observation of the Tenuous interstellar medium*)

PILOT est une expérience embarquée en ballon stratosphérique destinée à la mesure de l'émission polarisée de notre galaxie dans le submillimétrique. La charge pointée de PILOT est composée d'un télescope au foyer duquel est placée une caméra embarquant 2048 bolomètres, refroidis à 300 mK, mesurant dans deux bandes spectrales (240 µm et 550 µm) et deux polarisations. La détection de la polarisation est réalisée à l'aide d'un polariseur placé à 45° dans le faisceau, le décomposant en deux composantes polarisées orthogonales chacune détectée par un bloc détecteur, et d'une lame demi-onde rotative. L'Institut d'Astrophysique Spatiale (Orsay, France) est responsable de la réalisation, de l'intégration, des tests et de l'étalonnage spectral de la caméra.

Pour cela deux bancs de mesures sont développés, un pour les essais d'imagerie et de polarisation, et un pour l'étalonnage spectral. L'expérimentation permet de valider l'alignement des optiques froides, de caractériser la qualité optique des images, de caractériser les réponses temporelles et en intensité des détecteurs, et de mesurer la réponse spectrale de la caméra. Un modèle photométrique de l'instrument est développé simulant les différentes configurations pour les essais d'étalonnage spectral, d'imagerie en laboratoire, et en vol, ceci afin d'estimer la puissance totale reçue par chaque pixel du détecteur de chaque configuration. Cette puissance totale est issue de l'émission thermique de l'instrument, de l'atmosphère et des sources observées en vol ou de l'environnement du laboratoire. Une campagne de tests a permis de caractériser et d'étalonner la caméra de l'expérience PILOT. Les premières images dans le domaine du submillimétrique ont été révélées, et les premières réponses spectrales mesurées.

Suite à la caractérisation et l'étalonnage spectral, la caméra est alignée avec le miroir primaire sur la nacelle CNES pour des caractérisations et des étalonnages en polarisation de l'instrument complet. Le premier vol est prévu pour le milieu de l'année 2014.

Abstract

The PILOT camera characterization and spectral calibration

The Polarized Instrument for Long wavelength Observation of the Tenuous interstellar medium (PILOT) is a balloon borne experiment designed to measure the polarized emission from dust grains in the galaxy in the submillimeter range. The payload is composed of a telescope at the optical focus of which is placed a camera using 2048 bolometers cooled to 300 mK. The camera performs polarized optical measurements in two spectral bands (240 µm and 550 µm). The polarization measurement is based on a cryogenic rotating half-wave plate and a fixed mesh grid polarizer placed at 45° separating the beam into two orthogonal polarized components each detected by a detector array. The Institut d'Astrophysique Spatiale (Orsay, France) is responsible for the design, integration, tests and spectral calibration of the camera.

Two optical benches have been designed for its imaging and polarization characterization and spectral calibration. Theses setups allow to validate the alignment of the camera cryogenic optics, to check the optical quality of the images, to characterize the time and intensity response of the detectors, and to measure the overall spectral response. A numerical photometric model of the instrument was developed for the optical configuration during calibration tests (spectral), functional tests (imager) on the ground, and flight configuration at the telescope focus, giving an estimate of the optical power received by the detectors for each configuration. The tests campaign validates the PILOT camera characterization and calibration. It delivered the first submillimeter images and the first spectral responses.

Next, the camera will be aligned and integrated with the primary mirror of the telescope on the CNES gondola, for characterization and optical polarization calibration of the complete instrument. The first flight is now planned for mid 2014.

Table des matières

Remerciements **i**

Résumé **iii**

Abstract **v**

Préambule **xi**

1 Introduction et objectifs **1**
1.1 Le fond diffus cosmologique 1
1.2 Le milieu interstellaire 1
1.2.1 La poussière 1
1.2.2 Un avant-plan du CMB 2
1.3 L'observation de la poussière dans le submillimétrique 3
1.4 L'émission polarisée des grains de poussière 4
1.5 Le contexte et les objectifs scientifiques 4
1.6 Les objectifs de PILOT 5
1.7 La caractérisation et l'étalonnage de la caméra 6

2 L'instrument PILOT **9**
2.1 L'historique de PILOT 9
2.2 Le principe instrumental 10
2.2.1 Le ballon et la nacelle 10
2.2.2 La charge pointée 11
2.2.3 Les spécifications 15
2.2.4 La stratégie de vol 16
2.3 Du miroir primaire aux détecteurs 16
2.3.1 Le miroir primaire 17
2.3.2 Le cryostat et les écrans thermiques 17
2.3.3 La fenêtre d'entrée 17
2.3.4 Les filtres thermiques 18
2.3.5 Les lentilles 19
2.3.6 Les miroirs 21
2.3.7 La source d'étalonnage interne 22

2.3.8 Le diaphragme de Lyot 23
2.3.9 La lame demi-onde 23
2.3.10 Le polariseur 24
2.3.11 Les filtres de coupure à 240 µm et 550 µm 24
2.3.12 Les détecteurs à 240 µm et 550 µm 26
2.3.13 Le réfrigérateur miniature hélium 3 et le doigt froid 28
2.3.14 Les électroniques 29
2.4 Le calendrier du projet 31

3 Modèle photométrique de l'expérience PILOT 35
3.1 Objectifs 35
3.2 Les grandeurs photométriques 36
3.3 Simulation vol 39
3.3.1 Caractéristiques des sources et des éléments optiques 39
3.3.2 Photométrie vol 41
3.3.3 Résultat et conclusion 44
3.4 Comparaison des résultats IRAP/IAS 47

4 Intégration et essais fonctionnels de la caméra PILOT 49
4.1 Les moyens du banc de tests fonctionnels 49
4.2 Les objectifs du banc de tests fonctionnels 51
4.3 Mise sous vide 51
4.4 Descente en froid et autonomie 52
4.5 Essais des détecteurs 54
4.5.1 Réponse des détecteurs et numérotation des matrices 54
4.5.2 Mesure du fond thermique à 300 K et 77K 55
4.5.3 Comparaison du fond thermique estimé et mesuré 56
4.5.4 Puissance équivalente de bruit 58
4.6 Essais de la source interne d'étalonnage 58
4.7 Essais de la lame demi-onde 60

5 Description et modélisation des bancs optiques 63
5.1 Objectifs 64
5.1.1 Pourquoi les bancs optiques ? 64
5.1.2 Le modèle photométrique 64
5.2 Imagerie 65
5.2.1 Les moyens du BCN 65
5.2.2 Les objectifs du BCN 67
5.3 Simulation BCN 67
5.3.1 Caractéristiques des sources et des éléments optiques 67
5.3.2 Photométrie BCN 70
5.3.3 Résultat et conclusion BCN 71
5.4 Etalonnage spectral 73
5.4.1 Definitions et notions 73

5.4.2 Les moyens du BFTS 75
5.4.3 Les objectifs du BFTS 79
5.4.4 Paramètres de configurations 79
5.5 Simulation BFTS 81
5.5.1 Caractéristiques des sources et des éléments optiques 81
5.5.2 Photométrie BFTS 83
5.5.3 Résultat et conclusion BFTS 85
5.6 Conclusion et atténuateur 87
5.6.1 Conclusion 87
5.6.2 Atténuateur 88

6 La campagne d'étalonnage de la caméra PILOT 91
6.1 Imagerie 91
6.1.1 Alignement optique 91
6.1.2 Les essais et résultats 92
6.2 Etalonnage spectral 93
6.2.1 Alignement optique 93
6.2.2 Les essais et résultats 95

Conclusions et Perspectives 107

Annexes 109

A Caractéristiques optiques des lentilles 111
A.1 Lentilles PILOT L1 et L2 111
A.2 Lentilles des bancs optiques BCN et BFTS 127

B Simulation photométrique 143
B.1 Mesures de transmissions 143
B.1.1 Fenêtre d'entrée de la caméra PILOT 143
B.1.2 Filtres de la caméra PILOT 144
B.1.3 Lame demi-onde 146
B.2 Estimations spécifiques 146
B.2.1 Etendue géométrique d'un pixel du détecteur PILOT 146
B.2.2 Bandes spectrales 150
B.2.3 Efficacité du détecteur 150
B.3 Développement informatique 150

C Test de fuite en hélium 3 et 4 151

D Chaîne d'acquisition et de traitement des données 157
D.1 Chaîne d'acquisition des données 157
D.2 Acquisition des données de servitude et des bolomètres de PILOT 157
D.3 Acquisition des données du spectromètre 159
D.3.1 Interactions Homme-Machine 159

D.3.2 Méthode de synchronisation 160
D.4 Traitement des données scientifiques 161
D.4.1 Nature physique du problème 161
D.4.2 Méthode de résolution 161
D.4.3 Modules de lecture et de traitement des données 163

E Publication SPIE **165**

Liste des figures **173**

Liste des tableaux **177**

Liste des acronymes **179**

Bibliographie **181**

Préambule

Cette thèse est consacrée aux tests et à l'étalonnage de la caméra de l'expérience ballon PILOT, elle se compose en six parties.

L'introduction rassemble plusieurs notions astrophysiques et scientifiques nécessaires à une bonne compréhension du contexte de la mission et des motivations qui ont abouti à l'expérience ballon PILOT. Ces connaissances sont d'une part le fond diffus cosmologique (CMB) récemment mesuré avec précision par l'instrument Planck-HFI et le milieu interstellaire qui est un avant plan à l'observation du CMB. D'autre part des notions d'émission polarisée et des notions d'observation dans le domaine du submillimétrique sont également introduites. Puis sont exposés les objectifs scientifiques de la mission PILOT. Enfin il est précisé l'objectif de la thèse, à savoir la caractérisation et l'étalonnage de la caméra PILOT.

Une deuxième partie aborde l'historique de PILOT, puis expose le principe instrumental de PILOT et aussi le détail de la caméra, le système dont l'étude constitue l'essentiel de ma thèse.

Une troisième partie décrit comment l'instrument PILOT a été simulé à l'aide d'un modèle numérique photométrique et les raisons d'une telle simulation.

Ensuite une quatrième partie et une cinquième partie sont consacrées à la préparation des mesures. La quatrième partie décrit les moyens mis en oeuvre et les résultats des essais fonctionnels des sous-systèmes intégrés à la caméra, et leurs interactions. Et la cinquième partie décrit les moyens mis en oeuvre nécessaire à la caractérisation et l'étalonnage de la caméra, ainsi que les simulations numériques photométriques correspondantes.

Les résultats des mesures d'étalonnage de la caméra PILOT sont donnés dans une sixième partie.

Chapitre 1

Introduction et objectifs

Sommaire

1.1 Le fond diffus cosmologique **1**
1.2 Le milieu interstellaire **1**
1.2.1 La poussière 1
1.2.2 Un avant-plan du CMB 2
1.3 L'observation de la poussière dans le submillimétrique . . . **3**
1.4 L'émission polarisée des grains de poussière **4**
1.5 Le contexte et les objectifs scientifiques **4**
1.6 Les objectifs de PILOT **5**
1.7 La caractérisation et l'étalonnage de la caméra **6**

1.1 Le fond diffus cosmologique

La première lumière de l'univers a voyagé durant 13,7 milliards d'années avant qu'elle ne soit visible. Elle a été émise 380 000 ans après le big bang, lors du découplage entre le rayonnement et la matière. Ce rayonnement, extrêmement proche de celui d'un corps noir à 3000 K, nous parvient actuellement avec une température apparente de 2.7 K (figure 1.1). C'est donc dans le domaine de longueur d'onde s'étendant de l'infrarouge lointain au-delà de 100 µm, qu'il convient plus facilement de l'étudier.

1.2 Le milieu interstellaire

1.2.1 La poussière

Une galaxie comprend des étoiles, du gaz et de la poussière. Le gaz et la poussière à l'intérieur des galaxies constituent ce qu'on appelle le milieu interstellaire, et sont les principales sources de rayonnement dans l'infrarouge lointain. La poussière est constituée de petits solides de quelques nanomètres à une fraction de millimètre (image 1.2). Ces

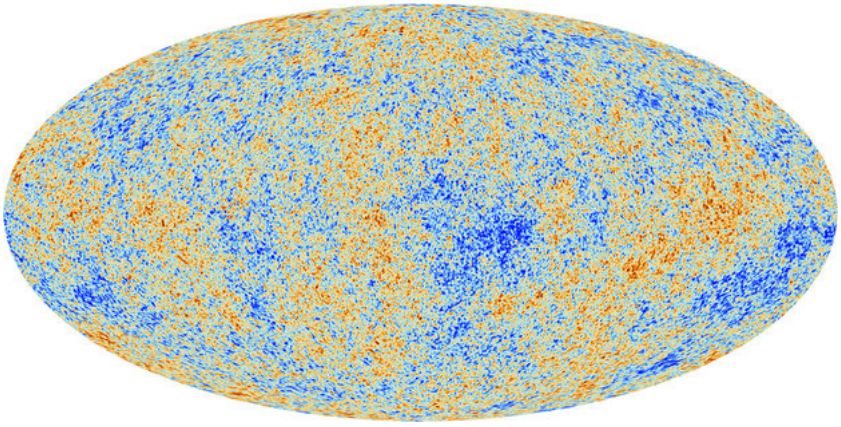


FIGURE 1.1 – Carte du fond diffus cosmologique détectée par Plank-HFI.

grains de poussières sont composés de silicate ou de carbone et ont une température très froide, environ 20 K. Ils ont la propriété d'absorber toute la lumière visible émise par les étoiles environnantes, et par ce qu'ils sont froids, d'émettre leur propre énergie dans l'infrarouge lointain.

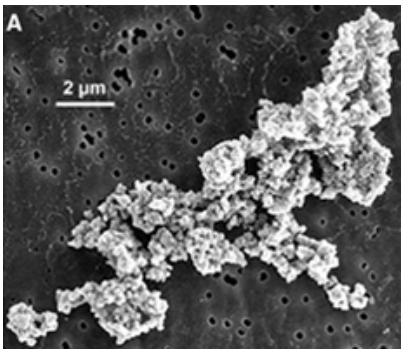


FIGURE 1.2 – Grain de poussière interplanétaire récupéré par la mission Stardust.

1.2.2 Un avant-plan du CMB

Le milieu interstellaire est un des avant-plans à l'observation du fond diffus cosmologique (CMB). Les avant-plans sont des objets astrophysiques qui produisent un signal se superposant au CMB, et qui modulent l'intensité du rayonnement reçu du CMB. Ils sont donc à soustraire du signal d'observation total pour arriver au CMB. Ces avant-plans (figure 1.3) sont le rayonnement de la Voie lactée, des grains de poussière galactique, des galaxies et amas de galaxies. A cela s'ajoutent les bruits instrumentaux. Une connaissance approfondie de ces avant-plans est donc nécessaire à l'observation du CMB.

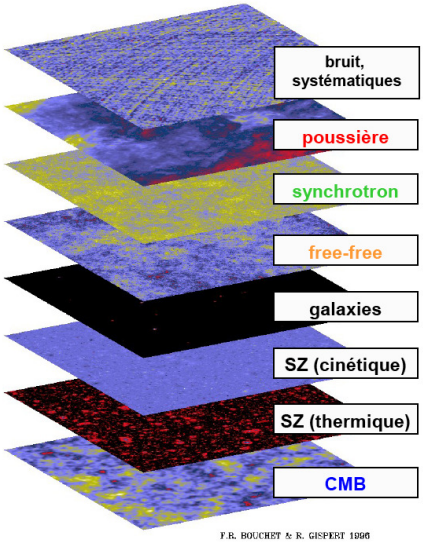


FIGURE 1.3 – Les avant-plans du fond diffus cosmologique (crédit François Bouchet and Richard Gispert 1996).

1.3 L'observation de la poussière dans le submillimétrique

Le rayonnement infrarouge est très utile en astronomie car cette lumière est émise principalement par les objets froids, comme les grains de poussière, et les objets jeunes de l'univers. Dans le spectre électromagnétique (figure 1.4) l'infrarouge a été découpé en plusieurs intervalles : l'infrarouge proche de 0,7 à 5 µm, l'infrarouge moyen de 5 à 30 µm, l'infrarouge lointain de 40 à 100 µm et le submillimétrique de 100 µm à 1 mm.

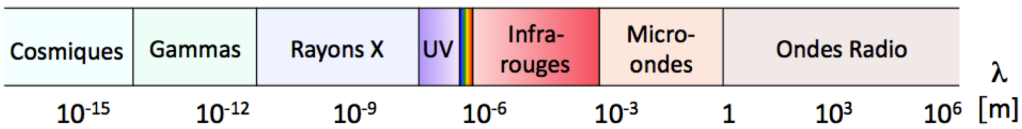


FIGURE 1.4 – Longueurs d'ondes λ du spectre électromagnétique.

Les grains de poussière sont chauffés par le rayonnement ultra-violet et visible des étoiles environnantes, et le ré-émettent dans l'infrarouge et le submillimétrique dans toutes les directions. L'observation dans l'infrarouge et le submillimétrique, peu opaques, permet de sonder l'intérieur et comprendre les propriétés des zones denses de notre galaxie. Sur la figure 1.5, six observations d'une même région du ciel dans six longueurs d'ondes différentes, du visible à l'infrarouge moyen, mettent en évidence les propriétés de l'émission des grains de poussières.

Les étoiles naissent dans des zones riches en gaz et en poussières qui sont totalement invisibles avec un télescope observant dans le visible tel que le télescope spatiale Hubble.

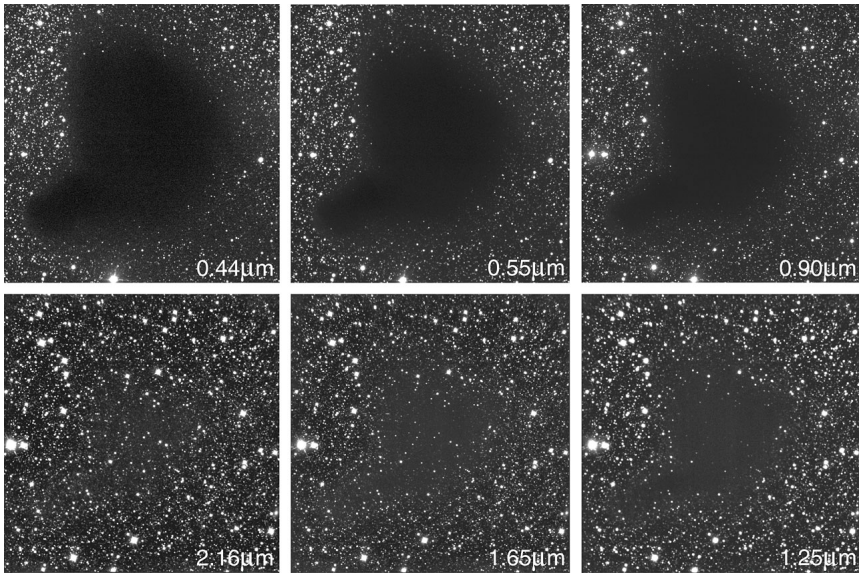


FIGURE 1.5 – Nuage de poussières sombre Barnard 68 (crédit ESO). L'obscurcissement causé par le nuage diminue avec l'augmentation de la longueur d'onde.

Donc il faut observer dans l'infrarouge pour pouvoir sonder l'intérieur de ces zones et en déduire les propriétés liées à la naissance des étoiles. A grande échelle, la lumière infrarouge permet ainsi d'avoir une vision globale de la naissance des étoiles dans une galaxie.

1.4 L'émission polarisée des grains de poussière

Les grains de poussière, que l'on peut considérer comme des dipôles magnétiques en rotation, s'alignent suivant les lignes du champ magnétique de notre galaxie. Du fait de leur alignement et de leur géométrie, l'émission des grains de poussières est légèrement polarisée dans une direction orthogonale aux lignes du champ magnétique. La polarisation est une propriété des ondes électromagnétiques liée à leur orientation dans un plan.

1.5 Le contexte et les objectifs scientifiques

Un défi majeur de ces dernières années est de mesurer avec précision la polarisation du fond diffus cosmologique. La figure 1.6 représente une carte simulée de polarisation mesurée par l'instrument WMAP. Ces observations vérifieront les modèles théoriques de l'inflation c'est-à-dire l'expansion très rapide de l'univers à son origine. Elles renseigneront aussi sur la réionisation due à l'apparition des premières étoiles. La polarisation du CMB est vue au travers de plusieurs avant-plans (amas de galaxies, galaxies, free free, synchrotron, poussière, zodiacal), dont la figure 1.3 en est une représentation

schématique. Pour une bonne analyse de la polarisation du CMB, la séparation de ces avant-plans requiert donc une connaissance approfondie de chacun d'eux. Un de ces avant-plans est l'émission polarisée du rayonnement des grains de poussières de notre galaxie. Et c'est dans cette perspective que PILOT se positionne, par l'étude de cet avant-plan.

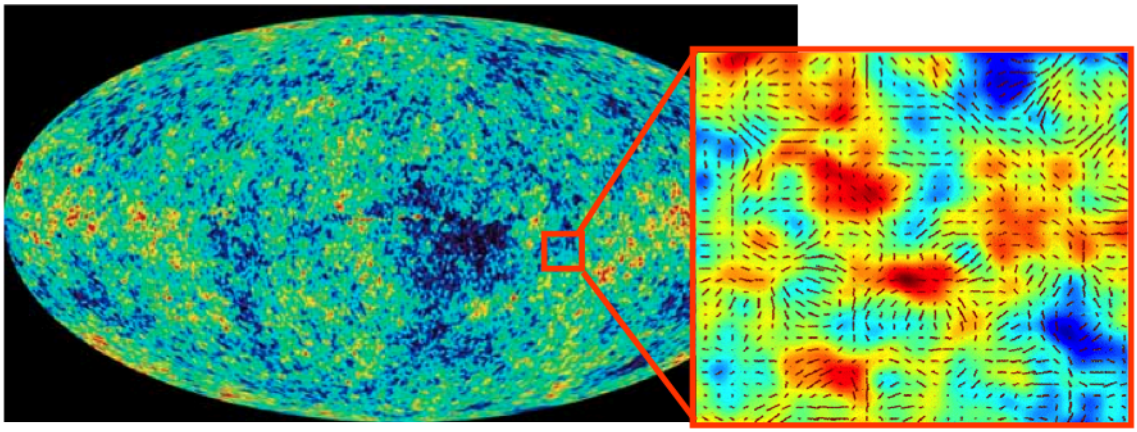


FIGURE 1.6 – Carte de polarisation WMAP.

1.6 Les objectifs de PILOT

En nous référant uniquement à la définition de l'acronyme PILOT nous avons une idée des objectifs de l'instrument. Littéralement la traduction de *Polarized Instrument for Long wavelength Observation of the Tenuous interstellar medium* veut dire : instrument pour l'observation à grande longueur d'onde de la polarisation du milieu interstellaire diffus. L'expérience PILOT mesurera donc précisément la polarisation linéaire émise par la poussière interstellaire de notre galaxie dans le submillimétrique. Ses mesures se feront dans deux bandes spectrales : une à 240 µm et une à 550 µm avec une résolution angulaire de quelques minutes d'arc. Ces observations ont plusieurs objectifs scientifiques majeurs (Bernard et al. 2007). Le premier objectif est que les mesures permettront de comprendre les propriétés des poussières et du champ magnétique galactique et de déterminer sa géométrie à grande échelle. Le deuxième objectif est de caractériser le disque de la Galaxie et des régions plus diffuses du ciel où la poussière constitue une émission d'avant-plan se superposant aux signaux cosmologiques, tels que les signaux mesurés par l'instrument Planck-HFI (Planck Collaboration 2011). Sur le spectre d'émission des poussières interstellaires (figure 1.7), les bandes d'observation de Planck-HFI et de PILOT, avec les voies polarisées, sont complémentaires. Un objectif supplémentaire est la réalisation d'un catalogue de plusieurs milliers de sources ponctuelles en polarisation.

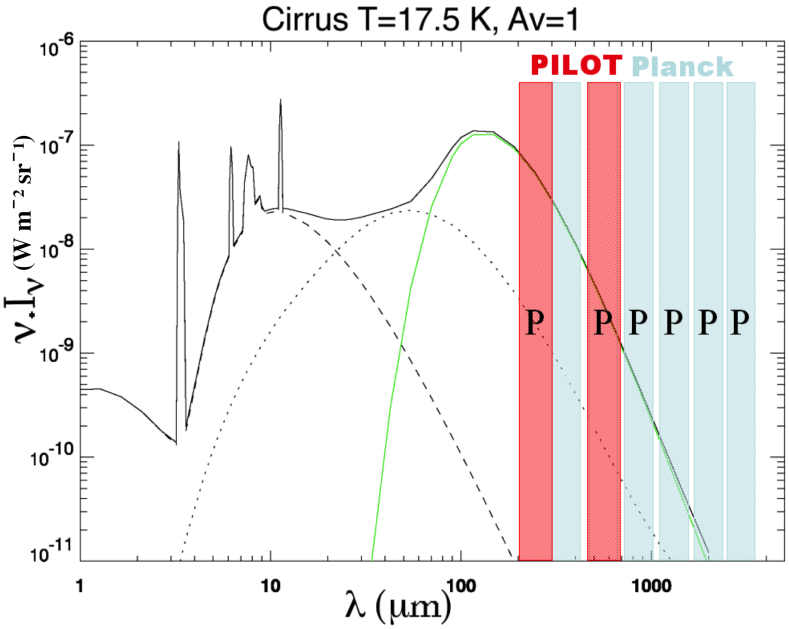


FIGURE 1.7 – Spectre Infrarouge/Micro-onde d'émission des poussières du milieu interstellaire. Les bandes d'observation de PILOT et Planck-HFI sont complémentaires. La lettre P représente les voies polarisées.

1.7 La caractérisation et l'étalonnage de la caméra

Le sujet de ma thèse est "Caractérisation et étalonnage de la caméra de l'expérience ballon PILOT". Pour la compréhension du fonctionnement d'un instrument deux étapes sont cruciales : sa caractérisation et son étalonnage. Durant celles-ci tous les sous-systèmes sont mis en oeuvre pour tester leur fonctionnement individuellement et de concert. Cette opération donne des informations essentielles à la vie de l'instrument en exploitation.

D'après le "Vocabulaire International des termes fondamentaux et généraux de Métrologie" (VIM), établi par l'ISO, la définition du mot "étalonnage" est une "*opération qui, dans des conditions spécifiées, établit en une première étape une relation entre les valeurs et les incertitudes de mesure associées qui sont fournies par des étalons et les indications correspondantes avec les incertitudes associées, puis utilise en une seconde étape cette information pour établir une relation permettant d'obtenir un résultat de mesure à partir d'une indication.*"

En préalable à la phase d'étalonnage, ma thèse comprend aussi une grande partie dédiée aux AIT/AIV, c'est à dire :

— comprendre, définir et valider le fonctionnement de la caméra. Après la définition sur le papier, c'est l'étape de vérification que l'instrument fonctionne nominalement et qu'il permet d'atteindre les objectifs spécifiés,
— vérifier que l'alignement optique permet la formation d'une image,
— définir et valider les réglages des détecteurs intégrés à la caméra pour une réponse

optimale,
— comprendre le comportement de l'instrument en cryogénie. Définir et valider les étapes cryogéniques pour atteindre la température nominale de fonctionnement,
— vérifier le fonctionnement du système d'étalonnage intégré,
— vérifier la réponse de la caméra à une source polarisée.

Les essais réalisés en fonction des objectifs de caractérisation et d'étalonnage sont décrits dans le tableau 1.1. L'étalonnage réalisé dans ce travail est axé sur la réponse spectrale de la caméra.

Objectifs \ Essais	Cryogénie	De 350 mK à 300 mK	Créneaux ICS	Fond à 300 K	Fond à 77K	Rotation HWPM	Réglage miroir plan	Source BCN, Chopper, Plan de polarisation	Translation miroir mobile, Source BFTS,	Sections
Stabilité thermique caméra	X									4.4
Caractérisation Plans focaux				X	X					4.5
Caractérisation ICS			X	X	X	X				4.6
Réponse sur ICS		X	X							
Caractérisation HWP			X			X			X	4.7
Réponse en imagerie								X		6.1
Réponse spectrale						X			X	6.2

TABLE 1.1 – Les essais réalisés en fonction des objectifs de caractérisation et d'étalonnage

Chapitre 2

L'instrument PILOT

Sommaire

2.1 L'historique de PILOT 9
2.2 Le principe instrumental 10
2.2.1 Le ballon et la nacelle 10
2.2.2 La charge pointée 11
2.2.3 Les spécifications 15
2.2.4 La stratégie de vol 16
2.3 Du miroir primaire aux détecteurs 16
2.3.1 Le miroir primaire 17
2.3.2 Le cryostat et les écrans thermiques 17
2.3.3 La fenêtre d'entrée 17
2.3.4 Les filtres thermiques 18
2.3.5 Les lentilles 19
2.3.6 Les miroirs 21
2.3.7 La source d'étalonnage interne 22
2.3.8 Le diaphragme de Lyot 23
2.3.9 La lame demi-onde 23
2.3.10 Le polariseur 24
2.3.11 Les filtres de coupure à 240 µm et 550 µm 24
2.3.12 Les détecteurs à 240 µm et 550 µm 26
2.3.13 Le réfrigérateur miniature hélium 3 et le doigt froid 28
2.3.14 Les électroniques 29
2.4 Le calendrier du projet 31

2.1 L'historique de PILOT

L'étude spatiale dans le domaine submillimétrique est longtemps restée inexploitée. Depuis de nombreux instruments l'ont étudié, tels que par exemple COBE, IRAS,

AGLAE, et PRONAOS. Ce dernier a permis l'observation du milieu interstellaire galactique et du rayonnement cosmique diffus. PRONAOS, dont l'étalonnage a été réalisé à l'IAS (Pajot et al. 2006), était destiné à vérifier la faisabilité technique de mesures des futures missions spatiales pour l'étude du milieu interstellaire et du fond diffus cosmologique, tel que Herschel et Planck. Il était composé d'un miroir de 2 mètres de diamètre, et de quatre détecteurs qui étaient des bolomètres refroidis à 300 mK. Ces longueurs d'onde spécifiques d'observation étaient égales à 200 µm, 260 µm, 360 µm et 583 µm, avec respectivement une résolution de 2.0', 2.0', 2.5' et 3.5'.

Direct successeur de PRONAOS et initialement destiné à préfigurer la mission Planck, le projet ballon ELISA (Experiment for Large Infrared Survey Astronomy) devait s'intéresser particulièrement à l'observation de l'émission submillimétrique des poussières à l'échelle Galactique. Là où PRONAOS a observé des objets isolés, ELISA devait permettre l'observation d'une grande partie du ciel (Ristorcelli et al. 2001). Cette observation était possible par l'utilisation d'un miroir d'un mètre de diamètre et de matrices de bolomètres. Ces longueurs d'ondes spécifiques d'observation étaient égales à 170 µm et 650 µm, avec une résolution de 3.5'.

Historiquement le projet a évolué par l'ajout d'une spécificité, la mesure de la polarisation de l'émission des grains de poussière galactique. Le projet ELISA est devenu ELISA-POL puis nommé PILOT (Bernard et al. 2007). Les spécificités antérieures restent identiques. La mesure de polarisation est basée sur un principe innovant combinant une lame demi-onde et deux blocs de matrices de bolomètres, 1024 pixels par bande d'observation. Les longueurs d'onde d'observation passent à 240 µm et 550 µm, avec une résolution respective de 1.44' et 3.29'. Cette spécificité instrumentale est détaillée dans la section 2.2.2.

PILOT est un projet international financé par le CNES et impliquant plusieurs laboratoires et instituts, français et étrangers dont l'Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie (IRAP) qui est le maitre d'œuvre, l'Institut d'Astrophysique Spatiale (IAS) qui est responsable de la caméra, le Commissariat à l'Energie Atomique et aux énergies alternatives (CEA) responsable du développement des détecteurs, et les Universités de Cardiff, de Manchester et la Sapienza de Rome.

2.2 Le principe instrumental

L'expérience PILOT (Marty 2010) est composée d'une nacelle et d'une charge pointée, lancée par un ballon stratosphérique.

2.2.1 Le ballon et la nacelle

Pour s'affranchir de l'atmosphère terrestre qui est essentiellement opaque dans le domaine du submillimétrique, l'instrument PILOT sera embarqué sous ballon stratosphérique permettant d'atteindre une altitude de 38 km. Le ballon stratosphérique fourni par le CNES, est un ballon "souple" d'un volume de 800 000 m^3. Le CNES fournit aussi une

nacelle standard, en structure tubulaire (figure 2.1). Elle sert de plate-forme à la charge pointée.

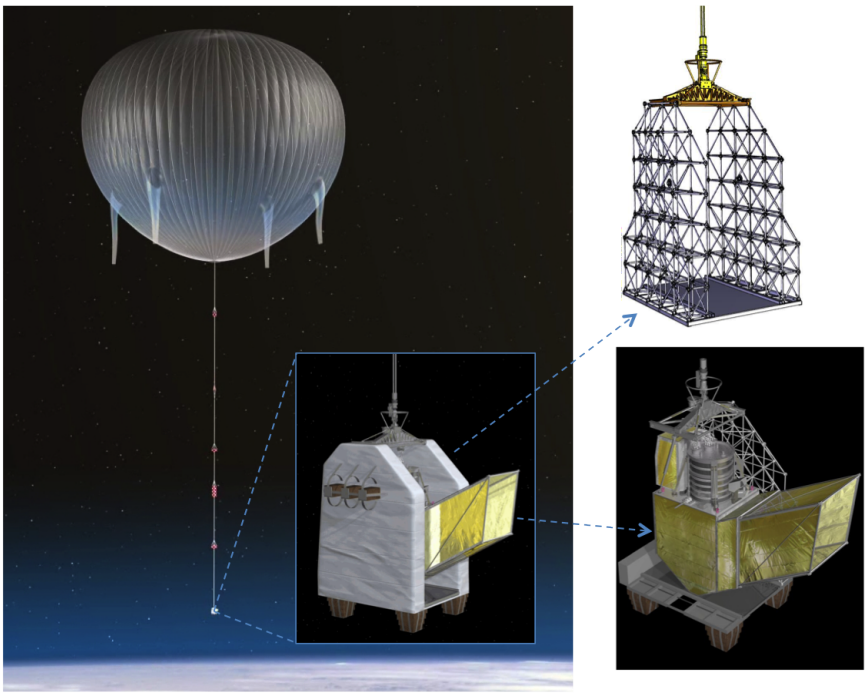


FIGURE 2.1 – La nacelle scientifique (au centre) embarquée sous le ballon stratosphérique, composée de la charge pointée (en bas) et de la structure tubulaire (en haut).

2.2.2 La charge pointée

La charge pointée (figure 2.2), sous responsabilité de l'IRAP, est composée d'un système de pilotage ballon, d'un système de communication, d'une structure mécanique, et de l'instrument scientifique qui permettra les mesures, c'est à dire PILOT.

La structure mécanique

La structure mécanique de la charge pointée, sous responsabilité de l'IRAP, est composée d'une structure maintenant l'ensemble de l'instrument scientifique, d'un système de réglage optique du miroir primaire de l'instrument et d'un bafflage de l'instrument réduisant les lumières parasites.

L'instrument scientifique PILOT

PILOT est un télescope composé d'une caméra (figure 2.3), sous responsabilité de l'IAS, avec son électronique de servitudes et des détecteurs, et d'un miroir primaire, sous responsabilité de l'IRAP.

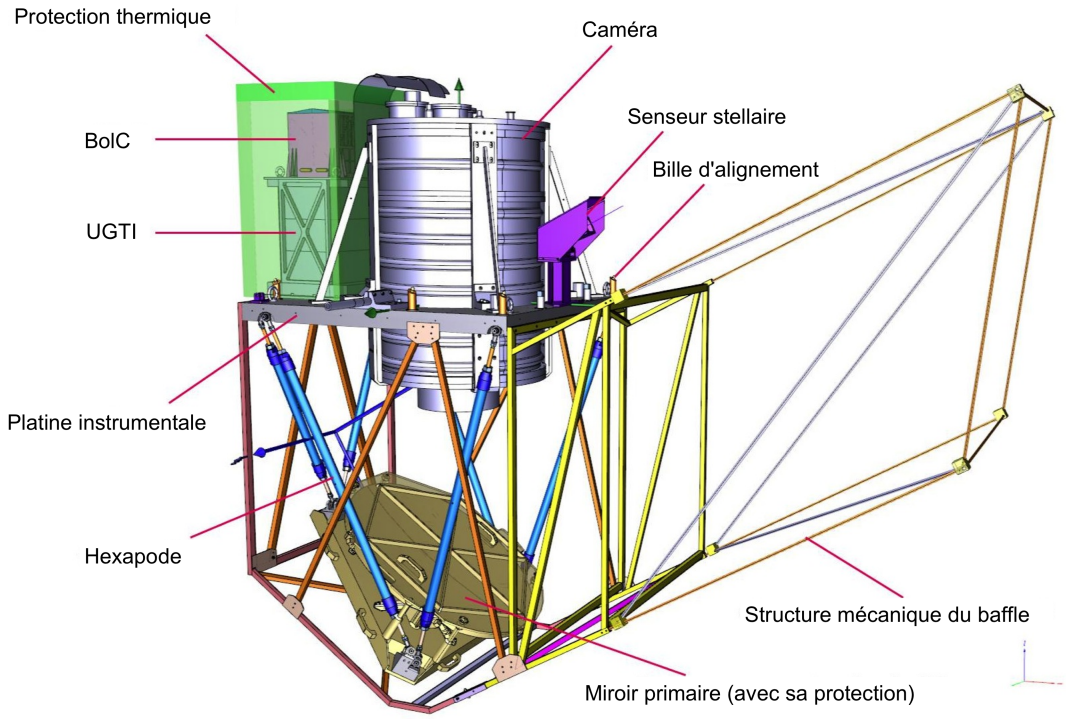


FIGURE 2.2 – La charge pointée.

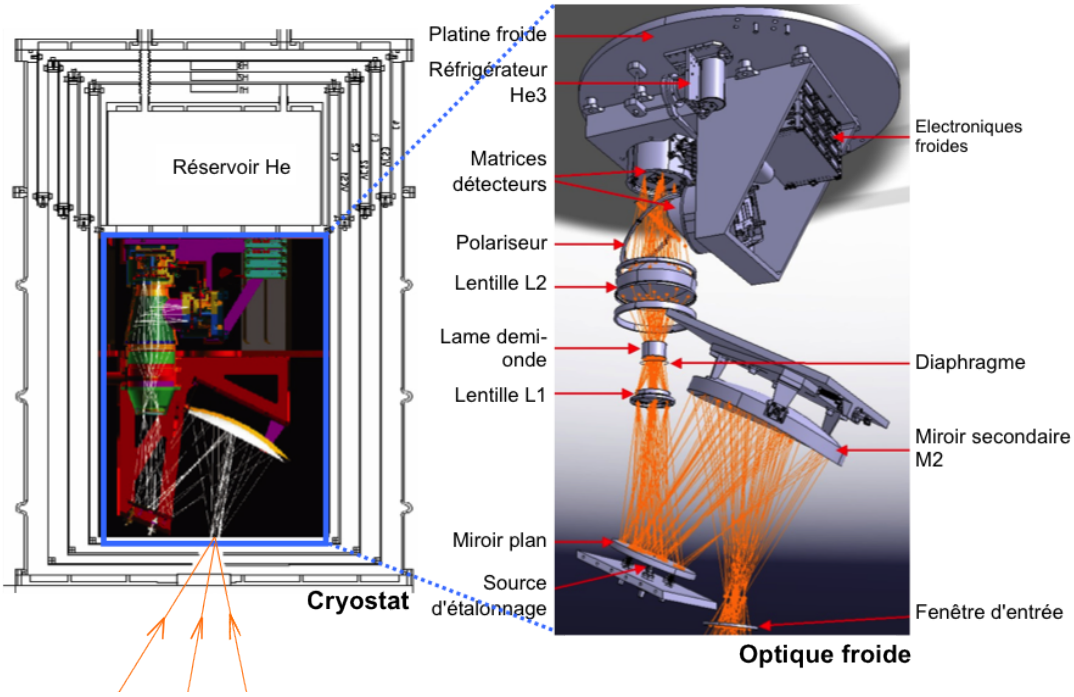


FIGURE 2.3 – La caméra.

PILOT a été développé dans le but de mesurer l'intensité et la polarisation émise par les grains de poussière. Afin de réduire les effets systématiques pouvant nuire à la sensibilité de la mesure et améliorer le rapport signal sur bruit, la conception optique de l'instrument a été optimisée en ce sens.

Les conditions imposées par les objectifs scientifiques sont les suivantes :
— une polarisation instrumentale minimale,
— une émission thermique minimale des éléments optiques et de leur environnement,
— une sensibilité maximale des détecteurs.

Les solutions instrumentales correspondantes sont :
— un télescope de type Grégory hors axe,
— un ensemble optique à 2.3 K placé dans un cryostat,
— des détecteurs et un réfrigérateur miniature à 300 mK.

Comme la mesure de la polarisation linéaire ne représente qu'environ 5% du signal astrophysique il faut réduire au maximum la polarisation instrumentale. Pour cela le miroir secondaire forme avec le miroir primaire hors axe un télescope de type Grégory hors axe (figure 2.4), ce qui a pour but de réduire la lumière parasite par diffraction et la polarisation instrumentale.

Excepté le miroir primaire placé à l'extérieur du cryostat, tous les éléments optiques de la caméra sont à 2 K afin de réduire les émissions thermiques des éléments optiques et de leur environnement, pour améliorer encore le rapport signal à bruit. Ceci permet de diminuer le signal du fond thermique instrumental.

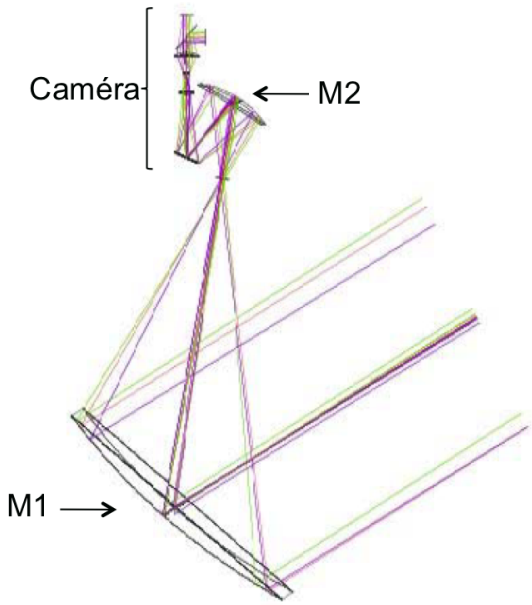


FIGURE 2.4 – Schéma optique du télescope PILOT

La caméra (Leriche et al. 2009) combine deux fonctions : un imageur, et un polarimètre. L'imageur est composé d'un miroir secondaire, d'un miroir de renvoi, d'un ré-imageur et de détecteurs, dont les bandes spectrales à 240 µm et 550 µm sont définies par un ensemble de filtres. Le ré-imageur (figure 2.5) est composé de deux lentilles L1 et L2 entre lesquelles sont placés une lame demi-onde et un diaphragme de Lyot.

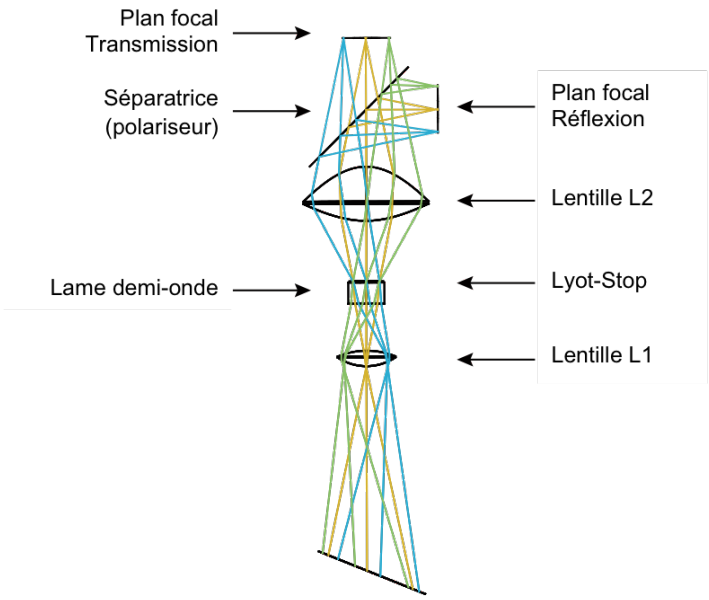


FIGURE 2.5 – Schéma optique du ré-imageur

Le système de mesure du degré de polarisation linéaire est constitué d'une part d'une lame demi onde rotative refroidie à 2 K permettant de faire tourner le plan de polarisation de l'onde incidente, d'autre part d'un polariseur placé à 45° dans le faisceau, qui sépare le faisceau en ses deux composantes polarisées orthogonales qui sont respectivement transmises et réfléchies vers les deux blocs de matrices de détecteurs.

PILOT a donc 2 plans focaux, un en réflexion et un en transmission, qui sont composés chacun de quatre matrices de bolomètres refroidis à 300 mK. Chaque matrice a une taille de 16*16 pixels ce qui nous donne un total de 2048 bolomètres. En comparaison Planck et Archeops ont respectivement 54 et 6 bolomètres. Ce nombre important de bolomètres augmente le nombre de mesures simultanées, améliorant ainsi la sensibilité de la mesure de la polarisation.

Les longueurs d'ondes d'observation à 240 µm et 550 µm sont adaptées à la mesure de l'émission de la poussière. L'observation à ces deux longueurs d'ondes, ainsi qu'une méthode de mesure de la polarisation utilisant la rotation d'une lame-demi onde et des matrices de bolomètres, feront de PILOT une expérience inédite et sensible, dédiée à cette mesure de la polarisation.

2.2.3 Les spécifications

Les spécifications de PILOT attendues suivant les fonctions de la caméra sont les suivantes : En radiométrie, des bandes spectrales centrées à λ_1=240 µm et à λ_2=550 µm, avec des largeurs respectives égales à 20% et 33%. En imagerie, un champ de vue de 48 minutes d'arc par 24 minutes d'arc, une résolution égale à Φ_{λ_1}=1,44' et Φ_{λ_2}=3,29', à mi-hauteur de la tache d'Airy, et une surface couverte par le balayage de $10°^2$/h à $300°^2$/h. En polarimétrie, une mesure de la polarisation linéaire égale à 5% du signal astrophysique doit être possible jusque dans des régions de faible colonne de densité, correspondant typiquement à quelques magnitudes d'extinction dans le visible.

La valeur totale du bruit (NEP) attendue est de l'ordre de 10^{-16} W/$\sqrt{Hz}$, et la sensibilité attendue des détecteurs en fonction de la couverture du ciel égale à S_{λ_1}=[0.92 ; 5.05] MJy/sr et S_{λ_2}=[1.08 ; 5.93] MJy/sr.

Pour le traitement des données, PILOT fournira les données de 2048 bolomètres à une fréquence de 40 Hz et des données de servitudes. Les données à bord sont stockées, et transférées au sol à un débit de transfert est égal à 1,5 Mbits/s. Le tout permet la réalisation de cartes de sources étendues.

Les caractéristiques instrumentales, et spécifications attendues de PILOT sont reprises dans le tableau 2.1.

Parameters	Unit	Values	
Physical primary mirror diameter	mm	830 (minor axis)	
Polish primary mirror diameter	mm	810 (minor axis)	
Useful primary mirror diameter (D_{iu})	mm	730	
Equivalent Focal Length	mm	1800	
Detectors		CEA-LETI bolometers arrays	
Detectors temperature	K	0.3	
Field of view	degree	0.8° x 0.4° (for 2 wavelengths)	
	arcminutes	48'*24' 1 pixel : 1.5'	
Scanning strategy	$°^2$/hour	[10 - 300]	
Wavelengths	µm	240	550
Frequencies	GHz	1250	545
Pixels number	px	1024	1024
Instrumental background	pW	18.6	1.9
NEPDetectors	W/sqrt(Hz)	210^{-16}	210^{-16}
NEPPhotons	W/sqrt(Hz)	$1.8\ 10^{-16}$	$3.7\ 10^{-17}$
NEPTotal	W/sqrt(Hz)	$2.69\ 10^{-16}$	$2.03\ 10^{-16}$
Resolution (FWHM)	arcmin	1.44'	3.29'
Sensitivity (3 σ in 3.5')	MJy/sr	[0.92-5.05]	[1.08-5.93]

TABLE 2.1 – Les spécifications.

2.2.4 La stratégie de vol

La stratégie d'observation de PILOT est d'effectuer une succession de balayages centrés sur la Galaxie ou la source à observer (Bernard et al. 2007). La figure 2.6 montre une simulation de l'observation du plan galactique.

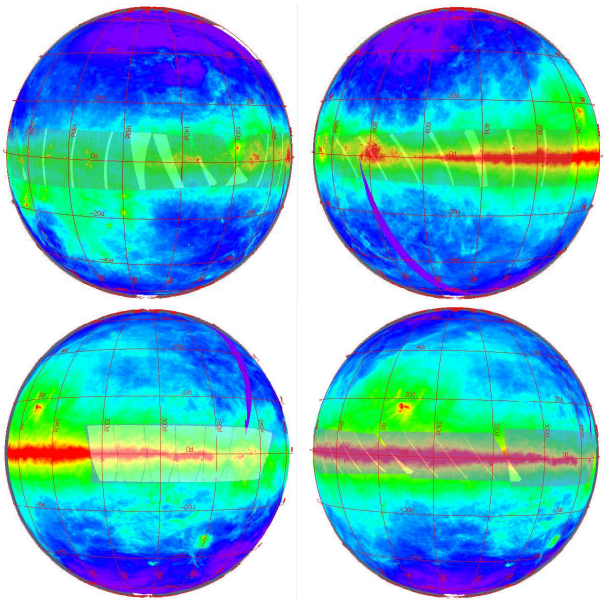


FIGURE 2.6 – Simulation de l'observation du plan galactique.

Le pointage pour l'observation sera assuré par un senseur stellaire nocturne ou diurne, dépendant du lieu d'observation. En prenant en compte les vents stratosphériques, la durée d'un vol ballon est de 20 à 25 heures, incluant la montée, le plafond pour l'observation à 38 km d'altitude et la descente.

Pour couvrir la totalité du plan de la galaxie, trois vols sont prévus, en trois lieux différents, Timmins au Canada, Kiruna en Suède, et en Australie. Le premier vol est prévu depuis Timmins pour le milieu de l'année 2014, le second vol depuis Kiruna pour mi 2016 et le troisième vol depuis l'Australie en fin d'année 2017. Pour les deux premiers vol les observations se feront de nuit, donc avec un senseur stellaire nocturne, et lors du dernier vol les observations se feront essentiellement de jour avec un senseur stellaire diurne.

2.3 Du miroir primaire aux détecteurs

Cette partie est une description de chaque sous-système de la caméra (figure 2.3), du miroir M1 aux détecteurs en passant par les électroniques et les servitudes. Chaque sous-système sous la responsabilité de l'IAS a été testé avant, pendant et après l'intégration dans la caméra. De la livraison à l'intégration, j'ai participé activement à ces essais ; ceux-ci sont décrits dans les sections suivantes.

2.3.1 Le miroir primaire

Le miroir primaire M1(Engel et al. 2013), sous la responsabilité de l'IRAP, est un miroir parabolique (figure 2.7) hors axe formant avec le miroir secondaire de la caméra un télescope de type Grégory hors axe. Le réglage en positon du miroir primaire de 830 mm de diamètre par rapport à la caméra est réalisé par un ensemble de 6 vérins manuels. Les caractéristiques du miroir sont données dans le tableau 2.1.

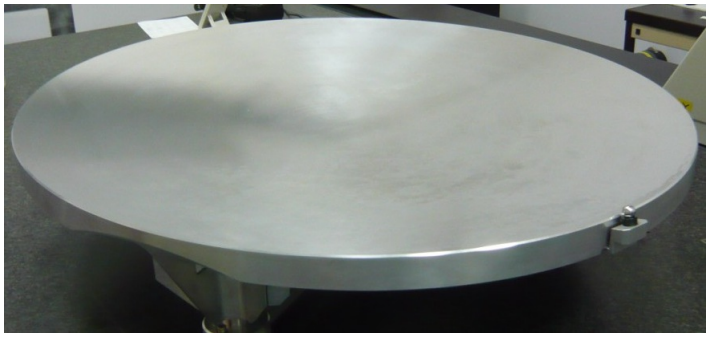


FIGURE 2.7 – Le miroir primaire.

Dans les spécifications d'essais il a été décidé que le miroir primaire ne serait pas livré à l'IAS pour les essais sol de caractérisation et d'étalonnage de la caméra. Cela aura une influence sur le développement des bancs optiques pour les essais (sections 5.2 et 5.4).

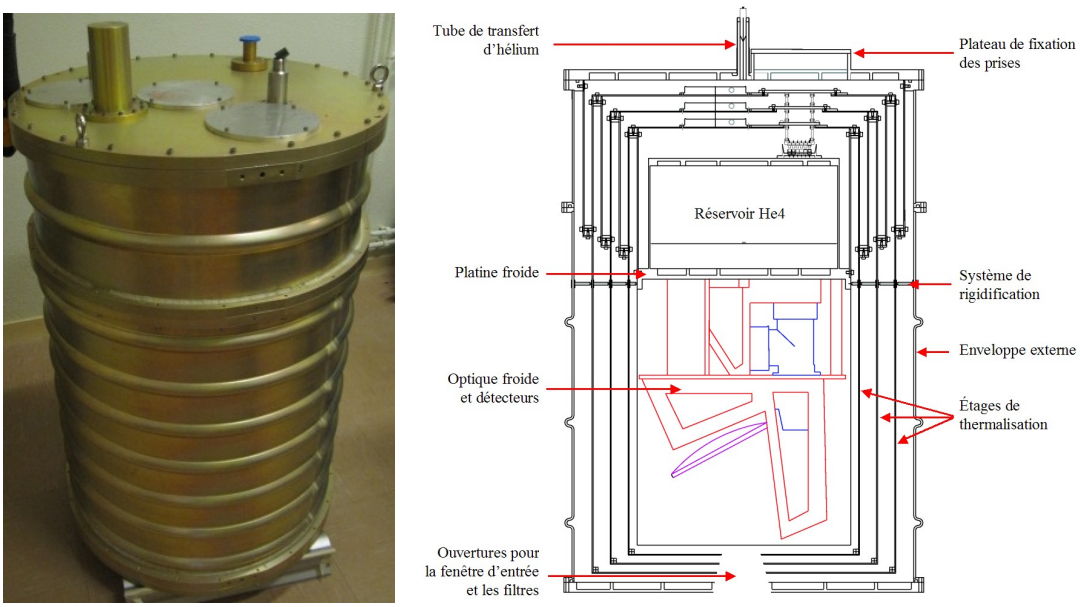
2.3.2 Le cryostat et les écrans thermiques

Le cryostat (Masi et al. 2010) est composé d'une enveloppe extérieure et d'écrans thermiques (figure 2.8) assurant la descente en température cryogénique au contact d'un réservoir d'hélium 4.

De diamètres différents et de hauteurs différentes, l'enveloppe extérieure et les écrans thermiques sont montés en poupée russe, c'est à dire l'un dans l'autre. Chaque écran permet d'atteindre une température définie, l'enveloppe extérieure à une température prévue de 300 K, puis les écrans thermiques intérieurs à une température successivement de 150 K, 80 K, 30 K et 3 K.

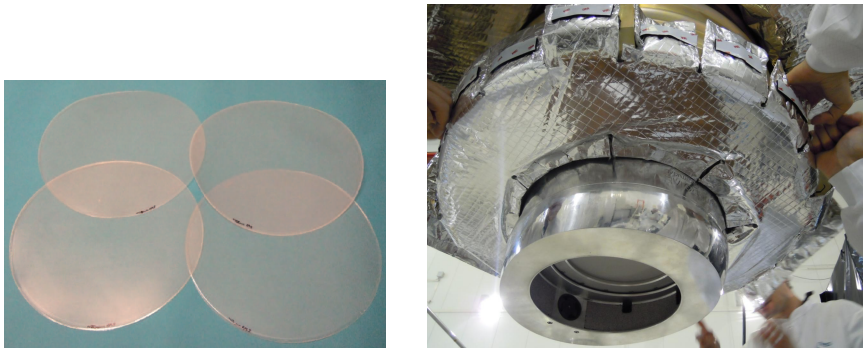
2.3.3 La fenêtre d'entrée

La fenêtre d'entrée (figure 2.9.a) est une plaque de polypropylène. Le choix de ce matériau est dû à sa faible émissivité et sa bonne transmission dans les bandes spectrales de PILOT. Elle permet l'étanchéité du vide de la caméra, et le passage des photons collectés par le miroir primaire. Un système chauffant (figure 2.9.b) est monté autour de la fenêtre d'entrée évitant la formation de givre lors de la montée dans l'atmosphère, pouvant perturber les observations. Les dimensions et la température de la fenêtre d'entrée sont données dans le tableau 2.2.



(a) (b)

FIGURE 2.8 – Enveloppe extérieure (a) et coupe de la caméra (b).



(a) (b)

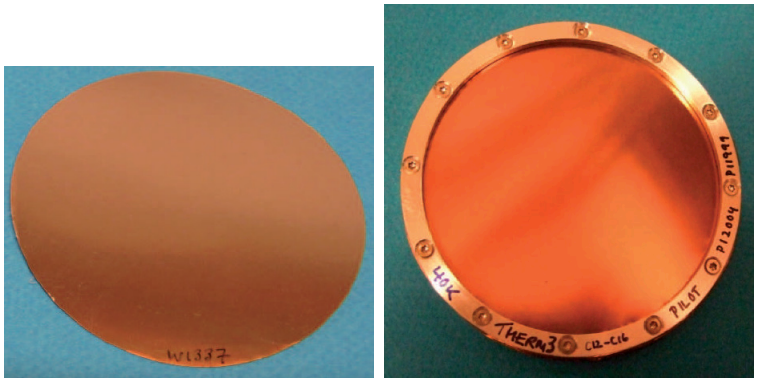
FIGURE 2.9 – La fenêtre d'entrée (a) et le chauffage fenêtre (b). Le système chauffant est fixé à l'entrée de la caméra.

2.3.4 Les filtres thermiques

Une série de filtres (Savini et al. 2010) optiques et thermiques (figure 2.10) placée sur les écrans thermiques, suivant la figure 2.11, permet de laisser passer le faisceau optique et de couper les bandes spectrales. Ces filtres sont communs aux deux bandes spectrales à 240 µm et 550 µm. D'autres filtres sont dédiés à ne laisser passer que celles-ci (section 2.3.11). Les filtres sont en polypropylène sauf le filtre 300 K qui est en Mylar. Ces matériaux servent de support au métal utilisé pour faire les grilles des filtres qui filtrent la lumière. Les dimensions et la température des filtres sont données dans le tableau 2.2.

PILOT	Material	Position	Size OD (mm)	Size CA (mm)	Quantities	Reference	Thickness (mm)
COMMON FILTERS							
Flight window	PP	300 K	300	160	4 for tests	14x15µm hotpressed complete	0,2
Ground test window	PP	300 K	300	160			2
Therm 1	Mylar	300 K	179	161		C8-C12	5 mm ring cross section
Therm 2	PP	140 K	110	100	one	C8-C12	5 mm ring cross section
65cm-1 LPE	PP	80 K	97.5	90	one	W1360	0.32
Therm 3	PP	40 K	85	75	one	C12-C16	5 mm ring cross section
60cm-1 LPE	PP	2.5 K	77.5	65	one	W1359(PFIL3 type)+ARC	0.47
80cm-1 LPE	PP	2.5 K	77.5	65	one	W1337	0.25
Half wave plate	Sapphire	2.5 K	50	35	one		8 mm ring thickness
Polarizer P10	Mylar	2.5 K	140	120	one	filter 1796	10 mm ring thickness
240µm BAND FILTERS							
36 cm-1 HPE	PP	array	60		four	3 x W 1356 and 1 x W1506	0.21
48 cm-1 LPE	PP	array	60		four	3 x W1336 and 1 x W875	0.32
58 cm-1 LPE	PP	array	60		four	3 x W1375 and 1 x W1371	0.25
550µm BAND FILTERS							
15.2 cm-1 HPE	PP	array	60		two	W984	0.56
21.2 cm-1 LPE	PP	array	60		three	W1376	0.98
25 cm-1 LPE	PP	array	60		two	W892	0.65

TABLE 2.2 – Caractéristiques des filtres de la caméra PILOT.



(a) (b)

FIGURE 2.10 – Filtre commun 80 cm^{-1} (a), et filtre thermique 3 dans son support (b). Les autres filtres sont similaires mais de diamètres différents.

2.3.5 Les lentilles

Les lentilles L1 et L2 asphériques sont en polypropylène avec un traitement anti-reflet sur leurs deux faces (figure 2.12). Leurs épaisseurs au centre sont respectivement de 14 mm et de 38 mm. Le rôle de la lentille de champ L1 est de former l'image de M1 sur le diaphragme de Lyot (section 2.3.8). Le rôle de la lentille de focalisation L2 est de ré-imager le ciel sur les détecteurs (section 2.3.12).

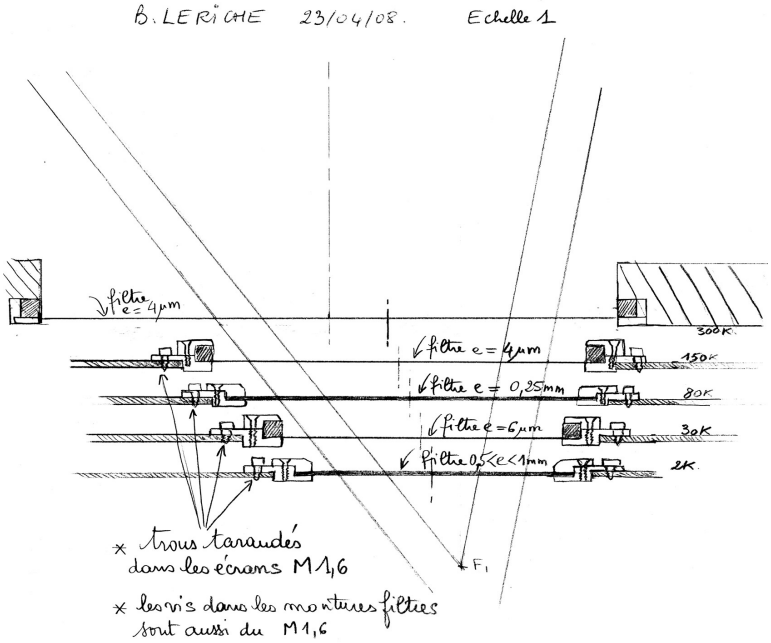


FIGURE 2.11 – Positionnement des filtres sur les écrans thermiques.

(a) (b)

FIGURE 2.12 – Les lentilles L1 (a) et L2 (b).

Caractérisations des lentilles L1 et L2

Pour caractériser les lentilles L1 et L2 de la caméra nous avons dû passer par plusieurs étapes d'expérimentations sur des échantillons de polypropylène. Dans un premier temps des mesures sur des lames de polypropylène ont déterminé les caractéristiques optiques du matériau, telles que l'expansion thermique, l'indice de réfraction et la transmission

optique. De ces caractéristiques, j'ai calculé le coefficient d'absorption du polypropylène. Dans un second temps une simulation optique, développée avec le logiciel Zemax®, et utilisant les précédentes mesures et calculs, permet de déterminer la géométrie des lentilles PILOT, et leurs valeurs de transmission optique. Les étapes de caractérisations du polypropylène et des lentilles sont détaillées dans l'annexe A.1.

La caractérisation a été une étape décisive dans le bilan de la simulation photométrique et dans le choix final des détecteurs de vol de la caméra (section 3.3).

2.3.6 Les miroirs

Le miroir secondaire M2 est un miroir elliptique (figure 2.13). Le miroir M3 est un miroir plan de renvoi (figure 2.14). Les deux miroirs, en aluminium, sont refroidis à environ 3 K pour limiter leur émission. Une particularité du miroir M3 est une ouverture pour laisser passer le cône de lumière de la source interne d'étalonnage, placée en son dos.

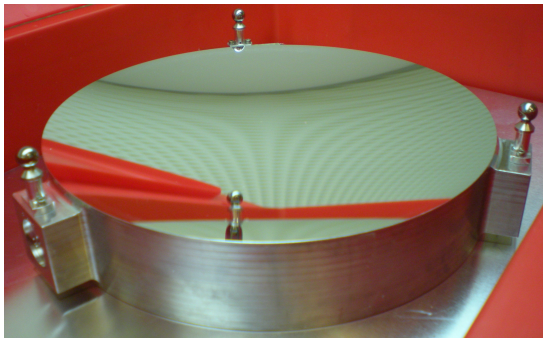
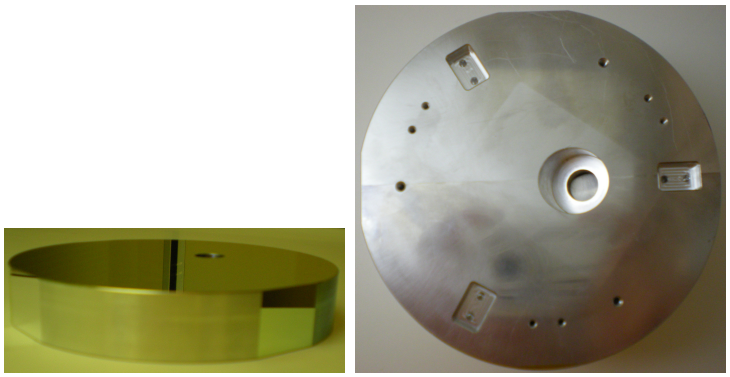


FIGURE 2.13 – Miroir elliptique M2 et trois billes de référence pour l'alignement optique.



(a) (b)

FIGURE 2.14 – Miroir plan M3 (a) et vue de dos avec l'emplacement de la source interne d'étalonnage (b).

Alignement optique M2 et M3

Afin de pouvoir procéder à un alignement (figure 2.15), trois points de fixation et d'alignement par miroir sont prévus. Nous avons donc pu réaliser l'alignement optique des miroirs M2 et M3 de la caméra (Caillat and Buttice 2012), afin que les foyers du miroir M2 soient correctement positionnés et l'axe optique de la caméra bien orienté. C'est à dire, le premier foyer du miroir M2 est confondu avec le foyer F_1 du miroir primaire et le second foyer F_2 est replié vers la lentille L1 par le miroir plan M3 de renvoi du faisceau. De plus nous avons repéré le foyer optique du miroir primaire ainsi que son axe optique en vue de son alignement avec les optiques internes de la caméra (le ré-imageur).

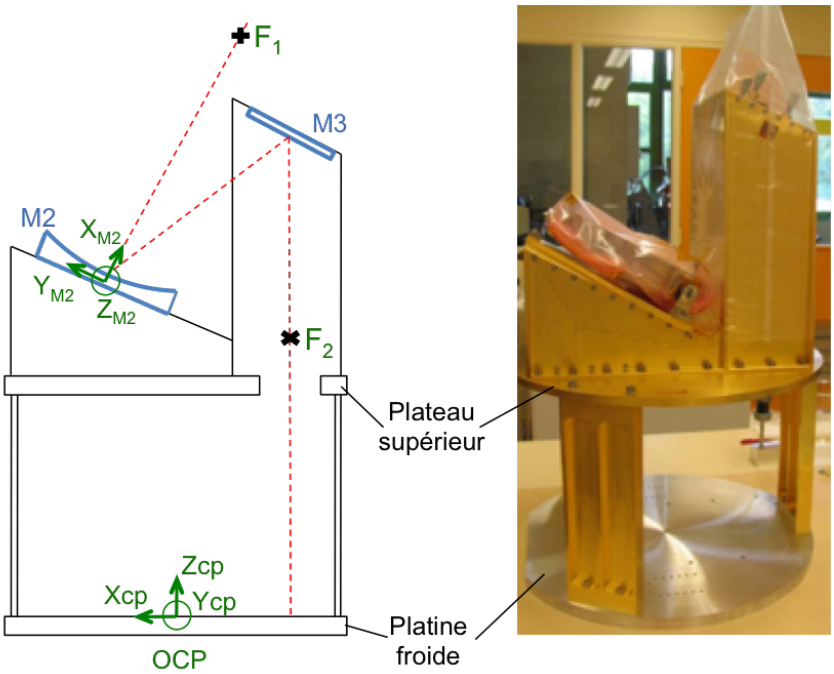


FIGURE 2.15 – Alignement optique des miroirs M2 et M3.

2.3.7 La source d'étalonnage interne

La source d'étalonnage interne (ICS) est la garantie d'un étalonnage relatif en vol des mesures (Hargrave 2006; Bernard et al. 2008). C'est un bolomètre chauffé par courant modulé, positionné derrière le miroir M3. Un exemplaire identique est utilisé dans le télescope Herschel : PCAL de SPIRE (Hargrave et al. 2006). L'ICS permet d'étalonner les détecteurs en suivant l'évolution de la réponse champ plat des détecteurs à la fin de chaque balayage du ciel.

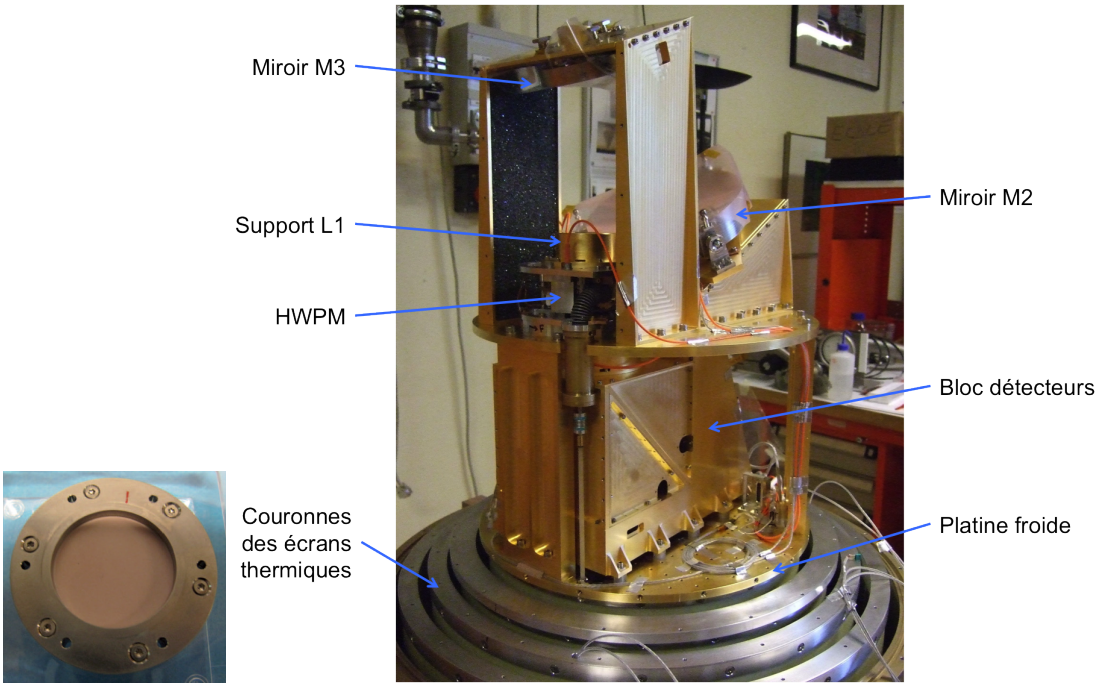
2.3.8 Le diaphragme de Lyot

Le diaphragme de Lyot ou Lyot-Stop est un diaphragme placé dans le faisceau permettant de réduire la taille de celui-ci et de limiter les lumières parasites du système optique. Il est situé à l'image de l'objectif formé par une lentille de champ L1, avec une ouverture légèrement plus petite que l'image de l'objectif.

2.3.9 La lame demi-onde

La lame demi-onde (Savini et al. 2007), sous la responsabilité de l'université de Cardiff, est composée de plusieurs lames de saphir (figure 2.16). Les dimensions et la température de la lame sont données dans le tableau 2.2.

Elle est placée dans le faisceau et sa spécificité est de permettre la rotation du plan de polarisation du rayon incident. Une rotation de la lame de 22.5° fait tourner le plan de polarisation de 45°.



(a) (b)

FIGURE 2.16 – La lame demi-onde (a) et le mécanisme de rotation HWPM de la lame intégrés à la caméra (b).

Transmission

Les mesures de transmissions de la lame demi-onde, réalisées par l'université de Cardiff, ont été obtenues en co-polarisation et en cross-polarisation (annexe B.1.3). Dans

le premier cas, les mesures en co-polarisation consistent à faire tourner la lame demi-onde entre deux polariseurs orientés dans le même sens. Dans le second cas, les mesures en cross-polarisation consistent à faire tourner la lame demi-onde entre des polariseurs orientés orthogonalement.

Caractéristique du mécanisme de la lame demi-onde

Le mécanisme de lame demi-onde (Salatino and de Bernardis 2010),sous la responsabilité de l'université La Sapienza, permet un positionnement précis de la lame demi-onde sur huit positions, avec un angle égal à 11.25° entre chaque position. Un système de vis sans fin, de roue dentée percée de trous et de fibres optiques permet ce positionnement. Les huit positions sont réparties entre 0° et 78.75° de la roue dentée.

Des essais en laboratoire du mécanisme de la lame demi-onde ont été réalisés avant son intégration dans la caméra. Formé par l'équipe de Rome, j'ai réalisé des essais de rotation du mécanisme lame demi-onde et de détections des positions, en configuration d'essai, c'est à dire, avec le moteur du mécanisme alimenté par une alimentation de laboratoire, et piloté par un ordinateur de contrôle de laboratoire et via un logiciel de contrôle sous LabView®. Puis formé par l'équipe de l'IRAP, j'ai réalisé des essais de rotation et de détection, en configuration mesures sol, c'est à dire, avec le moteur du mécanisme et ordinateur de bord alimentés par une baie sol spécifique aux essais PILOT et via le logiciel de contrôle vol PILOT-Studio.

Les essais consistaient à vérifier le fonctionnement nominal du mécanisme de rotation, de la détection des huit positions de la lame. Durant ces essais des améliorations ont été apportées au mécanisme au niveau de la précision des positions par les fibres optiques, et au niveau des butées mécaniques aux positions extrêmes (1 et 8). Nous avons remarqué un échauffement en rotation de la roue dentée et de la vis sans fin du mécanisme de la lame demi-onde jusqu'à 1.5 K (figure 2.17). L'ajout d'un lien thermique plus importante sur la roue dentée a permis de dissiper cette chaleur en excès.

2.3.10 Le polariseur

Le polariseur (figure 2.18) placé à 45° permet la séparation du faisceau optique en ses deux composantes polarisées orthogonales. Cette séparatrice est un polariseur à grille. Le matériau, les dimensions et la température du polariseur sont données dans le tableau 2.2.

2.3.11 Les filtres de coupure à 240 µm et 550 µm

La sélection spécifique de la bande spectrale centrée soit à 240 µm soit à 550 µm est réalisée par une série de trois filtres (figure 2.19) placée devant les détecteurs à 300 mK. Le matériau, les dimensions et la température des filtres de coupure sont données dans le tableau 2.2. Noter qu'à 240 µm, deux jeux de filtres ont été livrés. Leurs caractéristiques de coupures différent légèrement, cependant ils influent peu sur le résultat final.

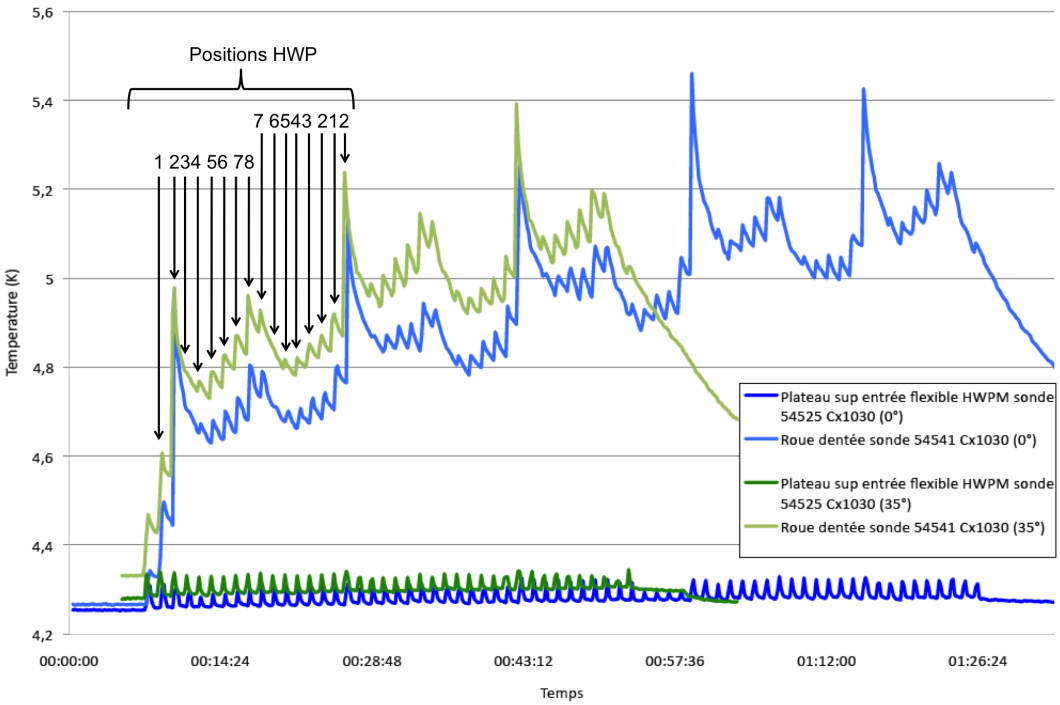
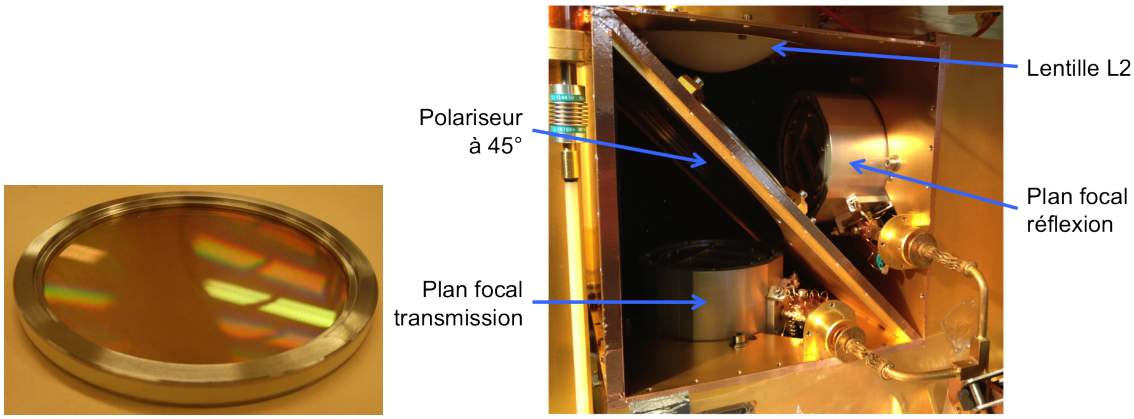


FIGURE 2.17 – Essais de rotation du mécanisme de la lame demi-onde à 4K. Evolution des températures en fonction de l'inclinaison de la caméra à 0° et 35°.



(a) (b)

FIGURE 2.18 – Polariseur (a) intégré à 45° dans son support (b).

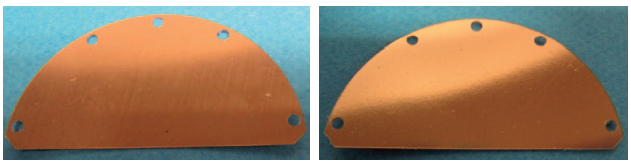


FIGURE 2.19 – Filtres de coupure à 240 µm et 550 µm.

2.3.12 Les détecteurs à 240 µm et 550 µm

Définition

Les deux plans focaux (figure 2.20) au foyer du télescope sont composés chacun de quatre matrices de bolomètres refroidis à 300 mK (Rodriguez 2008). Les matrices d'une taille de 16*16 bolomètres, soit 2048 au total, ont été développées par le CEA-DAPNIA de Saclay et le CEA-LETI de Grenoble. Celles-ci sont identiques aux matrices de l'instrument PACS du satellite Herschel (Simoens et al. 2004).

Les bolomètres, comme des calorimètres, mesurent l'apport de chaleur de la lumière observée, et transmettent l'information sous forme de signal électrique.

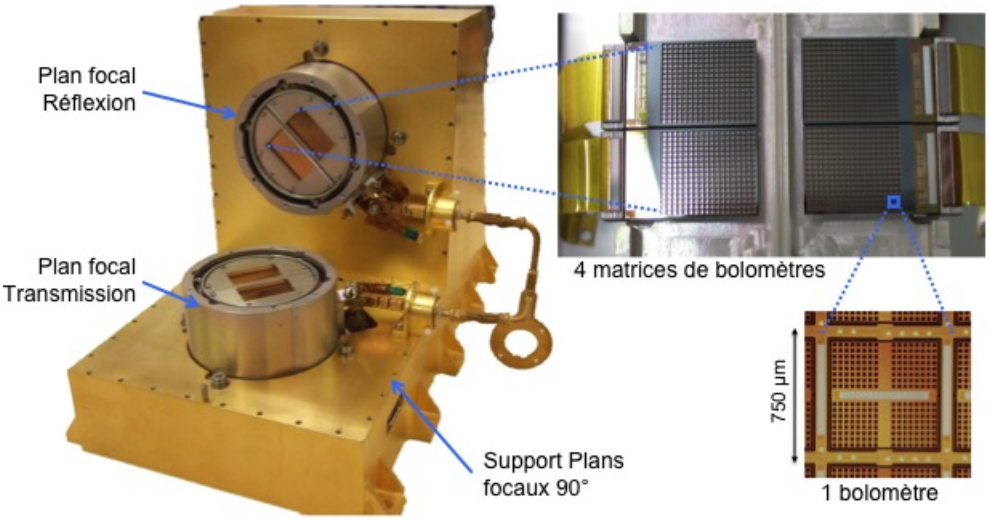


FIGURE 2.20 – Décomposition d'un plan focal.

Les plans focaux sont positionnés orthogonalement l'un par rapport à l'autre et orientés à 45°. Chaque plan focal est composé de deux matrices observant à 240 µm et de deux matrices à 550 µm. Cependant les matrices de bolomètres à 550 µm sont en cours de développement, donc non livrées lors des essais d'étalonnage. Les essais de cette thèse ont été réalisés avec quatre matrices de bolomètres par plan focal à 240 µm et le premier vol de PILOT se fera uniquement avec ces matrices.

Caractéristiques des détecteurs

— Le temps d'intégration de l'électronique de lecture des détecteurs est de 1.5 ms,
— Un pixel est lu par l'électronique toutes les 25 ms (40 Hz),
— La bande passante Δ_ν des détecteurs est de 8 Hz,
— La constante de temps T est de 20 ms,
— La valeur du gain en courant appliquée lors de la caractérisation est de 20 µV/ADU.

Caractérisation des plans focaux

Les essais de caractérisation au CEA (Boulade 2011a,b) consistaient à vérifier la réponse des matrices de bolomètres de chaque plan focal en fonction de la variation de deux paramètres : la température d'un corps noir, et la polarisation électrique appliquée aux détecteurs. Les plans focaux sont placés dans un cryostat de test au foyer du corps noir. Les températures du corps noir utilisées correspondent à une gamme de puissance reçue par pixel du détecteur refroidi à 300 mK. Les mesures consistaient alors à faire varier la puissance incidente de 0 pW/px à 10 pW/px par pas de 1 pW/px, et à chacun de ces paliers de régler la polarisation électrique des détecteurs de 0.5 V à 3 V. La gamme de puissances explorée a été déterminée suite aux estimations de puissance incidente sur les matrices de bolomètres en configuration de vol (section 3.3).

La réponse des détecteurs obtenue en fonction du flux et de la polarisation électrique est exprimée en V/W. Nous en déduisons la gamme optimale de fonctionnement des détecteurs. Les courbes 2.21 et 2.22 représentent la réponse de chaque matrice des plans focaux en transmission et en réflexion. Il en est déduit que la gamme optimale de fonctionnement des matrices de détecteurs est comprise entre 1 et 7 pW.

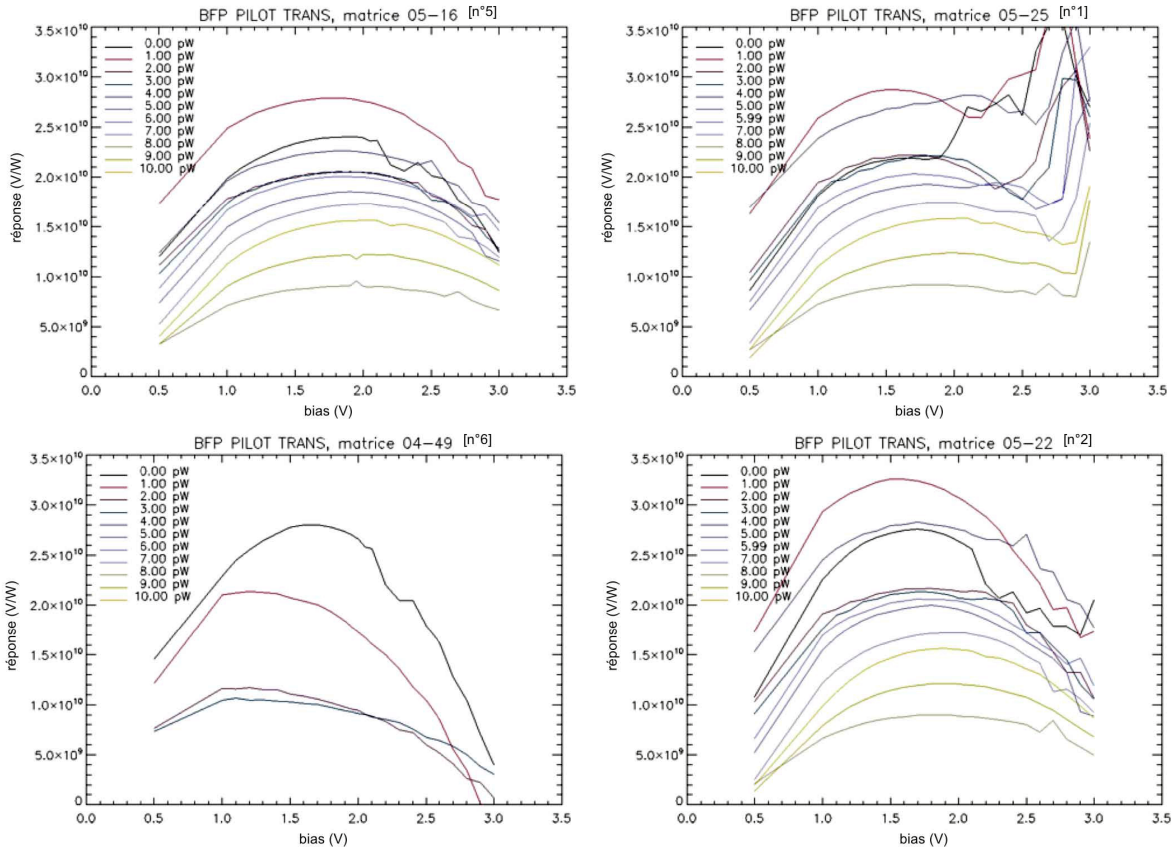


FIGURE 2.21 – Réponse moyenne des matrices du plan focal en transmission, en V/W (Boulade 2011a,b).

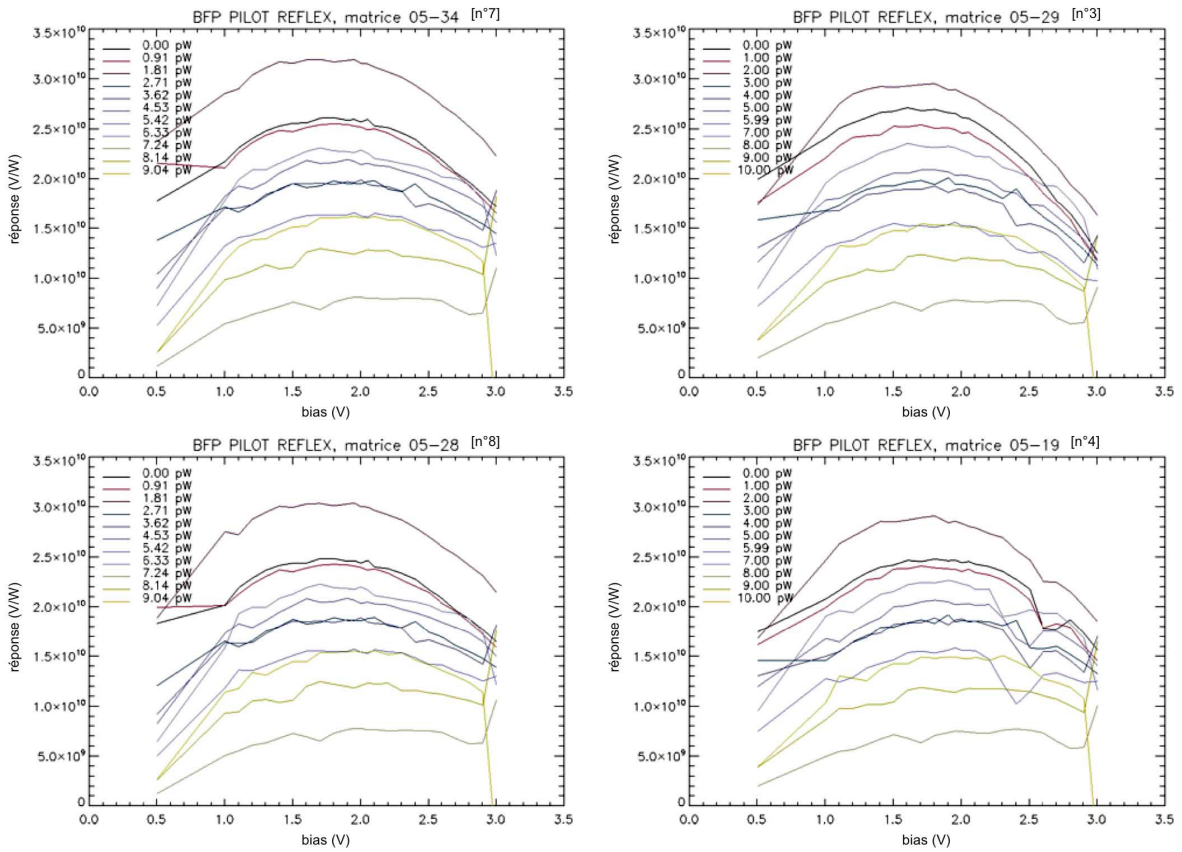


FIGURE 2.22 – Réponse moyenne des matrices du plan focal en réflexion, en V/W (Boulade 2011a,b).

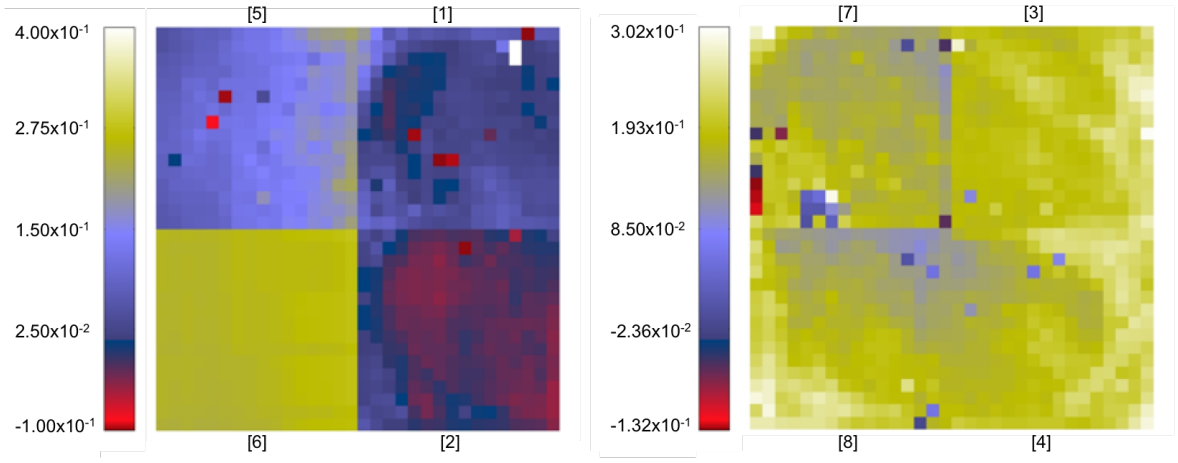
La caractérisation a permis aussi de visualiser la carte des signaux des plans focaux en transmission et en réflexion (figure 2.23). A noter que quelques pixels sont défectueux et que la matrice 6 est non opérationnelle.

2.3.13 Le réfrigérateur miniature hélium 3 et le doigt froid

Principe de fonctionnement

Le réfrigérateur miniature hélium 3 (Torre and Leriche 2008) est fixé sur la platine froide à 2.3 K. Il est composé de deux réservoirs (figure 2.24), la pompe et l'évaporateur, reliés par un tube et contenant de l'hélium 3 sous 100 atmosphère à 300 K. Le réfrigérateur fonctionne en circuit fermé et il permet d'atteindre la température de 300 mK environ au niveau de l'évaporateur, relié par un lien thermique aux matrices de bolomètres.

Le principe de fonctionnement du réfrigérateur (Torre and Chanin 1985) est nominal à partir de 2.3 K. A cette température l'hélium 3 est adsorbé par le charbon actif de la pompe. Le fait de chauffer la pompe fait désorber le charbon et l'hélium 3 se liquéfie alors dans le tube et tombe dans l'évaporateur. Puis à l'arrêt du chauffage, la pompe



(a) (b)

FIGURE 2.23 – Carte des signaux des matrices des plans focaux en transmission (a) et en réflexion (b).

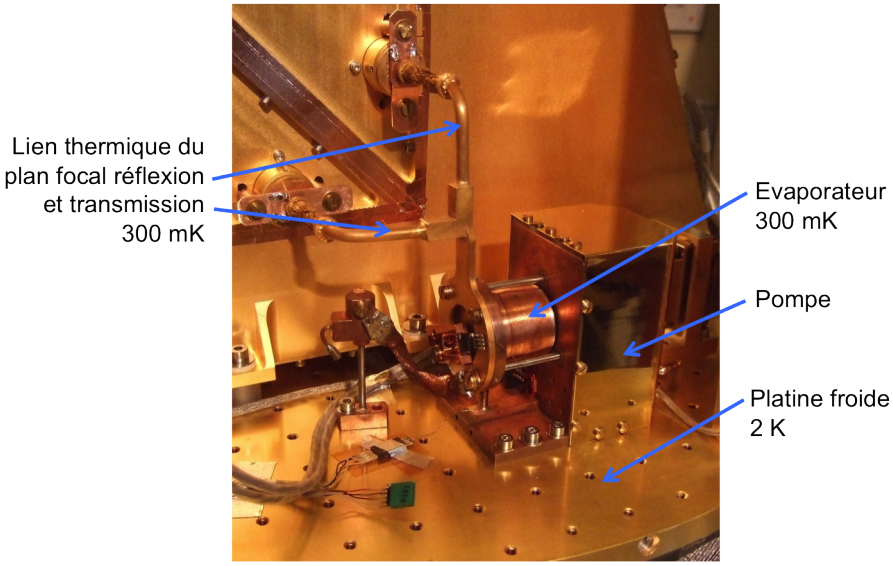


FIGURE 2.24 – Réfrigérateur hélium 3 intégré à la caméra.

se refroidit par une fuite thermique, et elle adsorbe à nouveau en pompant sur le bain d'hélium 3 liquide, ce qui a pour effet de diminuer la température de l'évaporateur qui se stabilise à 300 mK environ.

2.3.14 Les électroniques

Les électroniques de l'instrument PILOT (figure 2.25) sont composées d'une électronique des détecteurs (BolC) sous la responsabilité du CEA, d'une électronique du mécanisme de la lame demi-onde (HWPM) sous la responsabilité de l'Université de

Rome, d'une électronique de servitude de l'instrument (UGTI) et d'un ordinateur de bord (OBC) : ces deux dernières électroniques sont sous la responsabilité de l'IRAP.

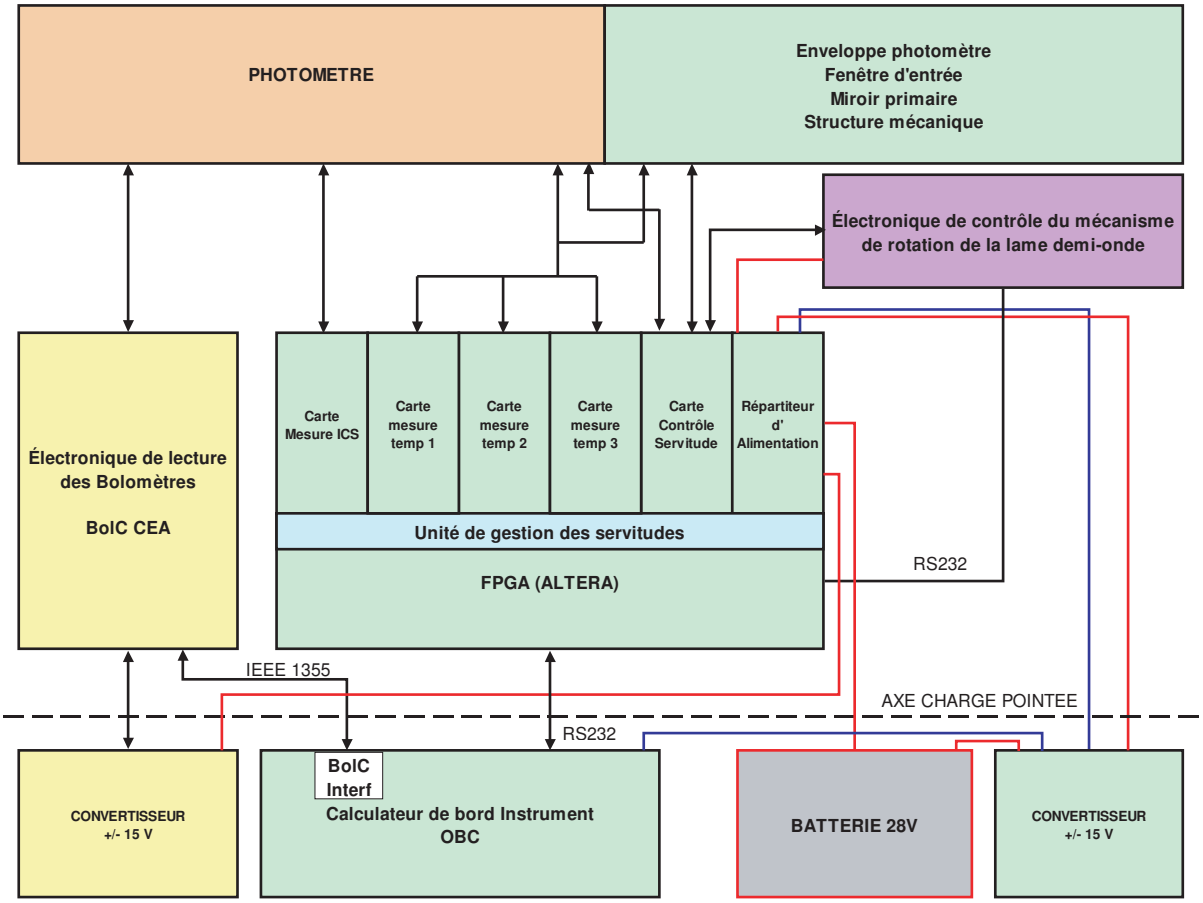


FIGURE 2.25 – Organigramme fonctionnel de l'architecture des électroniques (Rambaud et al. 2008).

L'électronique des détecteurs

L'électronique des détecteurs (Rodriguez 2006) pilote principalement les 8 matrices de 16x16 bolomètres (soit 2048 détecteurs) et assure la mesure des températures des blocs détecteurs ainsi que le contrôle du recyclage du réfrigérateur miniature hélium 3.

L'électronique du mécanisme de la lame-demi onde

L'électronique du mécanisme de la lame-demi onde contrôle le moteur permettant la rotation de la lame demi-onde, et assure la communication avec l'ordinateur de bord.

L'électronique de servitude de l'instrument

L'Unité de Gestion des données Technologiques de l'Instrument (UGTI) assure les fonctions suivantes :
- la lecture des températures de 300 K à 2 K,
- la lecture et contrôle de la source interne d'étalonnage des détecteurs,
- le contrôle des autres servitudes de l'instrument (mesures de courants, tensions, chauffages),
- la commande du mécanisme de la lame demi-onde,
- la commande de deux vannes cryogéniques permettant l'ouverture/fermeture du réservoir d'hélium,
- le contrôle des mises on/off des cartes électroniques de l'UGTI, de l'ordinateur de bord et de l'électronique des détecteurs,
- la communication avec l'ordinateur de bord.

L'ordinateur de bord

L'ordinateur de bord assure les fonctions suivantes :
- la lecture des données scientifiques et des données de servitudes de l'instrument,
- le pilotage de l'ensemble des sous systèmes,
- la sauvegarde des données,
- l'exécution des séquences de lectures (scènes),
- la datation des données,
- la communication avec le calculateur de la nacelle.

2.4 Le calendrier du projet

L'expérience ballon PILOT se compose de plusieurs sous-systèmes (ballon, nacelle, structure mécanique, caméra, miroir primaire), réalisés par différents laboratoires et entreprises. Dés le début de la thèse une étude bibliographique détaillée de l'expérience a été nécessaire pour avoir une compréhension globale du système, des sous-systèmes et de l'interaction entre ces derniers. Mais aussi il a été nécessaire d'avoir une connaissance de l'état d'avancement du projet dans sa globalité, et en priorité pour ma thèse dont l'élément important est la caméra. Au commencement de ma thèse chacun des sous-systèmes de l'expérience PILOT était à un stade d'avancement différent. Certains étaient soit en fin de développement (le cryostat, les lentilles, les miroirs, le plan focal à 550 µm) et en attente de livraison à l'IAS par les sous-traitants, soit en cours d'assemblage (le plan focal à 240 µm), soit en test. Des actions ont été effectuées avec pour objectif final l'intégration de la caméra. En quelques points voici un plan de tests réalisé sur les détecteurs seuls, sur les optiques froides et sur la caméra :

1. Caractérisation et étalonnage des détecteurs seuls
   - tests sur les blocs détecteurs à froid pour obtenir la réponse des détecteurs en fonction du flux incident, à réaliser au CEA,

— contrôle de la position relative des deux blocs détecteurs par rapport au polariseur.

2. Essais optiques froides
   — choix du matériau et de la géométrie des lentilles
   — vérification de l'alignement optique,
   — vérification du champ observé,
   — vérification de la pupille d'entrée.
3. Essais des détecteurs intégrés à la caméra, sans le miroir primaire
   — tests de continuité et d'isolement,
   — test de fonctionnement électrique,
   — test de bruit de détecteur sans source (caméra fermée),
   — test avec la Source de Calibration Interne,
   — test avec le cryostat ouvert sur 300 K,
   — vérification de la réponse spectrale de la caméra avec un spectromètre.
4. Etalonnage de la caméra, avec le miroir primaire, à réaliser à l'IRAP.

Pour réaliser ces essais, une identification des moyens mécaniques, optiques, informatiques et électroniques a été mise en place en particulier pour le traitement des données d'étalonnage à l'IAS.

Ces étapes sont importantes, et le travail pour les finaliser est rigoureux. Grâce à cela la caméra PILOT a délivré ses premiers signaux dans le submillimétrique en aout 2012. Les mesures d'imagerie, de polarisation et d'étalonnage spectral ont commencé à partir de cette date. Deux campagnes d'étalonnage spectral ont eu lieu, la première en octobre 2012 et la seconde en avril 2013. Puis la caméra a été livrée en juin 2013 (figure 2.26).

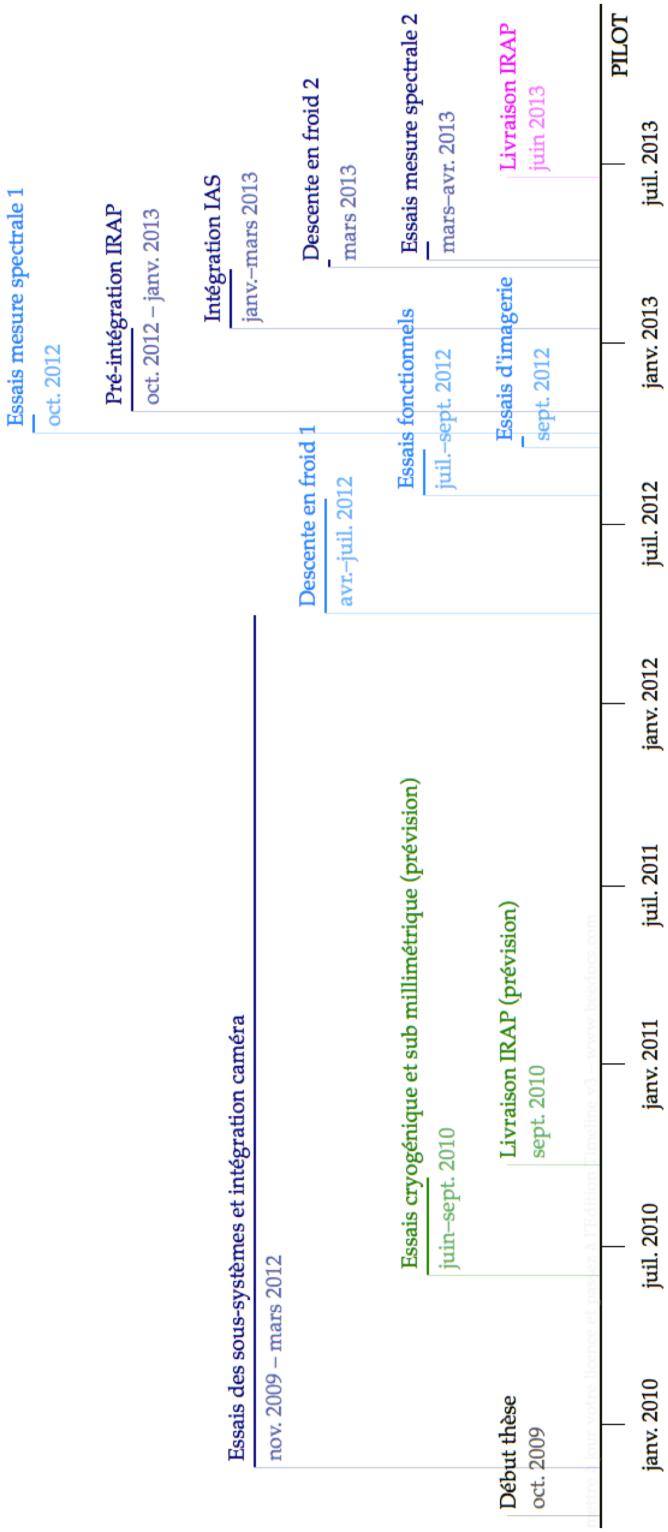


FIGURE 2.26 – Diagramme de Gantt simplifié.

Chapitre 3

Modèle photométrique de l'expérience PILOT

Sommaire

3.1 Objectifs **35**
3.2 Les grandeurs photométriques **36**
3.3 Simulation vol **39**
3.3.1 Caractéristiques des sources et des éléments optiques 39
3.3.2 Photométrie vol 41
3.3.3 Résultat et conclusion 44
3.4 Comparaison des résultats IRAP/IAS **47**

3.1 Objectifs

Au vu de l'état d'avancement du projet précédemment expliqué, et ayant acquis une meilleure connaissance des caractéristiques des filtres, des lentilles utilisées, ainsi que du design de l'optique froide, une étude photométrique de l'expérience a été nécessaire.

J'ai donc développé un modèle numérique photométrique spécifique à la caractérisation de la caméra lors des mesures en vol au foyer du télescope. Le modèle donne une estimation de la puissance optique totale du fond reçue par chaque pixel des détecteurs. Cette puissance totale est la contribution des émissions thermiques de chaque élément de la chaine optique. D'une part le modèle permet de déduire si la puissance reçue est suffisante pour pouvoir en analyser la composante scientifique venant des sources astrophysiques, et d'autre part, il permet de dimensionner et d'optimiser les détecteurs de la caméra.

Dans les sections suivantes, je détaille les notions photométriques, les données disponibles et les estimations faites de chaque élément de la chaine optique nécessaire à la simulation numérique, suivi des résultats estimés et des conséquences pour la caméra.

3.2 Les grandeurs photométriques

La photométrie est une notion physique qui étudie la mesure de l'intensité lumineuse, émise par une source, transmise, et reçue par un détecteur. Elle permet de caractériser et de dimensionner un système optique. Les grandeurs photométriques nécessaires à une étude photométrique sont listées dans le tableau 3.1.

Symbole	Unité	Description
P	W	**Puissance** : Puissance émise/reçue
E	Wm^{-2}	**Eclairement**, Flux : Puissance émise/reçue par unité de surface normale à la propagation
E_ν	$Wm^{-2}Hz^{-1}$	**Eclairement monochromatique**, Densité spectrale d'éclairement : Puissance par unité de surface et par unité spectrale
L	$Wm^{-2}sr^{-1}$	**Luminance**, Puissance par unité de surface normale à la propagation, et par unité d'angle solide
L_ν *ou* B_ν	$Wm^{-2}sr^{-1}Hz^{-1}$	**Brillance**, Luminance monochromatique : Puissance transportée par unité spectrale, par unité d'angle solide, et par unité d'élément de surface
θ	$^\circ$	**Angle** entre la normale à la surface émissive et la direction d'observation
dS	m^2	**Aire** élémentaire de la source
dR	m^2	**Aire** élémentaire du récepteur
n	-	**Normale** à la surface émissive
$d\Omega$	sr	**Angle solide** élémentaire
$d\nu$	Hz	**Fréquence** élémentaire
A	-	Absorption
R	-	Réflexion
τ	-	Transmission
ε	-	Emissivité spectrale
η_{det}	-	Efficacité du détecteur
h	Js	Constante de Planck $= 6.626 * 10^{-34} Js$
k_B	JK^{-1}	Constante de Boltzmann $= 1.381 * 10^{-23} JK^{-1}$
c	ms^{-1}	Célérité $= 3 * 10^8 ms^{-1}$

TABLE 3.1 – Liste des paramètres photométriques (avec comme unité spectrale la fréquence exprimée en Hertz).

De façon générale, la **puissance** P reçue sur une **surface** S dans l'**angle solide** Ω

s'écrit de la façon suivante :

$$\begin{aligned} P &= \int_{\nu} P_{\nu} d\nu \\ &= \int_{\nu} \int_{S} E_{\nu} dS d\nu \\ &= \int_{\nu} \int_{S} \int_{\Omega} L_{\nu} cos\theta d\Omega dS d\nu \end{aligned} \tag{3.1}$$

Dans le cas d'un faisceau conique de demi ouverture θ, il couvre un angle solide Ω comme représenté sur la figure 3.1.

$$\Omega = 2\pi \left(1 - cos\theta\right) \tag{3.2}$$

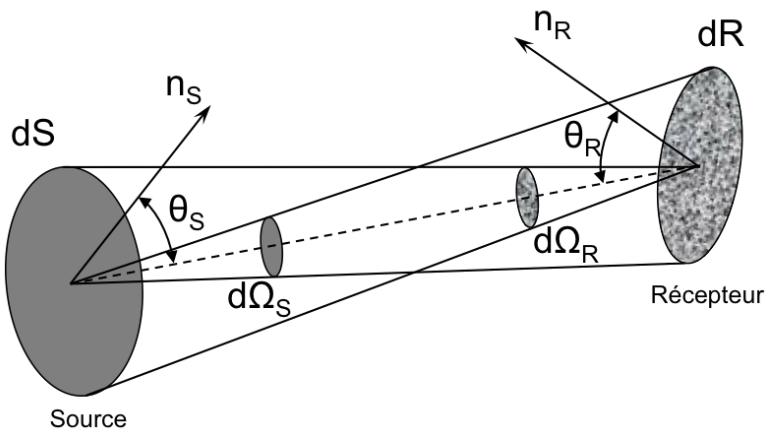


FIGURE 3.1 – Angle solide.

L'**étendue géométrique** G correspondant est égale au produit d'une surface émettrice et un angle solide :

$$G = S\Omega \tag{3.3}$$

Sachant que dans un même milieu l'étendue géométrique se conserve dans la chaine optique, nous en déduisons l'équation finale dans ce cas :

$$P = G \int_{\nu} L_{\nu} d\nu \tag{3.4}$$

Ici la **brillance** L_{ν} est égale au produit de l'émissivité ε et de la luminance d'un corps noir L_{cn} :

$$L_{\nu} = \varepsilon L_{cn}(\nu, T) \tag{3.5}$$

D'après la loi de Planck, la luminance d'un corps noir L_{cn} s'écrit de la façon suivante :

$$L_{cn}(\nu, T) = \frac{2hc^{-2}\nu^3}{exp\left(\frac{h\nu}{k_B T}\right) - 1} \tag{3.6}$$

Alors, dans un système photométrique, et d'après l'équation générale 3.1, la puissance totale reçue sur chaque pixel d'un détecteur est la somme des puissances issus de l'émission thermique de chaque éléments du chemin optique d'un instrument.

$$P(\nu) = \sum_{i=0}^{N} \left[\int_0^{\infty} \left[\varepsilon_i \left(\prod_{j=i+1}^{N} \tau_j(\nu) \right) L_\nu(\nu, T_i) \eta_{det}(\nu) S_{pix} \Omega_i \right] d_\nu \right] \tag{3.7}$$

où ε_i est l'émissivité de l'élément i, $\tau_j(\nu)$ est la transmission optique à la fréquence ν de l'élément photométrique j, $L_\nu(\nu, T_i)$ est la brillance d'un corps noir à la fréquence ν pour la température T_i de l'élément i,η_{det} est l'efficacité du détecteur en fonction de la fréquence ν, S_{pix} est la surface d'un pixel, Ω_i est l'angle solide sous lequel l'éclairement de l'élément photométrique i illumine le pixel.

Donc suivant le système photométrique à simuler les paramètres inconnus à définir sont la température T, l'émissivité ε et la transmission τ de chaque élément. Ceux-ci sont définis pour la configuration en vol de PILOT dans la section 3.3. Des estimations et des calculs spécifiques à la photométrie sont donnés en annexe B.

3.3 Simulation vol

3.3.1 Caractéristiques des sources et des éléments optiques

Pour une simulation photométrique de l'expérience PILOT lors de la compagne de mesure en vol, le sous-système optique important à caractériser est la caméra avec le miroir primaire, représentée sur le schéma optique 3.2. Chaque élément que compose ce sous-système est une source qui émet dans le submillimétrique. Et nous avons vu dans la section 3.2 que l'estimation de la puissance totale reçue sur le détecteur est égale à la somme des contributions de l'émission thermique de chaque élément sur le trajet optique de l'instrument. La connaissance de la température, de l'émissivité et de la transmission des sources d'émission et de chaque élément est donc requise pour paramétrer de façon physique la simulation numérique photométrique.

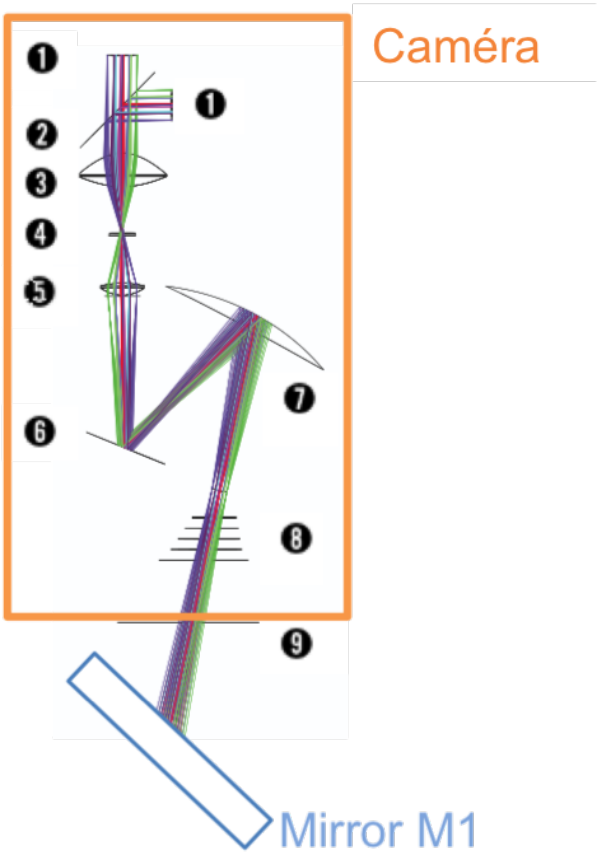


FIGURE 3.2 – Schéma optique configuration vol. 1-Plans focaux ; 2-Polariseur ; 3-Lentille L2 ; 4-Lyot stop et Lame demi-onde ; 5-Lentille L1 ; 6-Miroir plan M3 ; 7-Miroir elliptique M2 ; 8-Filtres thermiques ; 9-Fenêtre d'entrée.

Sources en vol

L'expérience PILOT observe la poussière du milieu interstellaire, comme défini dans le chapitre 1. La température de cette source est estimée à 20 K.

Une source supplémentaire en dehors des sources instrumentales est l'atmosphère à 38 kilomètres. En effet, lors de la campagne de mesure en vol, PILOT sera environ à cette altitude. Seule les premières dizaines de kilomètres de l'atmosphère est à prendre en compte, puis l'évolution est exponentielle et négligeable. A cette altitude la température est estimée à 253 K. D'après la courbe 3.3, nous pouvons en déduire la transmission de l'atmosphère à 240 µm et 550 µm.

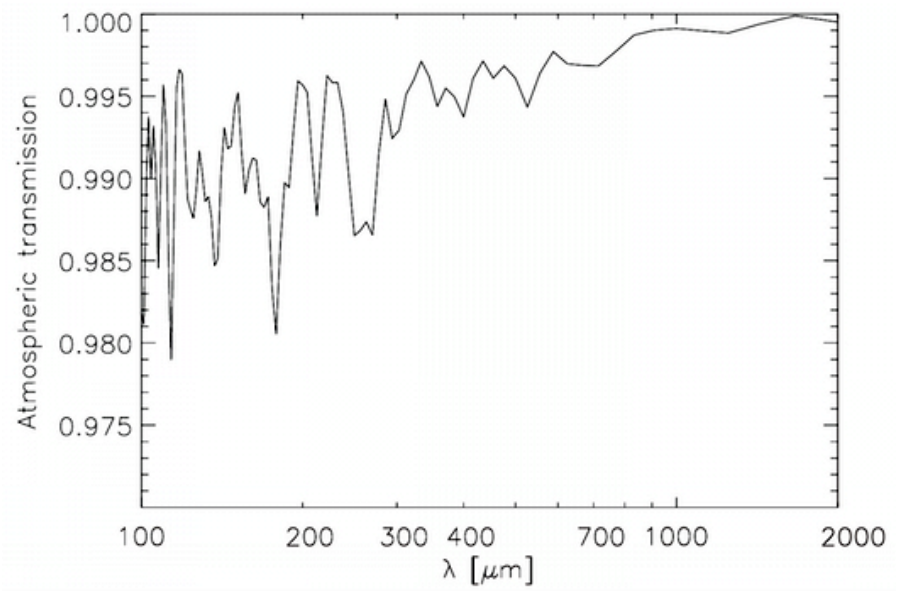


FIGURE 3.3 – Transmission atmosphérique à 38 km et 45°.

L'émissivité de l'atmosphère est estimée à 0.01.

Les valeurs de transmission et d'émissivité sont listés dans le tableau 3.2.

i	Elément	Température (K)	Emissivité	Transmission
0	Poussière	20	-	-
1	Atmosphère 38 km	253	0.01	0.99

TABLE 3.2 – Caractéristiques des sources en configuration vol.

Sources des optiques de la caméra PILOT

La caméra est composée de miroirs, de filtres, de lentilles, d'un polariseur, et de deux blocs détecteurs (figure 3.2). Les caractéristiques de la lame demi-onde, des filtres, du polariseur, ont été mesurées par les équipes de l'université de Cardiff. Les caractéristiques de la fenêtre d'entrée, des lentilles ont été mesurées à l'IAS. Et les caractéristiques des miroirs et du polariseur ont été estimées par une recherche bibliographique.

Tout d'abord, le choix de la température des éléments optiques exposés directement aux conditions extérieures se base sur la température de l'atmosphère à l'altitude de 38 kilomètres théoriquement atteinte par PILOT. Celle-ci est de 253 K. Les éléments optiques concernés sont le miroir primaire et la fenêtre d'entrée. Les températures des éléments optiques suivants sont estimées suivant la température théorique atteinte et spécifiée pour chaque écran du cryostat.

La transmission spectrale de la fenêtre d'entrée, de la lame demi-onde, et des filtres sont mesurées sur un large spectre incluant la largeur des deux bandes de PILOT (annexe B.1). Ce sont ces valeurs qui sont intégrées dans la simulation numérique. Pour la lame demi-onde, les mesures sont effectuées pour plusieurs positions entre un polariseur et un analyseur orienté en polarisation coplanaire et en polarisation croisée (section 2.3.9). Le calcul de la transmission lentilles est basé sur le coefficient d'absorption α du polypropylène, qui est le matériau des lentilles, et la longueur du trajet parcouru par chacun des rayons (annexe A.1).

Sur le trajet optique un élément peut réfléchir, transmettre, et/ou absorber une énergie incidente. Puisque l'énergie est conservée, la somme des énergies réfléchies R, transmises T et absorbées A est égale à l'énergie incidente. Nous écrivons cela de la façon suivante :

$$R + T + A = 1 \tag{3.8}$$

Où R, T et A sont les coefficients de réflexion, de transmission et d'absorption.

De plus, d'après la loi du rayonnement de Kirchhoff, les coefficients d'absorption et d'émission sont égaux.

$$A = \varepsilon \tag{3.9}$$

Pour estimer les émissivités de chaque élément, nous considérons qu'aucune réflexion n'a lieu. De même pour les lentilles ayant subit un traitement anti-reflet sur les deux faces (annexe A.1).

Le détail des caractéristiques est listé dans le tableau 3.3. Les valeurs affichées dans le tableau sont des moyennes d'une largeur de bande de 5 µm et 10 µm respectivement centrée sur 240 µm et 550 µm.

3.3.2 Photométrie vol

Les éléments du modèle photométrique sont numérotés de 0 à 18. Dans le modèle photométrie la puissance émise par chacun des éléments est calculée afin d'en déduire une estimation totale la puissance reçue sur chaque pixel des détecteurs. Cette puissance est décomposée ci-dessous pour chaque source.

Cas particulier de la poussière : Elément indice 0

Dans le cas d'un corps noir nous avons vu que la luminance est définie par la loi de Planck (équation 3.6). Or la poussière n'est pas considérée comme un corps noir. La luminance de la poussière $L_{poussiere}$ est le produit d'une constante cst, de la fréquence ν

i	Elément	T (K)	Emissivité		Transmission (moyenne)	
			240 μm	550 μm	240 μm	550 μm
2	Miroir Primaire M1	253	0.01	0.01	0.980	0.980
3	Fenêtre d'entrée	253	0.004	0.004	0.912	0.981
4	Filtre thermique 1	253	0.01	0.01	0.990	0.997
5	Filtre thermique 2	140	0.01	0.01	0.990	0.997
6	Filtre de blocage $65cm^{-1}$	80	0.03	0.01	0.875	0.985
7	Filtre thermique 3	40	0.01	0.01	0.937	0.977
8	Filtre de blocage $60cm^{-1}$	2.5	0.03	0.02	0.915	0.979
9	Filtre de blocage $80cm^{-1}$	2.5	0.03	0.03	0.880	0.839
10	Miroir secondaire M2	2.5	0.02	0.02	0.980	0.980
11	Miroir plan M3	2.5	0.02	0.02	0.980	0.980
12	Lentille 1	2.5	1-τ	1-τ	[0.551 ; 0.793]	[0.885 ; 0.929]
	Lame demi onde					
	τ_{HWP}^{max} position					
13	co-polarization 0°	2.5	0.03	0.01	0.757	0.937
13	cross-polarization 45°	2.5	0.03	0.01	0.737	0.987
14	Lentille 2	2.5	1-τ	1-τ	[0.213 ; 0.346]	[0.717 ; 0.752]
15	Polariseur	2.5	0.03	0.03	0.500	0.500
	Filtres sélectifs					
	240 μm : jeu n°1					
16	36 cm^{-1}	0.3	0.03	-	0.780	-
17	48 cm^{-1}	0.3	0.03	-	0.941	-
18	58 cm^{-1}	0.3	0.03	-	0.946	-
	Filtres sélectifs					
	240 μm : jeu n°2					
16	36 cm^{-1}	0.3	0.03	-	0.762	-
17	48 cm^{-1}	0.3	0.03	-	0.901	-
18	58 cm^{-1}	0.3	0.03	-	0.949	-
	Filtres sélectifs					
	550 μm :					
16	15.2 cm^{-1}	0.3	-	0.03	-	0.867
17	21.2 cm^{-1}	0.3	-	0.03	-	0.938
18	25 cm^{-1}	0.3	-	0.03	-	0.947
	Transmission totale			co-pol 0°	0.040	0.183
				x-pol 45°	0.039	0.193

TABLE 3.3 – Caractéristiques des éléments optiques de la caméra avec les filtres passe bande à 240 µm pour les jeux de filtres 1 et 2, et avec les filtres passe bande à 550 µm. Les transmissions de la fenêtre d'entrée, de la lame demi-onde, et des filtres ont été moyennées. Les courbes de transmissions sont en annexe B.1. Les transmissions en co-polarisation et en cross-polarisation de la lame demi-onde correspondent aux transmissions maximales des deux polarisations (annexe B.1.3). Les transmissions des lentilles ont été calculées en fonction du coefficient d'absorption α du polypropylène (annexe A.1).

au carré et de la luminance d'un corps noir L_{cn} à la température $T_{poussiere}$ de la source.

$$L_{poussiere} = cst * \nu^2 * L_{cn}(\nu, T_{poussiere}) \tag{3.10}$$

Pour le calcul de la constante *cst*, il nous faut connaitre la luminance L_{cn} exprimée en $Wm^{-2}Hz^{-1}sr^{-1}$ à la température de la poussière et à une fréquence donnée.

$$L_{cn}(\nu, T_{poussiere}) = \frac{2hc^{-2}\nu^3}{exp\left(\frac{h\nu}{k_B T_{poussiere}}\right) - 1} \tag{3.11}$$

D'après les cartes de la galaxie mesurées par Planck-HFI (Planck Collaboration et al. 2013), aux longueurs d'ondes 240 μm (1250 GHz) et 550 μm (545 GHz), et à une température de la poussière égale à 20 K, nous avons une valeur de la luminance spectrale égale à :

$$\begin{aligned} F_{240} &= 300\ MJy/sr \\ F_{550} &= 50\ MJy/sr \end{aligned}$$

La luminance L_{cn} exprimée en $Wm^{-2}Hz^{-1}sr^{-1}$ correspond à la luminance F exprimée en MJy/sr.

L'application numérique nous donne la valeur de la constante *cst* à 240 µm et 550 µm :

$$\begin{aligned} cst_{240} &= 1.27 * 10^{-27} Hz^{-2} \\ cst_{550} &= 1.9 * 10^{-27} Hz^{-2} \end{aligned}$$

Les deux constantes sont du même ordre de grandeur. Le fait qu'elles ne soient pas identiques est dû à la valeur donnée à la température de la poussière $T_{poussiere}$ et à la fréquence ν^2 de l'équation 3.10 qui sont des valeurs estimées.

La puissance émise par la poussière reçue par un pixel se définie de la façon suivant :

$$P_0 = G_{M1} * cst \int_{\nu} \nu^2 \left(\prod_{i=1}^{18} \tau_i\right) L_{cn}(\nu, T_0)\eta_{det}\, \mathrm{d}\nu \tag{3.12}$$

Atmosphère à 38 km : Elément indice 1

$$P_1 = G_{M1} \int_{\nu} \varepsilon_1 \left(\prod_{2}^{18} \tau_i\right) L_{cn}(\nu, T_1)\eta_{det}\, \mathrm{d}\nu \tag{3.13}$$

Caméra PILOT : Eléments indices 2 à 18

$$P_{camera} = \sum_{e=2}^{18} \left[G_{M1} \int_{\nu} \varepsilon_e \left(\prod_{e+1}^{19} \tau_i\right) L_{cn}(\nu, T_e)\eta_{det}\, \mathrm{d}\nu \right] \tag{3.14}$$

NB : L'indice 19 est un élément simulé de transmission 1, nécessaire pour compiler le code de simulation numérique du modèle photométrique. L'application numérique de l'étendue géométrique G_{M1} est donnée en annexe B.2.1.

Puissance totale en configuration vol

$$P_{totale} = P_0 + P_1 + P_{camera} \tag{3.15}$$

3.3.3 Résultat et conclusion

La simulation photométrique donnent les résultats pour les mesures effectuées en co-polarisation et en cross-polarisation (tableaux 3.4 et 3.5). Les résultats suivant ces deux plans de polarisation sont sensiblement identiques.

Par contre dans les deux cas, dû au coefficient d'absorption du polypropylène α et à la géométrie des lentilles, nous obtenons une variation de la puissance reçue sur un pixel du détecteur d'environ 57 %, à 240 μm, et d'environ 10% à 550 μm.

Pour la largeur de bande à 240 µm, une puissance totale reçue sur chaque pixel du détecteur est alors environ comprise entre 2 pW et 5 pW, et pour la largeur de bande à 550 µm, nous obtenons une puissance totale environ comprise entre 2 pW et 2.2 pW.

Emission thermique	Puissance (pW/px)		
	$240\mu m$		$550\mu m$
	Filtres jeu n°1 [α_{max} ; α_{min}]	Filtres jeu n°2 [α_{max} ; α_{min}]	
Poussière	[1.2e-03 ; 2.9e-03]	[1.1e-03 ; 2.6e-03]	[1.0e-03 ; 1.1e-03]
Atmosphère	[0.5 ; 1.1]	[0.4 ; 1.0]	[0.45 ; 0.49]
Caméra + M1	[1.9 ; 4.3]	[1.7 ; 3.9]	[1.6 ; 1.7]
Totale	[2.3 ; 5.4]	[2.1 ; 4.9]	[2.0 ; 2.2]

TABLE 3.4 – Résultats Configuration Vol, dans le cas CO-polarisation et en fonction du coefficient d'absorption α du polypropylène.

Emission thermique	Puissance (pW/px)		
	$240\mu m$		$550\mu m$
	Filtres jeu n°1 [α_{max} ; α_{min}]	Filtres jeu n°2 [α_{max} ; α_{min}]	
Poussière	[1.26e-03 ; 2.9e-03]	[1.1e-03 ; 2.7e-03]	[1.1e-03 ; 1.2e-03]
Atmosphère	[0.5 ; 1.1]	[0.4 ; 1.0]	[0.46 ; 0.50]
Caméra + M1	[1.9 ; 4.4]	[1.7 ; 4.0]	[1.6 ; 1.8]
Totale	[2.3 ; 5.5]	[2.1 ; 5.0]	[2.1 ; 2.3]

TABLE 3.5 – Résultats Configuration Vol, dans le cas CROSS-polarisation et en fonction du coefficient d'absorption α du polypropylène.

Les résultats détaillés de la simulation numérique en co-polarisation de chacune des sources sont listés dans le tableau 3.6. Nous remarquons que la puissance totale est dominée par l'émission thermique des éléments à des températures cryogéniques supérieurs à 2,5 K (indice 1 à 7).

Ces résultats de la simulation photométrique obtenus pour la configuration de vol ont déterminé le choix des détecteurs. En effet, l'absorption importante des lentilles

i	Emission thermique	Puissance sur un pixel (pW)		
		240μm		550μm
		filtres jeu n°1	filtres jeu n°2	
		[α_{max} ; α_{min}]	[α_{max} ; α_{min}]	[α_{max} ; α_{min}]
0	Poussière	[1.2e-03 ; 2.9e-03]	[1.1e-03 ; 2.6e-03]	[1.0e-03 ; 1.1e-03]
1	Atmosphère	[0.5 ; 1.1]	[0.4 ; 1.0]	[0.45 ; 0.49]
2	Miroir primaire M1	[0.5 ; 1.1]	[0.4 ; 1.0]	[0.46 ; 0.50]
3	Fenêtre d'entrée	[0.2 ; 0.5]	[0.2 ; 0.4]	[0.19 ; 0.21]
4	Filtre thermique 1	[0.5 ; 1.1]	[0.5 ; 1.0]	[0.47 ; 0.52]
5	Filtre thermique 2	[0.2 ; 0.6]	[0.2 ; 0.5]	[0.25 ; 0.28]
6	Filtre de blocage 65 cm^{-1}	[0.4 ; 1.0]	[0.4 ; 0.9]	[0.1 ; 0.2]
7	Filtre thermique 3	[0.05 ; 0.1]	[0.04 ; 0.1]	[6.0e-02 ; 6.6e-02]
8	Filtre de blocage 60 cm^{-1}	[2.2e-10 ; 5.1e-10]	[4.9e-07 ; 1.1e-06]	[1.8e-05 ; 2.0e-05]
9	Filtre de blocage 80 cm^{-1}	[2.3e-10 ; 5.5e-10]	[6.3e-07 ; 1.5e-06]	[3.4e-05 ; 3.7e-05]
10	Miroir secondaire M2	[1.6e-10 ; 3.7e-10]	[4.3e-07 ; 10.0e-07]	[2.3e-05 ; 2.6e-05]
11	Miroir plan M3	[1.6e-10 ; 3.8e-10]	[4.4e-07 ; 1.0e-06]	[2.4e-05 ; 2.6e-05]
12	Lentille 1	[6.6e-09 ; 5.0e-09]	[1.8e-05 ; 1.3e-05]	[1.5e-04 ; 9.9e-05]
13	Lame demi-onde CO-polarisation 0°	[5.6e-10 ; 9.1e-10]	[1.6e-06 ; 2.5e-06]	[1.7e-05 ; 1.8e-05]
14	Lentille 2	[6.9e-08 ; 5.7e-08]	[1.9e-04 ; 1.6e-04]	[6.7e-04 ; 5.9e-04]
15	Polariseur	5.3e-09	1.5e-05	1.4e-04
	Filtres sélectifs			
	240 μm : jeu n°1		-	-
16	36 cm^{-1}	1.9e-07	-	-
17	48 cm^{-1}	2.0e-07	-	-
18	58 cm^{-1}	3.0e-07	-	-
	Filtres sélectifs	-		-
	240 μm : jeu n°2	-		-
16	36 cm^{-1}	-	2.8e-07	-
17	48 cm^{-1}	-	3.0e-07	-
18	58 cm^{-1}	-	3.0e-07	-
	Filtres sélectifs	-	-	
	550 μm :	-	-	
16	15.2 cm^{-1}	-	-	2.2e-07
17	21.2 cm^{-1}	-	-	2.7e-07
18	25 cm^{-1}	-	-	3.0e-07

TABLE 3.6 – Détail des résultats : Dans le cas CO-polarisation, et en fonction du coefficient d'absorption α du polypropylène. La puissance émise des lentilles décroît car plus la transmission augmente, plus l'émissivité décroît dans ce cas en fonction de la géométrie des lentilles, épaisses au centre et fines au bord.

a un impact important sur la transmission totale de la caméra. L'estimation actuelle photométrique a démontré la possibilité d'utiliser les détecteurs existants PACS Herschel de rechange pour le premier vol à 240 µm, dont huit matrices 16x16 étaient disponibles (Simoens et al. 2004). Pour rappel, la gamme de fonctionnement des détecteurs PACS est comprise entre 1 et 7 pW.

La simulation photométrique a permis de tracer les transmissions de la caméra pour trois positions de la lame demi-onde en polarisation coplanaire et en polarisation croisée (figure 3.4). Ces trois positions correspondent chacune à une transmission maximale, minimale et intermédiaire. Les variations sont dues à deux paramètres : le trajet des rayons, au bord ou au centre de la lentille, et le coefficient d'absorption α du polypropylène. Nous remarquons les deux bandes à 240 µm et 550 µm spécifiques à la caméra PILOT.

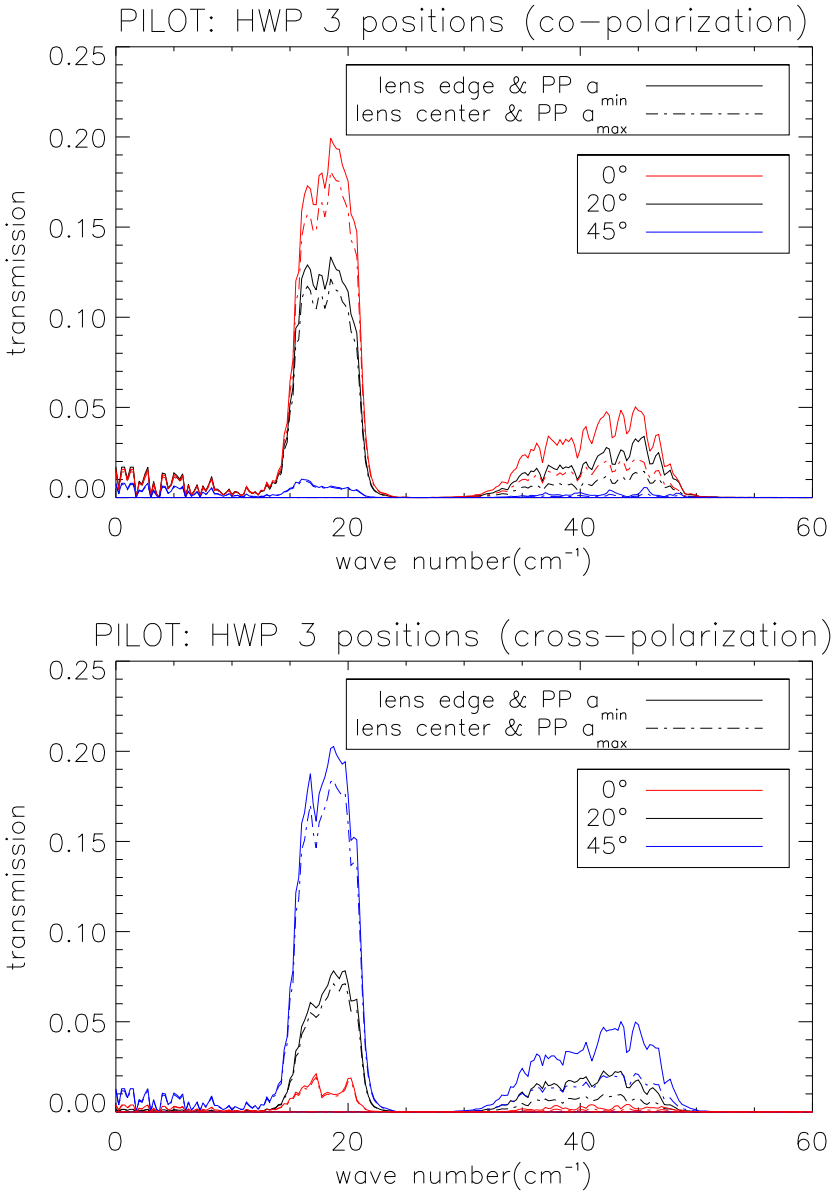


FIGURE 3.4 – Transmission optique de la caméra PILOT, avec les filtres sélectifs à 240 µm (jeu n°1) et 550 µm, en co-polarisation (en haut) et cross-polarisation (en bas). Noter que la position intermédiaire n'est pas centrée.

La simulation photométrique a permis de mettre en évidence le fait que les estimations précédentes étaient optimistes, surtout au niveau de la transmission des lentilles L1 et L2 de la caméra. Celle-ci était estimée à τ=0.95 pour 240 µm et 550 µm. Or la caractérisation des lentilles L1 et L2 faite à l'IAS (annexe A.1) a montré que leurs transmissions étaient nettement plus faibles, réduisant fortement les estimations du flux total reçu sur les détecteurs.

3.4 Comparaison des résultats IRAP/IAS

Un modèle photométrique de la configuration vol existait à l'IRAP. Nous avons comparé les résultats des simulations. Pour cela nous avons donc utilisé les mêmes paramètres d'entrée, et nous avons obtenu environ 1% de différence entre les deux modèles (tableau 3.7). Le résultat comparatif étant positif j'ai pu continuer le développement du modèle photométrique pour les simulations des bancs optiques spécifiques à l'étalonnage de la caméra à l'IAS.

Emission thermique	Flux (pW) IRAP	Flux (pW) IAS
Miroir M1	1.5	1.5
Fenêtre d'entrée	0.3	0.3
Filtre thermique 1	0.8	0.8
Filtre thermique 2	0.4	0.4
Filtre W1360	0.7	0.7
Filtre thermique 3	8.0e-2	7.9e-2
Filtre W1359	4.3e-10	3.7e-10
Filtre W1337	4.7e-10	3.9e-10
Miroir M2	3.2e-10	2.7e-10
Miroir M3	3.3e-10	2.8e-10
Lentille L1	7.6e-09	6.4e-09
Lame demi-onde	9.1e-10	7.6e-10
Lentille L2	7.9e-08	6.6e-08
Polariseur	6.6e-09	5.5e-09
Filtre W1356	2.0e-07	2.0e-07
Filtre W1336	2.1e-07	2.1e-07
Filtre W1375	-	3.2e-07
Total	3.89	3.85

TABLE 3.7 – Résultat de simulation IRAP/IAS, pour les filtres à 240 µm jeu n°1.

Chapitre 4

Intégration et essais fonctionnels de la caméra PILOT

Sommaire

4.1 Les moyens du banc de tests fonctionnels 49
4.2 Les objectifs du banc de tests fonctionnels 51
4.3 Mise sous vide 51
4.4 Descente en froid et autonomie 52
4.5 Essais des détecteurs 54
4.5.1 Réponse des détecteurs et numérotation des matrices 54
4.5.2 Mesure du fond thermique à 300 K et 77K 55
4.5.3 Comparaison du fond thermique estimé et mesuré 56
4.5.4 Puissance équivalente de bruit 58
4.6 Essais de la source interne d'étalonnage 58
4.7 Essais de la lame demi-onde 60

4.1 Les moyens du banc de tests fonctionnels

Dés le début de ma thèse je me suis impliqué et j'ai participé à toutes les phases d'intégration de la caméra, de la réception des premiers sous-systèmes de l'instrument, aux essais fonctionnels de la caméra. Chaque sous-système décrit dans la section 2.3 a dû être dans un premier temps vérifié après réception, et caractérisé individuellement. Puis dans un second temps, les sous-systèmes ont été intégrés au cryostat pour former la caméra PILOT. Les sous-systèmes ont ensuite été de nouveau testés de façon à vérifier leurs caractéristiques une fois intégrés. Durant ces différentes phases, et du fait du caractère expérimental, plusieurs sous-systèmes ont été modifiés, améliorés, afin d'interagir au mieux, et d'obtenir les caractéristiques attendues de la caméra. Un banc optique pour les essais fonctionnels de la caméra intégrée a donc été développé. Il est composé de la caméra et de l'électronique de vol, mises en position sur une table élévatrice (figure 4.1). Le

banc est complété d'un système de pompe à vide et d'une réserve de liquide cryogénique (azote et hélium) permettant de tester de manière fonctionnelle la caméra à pression et à température ambiante (300 K), puis sous vide et à température cryogénique (de 77 K à 300 mK). Un ordinateur de test avec une interface utilisateur (annexe D.2) permet de contrôler l'instrument et de stocker les données des essais.

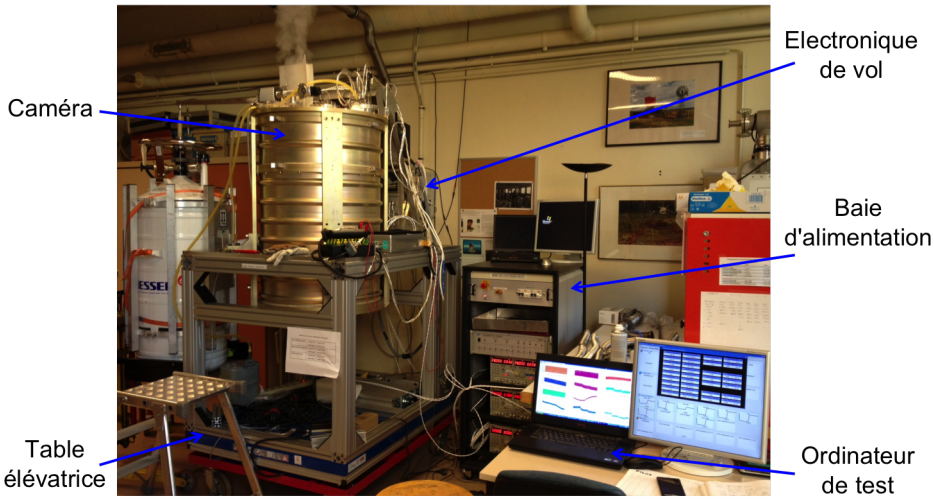


FIGURE 4.1 – Banc optique des essais fonctionnels.

Sources

Durant les essais, trois sources sont utilisées. La première est la source d'étalonnage interne de la caméra. La seconde source est un fond thermique à 300 K. Cette source est une surface plane d'absorbant (Eccosorb®) placée devant la fenêtre d'entrée de la caméra, dont les caractéristiques permettent un fond thermique uniforme à 300 K. La troisième est un fond thermique à 77 K. Cette source est de l'Eccosorb® positionné au fond d'un bain d'azote liquide placé devant la fenêtre d'entrée de la caméra.

Caméra

Dans un premier temps la caméra est donc à pression et à température ambiante, puis sous-vide et à température cryogénique. Afin d'éviter la saturation des détecteurs due à un flux lumineux du fond thermique à 300 K trop important, un atténuateur est mis en place dans la caméra et dans le faisceau. L'atténuateur est utilisé uniquement pour les mesures des essais au sol, il sera retiré pour les mesures en vol. Le facteur d'atténuation de l'atténuateur a été calculé suite à une simulation photométrique numérique des bancs optiques (section 5.6.2).

4.2 Les objectifs du banc de tests fonctionnels

Tout d'abord les essais fonctionnels à température et pression ambiante permettent de vérifier les électroniques de chaque sous-système et de valider le fonctionnement nominal des sondes de températures, des réchauffeurs internes, du pilotage de la source d'étalonnage interne, de la lame demi-onde et des détecteurs.

Puis les objectifs étaient de valider la procédure de mise sous vide et à température cryogénique de la caméra, et d'atteindre sa température de fonctionnement de 300 mK. Durant cette phase et à chaque palier de descente sous vide et à température cryogénique, de 300 K à 77 K, à 4 K, à 2 K et à 300 mK, l'objectif était de valider à nouveau le fonctionnement de chaque sous-système.

D'un point de vue scientifique, les mesures ont permis de faire les premières caractérisations de la source d'étalonnage interne de la caméra, de la lame demi-onde et des détecteurs à température nominale de 300 mK (Bernard 2012).

Durant toute la phase des essais fonctionnels, les mesures ont permis d'optimiser l'interface utilisateur en vue des différentes campagnes d'essais au sol et en vol.

4.3 Mise sous vide

Un système de pompe à vide relié à la caméra (figure 4.2) permet la mise sous vide de l'enceinte optique. Une pompe à vide primaire fait descende la pression interne de la caméra à 10^{-2} mbar environ, puis avec un pompage turbo-moléculaire la pression atteint un seuil de 10^{-4} mbar.

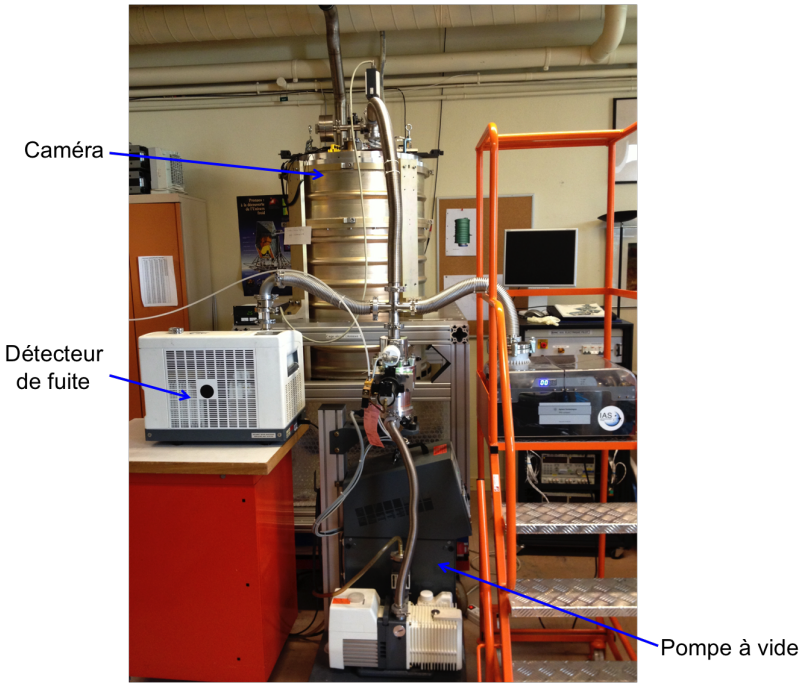


FIGURE 4.2 – Système de pompes à vide.

Lors de la descente en froid de la caméra (section 4.4) après avoir rempli le réservoir d'azote liquide il se produit un effet de cryo-pompage sur le vide de l'enceinte qui passe alors de 10^{-4} mbar à 10^{-6} mbar. Les dernières molécules d'eau sont en effet piégées contre les parois internes de la caméra.

De nombreux problèmes de fuite sont apparus imposant le changement des joints et la modification du design de pièces mécaniques assurant l'étanchéité de la caméra.

4.4 Descente en froid et autonomie

Une fois que le vide dans la caméra est atteint et stabilisé, il est possible de commencer la descente en froid de la caméra. Elle se décompose en quatre étapes, la première étape consiste à remplir le réservoir du cryostat avec de l'azote liquide pour atteindre une température stabilisée théorique de 77 K. Une fois cette température atteinte, il faut vider le réservoir de l'azote en surplus, et dans une seconde étape le remplir avec de l'hélium 4 liquide pour atteindre une température stabilisée théorique de 4 K. Dans chacune de ces deux étapes, en fonction du volume du réservoir, il est nécessaire de remplir régulièrement le réservoir avec soit l'azote soit l'hélium 4 liquide suivant l'étape correspondante. Dans une troisième étape, une pompe à vide pompe sur le bain d'hélium entrainant une nouvelle descente en froid pour atteindre la température théorique égale à 2 K. La dernière étape consiste à faire un cyclage du réfrigérateur miniature hélium 3 pour atteindre la température de 300 mK, température nominale de fonctionnement des détecteurs.

Le cyclage du réfrigérateur miniature hélium 3 consiste en une variation d'intensité appliquée à une chaufferette fixée à la pompe du réfrigérateur. D'après le principe de fonctionnement du réfrigérateur expliqué dans la section 2.3.13, le fait de chauffer la pompe fait désorber le charbon actif. Puis nous réduisons l'intensité appliquée à la chaufferette afin d'atteindre une température palier à 30°C pendant 20 minutes afin de désorber la totalité de l'hélium 3.

Lors de la descente en froid, comme nous le voyons sur les courbes de la figure 4.3, les températures minimales réelles atteintes sont de l'ordre de 80 K à l'azote, de 3 K à l'hélium 4, et de 308 mK à l'hélium 3 au niveau de l'évaporateur du réfrigérateur miniature. Un lien thermique fixé de l'évaporateur aux plans focaux les refroidit à 308 mK. Cette température répond parfaitement aux attentes et elle est comprise dans l'intervalle de température pour une réponse nominale des détecteurs.

En moyenne la température stabilisée à l'azote est atteinte en 50 heures, la température stabilisée à l'hélium 4 est atteinte en 92 heures, le cyclage du réfrigérateur miniature hélium 3 dure 30 minutes et la température stabilisée à l'hélium 3 est atteinte en 90 minutes. L'autonomie de la caméra à 308 mK est de 30 heures, conforme aux spécifications. A noter que sur la figure 4.3 cette dernière autonomie est égale à 21 heures, l'essai ayant été interrompu.

Les variations de températures peuvent fausser les données astronomiques. Pour que l'image sur les détecteurs soit nette, il faut que les températures des optiques soient stables. Sur les courbes de la figure 4.4 nous pouvons voir la stabilité des miroirs en

température une fois la température nominale atteinte, soit 2 K pour le miroir M2 et 1.9 K pour le miroir M3. A noter qu'il n'existe pas de sonde de températures pour les lentilles. Les pics de température du mécanisme de la lame demi-onde sont dus à la rotation de la roue dentée qui le compose. Son échauffement intervient uniquement lors de changement de position extrême de la lame demi-onde, c'est-à-dire d'une position 1 à 8 successive et inversement. Il ne perturbe que très légèrement et ponctuellement la stabilité en température des miroirs. Même dans ce cas extrême cela n'a aucune incidence sur la qualité des mesures qui sont faites lorsque la lame demi-onde est à l'arrêt.

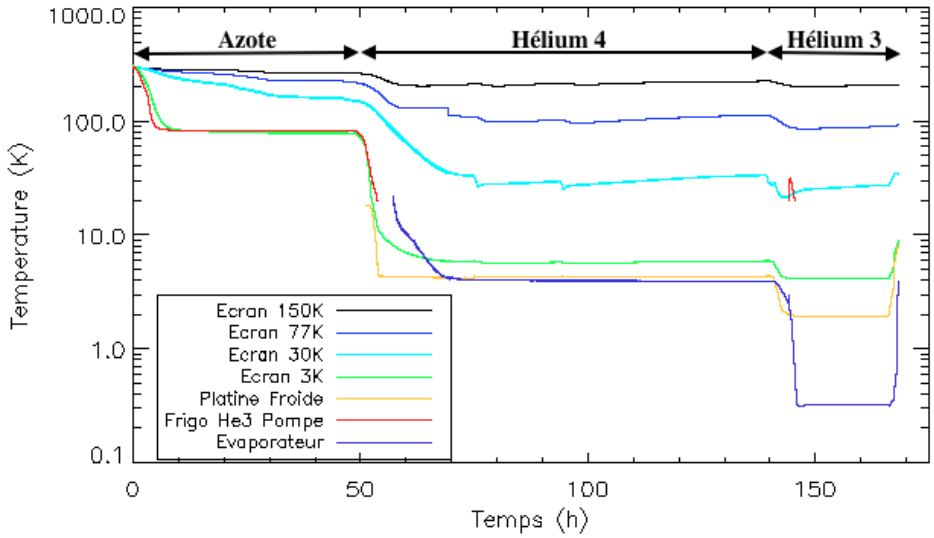


FIGURE 4.3 – Descente cryogénique des écrans et de l'évaporateur.

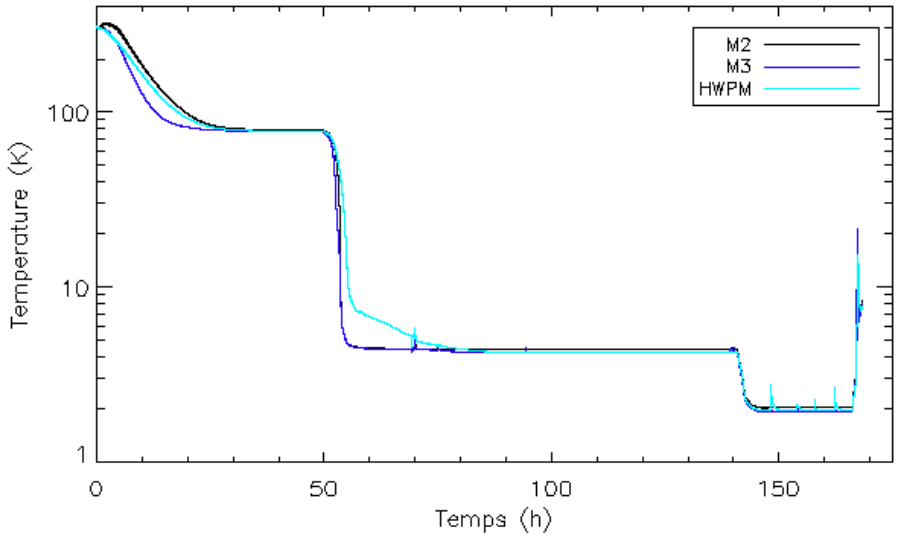


FIGURE 4.4 – Descente cryogénique des optiques froides.

A ce stade le fonctionnement nominal de la caméra à la température de 308 mK est atteinte. Nous pouvons continuer la campagne des essais.

Test de fuite en hélium 3 et 4

Le but de cet essai est de mesurer le taux d'une éventuelle fuite soit du réservoir d'hélium 4 soit du réfrigérateur miniature hélium 3, ou des deux.

Les résultats de cet essai, en annexe C, indiquent une fuite du réservoir d'hélium 4 d'un taux égal à 10^{-4} mbar.l/s, et une étanchéité parfaite du réfrigérateur miniature hélium 3.

Pour palier à cette fuite d'hélium 4, des cylindres contenant des charbons actifs ont été intégrés sur la platine froide, dans l'enceinte cryogénique. Les charbons actifs ont la particularité d'absorber l'excédent d'hélium 4 gazeux. L'enceinte des optiques froides reste ainsi sous vide et non polluée.

4.5 Essais des détecteurs

4.5.1 Réponse des détecteurs et numérotation des matrices

D'après l'estimation photométrique des détecteurs (section 3.3.3) et la caractérisation de chaque matrice faite avant l'intégration (section 2.3.12), nous pouvons déterminer la réponse nominale des matrices. L'estimation photométrique nous donne une puissance reçue sur les pixels des matrices du détecteur comprise entre 2 pW et 5 pW. D'après cet intervalle de puissance et d'après les réponses moyennes des matrices, il est estimé que la réponse nominale des matrices est obtenue pour une polarisation électrique de 1.5 V et pour une puissance incidente de 4 pW/px (figures 2.21 et 2.22). La valeur moyenne de la réponse est alors égale à $2*10^{10}$ V/W. Lors des campagnes d'étalonnage de la caméra, les détecteurs ont donc été polarisés électriquement à 1.5 V, optimisés pour une réponse à 4 pW/px.

De plus d'après les caractéristiques des détecteurs (section 2.3.12) nous savons que la valeur du gain en courant appliquée aux détecteurs est égale à 20 µV/ADU. Nous pouvons ainsi convertir le signal de la caméra S_{camera} reçu exprimé en ADU en une puissance P_{camera} exprimée en Watt pour chaque pixel. Pour cela le signal de la caméra S_{camera} est multiplié par le gain en courant G exprimé en V/ADU et divisé par la réponse des détecteurs $R_{detecteurs}$. Nous obtenons alors une puissance de la caméra P_{camera} en Watt :

$$P_{camera}[W] = \frac{S_{camera}[ADU] \ * \ G[V/ADU]}{R_{detecteurs}[V/W]} \tag{4.1}$$

En ce qui concerne l'orientation et la numérotation des matrices en transmission et en réflexion, celles-ci sont positionnées dans le bloc détecteur en symétrie à 45° et orthogonalement comme représentées dans le tableau 4.1.

Pour le traitement des données, les matrices sont orientées et numérotées comme représentées dans le tableau 4.2.

Transmission		Réflexion	
1		7	
2	5	3	8
6		4	

TABLE 4.1 – Orientation et numérotation des matrices BolC vue du ciel.

Transmission		Réflexion	
2	6	4	8
1	5	3	7

TABLE 4.2 – Orientation et numérotation des matrices vue des photons pour le traitement de données.

4.5.2 Mesure du fond thermique à 300 K et 77K

Un premier essai consistait à placer devant la fenêtre d'entrée de la caméra une plaque d'absorbant (Eccosorb®) simulant un fond thermique à une température de 300 K et de mesurer la réponse obtenue sur les détecteurs. Sur la figure 4.5 nous pouvons voir le signal d'un pixel. Cette valeur est exprimée en pW à partir du signal en ADU (équation 4.1) correspondant à la tension de point de milieu du circuit de lecture des bolomètres. Elle présente un offset lié à la méthode de lecture. Dans ce qui suit il faut considérer uniquement les variations de cette réponse et non sa valeur absolue. La variation du signal mesurée pic à pic est de 0.02 pW sur la durée de la mesure de 1000 s.

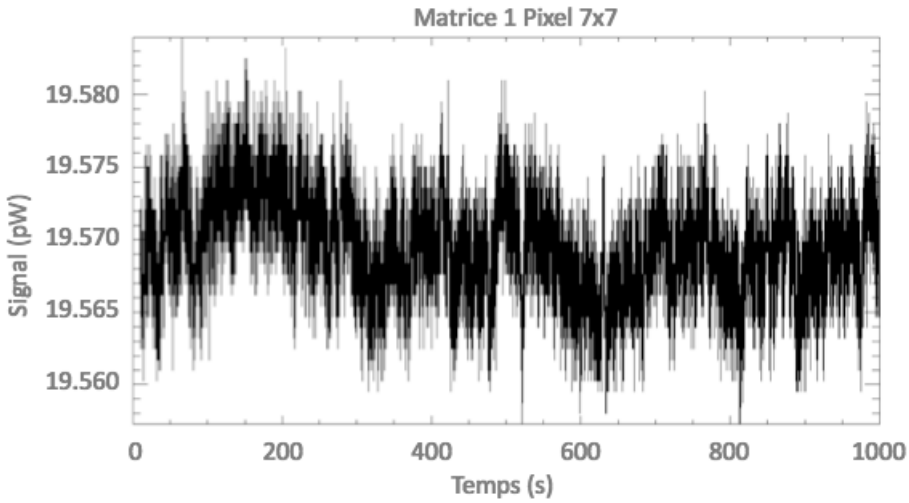


FIGURE 4.5 – Signal du fond thermique à 300 K sur un pixel.

Tous les pixels d'une matrice donnée répondent de façon stable. Sur la figure 4.6 nous pouvons observer la carte de la réponse de chaque matrice obtenue pour un fond thermique à 300 K moyennée sur la durée de l'essai de 1000 s. Pour chaque matrice nous

prenons la valeur médiane sur tous les pixels, à l'exception des pixels défectueux. Nous déterminons ensuite la réponse moyennée sur l'ensemble des sept matrices fonctionnelles, cette valeur est de 24.37 pW/px (offset compris).

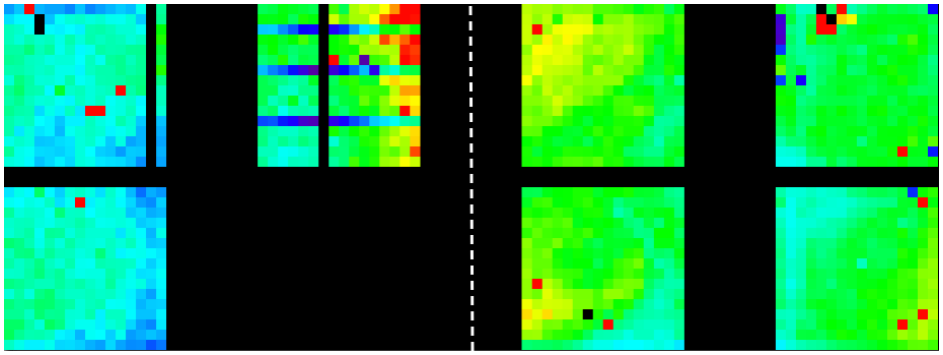


FIGURE 4.6 – Carte du fond thermique à 300 K. [$4e^{-12}$, $4e^{-11}$] W.

Un second essai consistait à placer devant la fenêtre d'entrée de la caméra un bain d'azote liquide simulant un fond thermique à une température de 77 K et de mesurer la réponse obtenue sur les détecteurs.

En suivant la même procédure que pour l'essai avec le fond thermique à 300 K, nous déterminons la réponse moyennée sur l'ensemble des sept matrices fonctionnelles, cette valeur est de 21.72 pW/px (offset compris). Sur la figure 4.7 nous pouvons observer la carte de la réponse de chaque matrice obtenue pour un fond thermique à 77 K sur la durée de l'essai de 170 s.

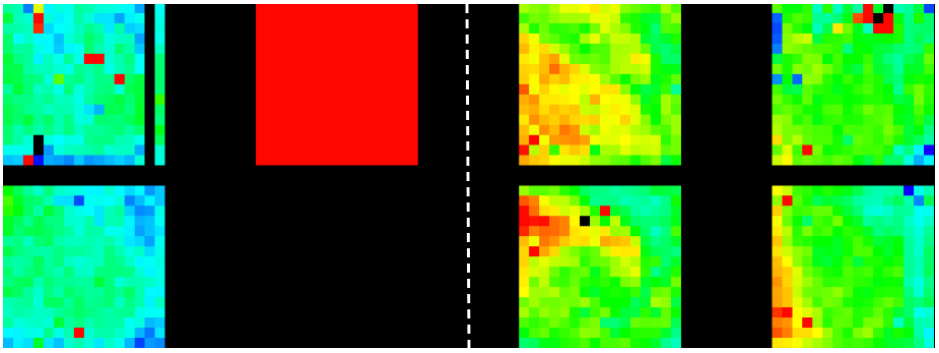


FIGURE 4.7 – Carte du fond thermique à 77 K. [$3.2e^{-12}$, $3.2e^{-11}$] W. La matrice 6 n'a pas été traitée.

4.5.3 Comparaison du fond thermique estimé et mesuré

A ce stade il est intéressant de pouvoir comparer la mesure du fond thermique avec la simulation photométrique simulée à 300 K.

Pour cela il est nécessaire de comparer l'évolution du signal des détecteurs suivant les fonds thermiques à 300 K et à 77 K. Sur la figure 4.8 nous observons cette évolution sur

un pixel. Les deux paliers niveau haut correspondent à un fond thermique à 300 K et le palier niveau bas à un fond thermique à 77 K. Ce dernier augmente dans le temps du fait que le bain d'azote a légèrement givré la fenêtre d'entrée augmentant son émission, et les variations périodiques correspondent à l'allumage de la source interne d'étalonnage durant l'essai.

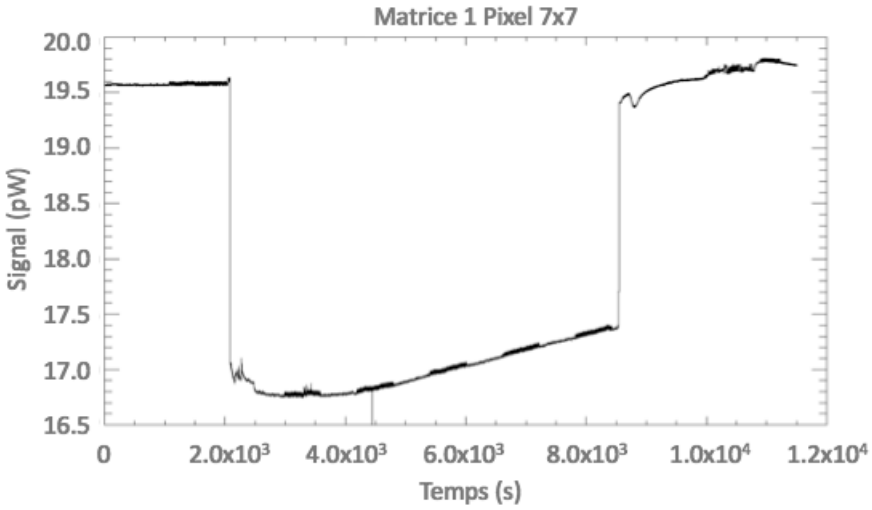


FIGURE 4.8 – Evolution du signal d'un bolomètre suivant les fonds thermiques à 300 K et à 77 K.

En faisant un calcul relatif entre le fond thermique à 300 K et celui à 77 K, nous pouvons en déduire une amplitude de la réponse Δ_R correspondant à une amplitude de la température entre 300 K et 77 K, égale à Δ_T. Ce qui a pour effet de retirer l'offset arbitraire des mesures.

La réponse moyennée sur l'ensemble des sept matrices fonctionnelles étant égale à 24.37 pW/px pour un fond thermique à 300 K, et égale à 21.72 pW/px pour un fond thermique à 77 K, l'amplitude de la réponse Δ_R pour une amplitude de température Δ_T sont égales à :

$$\Delta_R = 2.65\ pW/px$$
$$\Delta_T = 223\ K$$

En considérant que l'émission du fond thermique est proportionnelle à la température (domaine Rayleigh-Jeans), nous pouvons en déduire la valeur absolue du fond thermique pour 300 K, soit 3.57 pW (équation 4.2).

$$R_{300K} = \frac{300 * \Delta_R}{\Delta_T} = 3.57\ pW/px \tag{4.2}$$

Cette valeur de 3.57 pW/px est parfaitement comprise dans l'intervalle de grandeur estimé par le modèle photométrique compris entre 2 pW/px et 5 pW/px avec l'atténuateur intégré dans la caméra (tableau 5.16).

4.5.4 Puissance équivalente de bruit

Pour chaque matrice du plan focal en transmission et en réflexion, les figures 4.9 et 4.10 montrent la puissance équivalente de bruit (NEP) pour un fond thermique à 300 K et avec l'atténuateur intégré à la caméra.

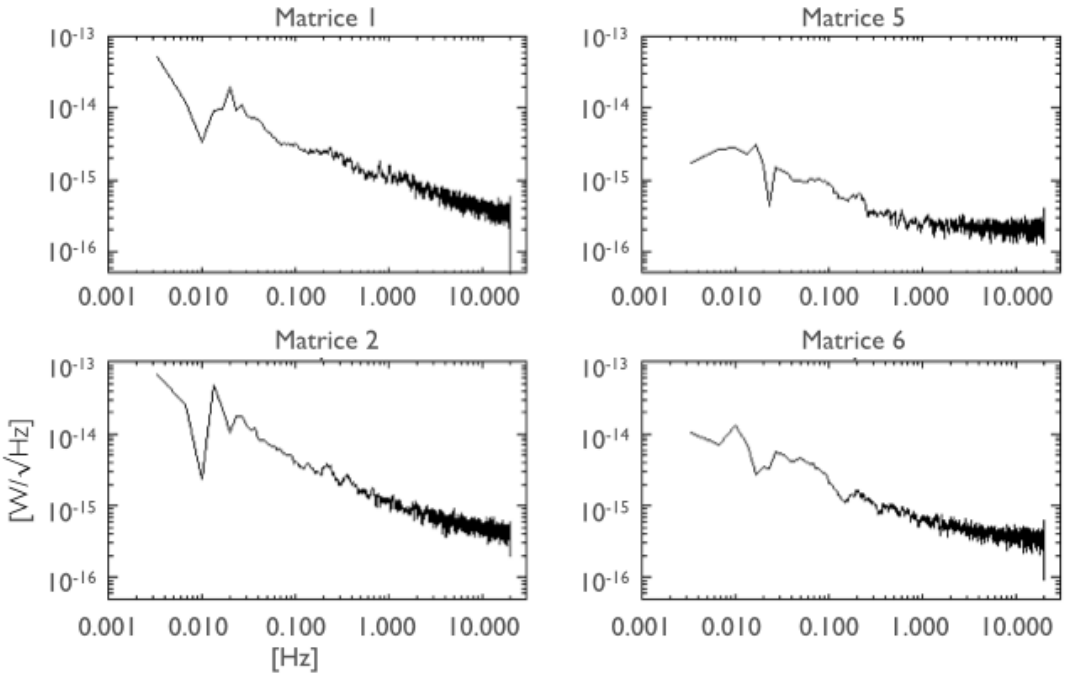


FIGURE 4.9 – Puissance équivalente de bruit (NEP) du plan focal transmission pour un fond thermique à 300 K et atténuateur, exprimée en $W/\sqrt{Hz}$.

Ces conditions de fond thermique sont équivalentes à la modélisation photométrique en vol (section 3.3). Nous pouvons alors comparer la NEP mesurée au sol avec la NEP estimée pour le vol.

La NEP totale (détecteur et fond) au sol est de l'ordre de $3*10^{-16}$ $W/\sqrt{Hz}$ entre 10 Hz et 20 Hz en accord avec la NEP estimée pour le vol qui est de $2.69*10^{-16}$ $W/\sqrt{Hz}$ pour la largeur de bande à 240 µm (tableau 2.1). Ce résultat valide les performances en sensibilité de la caméra. A basse fréquence la remontée du bruit est due à une somme de fluctuation thermique et de bruit électronique.

4.6 Essais de la source interne d'étalonnage

Cet essai consiste à éclairer le plan focal de la caméra en utilisant comme source la source interne d'étalonnage (ICS). La source est successivement allumée et éteinte. Cela correspond à l'application d'un courant de 1.8 mA puis de 0 mA à l'ICS. La figure 4.11 montre le courant appliqué à l'ICS sous forme de créneau et le signal d'un bolomètre sur chaque matrice du détecteur.

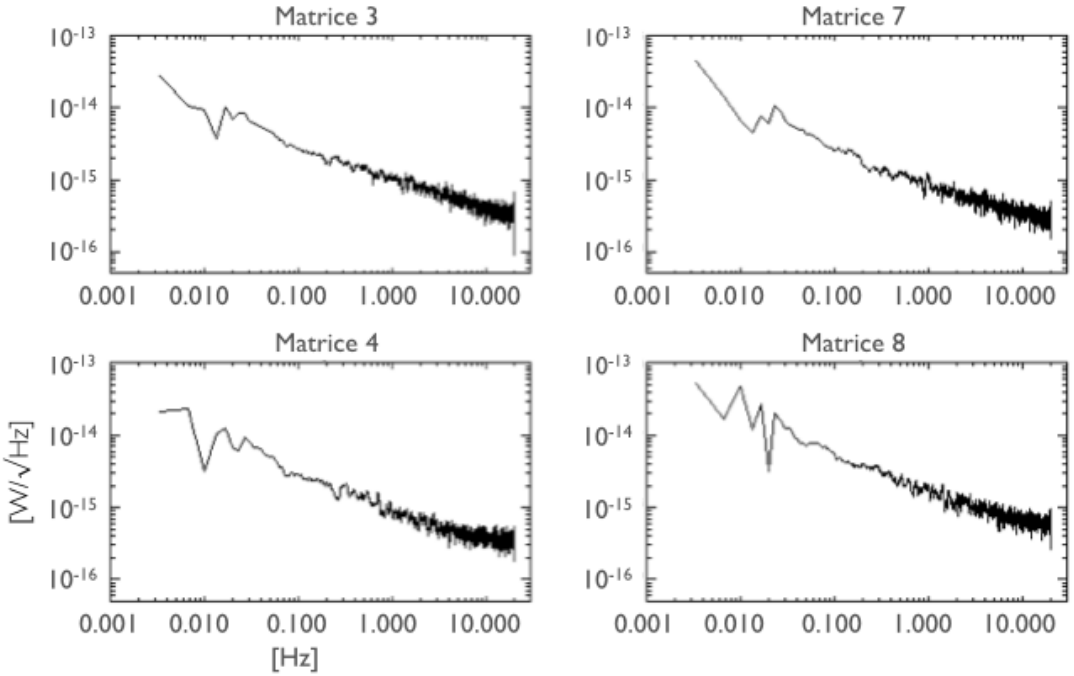


FIGURE 4.10 – Puissance équivalente de bruit (NEP) du plan focal réflexion pour un fond thermique à 300 K et atténuateur, exprimée en $W/\sqrt{Hz}$.

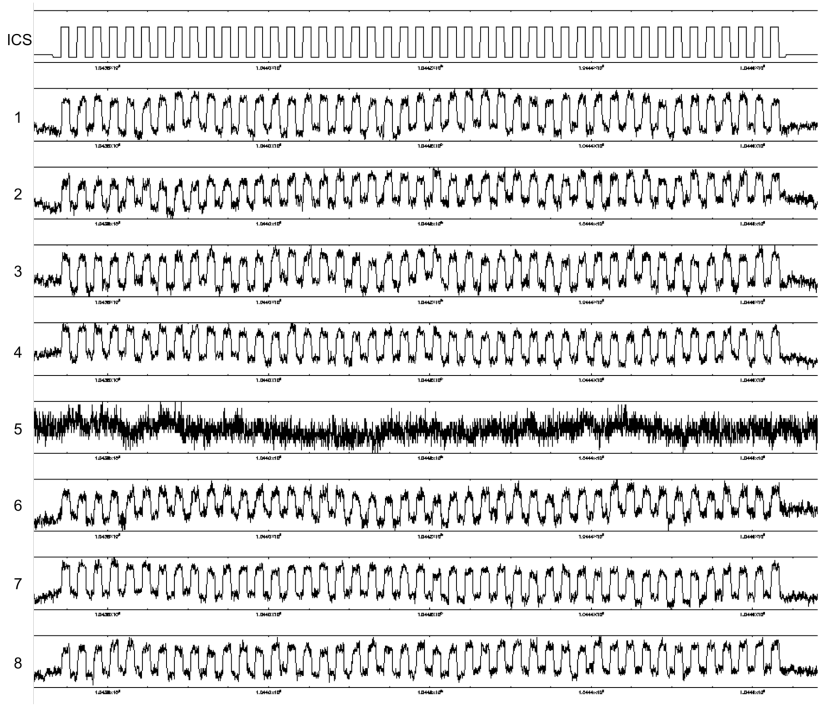


FIGURE 4.11 – Modulation de la source interne d'étalonnage et signal d'un bolomètre de chaque matrice, exprimée en ADU. Noter que la matrice 5 n'est pas opérationnelle.

La figure 4.12 représente l'image de l'ICS sur les plans focaux en transmission et en réflexion. Celle-ci a été calculée en moyennant les signaux des bolomètres lorsque l'ICS est allumée soustrait des signaux lorsque l'ICS est éteinte. On y remarque une tache ovale éclairant toutes les matrices du plan focal en réflexion, et on devine la symétrie sur le plan focal en transmission. L'ICS éclaire comme attendu la totalité du plan focal de la caméra.

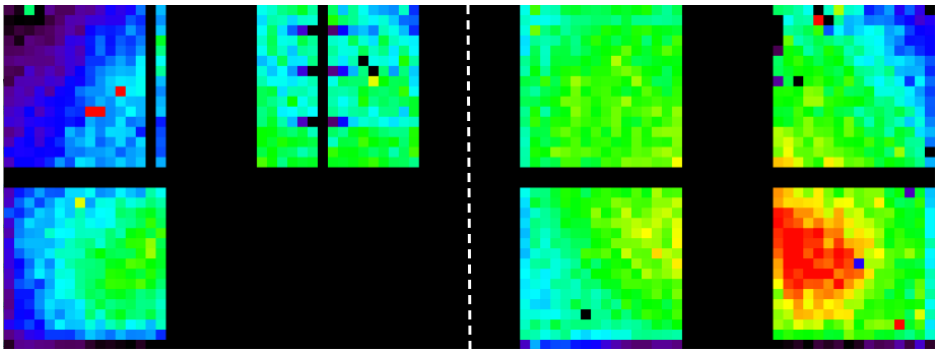


FIGURE 4.12 – Image de la source interne d'étalonnage. [$7e^{-15}$, $3e^{-14}$] W

4.7 Essais de la lame demi-onde

Pour cet essai nous avons mesuré la réponse des détecteurs éclairés par la source interne d'étalonnage en modifiant la position de la lame demi-onde. La lame demi-onde effectue plusieurs allers-retours sur toutes les positions de 1 à 8. Sur la figure 4.13 nous pouvons voir l'évolution du signal d'un bolomètre du plan focal en réflexion éclairé par la source interne d'étalonnage en fonction des positions de la lame demi-onde.

En ciblant cet essai sur un simple aller-retour des positions 1 à 8 à 1, nous pouvons comparer les signaux des deux plans focaux (figures 4.14 et 4.15).

Nous remarquons que le signal sur le plan focal en transmission atteint un maximum en positions 1 et 8 de la lame demi-onde, et un minimum en position 5. Inversement sur plan focal en réflexion, la réponse atteint un maximum en position 5 de la lame demi-onde, et un minimum en positions 1 et 8.

La lame demi-onde permet bien la rotation du plan de polarisation incident. Par contre cela veut dire qu'il existe une polarisation incidente du fond thermique. Celle-ci est due au fait que l'instrument est incomplet, c'est à dire sans le miroir primaire M1. En effet la polarisation incidente sera atténuée par l'alignement des miroirs M2 et M1 répondant à la condition Mizuguchi-Dragone de la conception optique de l'instrument réduisant cet effet de polarisation (section 2.2.2). Cette mesure sera à vérifier lors de l'intégration du miroir primaire M1 à L'IRAP.

Une étude approfondie des données de cet essai de la lame demi-onde permettra de déterminer les paramètres de Stokes nécessaire à une description complète de l'état de polarisation de la caméra (Ponthieu et al. 2008).

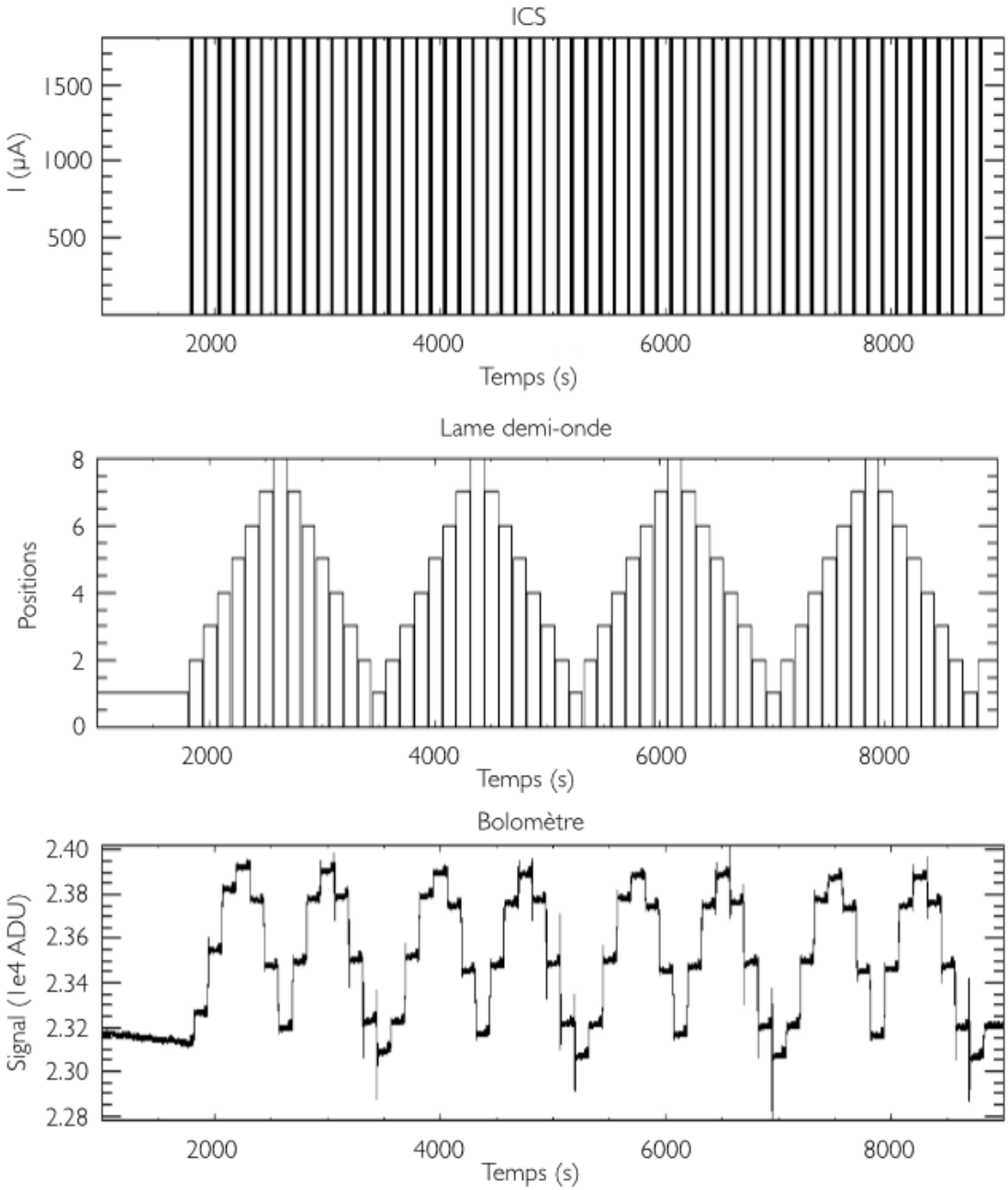


FIGURE 4.13 – Signal d'un bolomètre (fond thermique) en fonction de l'éclairement de la source interne d'étalonnage et de la position de la lame demi-onde. Les courbes de bas en haut sont : le signal d'un bolomètre exprimée en ADU, la position de la lame demi-onde de 1 à 8, et l'intensité appliquée à la source interne d'étalonnage en µA.

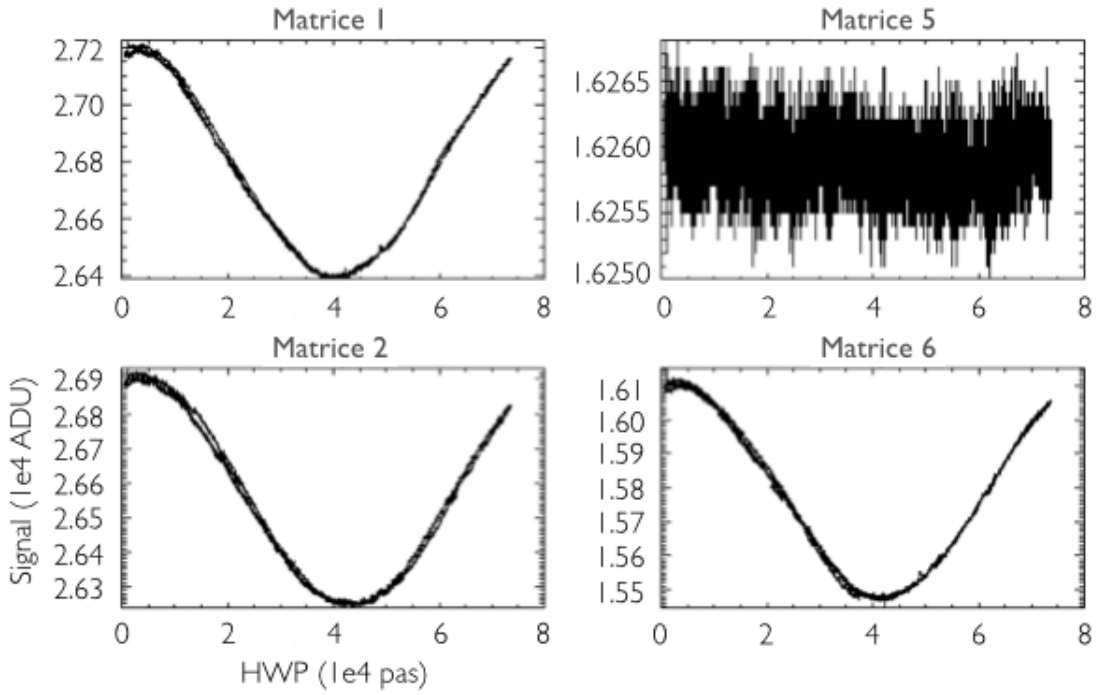


FIGURE 4.14 – Signal d'un pixel du plan focal en transmission, exprimée en ADU, en fonction des positions 1 à 8 de la lame demi-onde.

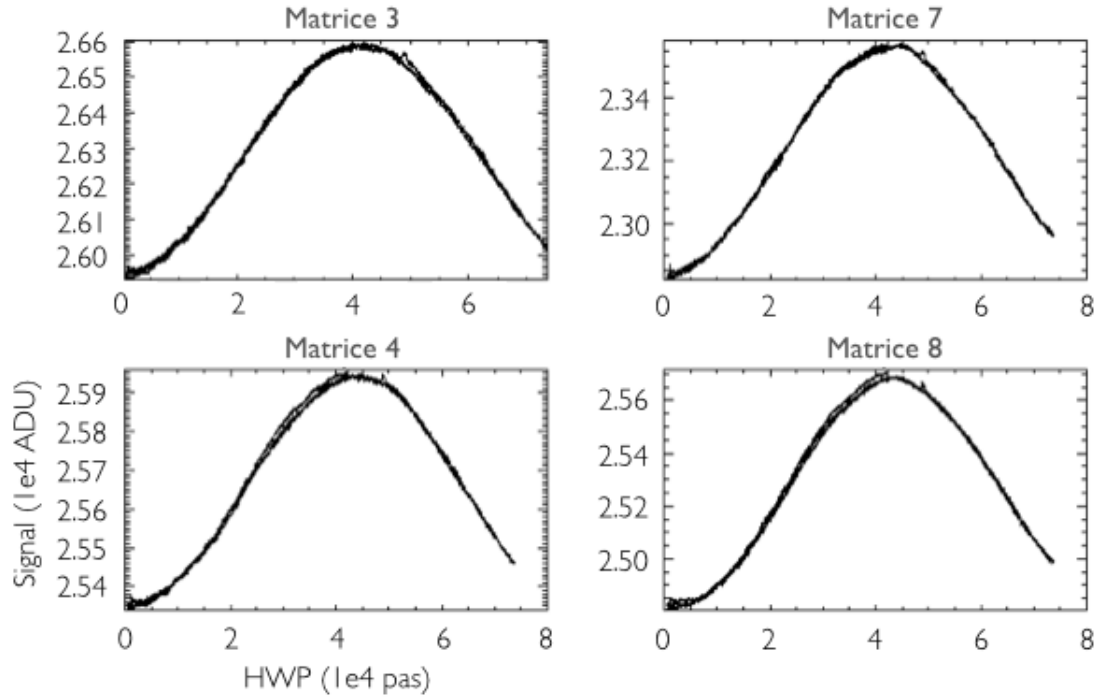


FIGURE 4.15 – Signal d'un pixel du plan focal en réflexion, exprimée en ADU, en fonction des positions 1 à 8 de la lame demi-onde.

Chapitre 5

Description et modélisation des bancs optiques

Sommaire

5.1 Objectifs **64**
5.1.1 Pourquoi les bancs optiques ? 64
5.1.2 Le modèle photométrique 64
5.2 Imagerie **65**
5.2.1 Les moyens du BCN 65
5.2.2 Les objectifs du BCN 67
5.3 Simulation BCN **67**
5.3.1 Caractéristiques des sources et des éléments optiques 67
5.3.2 Photométrie BCN 70
5.3.3 Résultat et conclusion BCN 71
5.4 Etalonnage spectral **73**
5.4.1 Definitions et notions 73
5.4.2 Les moyens du BFTS 75
5.4.3 Les objectifs du BFTS 79
5.4.4 Paramètres de configurations 79
5.5 Simulation BFTS **81**
5.5.1 Caractéristiques des sources et des éléments optiques 81
5.5.2 Photométrie BFTS 83
5.5.3 Résultat et conclusion BFTS 85
5.6 Conclusion et atténuateur **87**
5.6.1 Conclusion 87
5.6.2 Atténuateur 88

5.1 Objectifs

5.1.1 Pourquoi les bancs optiques ?

Nous avons développé deux bancs optiques spécifiques aux mesures d'imagerie, de polarisation et de réponses spectrales, d'une part pour simuler les sources spécifiques à de telles mesures, et d'autre part pour simuler le miroir primaire, non livré pour les essais. De plus, un nombre important de paramètres sont modifiables, tels que la puissance des sources, l'orientation du plan de polarisation, l'alignement de miroirs afin de cibler des zones spécifiques des détecteurs, ceci pour valider les caractéristiques d'imagerie, de polarisation et d'étalonnage spectral de la caméra.

5.1.2 Le modèle photométrique

Dès le début de ma thèse le développement d'un modèle numérique photométrique spécifique à la caractérisation de la caméra s'est imposé.Un tel modèle permet entre autre de dimensionner les bancs optiques, les systèmes de tests et les sources des essais au sol. J'ai donc développé un modèle numérique photométrique de la configuration optique spécifique aux essais fonctionnels et d'étalonnage en laboratoire, à la fois pour les configurations en imagerie et spectrale. Ce modèle donne aussi une estimation de la puissance optique du fond reçue par les détecteurs pour chaque configuration, et permet d'en déduire si elle est suffisante pour pouvoir en analyser la composante scientifique venant des sources astrophysiques.

Dans ce chapitre je vais décrire les bancs optiques développées pour chacun des essais, et détailler les modélisations photométriques correspondantes, ainsi que les résultats estimés et les conséquences pour les essais en laboratoire et pour la caméra.

5.2 Imagerie

5.2.1 Les moyens du BCN

Pour les essais d'imagerie, le banc optique BCN est identique au banc optique des essais fonctionnels (section 4.1), avec une source différente et l'ajout d'une interface optique et mécanique entre la caméra et la source.

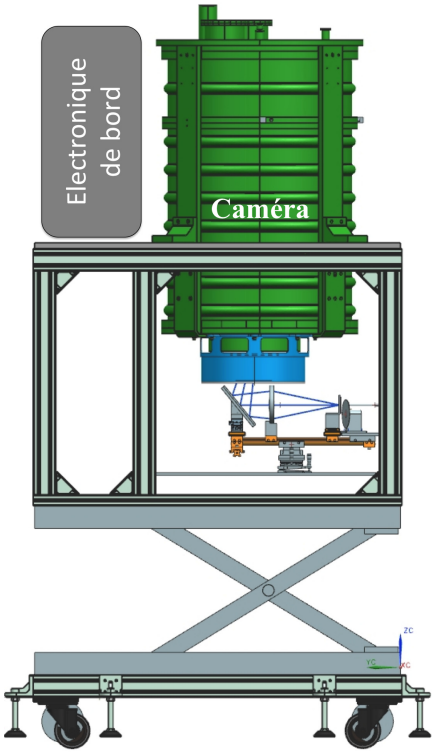


FIGURE 5.1 – Banc optique des essais d'imagerie.

Source du BCN

La source utilisée est une source chaude ponctuelle, chauffée à 405°C. Pour cela nous utilisons un fer à souder avec une panne spécifique et un traitement adapté. La source est placée derrière un diaphragme (trou source) de 2 mm de diamètre limitant les lumières parasites en entrée du système optique.

Interface du BCN

L'interface optique et mécanique (figure 5.2) entre la source et la caméra PILOT est dimensionnée pour reproduire les caractéristiques du miroir primaire de vol M1 (section 2.3.1). L'interface est composée d'une lentille en polypropylène pour focaliser le faisceau au foyer image F1 de la caméra, et d'un miroir plan de renvoi du faisceau à

l'intérieur de la caméra. Un chopper placé dans le faisceau module le signal. La géométrie de la lentille, ainsi que l'alignement des optiques de l'interface, ont été simulées et calculées avec un logiciel de simulation optique Zemax® (annexe A.2).

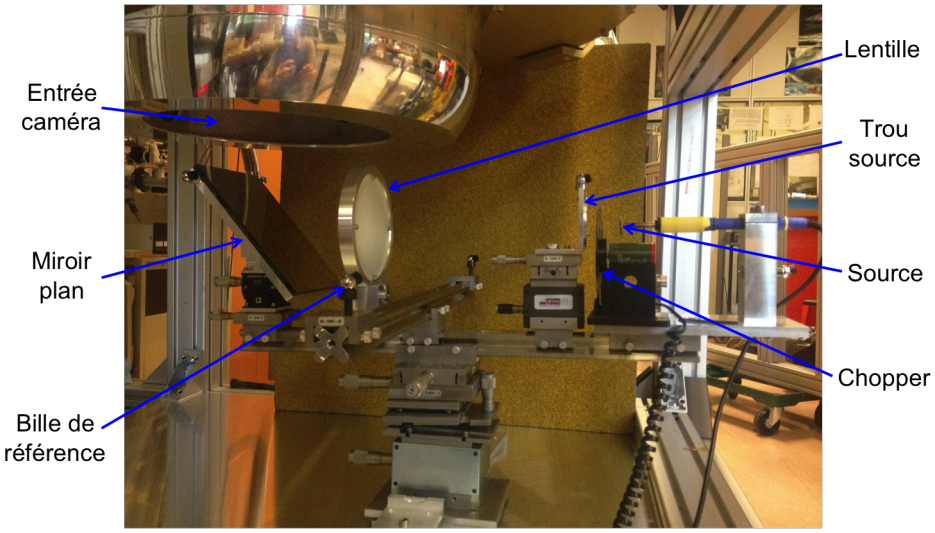


FIGURE 5.2 – Interface optique et mécanique du banc optique BCN.

Noter que mécaniquement l'interface BCN est composée de platines de réglage, et d'un rail de support des optiques. Il en est de même pour l'interface du banc optique avec le spectromètre à transformée de Fourier (BFTS) présentée dans la section 5.4.2. Les platines de réglage sont communes aux deux bancs optiques BCN et BFTS. Ainsi lorsque les platines de réglage sont optimisées pour l'alignement du banc optique BCN, le remplacement du rail de support des optiques est également optimal pour l'alignement du banc optique BFTS.

Caméra du BCN

La caméra est sous vide et à température cryogénique, les détecteurs sont à 300 mK. Afin d'éviter la saturation des détecteurs due à un flux lumineux du fond thermique à 300 K trop important, un atténuateur, spécifique aux essais en laboratoire, est mis en place dans la caméra et dans le faisceau. Le facteur d'atténuation de l'atténuateur a été calculé suite à une simulation photométrique numérique du banc optique BCN (section 5.6.2).

Les moyens informatiques et électroniques

Un ordinateur de test avec une interface utilisateur (annexe D.2) permet de contrôler l'instrument et de stocker les données des essais.

5.2.2 Les objectifs du BCN

Les objectifs sont dans un premier temps de valider l'alignement des optiques froides par une première recherche optique de la position du foyer F1 et de l'axe optique principal de la caméra. Puis dans un second temps les objectifs sont de détecter et d'observer la tache image de la source BCN sur chaque matrice.

5.3 Simulation BCN

Le banc optique BCN dédié aux essais de fonctionnement de l'instrument et d'imagerie se compose d'un ensemble de sources émettant dans le submillimétrique. Dans la section 5.3.1 je décompose ces sources en trois sous-ensembles : les sources de laboratoire, les sources des optiques de l'interface entre les sources de laboratoire et la caméra, et les sources de la caméra (figure 5.3).

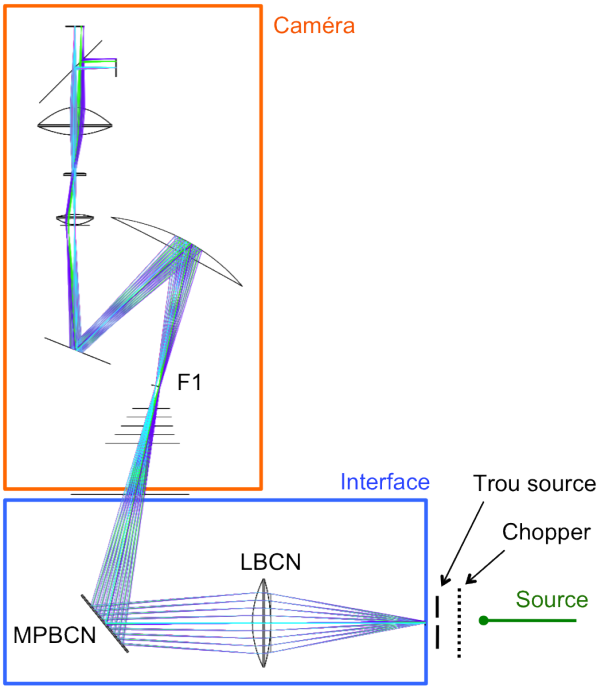


FIGURE 5.3 – Schéma optique du banc BCN.

5.3.1 Caractéristiques des sources et des éléments optiques

Sources de laboratoire

Plusieurs sources sont à prendre en compte dans la simulation numérique. La première source utilisée est un point chaud dont la température peut être modulée. La seconde source est le support du "trou source" qui échauffé par le rayonnement du flux émis par le point chaud émet également dans le submillimétrique.

De plus lors des essais, ne disposant pas du miroir primaire M1 de PILOT, nous utilisons l'interface entre les sources de laboratoire et la caméra composée d'une lentille et d'un miroir plan de renvoi MPBCN, d'un diamètre inférieur au diamètre du miroir M1. Or dans la configuration nominale de vol de l'expérience PILOT, tous les pixels reçoivent le flux réfléchi par le miroir M1, et lors des mesures en laboratoire, les pixels reçoivent le flux réfléchi par le miroir MPBCN issu de la source, et le flux du fond à 300 K, en lieu et place du miroir primaire. La différence entre les deux surfaces des miroirs M1 et MPBCN est vue par les détecteurs comme du fond à 300K. Alors pour connaitre le flux total reçu par les détecteurs dans cette configuration BCN, il est nécessaire de soustraire le flux reçu dans le cas du miroir M1 par le flux reçu dans le cas du miroir MPBCN. Pour ce calcul il faut prendre en en compte la différence entre l'étendue géométrique (G_{MPBCN}) d'un pixel regardant le miroir MPBCN et l'étendue géométrique (G_{M1}) d'un pixel regardant le miroir M1. Les calculs sont détaillés en annexe B.2.1.

Nous avons donc trois sources dont les caractéristiques sont listées dans le tableau 5.1.

i	Elément	Température (K)	Emissivité	Transmission
0	Point chaud	678	0.5	-
1	Fond 300 K	300	1	-
2	Trou source	313	0.8 (à 240 μm)	-

TABLE 5.1 – Caractéristiques des sources BCN.

Sources des optiques de l'interface du BCN

L'étude approfondie du polypropylène, matériau composant la lentille de l'interface BCN, et la connaissance de la géométrie de celle-ci à permis via une simulation optique numérique avec le logiciel Zemax® de calculer la transmission moyenne de la lentille (annexe A.2). Dans la simulation photométrique les optiques (lentille et miroir plan) sont sous atmosphère d'azote gazeux, en surpression pour réduire l'absorption atmosphérique et à température ambiante. Les émissivités sont calculées d'après les lois de conservation d'énergie (équation 3.8) et de rayonnement de Kirchhoff (équation 3.9). Les caractéristiques des éléments optiques de l'interface sont listées dans le tableau 5.2.

i	Elément	Température (K)	Emissivité		Transmission	
			$240\mu m$	$550\mu m$	$240\mu m$	$550\mu m$
3	Azote	300	-		1	
4	Lentille BCN	300	0.462	0.128	0.458	0.792
5	Miroir plan	300	0.02		0.98	

TABLE 5.2 – Caractéristiques des éléments optiques de l'interface source/caméra. Les caractéristiques de la lentille BCN sont détaillées en annexe A.2

Sources des optiques de la caméra PILOT

Dans cette configuration, les éléments optiques de la caméra sont identiques à ceux utilisés lors du vol, comme détaillé dans la section 3.3.1. Les caractéristiques des éléments sont listées dans le tableau 5.3.

i	Elément	T (K)	Emissivité		Transmission	
			$240\mu m$	$550\mu m$	$240\mu m$	$550\mu m$
6	Fenêtre d'entrée (vol)	300	0.004	0.004	annexe B.1.1	
7	Filtre thermique 1	300	0.01	0.01	annexe B.1.2	
8	Filtre thermique 2	140	0.01	0.01	annexe B.1.2	
9	Filtre de blocage $65cm^{-1}$ (W1360)	80	0.03	0.01	annexe B.1.2	
10	Filtre thermique 3	40	0.01	0.01	annexe B.1.2	
11	Filtre de blocage $60cm^{-1}$ (W1359)	2.5	0.03	0.02	annexe B.1.2	
12	Filtre de blocage $80cm^{-1}$ (W1337)	2.5	0.03	0.03	annexe B.1.2	
13	Atténuateur	2.5	0.02	-	section 5.6	
14	Miroir secondaire M2	2.5	0.02	0.02	0.98	0.98
15	Miroir plan M3	2.5	0.02	0.02	0.98	0.98
16	Lentille 1	2.5	1-τ	1-τ	[0.551 ; 0.793]	[0.885 ; 0.929]
	Lame demi onde τ_{HWP}^{max} position					
17	co-polarization 0°	2.5	0.03	0.01	annexe B.1.3	
17	cross-polarization 45°	2.5	0.03	0.01	annexe B.1.3	
18	Lentille 2	2.5	1-τ	1-τ	[0.213 ; 0.346]	[0.717 ; 0.752]
19	Polariseur	2.5	0.03	0.03	0.50	0.50
	Filtres sélectifs 240 μm : jeu n°1					
20	$36cm^{-1}$ (W1356)	0.3	0.03	-	annexe B.1.2	-
21	$48cm^{-1}$ (W1336)	0.3	0.03	-	annexe B.1.2	-
22	$58cm^{-1}$ (W1375)	0.3	0.03	-	annexe B.1.2	-
	Filtres sélectifs 240 μm : jeu n°2					
20	$36cm^{-1}$ (W1506)	0.3	0.03	-	annexe B.1.2	-
21	$48cm^{-1}$ (W875)	0.3	0.03	-	annexe B.1.2	-
22	$58cm^{-1}$ (W1371)	0.3	0.03	-	annexe B.1.2	-
	Filtres sélectifs 550 μm :					
20	$15.2cm^{-1}$ (W984)	0.3	-	0.03	-	annexe B.1.2
21	$21.2cm^{-1}$ (1376)	0.3	-	0.03	-	annexe B.1.2
22	$25cm^{-1}$ (W892)	0.3	-	0.03	-	annexe B.1.2

TABLE 5.3 – Caractéristiques des éléments optiques de la caméra avec les filtres passe bande à 240 µm pour les jeux de filtres 1 et 2, et avec les filtres passe bande à 550 µm. Les transmissions de la fenêtre d'entrée, de la lame demi-onde, et des filtres ont été mesurées, les courbes sont en annexe B.1. Les transmissions en co-polarisation et en cross-polarisation de la lame demi-onde correspondent aux transmissions maximales des deux polarisations (annexe B.1.3). Les transmissions des lentilles ont été calculées en fonction du coefficient d'absorption α du polypropylène (annexe A.1).

5.3.2 Photométrie BCN

Les éléments du modèle photométrique sont numérotés de 0 à 22. Dans le modèle photométrie la puissance émise par chacun des éléments est calculée afin d'en déduire une estimation totale la puissance reçue sur chaque pixel des détecteurs. Cette puissance est décomposée ci-dessous pour chaque élément du système.

Source Point chaud : Elément indice 0

$$P_0 = G_{MPBCN} \int_{\nu} \varepsilon_0 \left(\prod_{i=3}^{22} \tau_i \right) L_{cn}(\nu, T_0) \eta_{det} \, \mathrm{d}\nu \tag{5.1}$$

Source Fond 300 K : Elément indice 1

$$P_1 = (G_{M1} - G_{MPBCN}) \int_{\nu} \varepsilon_1 \left(\prod_{i=6}^{22} \tau_i \right) L_{cn}(\nu, T_1) \eta_{det} \, \mathrm{d}\nu \tag{5.2}$$

Source Trou source : Elément indice 2

$$P_2 = G_{MPBCN} \int_{\nu} \varepsilon_2 \left(\prod_{i=3}^{22} \tau_i \right) L_{cn}(\nu, T_2) \eta_{det} \, \mathrm{d}\nu \tag{5.3}$$

Interface Source/Caméra PILOT : Eléments indices 3 à 5

$$P_{interface} = \sum_{e=3}^{5} \left[G_{MPBCN} \int_{\nu} \varepsilon_e \left(\prod_{e+1}^{23} \tau_i \right) L_{cn}(\nu, T_e) \eta_{det} \, \mathrm{d}\nu \right] \tag{5.4}$$

Caméra PILOT : Eléments indices 6 à 22

$$P_{camera} = \sum_{e=6}^{22} \left[G_{MPBCN} \int_{\nu} \varepsilon_e \left(\prod_{e+1}^{23} \tau_i \right) L_{cn}(\nu, T_e) \eta_{det} \, \mathrm{d}\nu \right] \tag{5.5}$$

Caméra PILOT avec fond à 300 K : Eléments indices 6 à 22

$$P_{camera}^{300\ K} = \sum_{e=6}^{22} \left[(G_{M1} - G_{MPBCN}) \int_{\nu} \varepsilon_e \left(\prod_{e+1}^{23} \tau_i \right) L_{cn}(\nu, T_e) \eta_{det} \, \mathrm{d}\nu \right] \tag{5.6}$$

NB : L'indice 23 est un élément simulé de transmission 1, nécessaire pour compiler le code de simulation numérique du modèle photométrique. Les applications numériques des étendues géométriques G_{M1} et G_{MPBCN} sont en annexe B.2.1.

Puissance totale en configuration BCN

$$P_{totale} = P_0 + P_1 + P_2 + P_{interface} + P_{camera} + P_{camera}^{300\ K} \tag{5.7}$$

5.3.3 Résultat et conclusion BCN

La simulation photométrique donne les résultats pour les mesures effectuées en co-polarisation et en cross-polarisation (tableaux 5.4 et 5.5). Les résultats suivant ces deux plans de polarisation sont sensiblement identiques. Pour la largeur de bande à 240 µm, une puissance totale reçue sur chaque pixel du détecteur est alors environ comprise entre 53 pW et 139 pW, et pour la largeur de bande à 550 µm, nous obtenons une puissance totale environ comprise entre 58 pW et 65 pW.

Emission thermique	Puissance sur un pixel (pW)		
	$240\mu m$		$550\mu m$
	Filtres jeu n°1	Filtres jeu n°2	
	$[\alpha_{max}\ ;\ \alpha_{min}]$	$[\alpha_{max}\ ;\ \alpha_{min}]$	$[\alpha_{max}\ ;\ \alpha_{min}]$
Point chaud	[1.9 ; 4.5]	[1.8 ; 4.1]	[3.1 ; 3.5]
Trou source	[1.3 ; 3.1]	[1.2 ; 2.9]	[2.3 ; 2.5]
Interface BCN	[1.7 ; 3.9]	[1.5 ; 3.6]	[0.5 ; 0.6]
Caméra	[0.1 ; 0.2]	[0.1 ; 0.2]	[8.0e-2 ; 8.8e-2]
Fond 300 K	[51.9 ; 121.3]	[47.3 ; 110.7]	[50.9 ; 56.0]
Caméra 300K	[1.4 ; 3.4]	[1.3 ; 3.1]	[1.2 ; 1.3]
Totale	[58.4 ; 136.4]	[53.2 ; 124.5]	[58.0 ; 63.9]

TABLE 5.4 – Résultats en configuration BCN, dans le cas CO-polarisation et en fonction du coefficient d'absorption α du polypropylène.

Emission thermique	Puissance sur un pixel (pW)		
	$240\mu m$		$550\mu m$
	Filtres jeu n°1	Filtres jeu n°2	
	$[\alpha_{max}\ ;\ \alpha_{min}]$	$[\alpha_{max}\ ;\ \alpha_{min}]$	$[\alpha_{max}\ ;\ \alpha_{min}]$
Point chaud	[2.0 ; 4.6]	[1.8 ; 4.2]	[3.2 ; 3.6]
Trou source	[1.4 ; 3.2]	[1.3 ; 2.9]	[2.3 ; 2.6]
Interface BCN	[1.7 ; 4.0]	[1.6 ; 3.7]	[0.5 ; 0.6]
Caméra	[0.1 ; 0.2]	[0.1 ; 0.2]	[8.1e-2 ; 9.0e-2]
Fond 300 K	[53.1 ; 124.0]	[48.5 ; 113.3]	[52.1 ; 57.4]
Caméra 300K	[1.5 ; 3.4]	[1.3 ; 3.1]	[1.2 ; 1.3]
Totale	[59.7 ; 139.5]	[54.5 ; 127.4]	[59.5 ; 65.5]

TABLE 5.5 – Résultats en configuration BCN, dans le cas CROSS-polarisation et en fonction du coefficient d'absorption α du polypropylène.

Nous remarquons que la puissance totale est dominée par l'émission thermique du fond à 300 K. Et sachant que la gamme de fonctionnement des détecteurs PACS est comprise entre 1 et 7 pW, il est indispensable d'ajouter un atténuateur pour ne pas saturer les détecteurs. Pour un choix précis du facteur d'atténuation, nous prenons comme référence la gamme de fonctionnement de l'instrument en vol estimée dans la section 3.3.3. Après calcul le facteur d'atténuation estimé pour le BCN est de 25.4 à 240 µm et de 28.9 à 550 µm (tableau 5.6).

		$240\mu m$		$550\mu m$
		Filtres jeu n°1	Filtres jeu n°2	
		$[\alpha_{max}\,;\,\alpha_{min}]$	$[\alpha_{max}\,;\,\alpha_{min}]$	$[\alpha_{max}\,;\,\alpha_{min}]$
Puissance sur un pixel (pW)	BCN copol	[58.4 ; 136.4]	[53.2 ; 124.5]	[58.0 ; 63.9]
	BCN xpol	[59.7 ; 139.5]	[54.5 ; 127.4]	[59.5 ; 65.5]
	VOL copol	[2.3 ; 5.4]	[2.1 ; 4.9]	[2.0 ; 2.2]
	VOL xpol	[2.4 ; 5.5]	[2.2 ; 5.0]	[2.1 ; 2.3]
	det. PACS	[1 ; 7]	[1 ; 7]	-
Atténuateur	P_{BCN}^{copol}/P_{PACS}	[58.4 ; 19.5]	[53.2 ; 17.8]	-
	P_{BCN}^{xpol}/P_{PACS}	[59.6 ; 19.9]	[54.5 ; 18.2]	-
	$P_{BCN}^{copol}/P_{VOL}^{copol}$	25.4	25.4	28.9
	$P_{BCN}^{xpol}/P_{VOL}^{xpol}$	25.4	25.4	28.9

TABLE 5.6 – Atténuateur pour le banc optique BCN.

5.4 Etalonnage spectral

5.4.1 Definitions et notions

Definitions

Par définition, l'étalonnage est la *détermination de la relation existant entre les indications d'un appareil de mesure et les valeurs de la grandeur à mesurer*. Dans notre cas, l'indication correspond au signal reçu par télémétrie, l'appareil de mesure correspond à la caméra PILOT, et la grandeur mesurée est la puissance émise par la source. L'étalonnage spectral de la caméra à l'IAS est un étalonnage relatif, l'étalonnage absolu sera fait en vol.

Interféromètre de Michelson

Un spectromètre par transformée de Fourier est un instrument basé sur un interféromètre de Michelson (Born and Wolf 1999). Son fonctionnement utilise le principe de l'interférométrie. Celui-ci utilise la nature ondulatoire de la lumière et le fait que deux ondes cohérentes entre elles interfèrent de manières constructives ou destructives selon leur déphasage. Dans un spectromètre (figure 5.4), le faisceau incident d'une source est séparé en deux faisceaux par une séparatrice. Le faisceau parcourt des chemins optiques différents avant de se recombiner. Par le déplacement d'un miroir, la différence de chemin optique entre les deux faisceaux crée un signal d'interférence, qui constitue l'interférogramme. Cet interférogramme est la transformée de Fourier du spectre de la source. En calculant la transformée de Fourier inverse de cet interférogramme on obtient le spectre de la source en fonction de la fréquence, ou de la longueur d'onde.

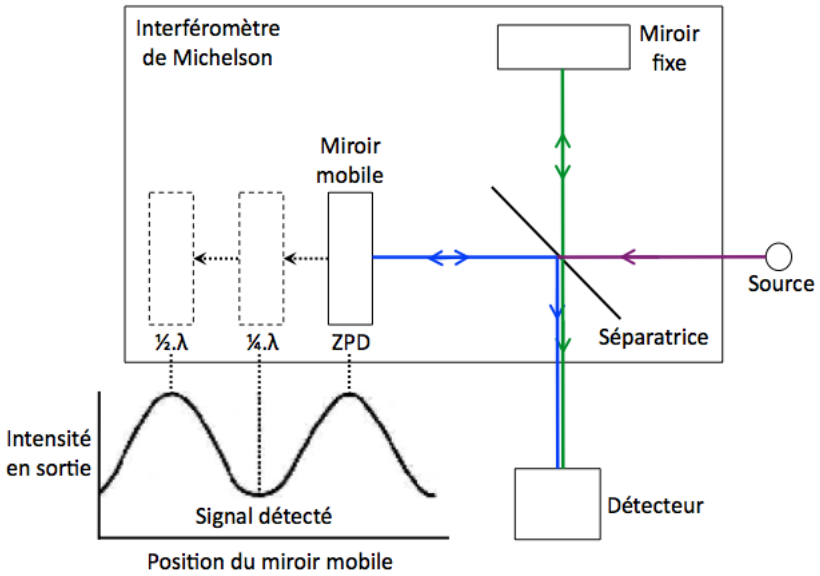


FIGURE 5.4 – Construction d'un interférogramme.

Spectroscopie par transformée de Fourier

En spectroscopie par transformée de Fourier, un interférogramme pour une source monochromatique de nombre d'onde σ s'écrit en fonction de la différence de marche δ :

$$I(\delta) = \frac{I_0}{2}(1 + cos(2\pi\sigma\delta)) \tag{5.8}$$

L'interférogramme d'une source monochromatique est donc une fonction cosinus de période spatiale $1/\sigma$, soit λ.

De façon général l'interférogramme d'une source polychromatique d'intensité spectrale $\mathrm{A}(\sigma)$ s'écrit comme la somme de toutes les intensités spectrales reçues :

$$I(\delta) = \int_0^\infty \frac{A(\sigma)}{2}\Big[1 + \cos(2\pi\sigma\delta)\Big]d\sigma \tag{5.9}$$

$I(\delta)$ est la transformée de Fourier cosinus d'intensité spectrale $\mathrm{A}(\sigma)$.

Mode Martin-Puplett

Le mode Martin-Puplett d'un spectromètre à transformée de Fourier est une configuration optimisée pour les mesures de polarisation dans le submillimétrique (Lambert and Richards 1978). Le principe est le même qu'un interféromètre de Michelson. La spécificité supplémentaire en mode Martin-Puplett est de polariser la lumière émise de la source en sortie du spectromètre. Contrairement au Michelson dont la séparatrice sépare le faisceau en intensité, la séparatrice du Martin-Puplett sépare le faisceau en deux polarisations orthogonales.

Notions sur les spectres et les interférogrammes

Plusieurs paramètres d'un interférogramme sont à déterminer afin d'optimiser son acquisition en respectant la résolution spectrale désirée.

Un spectre peut être caractérisé par deux paramètres. Le premier est le nombre d'onde maximum σ_{max} de la zone spectrale attendue pour l'instrument. Le second paramètre est la résolution spectrale $\delta\sigma$, qui est la capacité d'un détecteur à distinguer différentes longueurs d'onde proches.

Un interférogramme dépend de deux paramètres. Le premier est la différence de marche maximale D. Le second est le nombre de points N entre la différence de marche nulle et la différence de marche maximale D. Nous en déduisons le pas d :

$$d = \frac{D}{N} \tag{5.10}$$

Des liens existent entre ces paramètres. La résolution spectrale $\delta\sigma$ et la différence de marche maximale D sont liés par la relation :

$$\delta\sigma = \frac{1}{D} \tag{5.11}$$

D'autre part, le nombre d'onde maximum σ_{max} et le pas d'échantillonnage d de l'interférogramme sont liés par :

$$\sigma_{max} = \frac{1}{2d} \tag{5.12}$$

5.4.2 Les moyens du BFTS

Pour l'étalonnage spectral, un spectromètre à Transformée de Fourier (FTS) de type Martin-Puplett complète le banc BCN détaillé dans la section 5.2. Le spectromètre utilisé en mode Martin-Puplett est idéal pour des mesures dans le submillimétrique et en lumière polarisée. Lors des essais de mesures de réponse spectrale de la caméra, le BFTS est donc composé de la caméra intégrée avec l'atténuateur, du chauffage de la fenêtre d'entrée, d'une interface optique et mécanique entre le spectromètre et la caméra PILOT, et de l'électronique de vol. Une table élévatrice est utilisée comme support aux sous-systèmes.

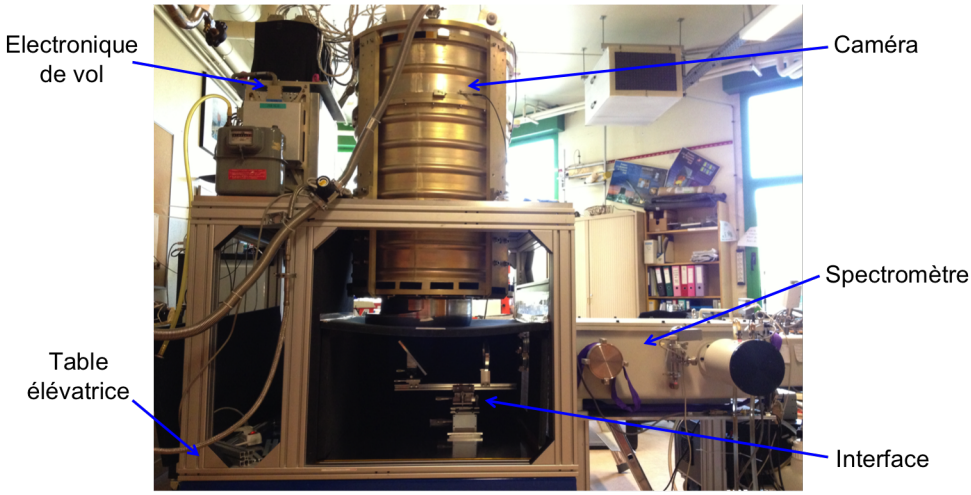


FIGURE 5.5 – Banc optique des essais de mesures spectrales.

Source du BFTS

La source submillimétrique utilisée lors des essais d'étalonnage est une lampe à vapeur de mercure interne au spectromètre. Un iris circulaire (trou source) d'un diamètre de 6 mm limite la taille du faisceau.

Spectromètre

Le spectromètre à transformée de Fourrier durant les essais est utilisé en configuration Martin-Puplett (figure 5.6). Lors des mesures le spectromètre est mis sous vide afin de limiter l'absorption atmosphérique. Les caractéristiques du spectromètre sont listées dans le tableau 5.7.

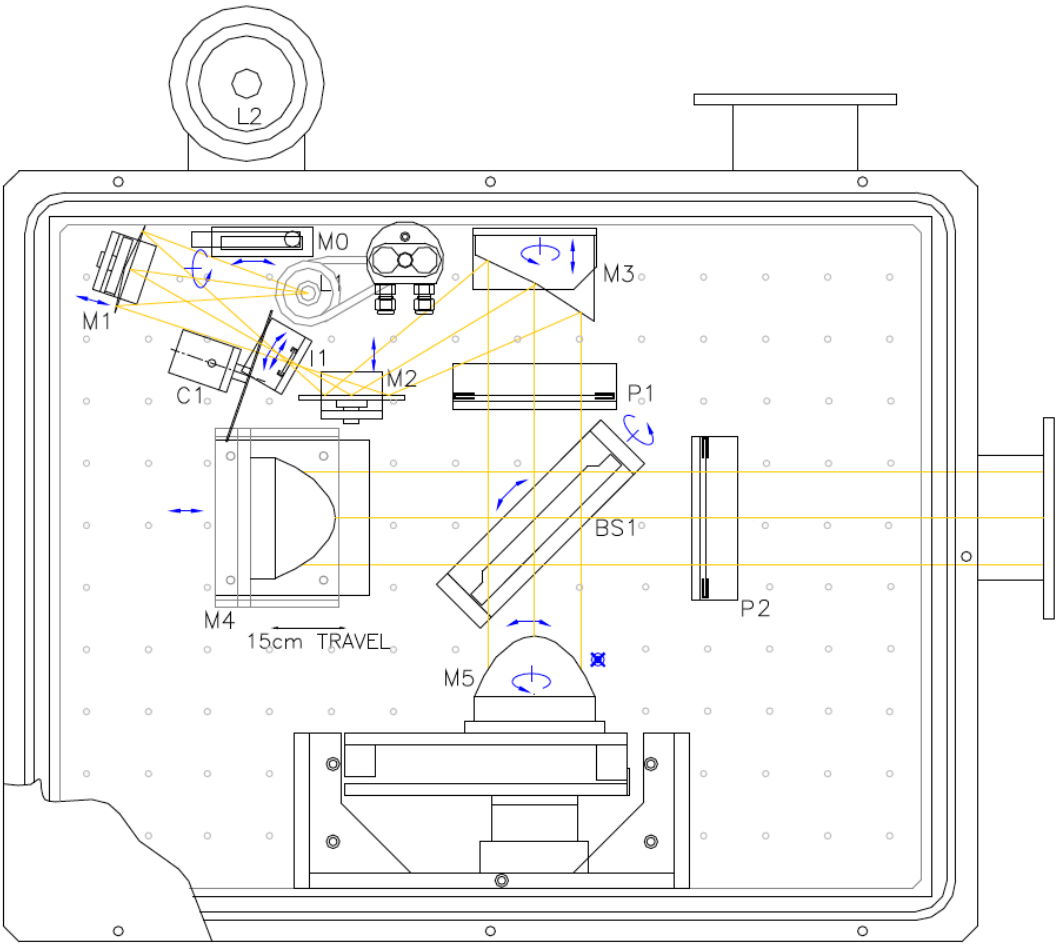


FIGURE 5.6 – Schéma optique du spectromètre à transformée de Fourier. $M0_{FTS}$ et $M2_{FTS}$-Miroir plan ; $M1_{FTS}$-Miroir elliptique ; $M3_{FTS}$-Miroir parabolique hors axe ; $M4_{FTS}$ et $M5_{FTS}$-Miroirs en coin ; C1-Chopper ; I1-Iris ; P1-Polariseur ; P2-Analyseur ; BS1-Lame séparatrice ; L1-Lampe Hg ; L2-Lampe externe.

Modes of operation	Polarizing (Martin-Puplett), Michelson
Modes of data acquisition	Rapid Scan, Step & Integrate
Spectral resolution	0.05 cm^{-1}
Optical F / number	2.5
Iris aperture	1 - 15 mm **(6 mm)**
Optics throughput (SΩ)	0.1 - 21.6 mm^2sr
Mirror coating	Gold, 2500A
Polarizing beam splitter	4 μm pitch grid on 12 μm Mylar substrate
Alignment laser power	4 mW
Hg lamp power ST75 Model	75 Watt max **(70 W)**
Chopper frequency	1 - 127 Hz

TABLE 5.7 – Caractéristiques du spectromètre (Sciencetech 2006).

Dans un premier temps le faisceau issu de l'iris I1 est réfléchi par les miroirs $M2_{FTS}$ et $M3_{FTS}$ sur un premier polariseur P1, puis le faisceau est séparé par une lame séparatrice BS1 (un polariseur à 45°) sur les miroirs en coin $M4_{FTS}$ et $M5_{FTS}$. Le déplacement du miroir mobile $M4_{FTS}$ a pour effet de moduler le signal issu de la source. Puis dans un second temps les deux faisceaux ainsi réfléchis sont recombinés par la séparatrice BS1 en un faisceau qui traverse un second polariseur P2. Ainsi le faisceau en sortie du spectromètre est la transformée de Fourier de la source. Puis par une transformée de Fourier inverse on retrouve la brillance de la source mais multipliée par la réponse du système.

Une table de translation "1 axe" permet le déplacement du miroir mobile du spectromètre. Un module de contrôle (Aerotech 2003) pilote le moteur de la table de translation. Les principales caractéristiques de la table de translation sont données dans le tableau 5.8.

Course_{max}	15 cm
Vitesse_{max}	0.5 cm.s^{-1}
Pas	0.1 µm

TABLE 5.8 – Principales caractéristiques de la table de translation du miroir mobile du spectromètre.

Dans une optique spécifique aux mesures d'étalonnage spectral de la caméra à l'IAS, j'ai développé un logiciel avec une interface en LabView® avec trois spécificités (annexe D.3) : Contrôler le déplacement du miroir mobile, acquérir les données de déplacement du miroir mobile (position, vitesse, et erreurs), et permettre la synchronisation avec les données des bolomètres.

Interface du BFTS

Comme pour l'interface du BCN, l'interface optique et mécanique du BFTS entre le spectromètre et la caméra PILOT est dimensionnée pour reproduire les caractéristiques du miroir primaire de vol M1 (section 2.3.1). L'interface (figure 5.7) est composée d'une lentille en polypropylène pour focaliser le faisceau au foyer image F1 de la caméra, et d'un miroir plan de renvoi du faisceau à l'intérieur de la caméra. Ses optiques sont sous atmosphère d'azote gazeux, en surpression pour réduire l'absorption atmosphérique, et à température ambiante. La géométrie de la lentille, ainsi que l'alignement des optiques de l'interface, ont été simulées et calculées avec un logiciel de simulation optique Zemax® (annexe A.2). Un système de réglage optique du miroir permet le balayage du champ de vue dans sa totalité et ainsi de palier à l'absence du miroir M1.

Caméra du BFTS

La caméra est dans la même configuration que pour le BCN (section 5.2.1).

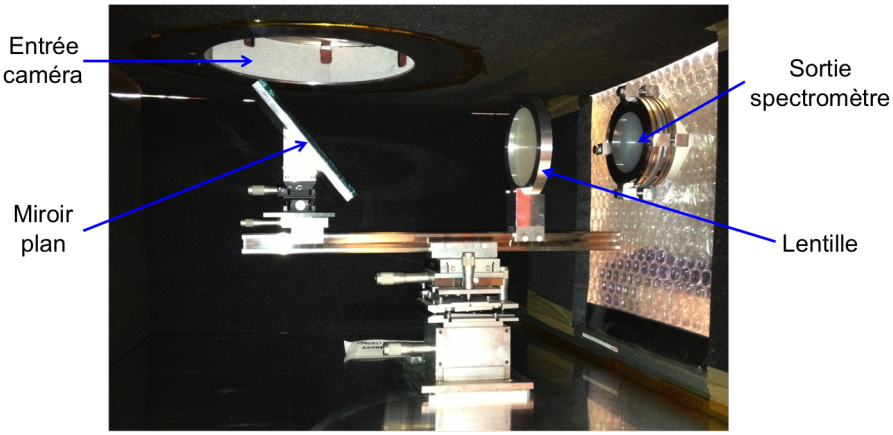


FIGURE 5.7 – Interface optique et mécanique du banc optique BFTS.

Les moyens informatiques et électroniques

L'organigramme 5.8 nous montre l'architecture électronique et informatique du banc de test et les moyens électroniques et informatiques des sous-systèmes mis en place.

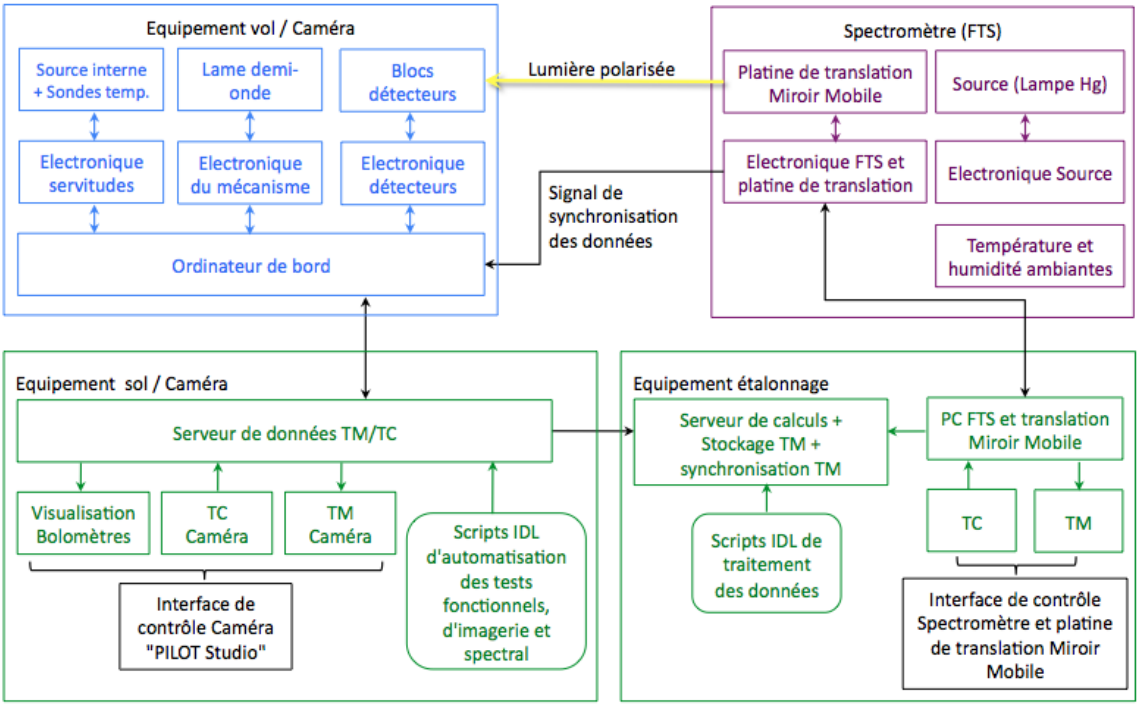


FIGURE 5.8 – Organigramme simplifié de l'architecture électronique de l'instrument.

Lors des tests à l'IAS pour la mesure de transmission spectrale globale de la caméra, un mode de fonctionnement sera de déplacer le miroir mobile du spectromètre dans un mode de balayage rapide modulant ainsi le signal. Un aspect important est de pouvoir synchroniser le déplacement du miroir du spectromètre avec l'acquisition des données

du détecteur. Une chaine d'acquisition des données spécifique est alors mise en place (annexe D).

5.4.3 Les objectifs du BFTS

De façon générale, l'objectif des mesures est de caractériser la réponse spectrale des détecteurs à 240 µm. Dans le détail le banc optique permet d'une part de mesurer la bande spectrale centrée à 240 µm de la caméra, et de vérifier l'absence de fuites spectrales en dehors de la largeur de bande spécifiée. D'autre part il permet de mesure de la polarisation, par l'acquisition d'images en mode de balayage rapide, avec les polariseurs du spectromètre en position 0° puis 90°, pour trois positions de lame demi-onde, sous atmosphère d'air et d'azote. Cela permettra d'une part de définir le degré de polarisation introduit par la caméra, et d'autre part de vérifier si la polarisation varie en fonction de la position des polariseurs du spectromètre, à 0° et 90°.

5.4.4 Paramètres de configurations

Vitesse de balayage

La vitesse de déplacement V du miroir mobile du spectromètre doit être suffisamment lente pour pouvoir laisser le temps au détecteur d'intégrer la mesure. Cette vitesse doit donc être au maximum égale au rapport de la distance entre deux points consécutifs de l'interférogramme divisé par la constante de temps du détecteur.

$$V_{max} = \frac{d_{mecanique}}{T_{det}} \tag{5.13}$$

$$= \frac{d}{2\ T_{det}} \tag{5.14}$$

Une vitesse trop rapide dégrade la qualité de l'interférogramme en particulier par l'introduction d'une asymétrie de la frange centrale à différence de marche nulle (ZPD).

Le nombre d'onde maximum σ_{max} de notre caractérisation spectrale est fixé à 200 cm^{-1} (λ=40 µm). Cette valeur découle des caractéristiques de l'interféromètre à transformé de Fourier utilisé. La constante de temps des détecteurs est égale à 20 ms (section 2.3.12).

Donc d'après les équations 5.14 et 5.12, la vitesse maximum est égale à :

$$\begin{aligned} V_{max} &= \frac{d}{2\ T_{det}} = \frac{1}{4\ \sigma_{max}\ T_{det}} \\ &= \frac{1}{4 * 200 * 2\ 10^{-2}} \\ &= 0.0625\ cm/s \end{aligned} \tag{5.15}$$

La résolution de la table translation du miroir mobile étant de 0.1 µm, cela correspond à une vitesse de 6250 pas/s. En appliquant un facteur de sécurité de 1.3 sur la constante de temps du détecteur, nous avons fixé une vitesse de translation à 4800 pas/s.

Longueur de balayage

La longueur de la course du miroir mobile du spectromètre détermine la résolution, c'est à dire le nombre de points qui permet de construire la courbe de la réponse spectrale. Nous avons posé une spécification de 100 points sur la largeur spectrale de la bande à 240 µm. La largeur attendue correspond à 20% de 240 µm, soit 8.33 cm^{-1} en nombre d'onde.

La résolution spectrale spécifiée est donc :

$$\delta\sigma = 0.0833\ cm^{-1}$$

D'après l'équation 5.11 la différence de marche mécanique nécessaire est de :

$$\begin{aligned} D &= \frac{1}{\delta\sigma} \\ D &= \frac{1}{0.0833} = 12\ cm \\ D_{mecanique} &= \frac{D}{2} = 6\ cm \end{aligned} \tag{5.16}$$

Le déplacement mécanique du miroir mobile est donc égal à 6 cm.

Nombre de balayages

Le nombre de balayages du miroir mobile du spectromètre détermine le rapport signal/bruit. Il a été déterminé de façon expérimentale. Nous avons réalisé une première série de mesures suivant N balayages. Nous avons calculé ensuite l'évolution du bruit sur les spectres en fonction du nombre de balayages du miroir mobile du spectromètre (courbe 5.9). Le bruit se réduit fortement jusqu'à une centaine de balayages. De 50 à 100 balayages, le rapport signal/bruit s'améliore de 25%. Le nombre de balayages utilisés lors des mesures est égale à 100 (50 balayages allers-retours).

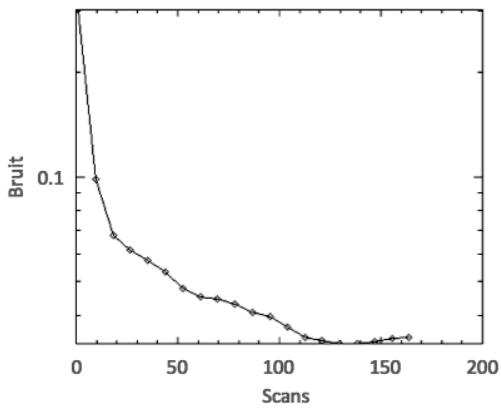


FIGURE 5.9 – Bruit sur les spectres sur un pixel en fonction du nombre de balayages du miroir mobile du spectromètre.

Nous pouvons expliquer le seuil atteint après 100 balayages comme étant dû à des effets systématiques instrumentaux et à une dérive de l'atmosphère azote.

5.5 Simulation BFTS

Le banc optique BFTS dédié aux essais de mesures de la réponse spectrale de la caméra se compose d'un ensemble de sources émettant dans le submillimétrique. Dans la section 5.5.1 je décompose ces sources en quatre sous-ensembles : les sources de laboratoire, les sources des optiques du spectromètre, les sources des optiques de l'interface entre le spectromètre et la caméra, et les sources de la caméra (figure 5.10).

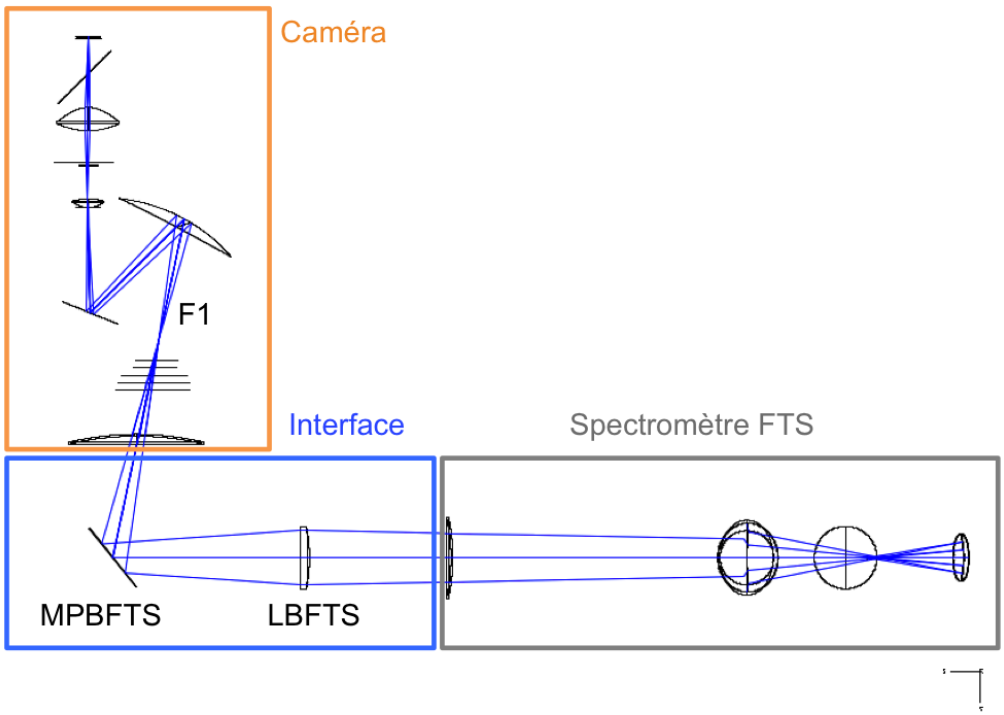


FIGURE 5.10 – Schéma optique du banc BFTS.

5.5.1 Caractéristiques des sources et des éléments optiques

Sources de laboratoires

Nous utilisons comme source la lampe à vapeur de mercure L1 du spectromètre (figure 5.6), sa température est estimée à 3000 K. Le flux émis par la source va chauffer par rayonnement le support de la lampe ainsi que l'iris. Dans le cas du support de la lampe l'émission parasite peut être négligée dans les calculs photométriques. En effet le diamètre du faisceau utile issu de l'iris (6 mm) est très inférieur au diamètre du support de la source (2 mm). Les pixels centraux ne verront donc que la lampe. L'ouverture de

l'iris est l'ouverture que les détecteurs voient. Dans le cas de l'iris, dont la température est estimée à 340 K, une émissivité importante est à prendre en compte. En effet, si on considère le champ de vue d'un pixel, les pixels au bord de la matrice recevront le rayonnement émis par l'iris.

De plus lors des essais, ne disposant pas du miroir primaire M1, nous utilisons une interface entre le spectromètre et la caméra composée d'une lentille et d'un miroir de renvoi de diamètre inférieur au diamètre du miroir M1. Or les détecteurs sont dimensionnés pour voir le miroir M1. Donc la différence entre les diamètres du miroir M1 et MPBFTS est vue par les détecteurs comme du fond à 300 K. Nous sommes dans le même cas que le banc optique pour les essais d'imagerie (section 5.3.1).

Nous avons donc une source modulée (lampe L1), et trois sources non modulées à prendre en compte (support de la lampe, iris, fond à 300 K). Les caractéristiques des sources de laboratoire sont listées dans le tableau 5.9.

i	Elément	Température (K)	Emissivité	Transmission
0	Lampe L1	3000	0.5	-
1	Support Lampe	600	0.1	-
2	Iris I1	340	0.90	-
3	Fond 300 K	300	1	-

TABLE 5.9 – Caractéristiques des sources BFTS.

Sources des éléments du spectromètre

Tous les éléments optiques du spectromètre (figure 5.6) sont sous vide et à températures ambiantes. Les polariseurs par définition transmettent la moitié du flux incident. Et les émissivités sont calculées d'après les lois de conservation d'énergie (équation 3.8) et de rayonnement de Kirchhoff (équation 3.9). Les caractéristiques des éléments optiques du spectromètre sont listées dans le tableau 5.10.

i	Elément	Température (K)	Emissivité	Transmission
4	Miroir M1	300	0.02	0.98
5	Miroir M2	300	0.02	0.98
6	Miroir M3	300	0.02	0.98
7	Polariseur P1	300	0.10	0.50
8	Lame séparatrice BS1	300	0.10	0.90
9	Miroir M4	300	0.02	0.98
10	Miroir M5	300	0.02	0.98
11	Analyseur P2	300	0.10	0.50

TABLE 5.10 – Caractéristiques des éléments optiques du spectromètre.

Sources des optiques de l'interface du BFTS

Les transmissions et les émissivités des optiques, lentille (annexe A.2) et miroir plan, qui composent l'interface du BFTS sont calculées de la même manière que les optiques de l'interface du BCN (section 5.3.1).

Les caractéristiques des éléments optiques de l'interface sont listées dans le tableau 5.11.

i	Elément	Température (K)	Emissivité		Transmission	
			$240\mu m$	$550\mu m$	$240\mu m$	$550\mu m$
12	Azote	300	-		1	
13	lentille	300	0.3666	0.148	0.553	0.772
14	miroir plan	300	0.02		0.98	

TABLE 5.11 – Caractéristiques des éléments optiques de l'interface Spectromètre / caméra PILOT en configuration BFTS. Les caractéristiques de la lentille BFTS sont détaillées en annexe A.2.

Sources des optiques de la caméra PILOT

Dans cette configuration, les éléments optiques de la caméra sont identiques à ceux utilisés lors du vol, comme détaillé dans la section 3.3.1. Les caractéristiques des éléments optiques de la caméra sont identiques à ceux du banc optique BCN, listées dans le tableau 5.3.

5.5.2 Photométrie BFTS

Les éléments du modèle photométrique sont numérotés de 0 à 31. Dans le modèle photométrie la puissance émise par chacun des éléments est calculée afin d'en déduire une estimation totale la puissance reçue sur chaque pixel des détecteurs. Cette puissance est décomposée ci-dessous pour chaque élément du système.

Source Lampe L1 : Elément indice 0

$$P_0 = G_{MPBFTS} \int_{\nu} \varepsilon_0 \left(\prod_{i=4}^{31} \tau_i \right) L_{cn}(\nu, T_0) \eta_{det} \, \mathrm{d}\nu \tag{5.17}$$

Source Support lampe : Elément indice 1

$$P_1 = G_{MPBFTS} \int_{\nu} \varepsilon_1 \left(\prod_{i=4}^{31} \tau_i \right) L_{cn}(\nu, T_1) \eta_{det} \, \mathrm{d}\nu \tag{5.18}$$

Source Iris I1 : Elément indice 2

$$P_2 = G_{MPBFTS} \int_{\nu} \varepsilon_2 \left(\prod_{i=5}^{31} \tau_i \right) L_{cn}(\nu, T_2) \eta_{det} \, \mathrm{d}\nu \tag{5.19}$$

Source Fond 300 K : Elément indice 3

$$P_3 = (G_{M1} - G_{MPBFTS}) \int_{\nu} \varepsilon_3 \left(\prod_{i=15}^{31} \tau_i \right) L_{cn}(\nu, T_3) \eta_{det} \, \mathrm{d}\nu \tag{5.20}$$

Spectromètre : Eléments indices 4 à 11

$$P_{spectrometre} = \sum_{e=4}^{11} \left[G_{MPBFTS} \int_{\nu} \varepsilon_e \left(\prod_{e+1}^{32} \tau_i \right) L_{cn}(\nu, T_e) \eta_{det} \, \mathrm{d}\nu \right] \tag{5.21}$$

Interface Spectromètre/Caméra PILOT : Eléments indices 12 à 14

$$P_{interface} = \sum_{e=12}^{14} \left[G_{MPBFTS} \int_{\nu} \varepsilon_e \left(\prod_{e+1}^{32} \tau_i \right) L_{cn}(\nu, T_e) \eta_{det} \, \mathrm{d}\nu \right] \tag{5.22}$$

Caméra PILOT : Eléments indices 15 à 31

$$P_{camera} = \sum_{e=15}^{31} \left[G_{MPBFTS} \int_{\nu} \varepsilon_e \left(\prod_{e+1}^{32} \tau_i \right) L_{cn}(\nu, T_e) \eta_{det} \, \mathrm{d}\nu \right] \tag{5.23}$$

Caméra PILOT avec fond à 300 K : Eléments indices 15 à 31

$$P_{camera}^{300\ K} = \sum_{e=15}^{31} \left[(G_{M1} - G_{MPBFTS}) \int_{\nu} \varepsilon_e \left(\prod_{e+1}^{32} \tau_i \right) L_{cn}(\nu, T_e) \eta_{det} \, \mathrm{d}\nu \right] \tag{5.24}$$

NB : L'indice 32 est un élément simulé de transmission 1, nécessaire pour compiler le code de simulation numérique du modèle photométrique. Les applications numériques des étendues géométriques G_{M1} et G_{MPBFTS} sont en annexe B.2.1.

Puissance totale en configuration BFTS

$$P_{totale} = P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + P_{spectrometre} + P_{interface} + P_{camera} + P_{camera}^{300\ K} \tag{5.25}$$

5.5.3 Résultat et conclusion BFTS

La simulation photométrique donnent les résultats pour les mesures effectuées en co-polarisation et en cross-polarisation (tableaux 5.12 et 5.13). Les résultats suivant ces deux plans de polarisation sont sensiblement identiques. Pour la largeur de bande à 240 µm, une puissance totale reçue sur chaque pixel du détecteur est alors environ comprise entre 52 pW et 137 pW, et pour la largeur de bande à 550 µm, nous obtenons une puissance totale environ comprise entre 55 pW et 63 pW.

Emission thermique	Puissance sur un pixel (pW)		
	$240\mu m$		$550\mu m$
	Filtres jeu n°1	Filtres jeu n°2	
Coefficient d'absorption α	$[\alpha_{max}\,;\,\alpha_{min}]$	$[\alpha_{max}\,;\,\alpha_{min}]$	$[\alpha_{max}\,;\,\alpha_{min}]$
Lampe Hg	[0.5 ; 1.2]	[0.5 ; 1.1]	[0.67 ; 0.74]
Support Lampe Hg	[2.0e-2 ; 4.6e-2]	[1.8e-2 ; 4.2e-2]	[2.6e-2 ; 2.9e-2]
Iris I1	[0.1 ; 0.2]	[0.1 ; 0.2]	[0.14 ; 0.15]
Spectromètre	[0.1 ; 0.2]	[0.1 ; 0.2]	[0.14 ; 0.16]
Interface BFTS	[0.3 ; 0.8]	[0.3 ; 0.7]	[0.14 ; 0.15]
Caméra	[2.4e-2 ; 5.5e-2]	[2.2e-2 ; 5.0e-2]	[1.9e-2 ; 2.1e-2]
Fond 300K	[54.6 ; 127.6]	[49.8 ; 116.4]	[53.5 ; 58.9]
Caméra 300K	[1.5 ; 3.5]	[1.4 ; 3.2]	[1.2 ; 1.3]
Totale	[57.2 ; 133.7]	[52.2 ; 122.0]	[55.9 ; 61.5]

TABLE 5.12 – Résultats en configuration BFTS, dans le cas CO-polarisation et en fonction du coefficient d'absorption α du polypropylène.

Emission thermique	Puissance sur un pixel (pW)		
	$240\mu m$		$550\mu m$
	Filtres jeu n°1	Filtres jeu n°2	
Coefficient d'absorption α	$[\alpha_{max}\,;\,\alpha_{min}]$	$[\alpha_{max}\,;\,\alpha_{min}]$	$[\alpha_{max}\,;\,\alpha_{min}]$
Lampe Hg	[0.5 ; 1.2]	[0.5 ; 1.1]	[0.7 ; 0.8]
Support Lampe Hg	[2.0e-2 ; 4.7e-2]	[1.9e-2 ; 4.3e-2]	[2.7e-2 ; 3.0e-2]
Iris I1	[0.1 ; 0.2]	[0.1 ; 0.2]	[0.1 ; 0.2]
Spectromètre	[0.1 ; 0.3]	[0.1 ; 0.2]	[0.15 ; 0.16]
Interface BFTS	[0.3 ; 0.8]	[0.3 ; 0.7]	[0.1 ; 0.2]
Caméra	[2.4e-2 ; 5.6e-2]	[2.2e-2 ; 5.2e-2]	[2.0e-2 ; 2.2e-2]
Fond 300K	[55.8 ; 130.5]	[51.0 ; 119.2]	[54.9 ; 60.4]
Caméra 300K	[1.5 ; 3.6]	[1.4 ; 3.3]	[1.3 ; 1.4]
Totale	[58.5 ; 136.7]	[53.4 ; 124.9]	[57.3 ; 63.0]

TABLE 5.13 – Résultats en configuration BFTS, dans le cas CROSS-polarisation et en fonction du coefficient d'absorption α du polypropylène.

Nous remarquons que la puissance totale est dominée par l'émission thermique du fond à 300 K. Et sachant que la gamme de fonctionnement des détecteurs PACS est comprise entre 1 et 7 pW, il est indispensable d'ajouter un atténuateur pour ne pas saturer les détecteurs. Pour un choix précis du facteur d'atténuation, nous prenons comme référence la gamme de fonctionnement de l'instrument en vol estimée dans la section 3.3.3. Après calcul le facteur d'atténuation estimé pour le BFTS est de 24.9 à 240 µm et de 27.8 à 550 µm (tableau 5.14).

		$240\mu m$		$550\mu m$
		filtres jeu n°1	filtres jeu n°2	
		$[\alpha_{max}\,;\,\alpha_{min}]$	$[\alpha_{max}\,;\,\alpha_{min}]$	$[\alpha_{max}\,;\,\alpha_{min}]$
Puissance sur un pixel (pW)	BFTS copol	[57.2 ; 133.7]	[52.2 ; 122.0]	[55.9 ; 61.5]
	BFTS xpol	[58.5 ; 136.7]	[53.4 ; 124.9]	[57.3 ; 63.0]
	VOL copol	[2.3 ; 5.4]	[2.1 ; 4.9]	[2.0 ; 2.2]
	VOL xpol	[2.4 ; 5.5]	[2.2 ; 5.0]	[2.1 ; 2.3]
	det. PACS	[1 ; 7]	[1 ; 7]	-
Atténuateur	$P^{copol}_{BFTS}/P_{PACS}$	[57.2 ; 19.1]	[52.1 ; 17.4]	-
	P^{xpol}_{BFTS}/P_{PACS}	[58.5 ; 19.5]	[53.4 ; 17.8]	-
	$P^{copol}_{BFTS}/P^{copol}_{VOL}$	24.9	24.9	27.8
	$P^{xpol}_{BFTS}/P^{xpol}_{VOL}$	24.9	24.9	27.8

TABLE 5.14 – Atténuateur pour le banc optique BFTS.

5.6 Conclusion et atténuateur

5.6.1 Conclusion

Les estimations du modèle photométrique réalisées pour les bancs optiques des essais au sol à l'IAS, montrent un flux important reçu sur chaque pixel du détecteur. Celui-ci est en dehors de la gamme de fonctionnement nominale des détecteurs, il est donc essentiel d'installer au niveau de l'optique froide et sur le chemin optique un atténuateur afin de ne pas saturer les détecteurs. L'atténuateur est utilisé uniquement pour les mesures des essais au sol, il sera retiré pour les mesures en vol. Pour rappel, en prenant comme référence la gamme de fonctionnement de l'instrument en vol, il faut utiliser le facteur d'atténuation écrit dans le tableau 5.15.

Bancs optiques	Facteur d'atténuation	
	240 μm	550 μm
BCN	25.4	28.9
BFTS	24.9	27.8

TABLE 5.15 – Facteur d'atténuation de l'atténuateur pour bancs optiques.

Sur la bande spectrale centrée à 240 µm, il est décidé du choix d'un atténuateur commun aux tests d'imagerie et de mesure spectrale, pour les bancs optiques BCN et BFTS. Pour un atténuateur unique, nous utiliserons un facteur d'atténuation égal à 25, soit une transmission atténuateur τ_{att}=0.04. Lors de la futur campagne d'étalonnage sur la bande spectrale centrée à 550 µm, le facteur d'atténuation de l'atténuateur devra être égal à 28, soit une transmission atténuateur τ_{att}=0.0357.

En faisant les calculs de photométrie avec l'atténuateur en position, nous obtenons bien des valeurs comprises dans la gamme de fonctionnement des détecteurs entre 1 pW et 7 pW (tableau 5.16).

Emission thermique	Puissance sur un pixel (pW)		
	240 μm		550 μm
	Filtres jeu n°1	Filtres jeu n°2	
Coefficient d'absorption α	$[\alpha_{max}\,;\,\alpha_{min}]$	$[\alpha_{max}\,;\,\alpha_{min}]$	$[\alpha_{max}\,;\,\alpha_{min}]$
VOL copol	[2.3 ; 5.4]	[2.1 ; 4.9]	[2.0 ; 2.2]
BCN copol	[2.3 ; 5.5]	[2.1 ; 5.0]	[2.1 ; 2.3]
BFTS copol	[2.3 ; 5.4]	[2.1 ; 4.9]	[2.0 ; 2.2]
VOL xpol	[2.4 ; 5.5]	[2.2 ; 5.0]	[2.1 ; 2.3]
BCN xpol	[2.4 ; 5.6]	[2.1 ; 5.1]	[2.1 ; 2.3]
BFTS xpol	[2.3 ; 5.5]	[2.1 ; 5.0]	[2.0 ; 2.3]

TABLE 5.16 – Simulation photométrique avec atténuateur pour les bancs optiques BCN et BFTS

Du fait du choix d'un seul atténuateur, et donc d'estimation, certaines valeurs aux bornes sont soient inférieures soit supérieurs aux bornes de la gamme de fonctionnement des détecteurs estimée en vol, cependant les estimations sont bien comprises dans la gamme de fonctionnement des détecteurs entre 1 et 7 pW.

5.6.2 Atténuateur

Suite à la simulation photométrique nous avons lancé la fabrication de l'atténuateur avec la caractéristique d'atténuation d'un facteur compris entre 25 et 30, atténuateurs que nous allons utiliser lors des essais en laboratoire. Nous avons reçu deux échantillons d'atténuateurs de deux modèles différents. Les échantillons sont des grilles capacitives à barreaux métalliques (figure 5.11). Deux échantillons du modèle 133-13 (nommés N°1 et N°2), et deux échantillons du modèle 170-17 (nommés N°3 et N°4). Le premier nombre correspond au pas de la grille et le second à la largeur du barreau de la grille.

J'ai caractérisé ces échantillons, le but étant de mesurer la transmission des atténuateurs dans les bandes spectrales spécifique à la caméra, et d'en déduire quel échantillon utiliser. J'ai donc fait des mesures de transmission des échantillons d'atténuateurs avec un spectromètre à transformée de Fourier (figure 5.12).

Les mesures de transmission donnent un modèle d'atténuateur qui transmet à 5% et un autre à 9% (tableau 5.17). D'après mes estimations du flux reçu sur un pixel, nous allons utiliser le modèle qui transmet à 5%. Pour rappel, le facteur d'atténuation estimé est égale à 25, ce qui correspond à une transmission de l'atténuateur de 4%.

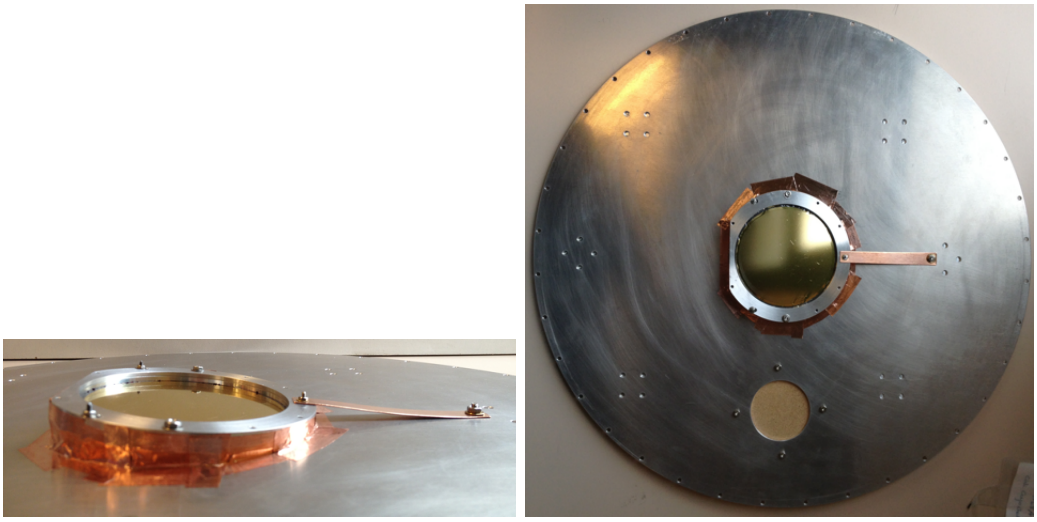


FIGURE 5.11 – Filtre atténuateur intégré sur l'écran thermique 2K (vue de profil et de haut).

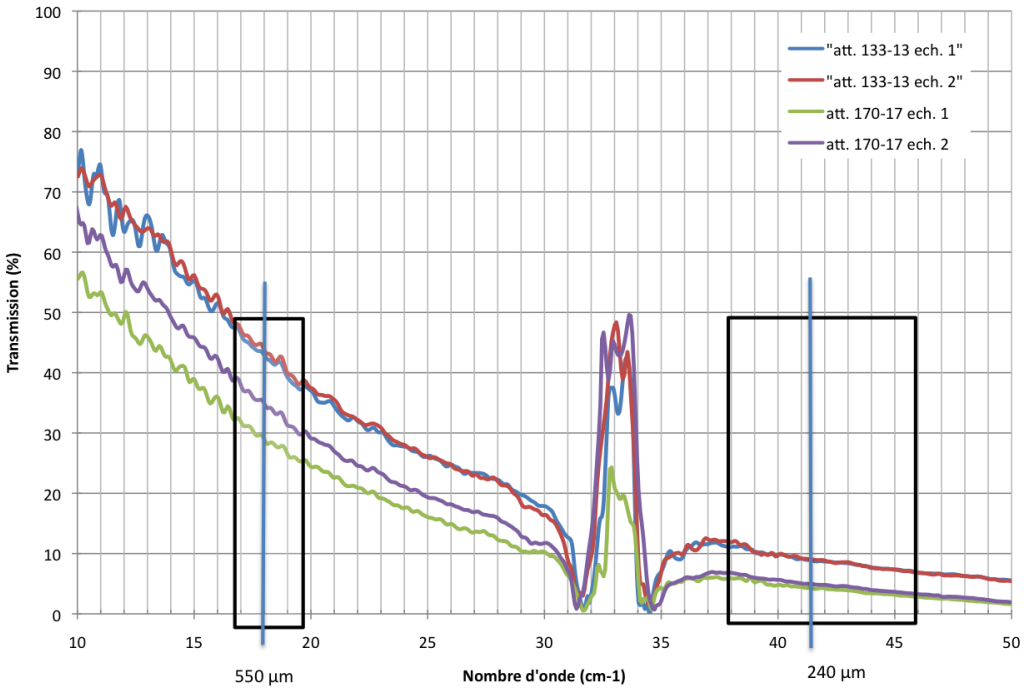


FIGURE 5.12 – Transmission des échantillons de l'atténuateur. Le pic entre 31 cm^{-1} et 35 cm^{-1} n'est pas réel et est dû au zéro de transmission de la séparatrice à 100 µm du spectromètre à transformée de Fourier.

	Bande spectrale			Transmission (%)				Atténuation			
	µm	cm^{-1}	GHz	n°1	n°2	n°3	n°4	n°1	n°2	n°3	n°4
20%	216	46.3	1389	7	7	3	3	14	14	33	33
	240	**41.7**	**1250**	**9**	**9**	**5**	**5**	**11**	**11**	**20**	**20**
	264	37.9	1136	12	12	7	7	8	8	14	14
33%	459	21.8	653	38	38	25	30	3	3	4	3
	550	**18.2**	**545**	**42**	**42**	**28**	**34**	**2**	**2**	**4**	**3**
	641	15.6	468	47	47	32	38	2	2	3	3

TABLE 5.17 – Transmission des échantillons de l'atténuateur

Chapitre 6

La campagne d'étalonnage de la caméra PILOT

Sommaire

6.1 Imagerie **91**
6.1.1 Alignement optique 91
6.1.2 Les essais et résultats 92
6.2 Etalonnage spectral **93**
6.2.1 Alignement optique 93
6.2.2 Les essais et résultats 95

6.1 Imagerie

6.1.1 Alignement optique

Les essais fonctionnels nous ont permis de vérifier le bon alignement des optiques froides de la caméra par la détection de la source ICS, c'est à dire de l'ICS jusqu'aux détecteurs. Maintenant il faut vérifier l'alignement de toutes les optiques de la caméra, de la fenêtre d'entrée jusqu'aux détecteurs. Pour cela nous disposons de l'interface BCN et de la source. Nous voulons pouvoir visualiser une image de la source BCN sur chaque matrice des détecteurs. Cela confirmera l'alignement des optiques de la caméra. Nous devons avant tout aligner la source, l'interface BCN et la caméra.

Lors de l'intégration, des billes de référence ont été fixées sur l'enveloppe extérieure de la caméra et sur l'interface BCN. Précédemment, nous avons aligné les optiques froides de la caméra (section 2.3.6) et repéré les positions du foyer F_1 et des billes de référence de la caméra dans le même repère OCP (Caillat and Buttice 2012). Puis nous avons aligné les optiques de l'interface BCN, et de la même façon nous avons repéré les positions du foyer image F_{BCN} de la source et des billes de référence fixées sur l'interface dans le repère OBCN (figure 6.1). Maintenant nous devons aligner l'interface et la caméra de façon à ce que les deux précédents foyer F_1 et F_{BCN} soient confondus. Pour cela un laser

de poursuite est utilisé pour repère en temps réel les positions des billes de référence de la caméra et de l'interface dans un repère commun. Nous connaissons alors les positions des foyers de la caméra et de l'image source dans ce repère, et grâce à des platines de réglage de l'interface BCN nous pouvons déplacer la position du foyer image F_{BCN} de la source et le confondre avec le foyer F_1 de la caméra. Ceci a permis l'alignement de façon précise de la source de l'interface BCN et l'axe optique principal de la caméra (figure 5.3).

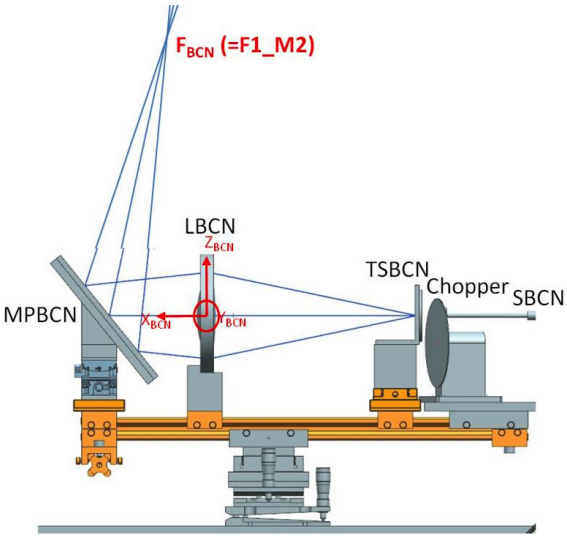


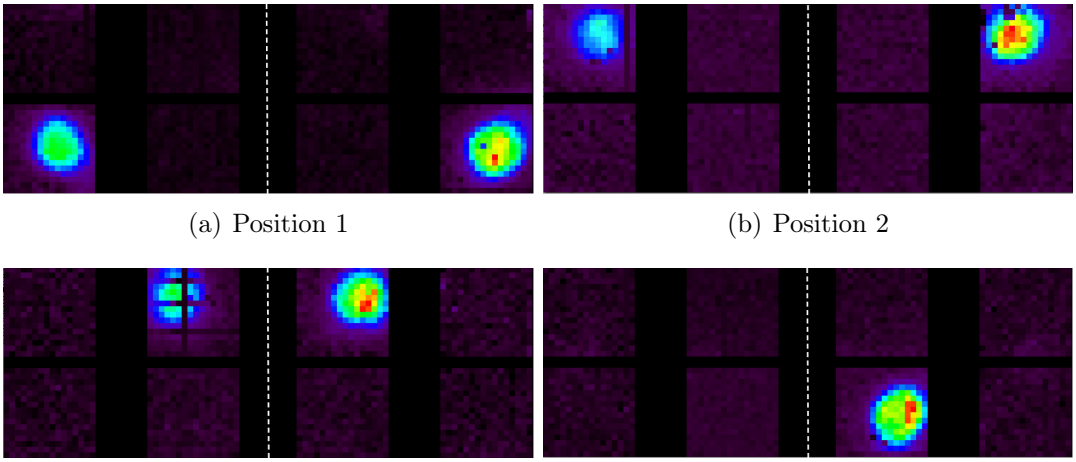
FIGURE 6.1 – Alignement optique de l'interface BCN.

6.1.2 Les essais et résultats

Détection et observation de la tache image

Le banc optique étant aligné, nous pouvons commencer les mesures en imagerie. La source est allumée à une température de 450°C et éclaire donc le plan focal de la caméra. Il est nécessaire d'allumer le chopper placé dans le faisceau pour moduler le signal et visualiser son signal sur les détecteurs. Nous obtenons une image que nous positionnons successivement au centre de chaque matrice du bloc détecteur en transmission. Pour chaque image transmise, celle-ci est réfléchie par la séparatrice de la caméra sur les matrices du bloc détecteur en réflexion. Le réglage de la positon de l'image se fait avec les vis micrométriques du miroir plan de l'interface BCN. La figure 6.2 représente quatre positions sur le plan focal. Sur ces images, les matrices en transmission et en réflexion sont numérotées de la manière suivante :

Transmission		Réflexion	
2	6	4	8
1	5	3	7



(a) Position 1 (b) Position 2

(c) Position 3 (d) Position 4

FIGURE 6.2 – Image de la source du BCN. Pour les quatre positons, nous observons l'image sur une matrice en transmission et en réflexion. A noter que pour la quatrième position, l'image n'est pas observable, la matrice n°5 n'étant pas opérationnelle.

Comparaison de la tache image avec la PSF simulée

Pour une source BCN de diamètre égale à 2 mm, la largeur à mi-hauteur de la tache image est d'environ 4 pixels sur chaque matrice. Le tableau 6.1 donne les résultats sur chaque matrice.

Matrice	1	2	3	4	5	6	7	8
Pixels	4	3	4	4	-	3	4	4

TABLE 6.1 – Largeur à mi-hauteur de la tache image arrondie à un nombre entier de pixels.

Ce résultat est du même ordre de grandeur que le résultat obtenu lors de la simulation de la PSF pour une source de diamètre égale à 2 mm. En effet la largeur à mi-hauteur de la PSF estimée est égale à 3.4 pixels sur une matrice (image 6.3).

Le résultat de ces essais confirme le bon alignement de l'optique interne à la caméra PILOT.

6.2 Etalonnage spectral

6.2.1 Alignement optique

Les platines de réglage de l'interface BCN étant communes à l'interface BFTS, le remplacement du rail de support des optiques de l'interface BCN par celui de l'interface BFTS optimise l'alignement du banc optique BFTS. Les foyers optiques F_1 de la caméra et F_{BFTS} sont rapidement confondus, et le banc optique aligné (figure 5.10).

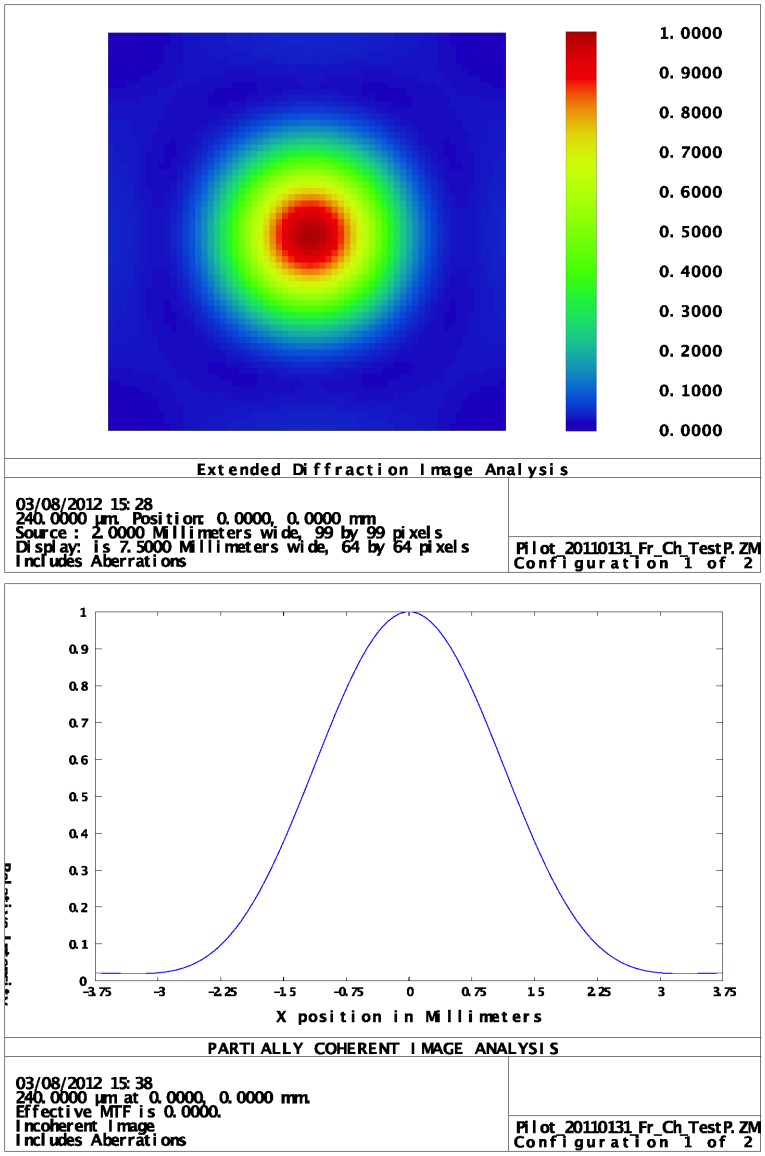


FIGURE 6.3 – Simulation de la PSF de la source du BCN.

La source submillimétrique interne du spectromètre éclaire deux matrices par plan focal en un alignement. Le réglage de la positon du miroir plan de l'interface BFTS déplace la tache image sur les deux autres matrices par plan focal. Donc pour éclairer la totalité des matrices, deux réglages de la position du miroir de l'interface BFTS sont nécessaires. La figure 6.4 montre une visualisation de l'éclairement des matrices 1 et 2. Pour cet éclairement, l'alignement de la source est sur les matrices 1, 2, 7 et 8, les grilles des polariseurs du spectromètre sont en position verticale et la lame demi-onde est en position 5. Comme attendu par la fonction polarimètre de la caméra, uniquement les matrices 1 et 2 sont éclairées. En position 5 de la lame demi-onde les matrices 7 et 8 sont éclairées. Et inversement lorsque les grilles des polariseurs du spectromètre sont en position horizontale. Cette fonction de polarimètre est vérifiée dans la section 6.2.2.

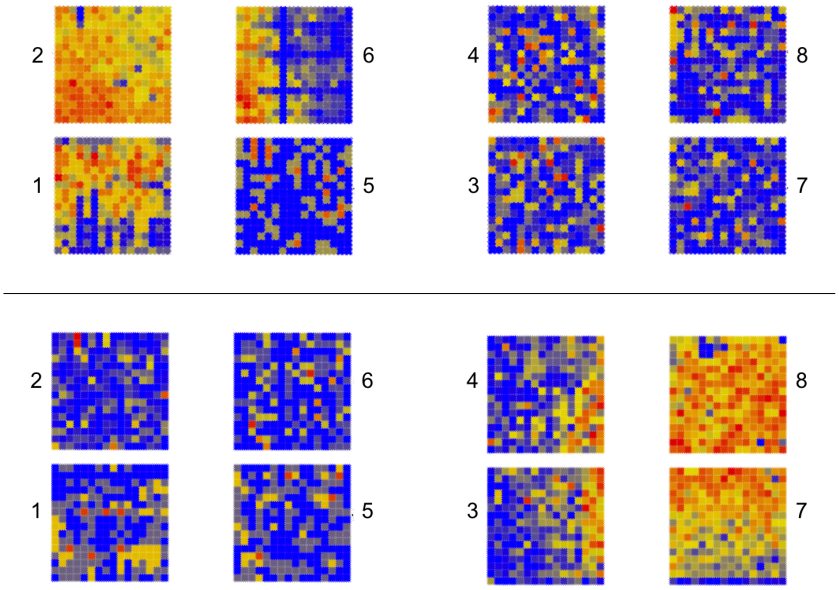


FIGURE 6.4 – Eclairement de la source sur les matrices 1 et 2, puis 7 et 8 par la rotation de la lame demi-onde.

6.2.2 Les essais et résultats

Déroulement d'une mesure d'étalonnage

Le miroir mobile du spectromètre se déplace entre 2 positions à une vitesse constante, et il effectue des allers et retours suivant le nombre de balayage paramétré. Puis il répète le même déplacement suivant le nombre de position de la lame demi-onde choisi avec une pause entre chaque répétition, le temps que la lame demi-onde change de position et refroidisse. En parallèle la lame demi-onde initialement en position 1 se déplacera vers les positions choisies successivement, avec une pause entre chaque position, le temps que le miroir mobile effectue ses déplacements d'allers et retours (figure 6.5).

Deux séries d'essais ont été réalisées. Pour la première série, la réponse spectrale est mesurée en paramétrant dix balayages du miroir mobile du spectromètre, et successivement sur toutes les positions de la lame demi-onde. Pour la seconde série, la réponse spectrale est mesurée en paramétrant cent balayages du miroir mobile, et uniquement sur les positions 1, 3 et 5 de la lame-demi onde. Nous avons augmenté le nombre balayage du miroir mobile afin d'améliorer le rapport signal/bruit uniquement sur trois positions de la lame demi-onde représentatives d'un niveau maximum, intermédiaire et minimum de la réponse spectrale de la caméra.Pour chaque série d'essais, la réponse spectrale est mesurée suivant un plan de polarisation incident soit vertical soit horizontal, et éclairant toutes les matrices des plans focaux (tableau 6.2).

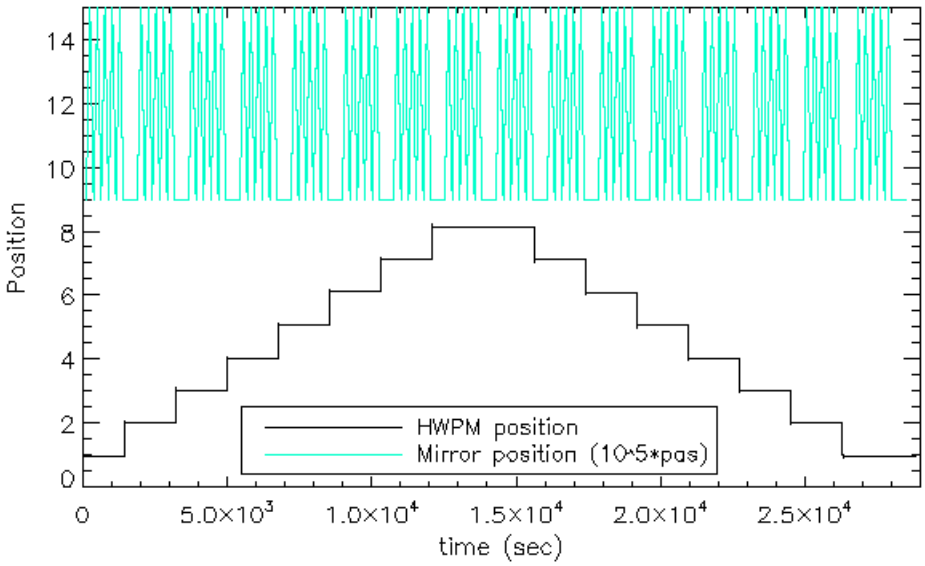


FIGURE 6.5 – Position du miroir mobile du spectromètre et de la lame demi-onde, dans le cas d'une translation du miroir égale à 6 cm et des huit positions de la lame demi-onde.

Plan de polarisation incident	Numéro de matrices	Position HWP	Miroir mobile Vitesse de translation (pas/s)	Nombre de balayage	Course (cm)
Vertical	1 2 7 8	1 à 8	4800	5*2	9 à 15
Vertical	3 4 5 6	1 à 8	4800	5*2	9 à 15
Horizontal	1 2 7 8	1 à 8	4800	5*2	9 à 15
Horizontal	3 4 5 6	1 à 8	4800	5*2	9 à 15
Vertical	1 2 7 8	1 3 5	4800	50*2	9 à 15
Vertical	3 4 5 6	1 3 5	4800	50*2	9 à 15
Horizontal	1 2 7 8	1 3 5	4800	50*2	9 à 15
Horizontal	3 4 5 6	1 3 5	4800	50*2	9 à 15

TABLE 6.2 – Campagne d'étalonnage spectral. Le nombre de balayage correspond aux allers et retours du miroir mobile du spectromètre.

Mesure de la réponse spectrale de la caméra à 240 µm

Durant une mesure de la réponse spectrale de la caméra, pour un balayage du miroir mobile du spectromètre et pour une position de lame demi-onde donnée, les 2048 bolomètres détectent le signal simultanément. L'ordinateur de bord stocke les 2048 vecteurs de données spécifiques à la réponse correspondant aux bolomètres. Pour avoir une idée du nombre de vecteurs à traiter il correspond au nombre de vecteurs multiplié par le nombre de balayage du miroir mobile et par le nombre position de la lame demi-onde. De plus sachant qu'il faut deux alignements différents pour éclairer les 2 plans focaux entièrement et que les mesures sont faites avec une source submillimétrique éclairant suivant un plan de polarisation horizontal puis vertical en sortie du spectromètre, le nombre de vecteurs est de nouveau multipliés par deux. Soit pour la mesure avec le meilleur rapport signal à bruit un total de 2 457 600 vecteurs. Ces vecteurs sont rangés

sous forme de huit cubes qu'il faut traiter numériquement pour en calculer la réponse spectacle.

Le code de traitement des données développé pour calculer la réponse spectrale de la caméra PILOT est détaillé en annexe D.4. De façon simplifiée il commence par construire 2048 interférogrammes pour les 2048 pixels et pour chaque balayage du miroir mobile. Puis il moyenne les interférogrammes en fonction du nombre de balayage du miroir mobile et par matrice. Enfin il calcule la réponse spectrale par une transformée de Fourier pour chaque matrice. Le code répète l'opération pour chaque position de la lame demi-onde paramétrée, et pour chaque orientation du plan de polarisation incident.

En prenant comme exemple les résultats obtenus pour une mesure uniquement sur la matrice 1, je vais expliquer le déroulement du traitement de données. Pour cette mesure le faisceau incident a un plan de polarisation horizontal, la lame demi-onde est en position 5, et le faisceau est aligné afin d'éclairer la matrice 1.

Le code construit pour chaque pixel un interférogramme de longueur correspondant au déplacement du miroir mobile (figure 6.6(a)). Il moyenne les interférogrammes obtenus pour chaque pixel suivant le nombre de balayage du miroir mobile (figure 6.6(b)). La figure 6.7 est une représentation en deux dimensions des interférogrammes moyennées de la matrice 1. Puis le code moyenne de nouveau les interférogrammes par région, sur la figure 6.6(c) la région sélectionnée est la matrice 1 entière. La moyenne des interférogrammes améliore le rapport signal/bruit.

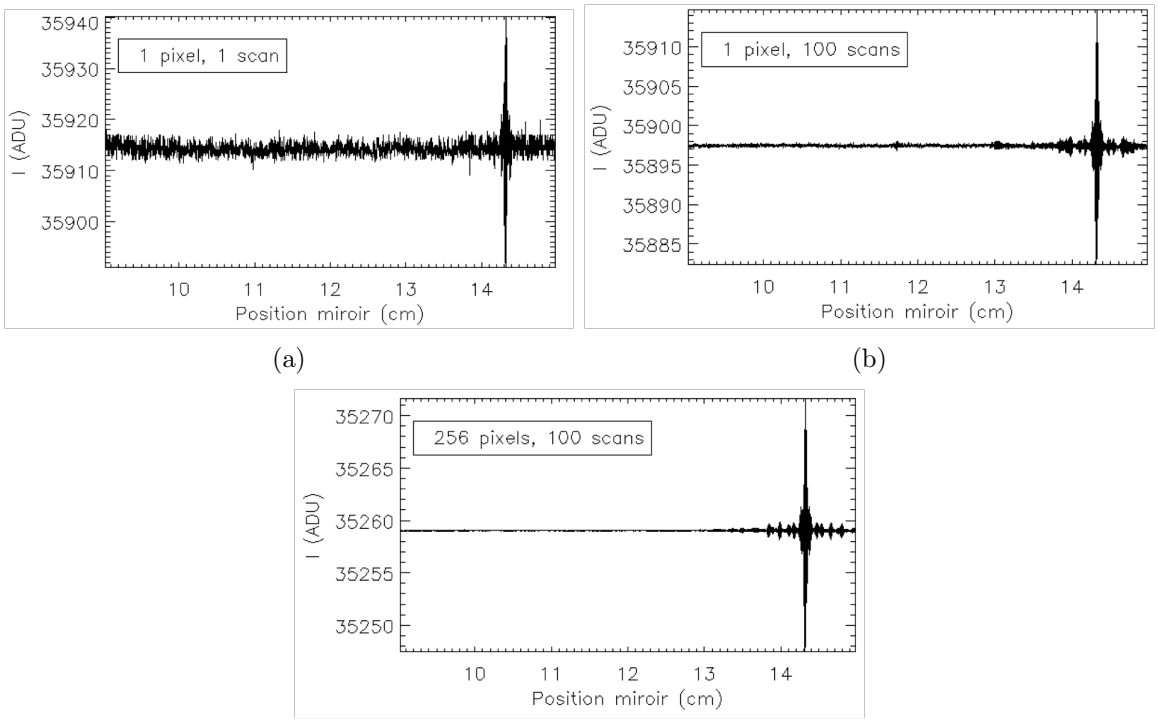


FIGURE 6.6 – Comparaison d'interférogrammes de la matrice 1.

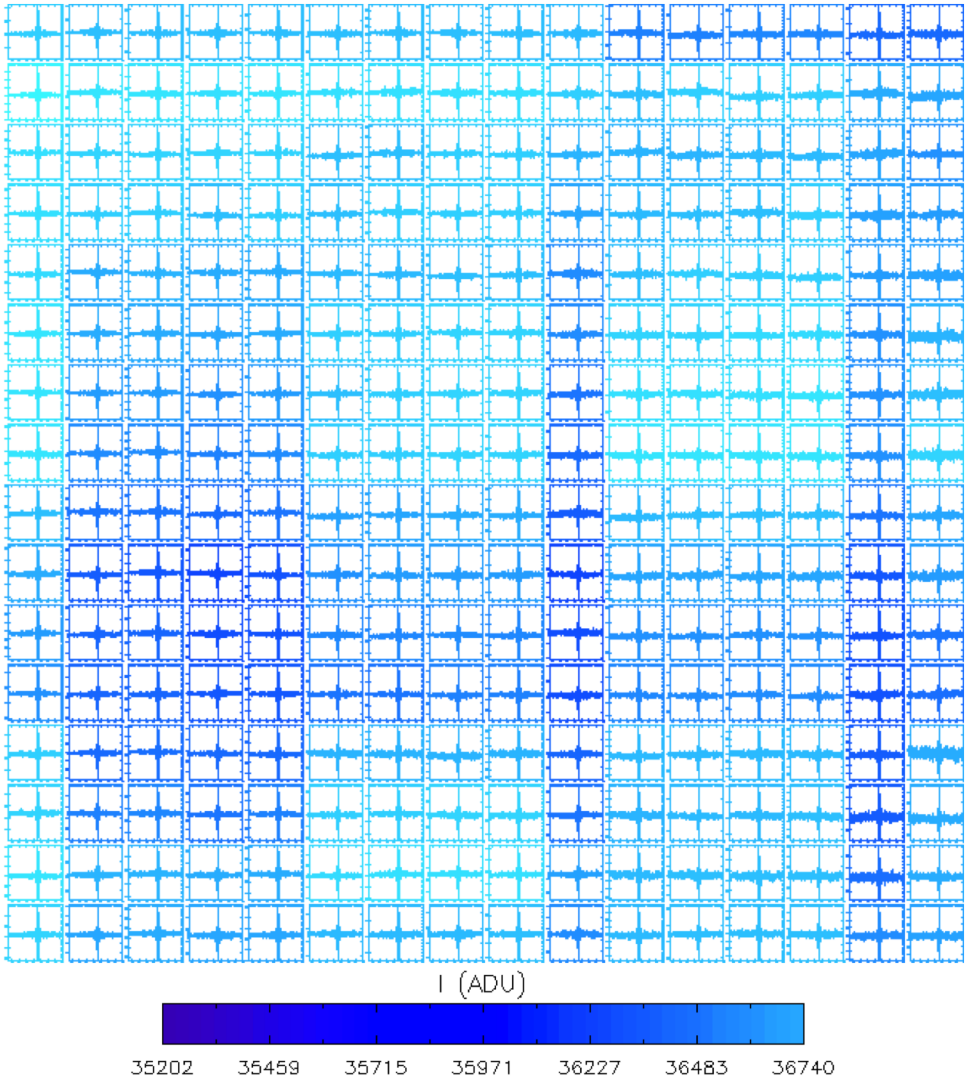


FIGURE 6.7 – Représentation en 2D des interférogrammes de la matrice 1 centrés autour de la différence de marche nulle. Le code couleur est basé sur le pic des interférogrammes.

Enfin le code calcule la transformée de Fourier de l'interférogramme obtenu (figure 6.8). Le spectre à 240 µm mesuré est bien dans la bande attendue.

Validation de l'absence de fuite spectrale

Par une observation de la réponse spectacle sur chaque matrice et sur un large intervalle spectral, nous validons l'absence de fuite spectrale entre 30 µm et 1800 µm. La figure 6.9 est l'exemple de la matrice 1.

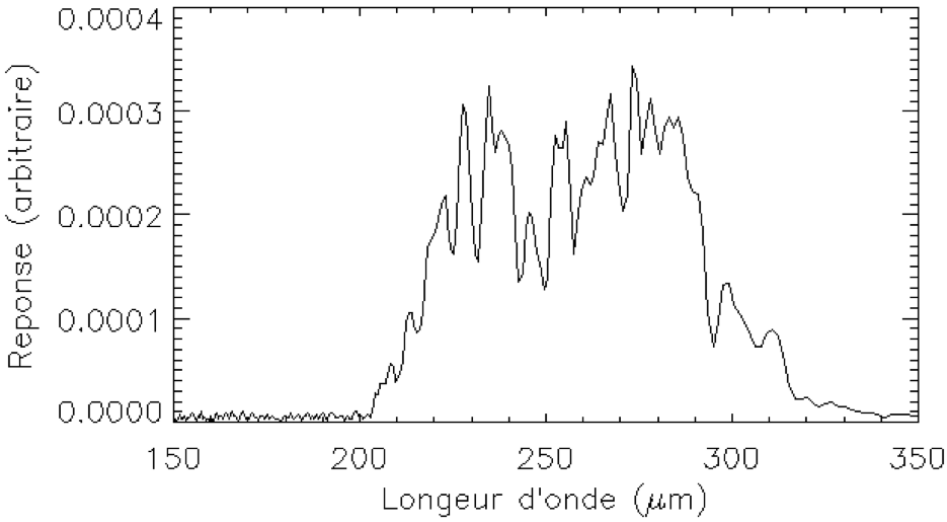


FIGURE 6.8 – Réponse spectrale de la matrice 1.

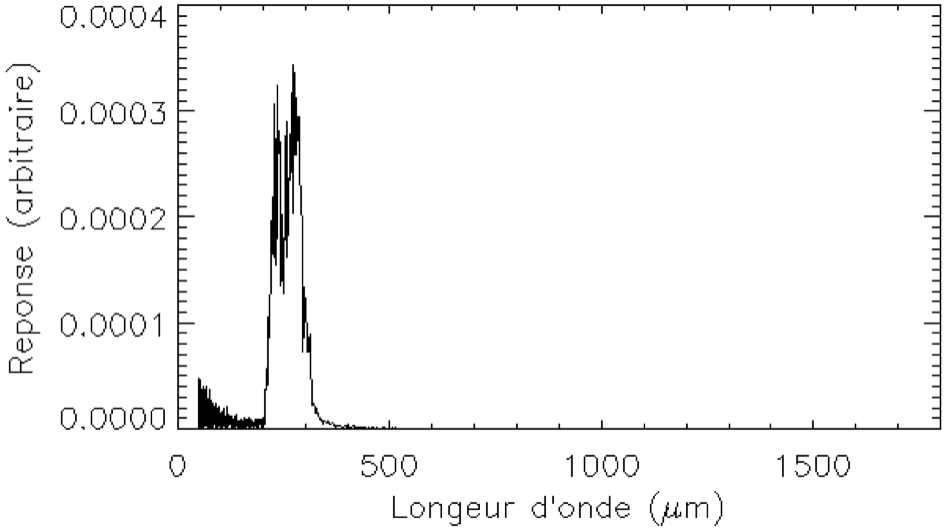


FIGURE 6.9 – Réponse spectrale de la matrice 1 sur un large intervalle spectral.

Validation du mode polarimètre de la caméra

Il existe 16 combinaisons d'orientations du plan de polarisation incident, cela en fonction de la position des polariseurs du spectromètre, et de la position de la lame demi-onde. Le spectromètre permet d'orienter le plan de polarisation incident dans deux directions 0° ou 90°, et la lame demi-onde dans huit directions entre 0° et 180°. Un angle entre deux postions de la lame demi-onde est égal à 11.25°, cela induit une rotation de 22.5° du plan de polarisation incident.

Pour un plan de polarisation en sortie du spectromètre, nous faisons tourner successivement la lame demi-onde sur ses huit positions. Le faisceau polarisé incident traverse la

séparatrice de la caméra qui est transmis ou réfléchie sur les plan focaux. La figure 6.10 montre l'évolution de la réponse spectrale suivant trois positions de la lame demi-onde pour la matrice 1.

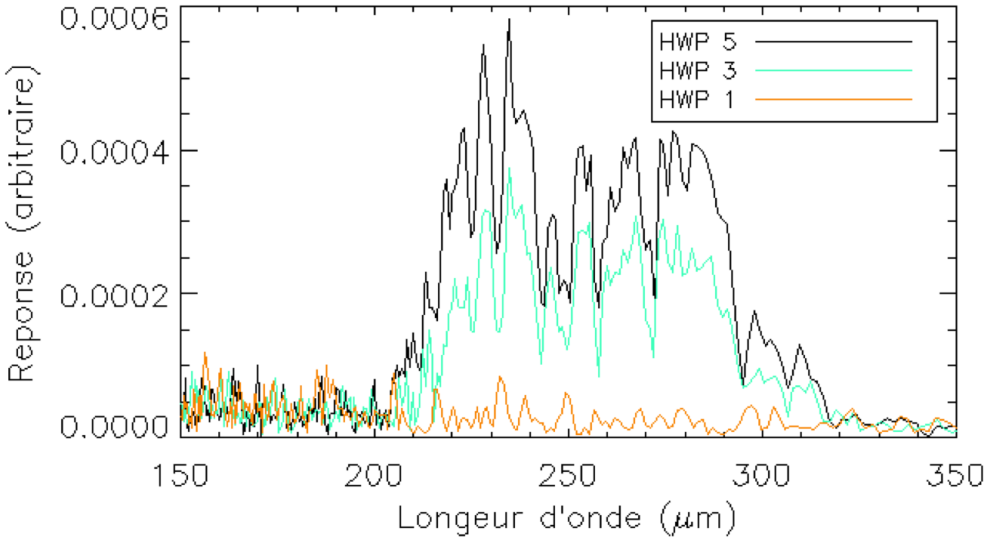


FIGURE 6.10 – Evolution de la réponse spectrale de la matrice 1 en fonction de la position de la lame demi-onde, pour un seul balayage du miroir mobile.

Les maximums des réponses spectrales suivant les matrices de détecteurs sont listés dans le tableau 6.2.2 en fonction du plan de polarisation et de la position de la lame demi-onde.

Plan de polarisation incident	Position HWP	Matrices	Plan focal
Horizontales	1 et 8	3, 4, 7 et 8	Réflexion
Horizontales	5	1, 2, 5 et 6	Transmission
Verticales	1 et 8	1, 2, 5 et 6	Transmission
Verticales	5	3, 4, 7 et 8	Réflexion

TABLE 6.3 – Réponses spectrales maximales suivant les matrices en fonction du plan de polarisation et de la position de la lame demi-onde.

Les figures 6.14, 6.12, 6.13 et 6.11 représentent les réponses spectrales maximales et minimales suivant les configurations correspondantes. Les résultats valident le mode polarimètre de la caméra, le faisceau polarisé incident est soit transmis soit réfléchis sur les détecteurs positionnés orthogonalement.

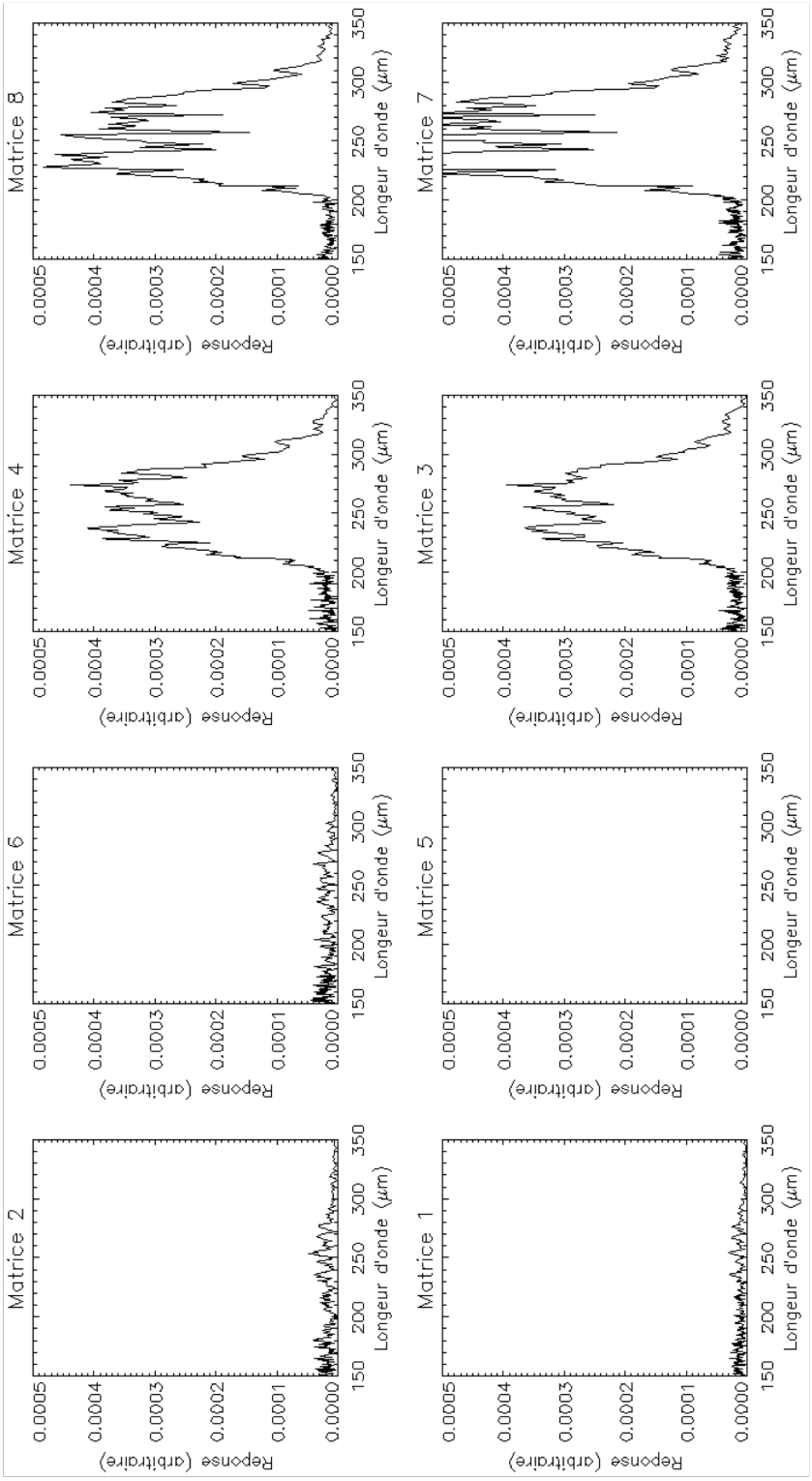


FIGURE 6.11 – Réponses spectrales en fonction du plan de polarisation incident horizontal et de la position 1 de HWP. Le résultat est similaire en position 8 de HWP.

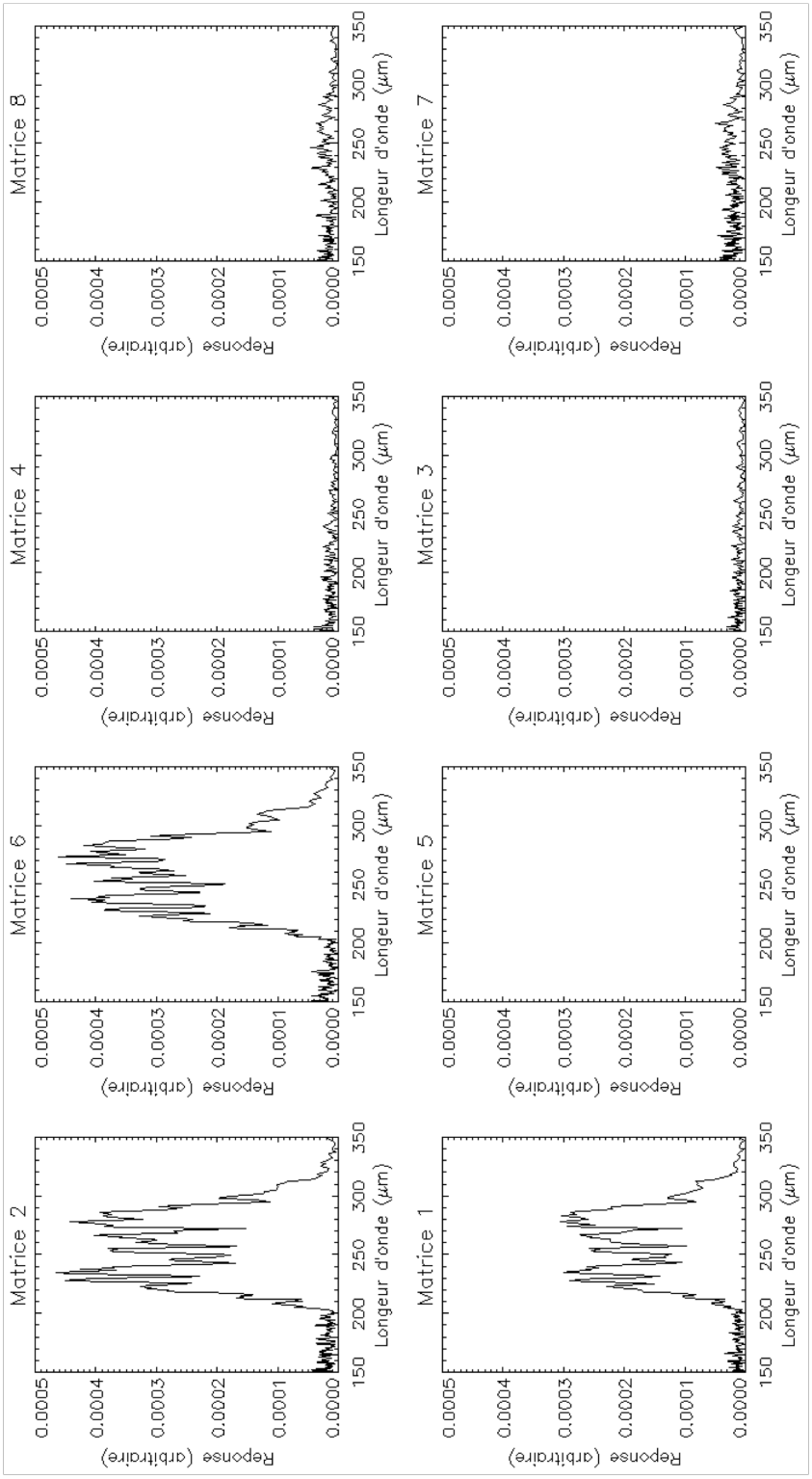


FIGURE 6.12 – Réponses spectrales en fonction du plan de polarisation incident horizontal et de la position 5 de HWP.

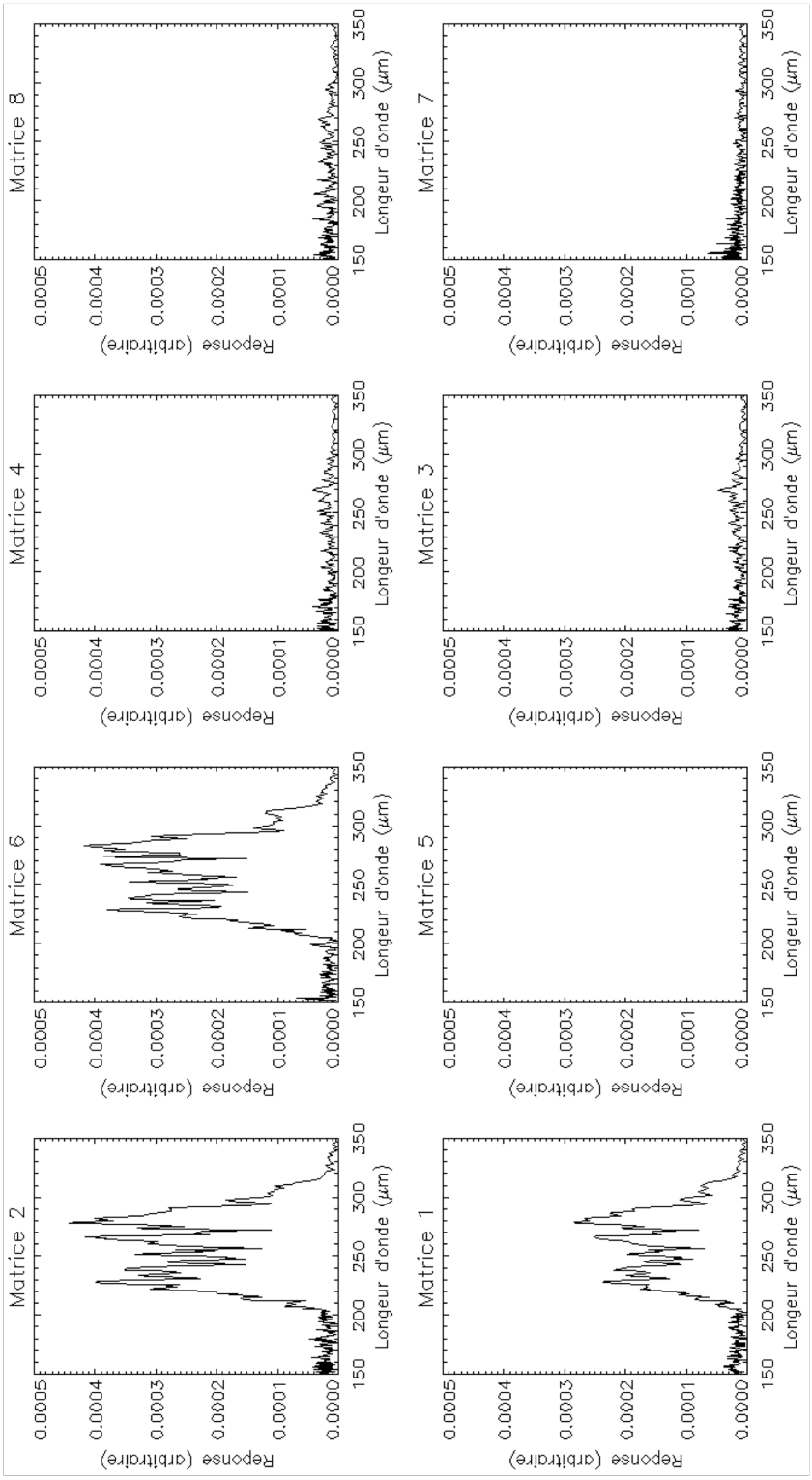


FIGURE 6.13 – Réponses spectrales en fonction du plan de polarisation incident vertical et de la position 1 de HWP. Le résultat est similaire en position 8 de HWP.

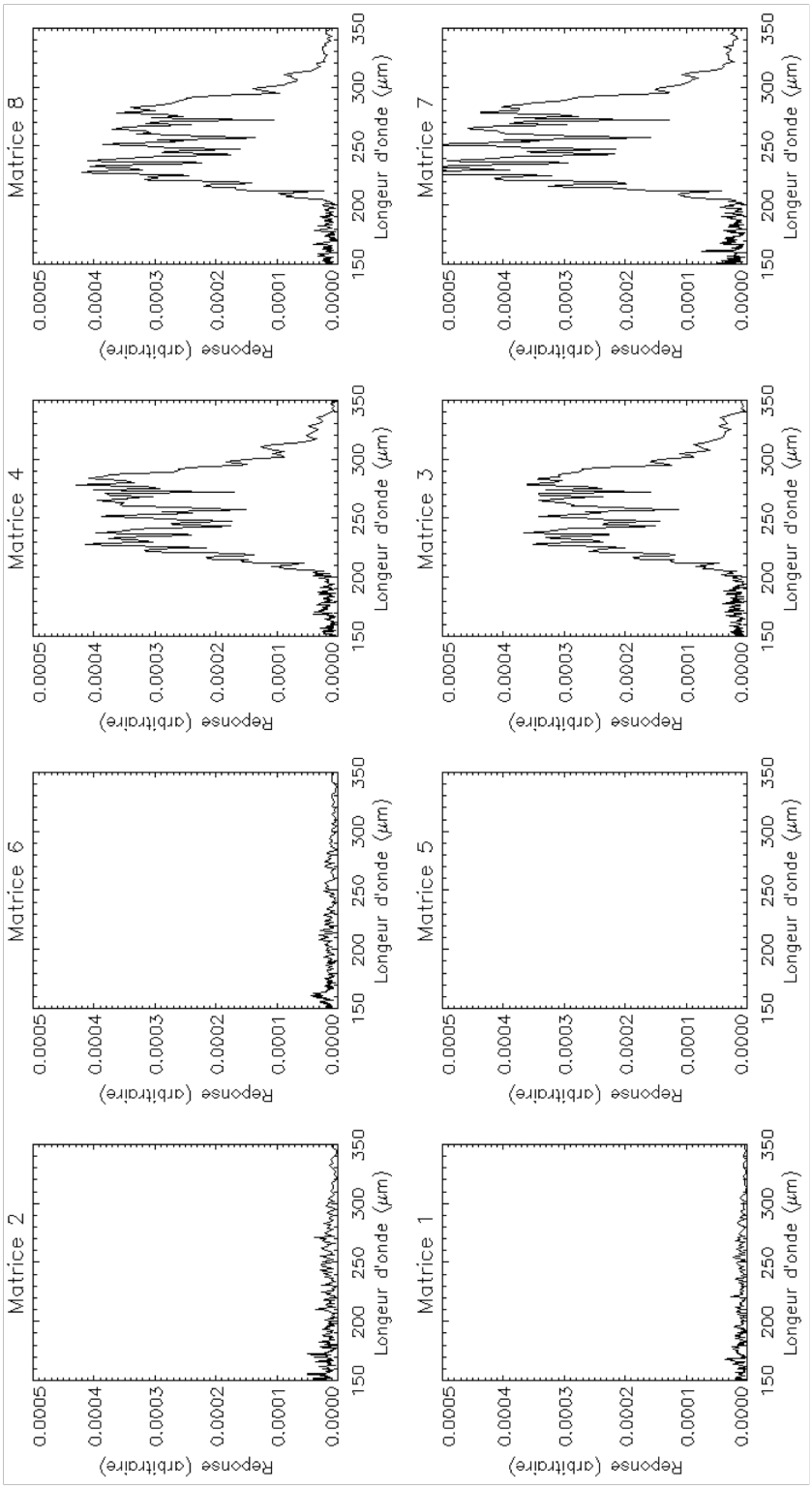


FIGURE 6.14 – Réponses spectrales en fonction du plan de polarisation incident vertical et de la position 5 de HWP.

Validation de la largeur de bande spectrale à 240 µm

Les spécifications demandées sont une réponse spectrale centrée à 240 µm et de largeur à mi-hauteur égale à 20%, soit 48 µm. Les résultats obtenus sur chaque matrice sont reportés dans le tableau 6.4. Ils nous montrent qu'en moyenne la réponse spectrale est centrée à 253.7 µm et de largeur moyenne à mi-hauteur égale à 82.5 µm. Le décalage du centre de la réponse spectrale n'aura pas d'incidence sur les mesures en vol, la longueur d'onde à 250 µm faisant partie de l'intervalle là où l'émission des grains de poussières est maximale. La largeur de bande mesure est égale à 32.5%, ce résultat est supérieur aux spécifications. Cela entrainera une augmentation du flux reçu, la moyenne spectrale se fera sur une plus grande largeur entrainant une diminution de l'information spectrale et une augmentation du rapport signal/bruit.

Matrice	1	2	3	4	5	6	7	8	Moyenne
Centre (µm)	252.5	252.5	252.5	255	-	252.5	251	260	253.7
Largeur (µm)	90	80	85	80	-	80	82.5	80	82.5

Table 6.4 – Caractéristiques des bandes spectrales mesurées, centre et largeur à mi-hauteur sur chaque matrice.

Comparaison entre les transmissions mesurées et estimées

Nous avons mesuré la transmission spectrale du banc BFTS avec les détecteurs optimisés à 240 µm. Dans la simulation numérique photométrique j'ai calculé la transmission totale du banc FTS dans les mêmes conditions de tests. La figure 6.15 montre la comparaison entre les transmissions mesurées et simulées. Estimée à partir des transmissions des composants optiques individuelles (produit des filtres), la bande spectrale simulée est centrée à 246 µm et est de largeur à mi-hauteur égale à 68 µm. La simulation montre ainsi un décalage de la bande spectrale et une largeur à mi-hauteur supérieure aux spécifications. Le modèle photométrique est donc cohérent aux mesures.

Comparaison d'une mesure avec ou sans atmosphère d'azote

Une série d'observations a été faite lorsque l'interface entre le spectromètre et la caméra n'était pas sous une atmosphère d'azote gazeux. La figure 6.16 montre une réponse spectrale lorsque l'interface est avec ou sans atmosphère d'azote. La comparaison avec la transmission atmosphérique met bien en évidence les raies d'absorption de l'atmosphère. En effet, la vapeur d'eau présente dans l'atmosphère absorbe la quasi-totalité du rayonnement submillimétrique. Cela confirme la nécessité d'une atmosphère d'azote pour limiter l'absorption atmosphérique. De plus, cette observation a permis de vérifier l'étalonnage spectral des filtres de la caméra, les raies d'absorptions étant confondues.

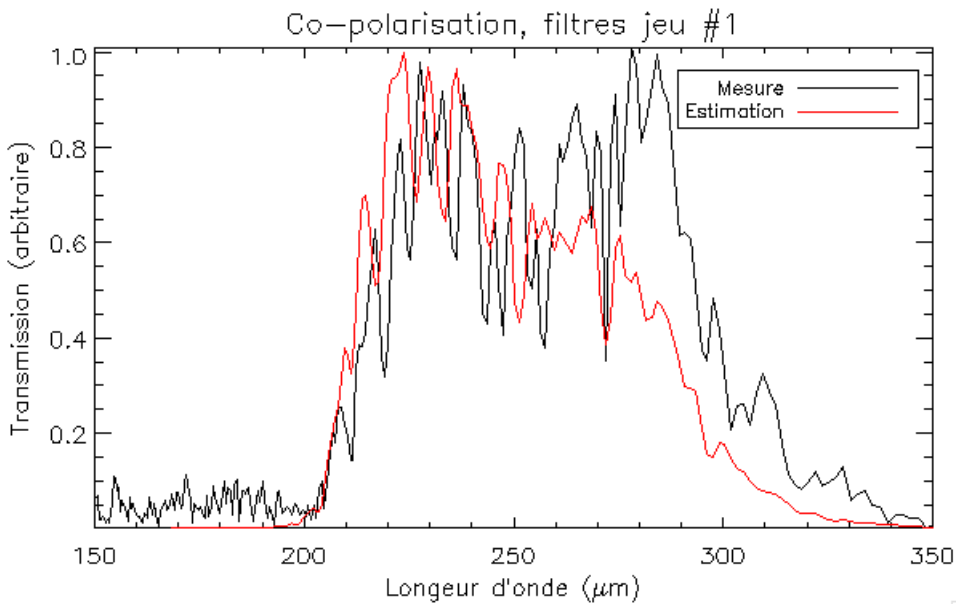


FIGURE 6.15 – Comparaison entre les transmissions mesurées et estimées en co-polarisation.

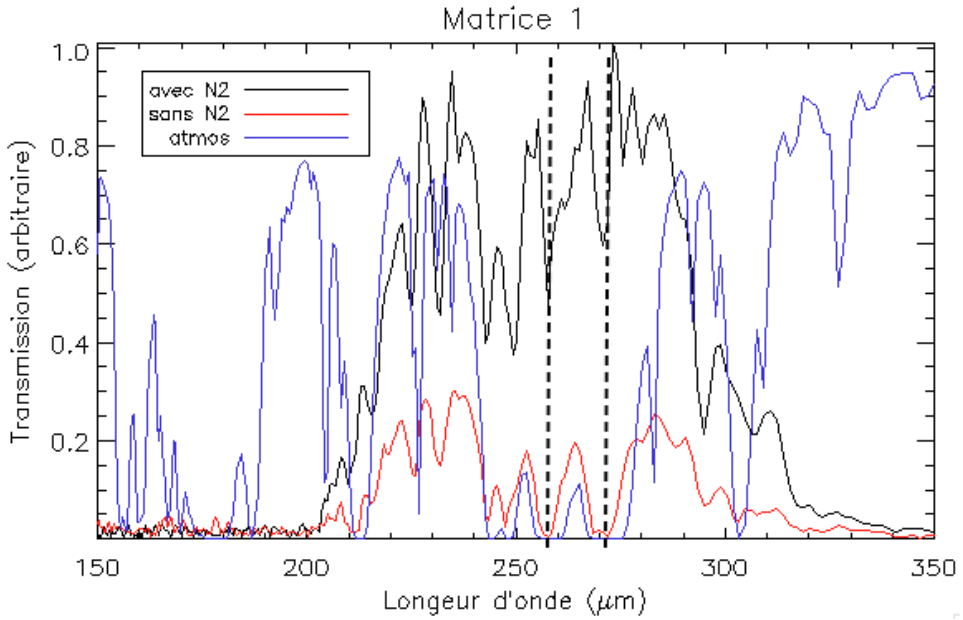


FIGURE 6.16 – Réponses spectrales avec ou sans atmosphère d'azote.

Conclusions et Perspectives

Ce travail de thèse s'inscrit dans la préparation du télescope PILOT dédié à la mesure de l'émission polarisée du milieu interstellaire de la Galaxie. Ma contribution résidait dans la caractérisation et l'étalonnage de la caméra. Une grande mobilisation des compétences du laboratoire dans le domaine du submillimétrique et l'utilisation de moyens instrumentaux spécifiques d'une haute technicité ont été mis en oeuvre, que ce soit en optique, en électronique, en contrôle instrumental et en cryogénie. L'ensemble des objectifs a été rempli grâce au travail de l'équipe responsable de la caméra PILOT. Plus précisément en ce qui concerne la caractérisation, cette étude a démontré la pleine fonctionnalité de la caméra, que ce soit dans l'utilisation individuelle des sous-systèmes ou dans la caméra complète. Du point de vue de la cryogénie, la température nominale des détecteurs a été atteinte après une longue période de mise au point de la chaine de refroidissement. Les essais d'imagerie et les observations ont validés l'alignement des optiques froides, ainsi que les performances en sensibilité. L'étalonnage de la réponse spectrale de la caméra à 240 µm a été réalisé, et les paramètres fondamentaux des bandes spectacles ont été déterminés. Enfin, les mesures avec différents plans de polarisations incidents et la rotation de la lame demi-onde ont permis de valider la capacité de la caméra à mesurer la polarisation. Mes travaux de thèse ont ainsi démontré l'état nominal de la caméra. Celle-ci a été livrée à l'IRAP et intégrée à la charge pointée pour les essais globaux de PILOT (Engel et al. 2010).

Afin d'arriver à un tel résultat plusieurs étapes ont été réalisées avec succès. J'ai commencé par développer un modèle photométrique de l'instrument. Cette étude m'a permis de lier les besoins scientifiques de la mission à une simulation numérique. Puis j'ai défini les bancs optiques spécifiques aux mesures, ce qui a mis en avant ma capacité de planifier les besoins aux essais à réaliser. J'ai ensuite participé activement aux phases d'assemblage, d'intégration, d'alignement optique, de cryogénie, de tests et de validations de la caméra PILOT (AIT/AIV). Les essais instrumentaux mis en place étaient compliqués, pointus, demandant de la rigueur. C'est un gain important pour mon expérience professionnelle dans le domaine instrumental. De plus j'ai développé mes connaissances dans la mesure en imagerie et la mesure spectrale à l'aide d'un spectromètre à transformée de Fourier. Grâce au développement d'outils de contrôle et d'acquisition des données instrumentales ainsi qu'au développement d'outil pour le traitement de données, mes compétences dans le domaine du développement informatique ainsi que mon analyse scientifique des données ont été améliorées. Il est important de noter que les activités d'étalonnage de la caméra PILOT étaient intégrées dans le planning du projet, et dépen-

daient donc de l'état d'avancement de celui-ci. Cette approche projet a été enrichissante et formatrice parce que l'interaction avec l'équipe était importante. C'est ainsi que j'ai pu développer ces connaissances et acquérir ces compétences grâce au rôle central que j'ai joué dans cette période de préparation.

J'ai présenté dans cette étude les premiers résultats de l'étalonnage de la caméra PILOT. Un traitement de données approfondi sera pris en charge par les équipes scientifiques. Parmi les éléments de ce traitement l'erreur sur la réponse spectrale devra être calculée. Les effets résiduels potentiels liés à la vapeur d'eau devront être caractérisés. D'autre part la correction liée au spectre de la source du spectromètre FTS et de son interface avec la caméra PILOT devra être prise en compte dans le résultat final. Un autre calcul à réaliser est la correction de couleurs pour divers spectres de source en fonction de la position de la lame demi-onde, et son impact sur la détermination des paramètres de polarisation. De plus grâce aux données récoltées la lame demi-onde pourra être caractérisée. Afin de répondre aux premières spécifications de PILOT, la réalisation des détecteurs à 550 µm est en cours au CEA. L'étalonnage de la caméra à cette longueur d'onde devra être de nouveau réalisé afin que dés le second vol, PILOT puisse observer dans les deux largeurs de bande à 240 µm et 550 µm.

Nous disposons actuellement d'un ensemble de mesures complet permettant d'envisager ces travaux essentiels en vue de la meilleure réduction des données du premier vol de PILOT prévu durant l'été 2014.

Annexes

Annexe A

Caractéristiques optiques des lentilles

A.1 Lentilles PILOT L1 et L2

PILOT
Polarized Instrument for
Long-wavelength Observations
of the Tenuous ISM

TITLE: **Transmission moyenne des lentilles L1 et L2 de l'expérience PILOT**

DOC. TYPE: NT
PROJECT REF.: PILOT-NT-123-003-IAS PAGE: 1 of 14

Prepared by	V. Buttice, Y. Longval	2013/05/30
Agreed by	B. Leriche	Local Manager
Approved by	J. P. Bernard C. Marty	Prime Investigator Instrument Project Manager

Change record

Date	Description of change	Author
2010/11/25	First version	V. Buttice, Y. Longval
2010/12/17	Second version	V. Buttice, Y. Longval
2011/02/21	Calcul du coefficient d'absorption du polypropylène à froid	V. Buttice
2011/04/01	Mise à jour des transmissions des lentilles PILOT en fonction du coefficient d'absorption min et max	V. Buttice
2012/11/26	Ajout des calculs à 550 μm	V. Buttice
2013/05/30	Mise à jour	V. Buttice

Table des matières

1 Scope of the Document **4**

2 Acronyms **4**

3 References **4**

4 Principe **4**
4.1 Caractéristiques optiques du polypropylène 4
4.2 Mesures de transmission du polypropylène 5
4.2.1 Méthode radiométrique 5
4.2.2 Méthode spectrométrique 5
4.3 Coefficient d'absorption 5
4.4 Calcul de transmission des lentilles 6
4.4.1 Description 6
4.4.2 Calcul de transmission moyenne 7

5 Résultats **7**
5.1 A 240 μm 8
5.2 A 550 μm 9

6 Conclusion **9**

A Coefficient d'absorption **10**

B Transmission totale lame parallèle **12**
B.1 1 12
B.1.1 Exemple à 240 μm 12
B.1.2 Exemple à 550 μm 12
B.2 2 12

C Comparaison transmission du PP **13**

D Emissivité **14**

1 Scope of the Document

La connaissance de transmission des lentilles de L1 et L2 dans l'instrument PILOT est importante pour l'estimation de flux reçu par détecteurs, et l'analyse des performances de l'expérience. Ce document décrit les méthodes et les paramètres utilisés pour le calcul de la transmission et présente les résultats de l'estimation de transmission des lentilles L1 et L2 de l'instrument PILOT.

2 Acronyms

Acronyms for this document :
TBC = To Be Confirmed
TBD = To Be Defined
PP = Polypropylène
PE = Polyéthylène

3 References

- RD1 : Definition document, PILOT-DD-01-001-IAS, "Optical Design", Y. Longval and C. Engel.
- RD2 : Note Technique PILOT "Mesure de l'expansion thermique du polypropylène", B. Leriche, JP Dubois (09/05/27). cf. Expansion_Thermique_PP.doc
- RD3 : Note Technique PILOT "Indices de réfraction du polypropylène et du polyéthylène à 300 K et à 4,2 K dans le submillimétrique mesurés par un spectromètre à transformée de Fourier" 18/01/2010, A. Caillat. cf. indices_PP_PE_recapitulatif_V2.pdf
- RD4 : Note Technique PILOT, "Transmission L1 et L2", 29/03/2011 (et 07/01/2011), Y. Longval
- RD5 : "Synthèse sur les mesures de transmission du polypropylène à 240 μm à 4 K et 300 K" (Transmission_PP_240microns_4&300K_2_methodes.pdf), 13/12/2010, A. Caillat

Formule coefficient d'absorption :
- Infrared Window and Dome Materials. Daniel C. Harris page 7
- Principles of Optics (7e edition expanded) Max Born and Ennil Wolf page 219

4 Principe

4.1 Caractéristiques optiques du polypropylène

La température de travail des lentilles L1 et L2 est d'environ 4K.

La mesure de l'expansion thermique du polypropylène a été réalisée à l'IAS (voir RD2). Le résultat montre que son expansion est de -0.0125 de température ambiante à 4K.

L'indice de réfraction du polypropylène à 4K est de 1.523, mesuré à l'IAS (voir RD3).

Ces résultats sont utilisés comme base aux calcules de transmission des lentilles L1 et L2 de PILOT.

4.2 Mesures de transmission du polypropylène

Pour connaître la transmission du polypropylène, deux méthodes de mesures à 4K ont été réalisés. La première méthode par radiométrie sur deux lames de polypropylène de différentes épaisseurs (1.98 mm et 10.28 mm), avec des filtres de coupure à 240 μm. La seconde par spectrométrie FTS sur une lame de polypropylène de 1.98 mm d'épaisseur.

Voir RD4, RD5 et annexe C.

4.2.1 Méthode radiométrique

Nous avons obtenu deux résultats de mesures différents :

- Pour une lame d'épaisseur l_1 égale à 1.98 mm, nous mesurons une transmission τ_1 égale à 0.881 +/- 0,002
- Pour une lame d'épaisseur l_2 égale à 10.28 mm, nous mesurons une transmission τ_2 égale à 0.652 +/- 0,002

4.2.2 Méthode spectrométrique

Les résultats obtenus par FTS sont présentés sur la figure 1. D'après les spécifications attendues, à 240 μm et à 550 μm les largeurs de bande sont réciproquement de 20% et 33%.

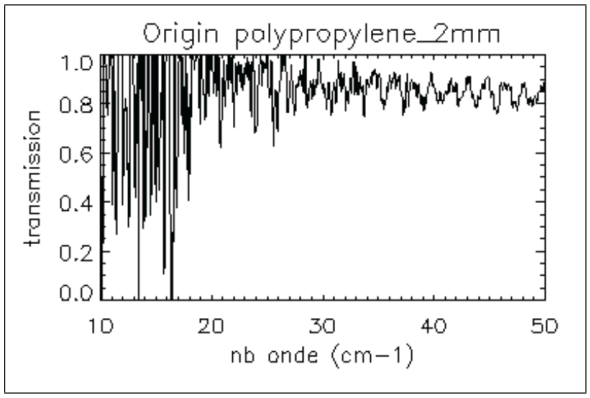


FIGURE 1: Transmission du polypropylène mesurée par méthode de FTS

La transmission mesurée par spectrométrie est égale à 0.847 +/- 0.002 à 4K en prenant une bande spectrale de +/- 10% centrée sur 240 μm, et estimée à 0,9 en prenant une bande spectrale de +/- 33% centrée sur 550 μm. (NB : mesure extrêmement bruitée.)

NB : 240 μm -> 41,66 cm^{-1}, et 550 μm -> 18,18 cm^{-1}.

4.3 Coefficient d'absorption

Nous posons le coefficient d'absorption du polypropylène α à 240 μm et 550 μm respectivement égale à (0.037 $\pm$ 0.003) mm^{-1} et 0.008845 mm^{-1}. cf. calcul en Annexe A.
Plus le coefficient d'absorption est faible et plus la transmission des lentilles est élevé.
Nous aurons donc un intervalle de transmission des lentilles PILOT.
Le calcul de transmission totale τ_{tot} d'une lame est présenté en Annexe B.

4.4 Calcul de transmission des lentilles

4.4.1 Description

On sait que la transmission du polypropylène dépend du coefficient d'absorption et de la longueur de chemin que le rayon parcourt.

Dans le cas de PILOT, les chemins des rayons sont complexes.

Les formes de surface de L1 et L2 sont asphériques. L'épaisseur au centre de L1 est de 14 mm et celle de L2 est de 38 mm.

La figure 2 montre le tracé des rayons dans le reimageur. L'instrument PILOT a une dimension de plan focal de 25.5x27 mm, il couvre un champ de vue de 1° dans le ciel.

La figure 3 montre le tracé de rayons du centre de plan focal, et la figure 4 montre le tracé de rayons à un des bords du plan focal. On constate que les longueurs du chemin parcouru par les rayons sont différents selon la position du champ.

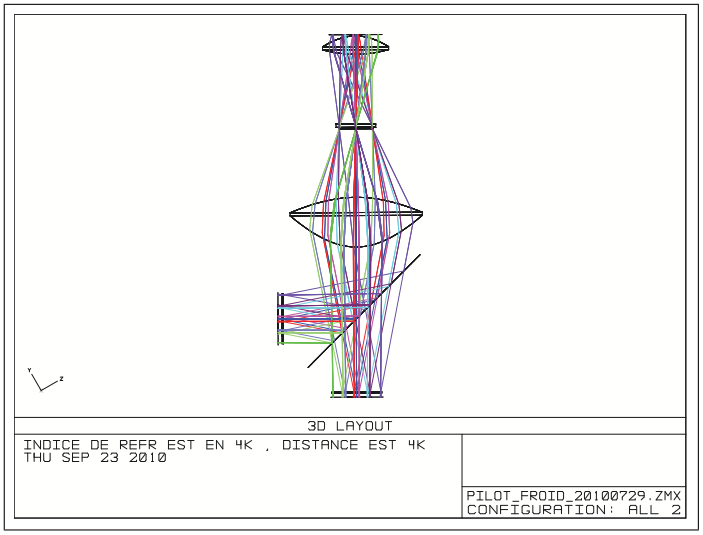


FIGURE 2: Schéma optique de reimageur

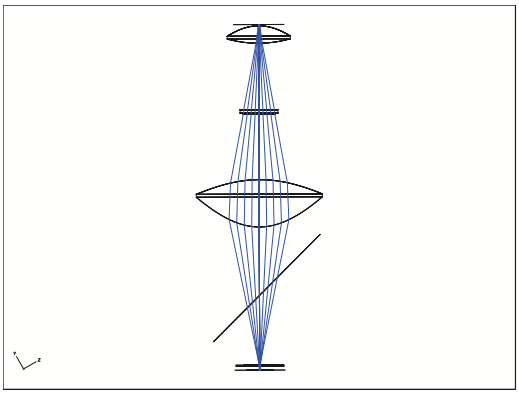


FIGURE 3: Schéma optique au centre du plan focal

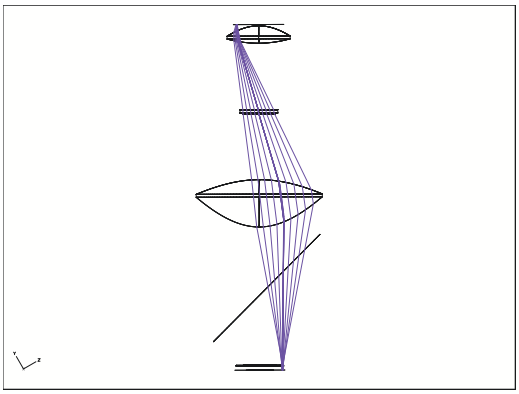


FIGURE 4: Schéma optique au bord du plan focal

On remarque deux points suivants :
- pour un champs de vue donné, chaque rayon a sa propre longueur de chemin optique, donc le flux arrivant à chaque pixel est la transmission moyenne de tous.
- pour chaque de champs de vue, les longueurs de chemin optique moyennes que les rayons traversent sont différentes, donc les transmissions des lentilles sont différentes. Donc il est nécessaire de calculer les transmissions à chaque champs.

4.4.2 Calcul de transmission moyenne

Calcul effectué avec Zemax.
Pour chaque point de champs de vue, on calcule la transmission moyenne d'une grille de 32x32 rayons. Ainsi nous calculons toutes les transmissions pour chaque champs de vue dans le ciel.

5 Résultats

La figure 5 montre les positions sur le plan focal de 9 champs de vue.

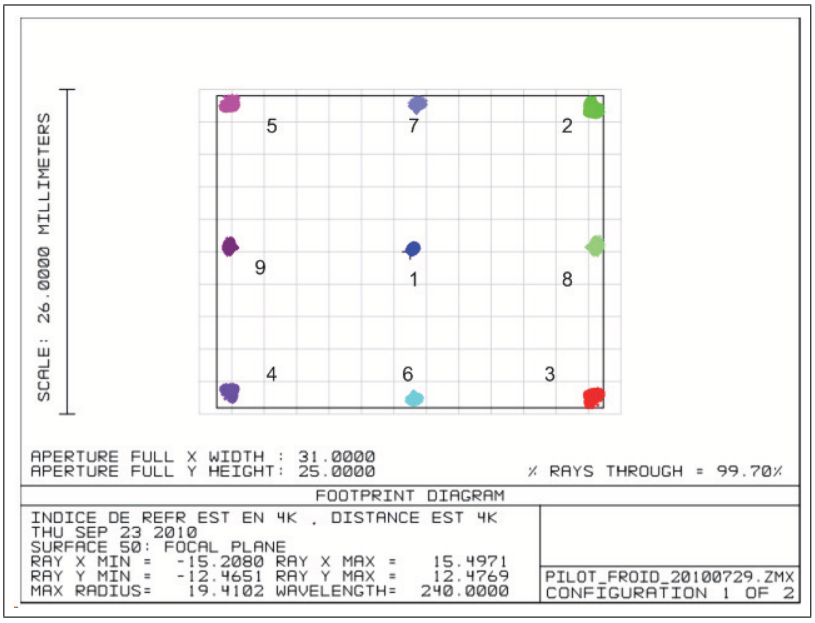


FIGURE 5: Plan focal

Les transmissions des lentilles PILOT L1 et L2 ont été calculées en utilisant le logiciel Zemax, prenant en compte la géométrie des lentilles, en fonction du coefficient d'absorption précédemment posé, au minimum et au maximum de l'intervalle d'incertitude, à 240 μm.

$$\begin{aligned} \alpha_{min} &= 0.034\ mm^{-1} \\ \alpha_{max} &= 0.04\ mm^{-1} \\ \alpha_{moy} &= 0.037\ mm^{-1} \end{aligned} \tag{1}$$

A 550 μm, nous avons une seule valeur, du fait de la mesure bruitée.

$$\alpha_{moy} = 0.008845\ mm^{-1} \tag{2}$$

NB : Nous savons que l'émissivité varie en fonction de la température or nous supposons négligeable la différence de température entre les mesures de la lame échantillon et les lentilles L1 etL2 de PILOT.

Là où la transmission est minimale correspond une épaisseur maxi des lentilles (position 1), et là où la transmission est maximale correspond une épaisseur minimale des lentilles (en coin, ex : position 2, 3, 4 ou 5).

5.1 A 240 μm

La figure 6 montre les résultats de transmission obtenues avec un coefficient d'absorption du polypropylène minimal pour L1, L2 et la transmission totale des deux lentilles pour chaque champs de vue.

field 1	Lens 1	Lens2	Toltal
1	0.653	0.292	0.190
2	0.786	0.343	0.270
3	0.793	0.346	0.274
4	0.784	0.343	0.269
5	0.787	0.344	0.271
6	0.702	0.311	0.219
7	0.706	0.312	0.220
8	0.735	0.324	0.238
9	0.735	0.324	0.238
Moyenne	0.742	0.327	0.242

FIGURE 6: Résultats des Transmissions de L1, L2 et Transmission totale, avec α_{min}

En fonction d'un coefficient d'absorption α_{min} du PP, les transmissions des lentilles sont comprises entre 0.653 et 0.793 pour L1, et 0.292 et 0.346 pour L2.

La figure 7 montre les résultats de transmission obtenues avec un coefficient d'absorption du polypropylène maximal pour L1, L2 et la transmission totale des deux lentilles pour 9 champs de vue.

field 1	Lens 1	Lens2	Toltal
1	0.551	0.213	0.117
2	0.685	0.262	0.179
3	0.689	0.263	0.181
4	0.684	0.261	0.178
5	0.692	0.263	0.182
6	0.602	0.232	0.140
7	0.601	0.232	0.139
8	0.633	0.243	0.154
9	0.630	0.242	0.152
Moyenne	0.641	0.246	0.157

FIGURE 7: Résultats des Transmissions de L1, L2 et Transmission totale, avec α_{max}

En fonction d'un coefficient d'absorption α_{max} du PP, les transmissions des lentilles sont comprises entre 0.551 et 0.692 pour L1, et 0.213 et 0.263 pour L2.

5.2 A 550 μm

En fonction d'un coefficient d'absorption α_{moy} du PP, les transmissions des lentilles sont comprises entre 0.885 et 0.929 pour L1, et 0.717 et 0.752 pour L2.

6 Conclusion

L'intervalle des transmissions des lentilles sont [0.551 ; 0.793] pour L1, et [0.213 ; 0.346] pour L2 à 240 μm, et [0.885 ; 0.929] pour L1, et [0.717 ; 0.752] pour L2 à 550 μm.

A Coefficient d'absorption

La figure 8 montre le schéma optique de calcul de coefficient d'absorption d'une lame d'une épaisseur l et de l'indice n.

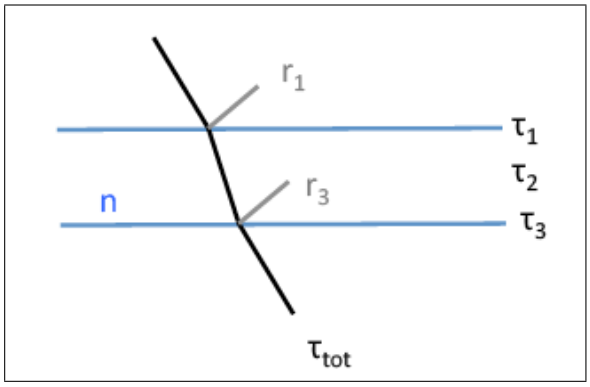


FIGURE 8: Lame d'épaisseur l. Transmission τ, Reflexion r, Indice de refraction n

Le faisceau incident, rencontre d'abord la première interface de air/lame, il y a une réflexion r_1 et une transmission τ_1. En suite le faisceau traverse la lame, il y une transmission τ_2 et une absorption a_2. Enfin il traverse l'interface lame/air, il y lieu r_3 et τ_3.

PS : Nous négligeons les interfaces (très fines) du traitement anti-reflet sur les lentilles PILOT.

Calcul du coefficient d'absorption :

Transmission totale :

$$\tau_{tot} = \tau_1 * \tau_2 * \tau_3 \tag{3}$$

Si la surface optique n'a pas de traitement anti-reflet (c'est le cas de lame échantillon), on sait que :

$$r_1 + \tau_1 = 1 \tag{4}$$

$$\Rightarrow r_1 = (1 - \tau_1) = \left(\frac{1-n}{1+n}\right)^2 \tag{5}$$

Nous négligeons la faible variation en fonction de la longueur d'onde. Et nous considérons l'indice de réfraction constant à 240 μm et 550 μm.

Pour les lentilles PILOT, n=1.523 donc r_1=0.04297

La transmission τ_0 égale au produit des interfaces c'est-à-dire des interfaces 1 et 3.

Sachant que $r_1 = r_3$, on pose :

$$\tau_0 = \tau_1 * \tau_3 = (1 - r_1) * (1 - r_3) = (1 - r_1)^2 = 1 - 2 * r_1 + r_1^2 \tag{6}$$

Pour les lentilles PILOT, $\tau_0 = 1 - (2 * 0.04297) + 0,04297^2 = 0.9159$

Alors

$$\tau_{tot} = \tau_0 * \tau_2 \tag{7}$$

De plus nous savons que la transmission varie de façon exponentielle en fonction de l'épaisseur. Nous posons donc :

$$\tau_2 = e^{-\alpha * l} \tag{8}$$

avec α coefficient d'absorption et l longueur traversée (épaisseur de la lentille)

Connaissant la transmission mesurée τ_{tot} de la lame échantillon (cf. section 4.2), la transmission τ_0 calculée en fonction de l'indice de réfraction n et l'épaisseur l de la lame, nous pouvons calculer le coefficient d'absorption α :

$$\tau_2 = \frac{\tau_{tot}}{\tau_0} = e^{-\alpha * l} \tag{9}$$

$$ln\frac{\tau_{tot}}{\tau_0} = -\alpha * l \tag{10}$$

$$\alpha = -\frac{1}{l} * ln\frac{\tau_{tot}}{\tau_0} \tag{11}$$

$$\Rightarrow \alpha = \frac{1}{l} * ln\frac{\tau_0}{\tau_{tot}} \tag{12}$$

Pour les lentilles PILOT :

- Lame échantillon en polypropylène d'épaisseur 1.98 mm et de transmission égale à 0.881 +/- 0,002 par la méthode radiométrique à 240 μm.

$$\alpha = \frac{1}{1.98} * ln\frac{0.9159}{0.881} = 0.02\ mm^{-1} \tag{13}$$

- Lame échantillon en polypropylène d'épaisseur 10.28 mm et de transmission égale à 0.652 +/- 0,002 par la méthode radiométrique 240 μm. Cette mesure pour le calcul du coefficient d'absorption est plus précise car pour une épaisseur plus importante l'absorption est plus grande, cela augmente la précision.

$$\alpha = \frac{1}{10.28} * ln\frac{0.9159}{0.652} = 0.033\ mm^{-1} \tag{14}$$

- Lame échantillon en polypropylène d'épaisseur 1.98 mm et de transmission égale à 0.847 +/- 0,002 par la méthode spectrométrique 240 μm.

$$\alpha = \frac{1}{1.98} * ln\frac{0.9159}{0.847} = 0.0395 \approx 0.04\ mm^{-1} \tag{15}$$

- Lame échantillon en polypropylène d'épaisseur 1.98 mm et de transmission égale à 0.9 par la méthode spectrométrique 550 μm.

$$\alpha = \frac{1}{1.98} * ln\frac{0.9159}{0.9} = 0.008845\ mm^{-1} \tag{16}$$

Par les différentes méthodes de mesure, le coefficient d'absorption diffère.

L'objectif est de calculer un coefficient d'absorption α précis du polypropylène.

En nous concentrant sur les 2 précédentes mesures radiométriques, et sachant que les transmissions τ_{lame1} pour la première mesure et τ_{lame2} pour la seconde sont : cf. formule (8)

$$\begin{aligned} \tau_{lame1} &= e^{-\alpha * l_{lame1}} \\ \tau_{lame2} &= e^{-\alpha * l_{lame2}} \end{aligned} \tag{17}$$

Alors par le rapport de ces deux expressions nous nous s'affranchissons des effets systématiques du photomètre utilisé pour réaliser les mesures.

$$\frac{\tau_{lame1}}{\tau_{lame2}} = \frac{e^{-\alpha * l_{lame1}}}{e^{-\alpha * l_{lame2}}} \tag{18}$$

$$e^{-\alpha(l_{lame1}-l_{lame2})} = \frac{\tau_{lame1}}{\tau_{lame2}} \tag{19}$$

$$-\alpha(l_{lame1} - l_{lame2}) = ln\frac{\tau_{lame1}}{\tau_{lame2}} \tag{20}$$

$$\alpha = \frac{1}{(l_{lame2} - l_{lame1})} * ln\frac{\tau_{lame1}}{\tau_{lame2}} \tag{21}$$

$$\alpha = \frac{1}{(10.28 - 1.98)} * ln\frac{0.881}{0.652} \tag{22}$$

$$\alpha = 0.036 \tag{23}$$

Pour couvrir tout l'intervalle d'incertitude des mesures et les méthodes de mesures utilisées, nous posons un coefficient d'absorption avec une incertitude :

$$\boxed{\alpha_{240\mu m} = (0.037 \pm 0,003)\ mm^{-1}} \tag{24}$$

$$\boxed{\alpha_{550\mu m} = 0.008845\ mm^{-1}} \tag{25}$$

B Transmission totale lame parallèle

Ci-dessous une estimation de transmission considérant une lame parallèle, sorte d'une transmission moyenne d'une lentille bombée. Pour une valeur précise, utiliser le logiciel Zemax, section 5. Pour rappel, les épaisseurs maximales des lentilles L1 et L2 de PILOT sont respectivement égales à 14 mm et 38 mm.

B.1 1

Connaissant l'épaisseur des lentilles et sachant que $\tau_2 = e^{-\alpha * l}$ (l en mm), cela nous permet d'en déduire la transmission :

B.1.1 Exemple à 240 μm

Pour l=38 mm, $\tau_2 = 0.2451$
Pour l=14 mm, $\tau_2 = 0.5957$

B.1.2 Exemple à 550 μm

Pour l=38 mm, $\tau_2 = 0.7145$
Pour l=14 mm, $\tau_2 = 0.8835$

B.2 2

De plus nous savons que $\tau_{tot} = \tau_1 * \tau_2 * \tau_3$
et sur une surface traitée avec un anti-reflet $\tau_1 = \tau_3 = 1$
Alors $\tau_{tot} = \tau_2$

C Comparaison transmission du PP

Les essais ci-dessous ont été réalisé avec les filtres PILOT à 240 μm.

Voici les conditions et les résultats des mesures de transmission du polypropylène à 4K :

- épaisseur de l'échantillon à 300K (mesurée) : 10,41 +/- 0,01 mm
- coefficient de dilatation thermique : 1,25 +/- 0,05
- épaisseur de l'échantillon à 4K (calculée) : 10,28 mm +/- 0,02 mm
- description du montage : corps noir - chopper - filtres PILOT (80 cm-1 ; 65 cm-1 ; 60 cm-1 ; 58 cm-1 ; 48 cm-1 ; 36 cm-1) - cryostat (filtre - lentille - détecteur)
- acquisition des données par une détection synchrone (valeurs de R=amplitude du signal modulé détecté) avec une fréquence du chopper de 130 Hz
- transmission de l'échantillon à 4K (mesurée) : 0,652 +/- 0,002 (l'incertitude que je donne ici correspond à l'écart maximal obtenu sur des mesures effectuées dans les mêmes conditions à différents moments de l'après-midi mais elle ne tient pas compte par exemple du bruit du détecteurs, de la détection synchrone, de la variation de température de la source,...)
- coefficient d'absorption du polypropylène (calculée d'après la relation donnée dans l'annexe A du document PILOT_NT_123_003_IAS_TRANSMISSION_LENTILLES : 0,033 mm-1

Pour rappel, voici les résultats qui avaient été obtenus précédemment :

- épaisseur de l'échantillon à 300K (mesurée) : 2,0065 +/- 0,002 mm
- coefficient de dilatation thermique : 1,25 +/- 0,05 %
- épaisseur de l'échantillon à 4K (calculée) : 1,9814 mm +/- 0,01 mm
- description du montage : corps noir - chopper - filtres PILOT (80 cm-1 ; 65 cm-1 ; 60 cm-1 ; 58 cm-1 ; 48 cm-1 ; 36 cm-1) - cryostat (filtre - lentille - détecteur)
- acquisition des données par une détection synchrone (valeurs de R=amplitude du signal modulé détecté) avec une fréquence du chopper de 130 Hz
- transmission de l'échantillon à 4K (mesurée) : 0,881 +/- 0,002 (l'incertitude que je donne ici correspond à l'écart maximal obtenu sur des mesures effectuées dans les mêmes conditions à différents moments de l'après-midi mais elle ne tient pas compte par exemple du bruit du détecteurs, de la détection synchrone, de la variation de température de la source,...)
- coefficient d'absorption du polypropylène (calculée d'après la relation donnée dans l'annexe A du document PILOT_NT_123_003_IAS_TRANSMISSION_LENTILLES : 0,02 mm-1

Enfin, la valeur moyenne sur la bande passante à 240 μm (non pondérée) de transmission mesurée avec le FTS sur l'échantillon d'épaisseur 2 mm à 4K : 0,847 +/- 0,002 (de même que précédemment, cette incertitude ne tient compte que des valeurs obtenues et il est possible qu'elle soit sous-estimée...).

La valeur du coefficient d'absorption correspondante calculée d'après la relation donnée dans l'annexe A du document PILOT_NT_123_003_IAS_TRANSMISSION_LENTILLES est : 0,04 mm-1.

D Emissivité

Les équations ci-dessous permettent de calculer l'emissivité d'une interface (lentille ou lame) ayant subit un traitement anti-reflet sur les deux faces.

Nous savons que :

$$A + \tau + 2R = 1 \tag{26}$$

Lors d'un traitement anti-reflet, la réflexion R est nulle. Alors :

$$A + \tau = 1 \tag{27}$$

Et d'après la loi du rayonnement Kirchhoff :

$$A = \varepsilon \tag{28}$$

Donc :

$$\varepsilon = 1 - \tau \tag{29}$$

A.2 Lentilles des bancs optiques BCN et BFTS

PILOT
Polarized Instrument for
Long-wavelength Observations
of the Tenuous ISM

TITLE: **Transmission des lentilles des bancs optiques de l'expérience PILOT**

DOC. TYPE: NT
PROJECT REF.: PILOT-NT-xxx-xxx-IAS PAGE: 1 of 14

Prepared by	V. Buttice, Y. Longval	2013/06/18
Agreed by	B. Leriche	Local Manager
Approved by	J. P. Bernard C. Marty	Prime Investigator Instrument Project Manager

Change record

Date	Description of change	Author
2011/03/18	First version	V. Buttice
2012/12/03	Mise à jour des calcules et ajout du 550 μm	V. Buttice
2013/05/29	Mise à jour des schémas optiques	V. Buttice
2013/06/18	Mise à jour des épaisseurs de lentilles	V. Buttice

Table des matières

1 Scope of the Document **4**

2 Acronyms **4**

3 References **4**

4 Principe **4**
4.1 Caractéristiques optiques du polypropylène 4
4.2 Mesures de transmission du polypropylène 4
4.2.1 Méthode radiométrique 5
4.2.2 Méthode spectrométrique 5
4.3 Coefficient d'absorption 5
4.4 Calcul de transmission des lentilles 5
4.4.1 Description 5
4.4.2 Calcul de transmission moyenne 7

5 Résultats **7**

A Coefficient d'absorption **9**

B Emissivité **11**

C Transmission totale lame parallèle **11**
C.1 Cas imagerie BCN 12
C.1.1 A 240 μm 12
C.1.2 A 550 μm 12
C.2 Cas spectral BFTS 12
C.2.1 A 240 μm 12
C.2.2 A 550 μm 12
C.3 Cas fenêtre de sortie du FTS 13
C.3.1 A 240 μm 13
C.3.2 A 550 μm 13

D Caractéristiques optiques des lentilles BCN et BFTS **13**
D.1 Cas imagerie BCN 13
D.2 Cas imagerie BFTS 13

1 Scope of the Document

Deux bancs optiques sont réaliser pour les tests d'imagerie et pour la mesure spectrale de l'instrument PILOT. Pour chacuns des bancs optiques nous utilisons une interface entre la source et le photomètre (ISP). Une interface est composée d'un miroir plan et d'une lentille en polypropylène. La connaissance de transmission de ces lentilles de tests est importante pour l'estimation de flux reçu par détecteurs, et l'analyse des performances de l'expérience. Ce document décrit les méthodes et les paramètres utilisés pour le calcul de la transmission et présente les résultats de l'estimation de transmission des lentilles de tests de l'instrument PILOT.

2 Acronyms

Acronyms for this document :
PP = Polypropylène
PE = Polyéthylène
BCN = Banc Corps Noir
BFTS = Banc Fourier Transform Spectrometer
L_{BCN} = Lentille du BCN Noir pour les essais en imagerie
L_{BFTS} = Lentille du BFTS pour les essais de réponse spectrale

3 References

- RD1 : Note Technique PILOT "Indices de réfraction du polypropylène et du polyéthylène à 300 K et à 4,2 K dans le submillimétrique mesurés par un spectromètre à transformée de Fourier" 18/01/2010, A. Caillat. cf. indices_PP_PE_recapitulatif_V2.pdf
- RD2 : "Synthèse sur les mesures de transmission du polypropylène à 240 μm à 4 K et 300 K" (Transmission_PP_240microns_4&300K_2_methodes.pdf), 13/12/2010, A. Caillat
- RD3 : "20110201_transmissionPP_chaud_CN&filtresPILOT240 μm.xlsx", 01/02/2011, A. Caillat

Formule coefficient d'absorption :
- Infrared Window and Dome Materials. Daniel C. Harris page 7
- Principles of Optics (7e edition expanded) Max Born and Ennil Wolf page 219

4 Principe

4.1 Caractéristiques optiques du polypropylène

La température de travail des lentilles tests est d'environ 300K. L'indice de réfraction du polypropylène à 300K est de 1.5, mesuré à l'IAS (voir RD1).

4.2 Mesures de transmission du polypropylène

Pour connaître la transmission du polypropylène, deux méthodes de mesures à 300K ont été réalisés. La première méthode par radiométrie sur deux lames de polypropylène de différentes épaisseurs (2.0065 mm et 10.41 mm), avec des filtres de coupure à 240 μm. La seconde

par spectrométrie FTS sur une lame de polypropylène de 2.0065 mm d'épaisseur.
Voir RD2, RD3.

4.2.1 Méthode radiométrique

Nous avons obtenu deux résultats de mesures différents :
- Pour une lame d'épaisseur l_1 égale à (2.0065 +/- 0.002) mm, nous mesurons une transmission τ_1 égale à 0.865
- Pour une lame d'épaisseur l_2 égale à (10.41 +/- 0.01) mm, nous mesurons une transmission τ_2 égale à (0.649 +- 0.002)

4.2.2 Méthode spectrométrique

Les résultats obtenus par FTS sont présentés sur la figure 1. D'après les spécifications attendues, à 240 μm et à 550 μm les largeurs de bande sont réciproquement de 20% et 33%.

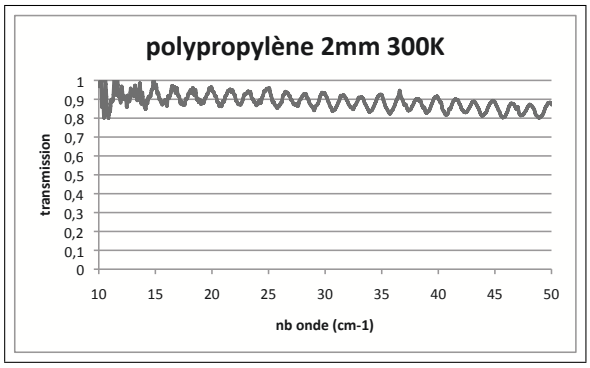


FIGURE 1: Transmission du polypropylène à 300K mesurée par méthode de FTS

La transmission mesurée par spectrométrie est égale à 0.86 à 300K en prenant une bande spectrale de 20% centrée sur 240 μm, et égale à 0,9 en prenant une bande spectrale de 33% centrée sur 550 μm.
NB : 240 μm -> 41,66 cm^{-1}, et 550 μm -> 18,18 cm^{-1}.

4.3 Coefficient d'absorption

Nous posons le coefficient d'absorption du polypropylène α à 240 μm et 550 μm respectivement à égale à 0.034 +/- 0.0005 mm^{-1} et 0.0118 mm^{-1}. cf. calcul en annexe A.
Plus le coefficient d'absorption est faible et plus la transmission des lentilles est élevé.
Nous aurons donc un intervalle de transmission des lentilles tests.
Le calcul de transmission totale τ_{tot} d'une lame est présenté en annexe C.

4.4 Calcul de transmission des lentilles

4.4.1 Description

On sait que la transmission du polypropylène dépend du coefficient d'absorption et de la longueur de chemin que le rayon parcourt.

Dans le cas des bancs optiques PILOT, les chemins des rayons sont complexes.

Les formes de surface de L_{BCN} et L_{BFTS} sont asphériques (annexe D).

La figure 2 nous montre le tracé des rayons du banc optique pour les tests d'imagerie, la figure 3 pour la mesure spectrale.

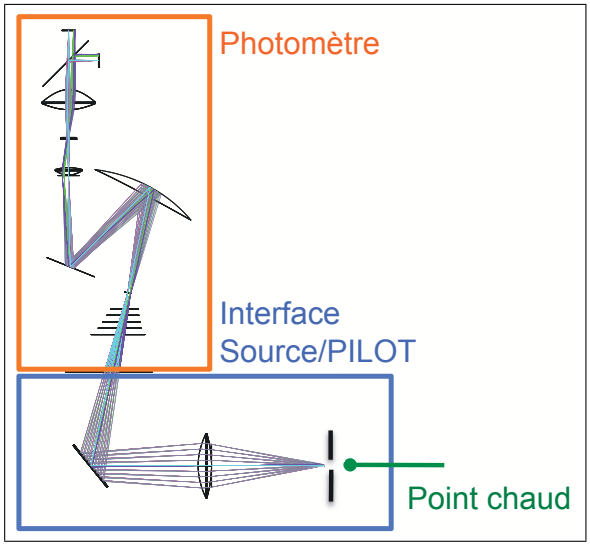


FIGURE 2: Schéma optique BCN pour les essais en imagerie

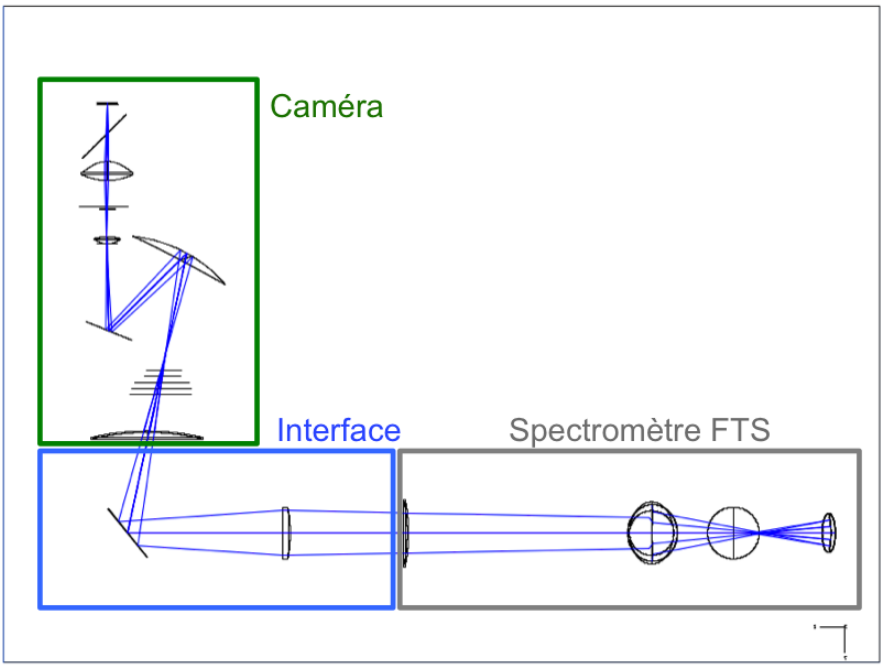


FIGURE 3: Schéma optique BFTS pour les essais de réponse spectrale

On remarque deux points suivants :

- pour un champs de vue donné, chaque rayon a sa propre longueur de chemin optique, donc le flux arrivant à chaque pixel est la transmission moyenne de tous.
- pour chaque de champs de vue, les longueurs de chemin optique moyennes que les rayons traversent sont différentes, donc les transmissions des lentilles sont différentes. Donc il est nécessaire de calculer les transmissions à chaque champs.

4.4.2 Calcul de transmission moyenne

Calcul effectué avec Zemax.

Pour chaque point de champs de vue, on calcule la transmission moyenne d'une grille de 32x32 rayons. Ainsi nous calculons toutes les transmissions pour chaque champs de vue dans le ciel.

5 Résultats

Les figures 4 et 5 montrent les positions sur le plan focal de 9 champs de vue, respectivement du BCN et du BFTS.

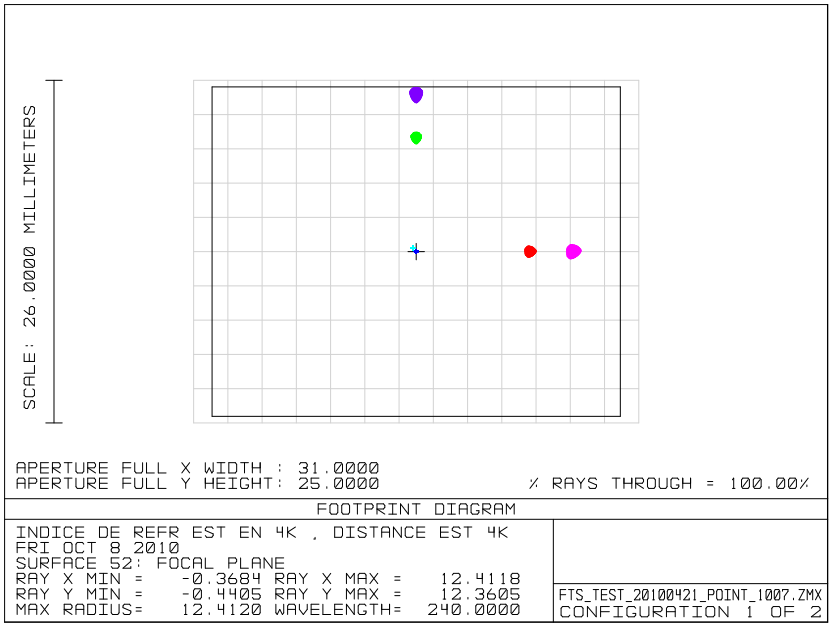


FIGURE 4: Plan focal du BCN

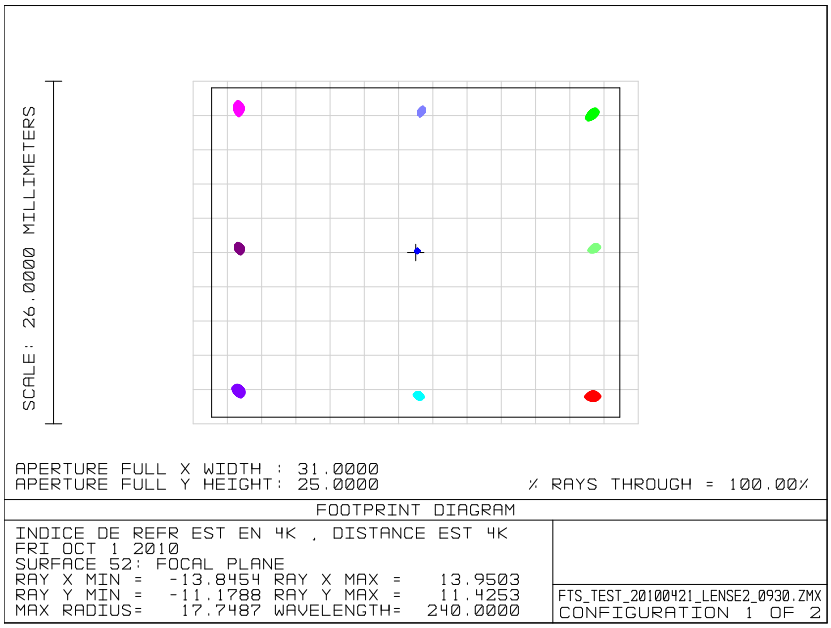


FIGURE 5: Plan focal du BFTS

Les transmissions des lentilles tests L_{BCN} et L_{BFTS} ont été calculées en utilisant le logiciel Zemax, prenant en compte la géométrie des lentilles, en fonction du coefficient d'absorption précédemment posé, au minimum et au maximum de l'intervalle d'incertitude, à 240 μm.

$$\begin{aligned} \alpha_{min} &= 0.0335\ mm^{-1} \\ \alpha_{max} &= 0.0345\ mm^{-1} \end{aligned} \tag{1}$$

A 550 μm, nous avons une seule valeur, du fait de la mesure bruitée.

$$\alpha_{moy} = 0.0118\ mm^{-1} \tag{2}$$

Le détail des calculs des transmissions et des émissivité est en annexe C et en annexe B :
En fonction d'un coefficient d'absorption α_{240} du PP, les transmissions des lentilles sont égales à :

$$\tau_{L_{BCN}} = 0.458 \tag{3}$$

$$\tau_{L_{BFTS}} = 0.553 \tag{4}$$

En fonction d'un coefficient d'absorption α_{550} du PP, les transmissions des lentilles sont égales à :

$$\tau_{L_{BCN}} = 0.792 \tag{5}$$

$$\tau_{L_{BFTS}} = 0.772 \tag{6}$$

A Coefficient d'absorption

La figure 2 montre le schéma optique de calcul de coefficient d'absorption d'une lame d'une épaisseur l et de l'indice n.

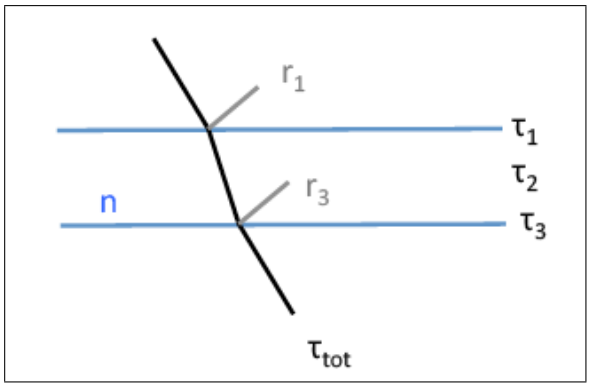


FIGURE 6: Lame d'épaisseur l. Transmission τ, Reflexion r, Indice de refraction n

Le faisceau incident, rencontre d'abord la première interface de air/lame, il y a une réflexion r_1 et une transmission τ_1. En suite le faisceau traverse la lame, il y une transmission τ_2 et une absorption a_2. Enfin il traverse l'interface lame/air, il y lieu r_3 et τ_3.

Calcul du coefficient d'absorption :

Transmission totale :

$$\tau_{tot} = \tau_1 * \tau_2 * \tau_3 \tag{7}$$

Si la surface optique n'a pas de traitement anti-reflet (c'est le cas de lame échantillon), on sait que :

$$r_1 + \tau_1 = 1 \tag{8}$$

$$\Rightarrow r_1 = (1 - \tau_1) = \left(\frac{1-n}{1+n}\right)^2 \tag{9}$$

Nous négligeons la faible variation en fonction de la longueur d'onde. Et nous considérons l'indice de réfraction constant à 240 μm et 550 μm.

Pour les lentilles bancs optiques, n=1.5 donc r_1=0.04

La transmission τ_0 égale au produit des interfaces c'est-à-dire des interfaces 1 et 3.

Sachant que $r_1 = r_3$, on pose :

$$\tau_0 = \tau_1 * \tau_3 = (1 - r_1) * (1 - r_3) = (1 - r_1)^2 = 1 - 2 * r_1 + r_1^2 \tag{10}$$

Pour les lentilles bancs optiques, $\tau_0 = 1 - (2 * 0.04) + 0,04^2 = 0.9216$

Alors

$$\tau_{tot} = \tau_0 * \tau_2 \tag{11}$$

De plus nous savons que la transmission varie de façon exponentielle en fonction de l'épaisseur.

Nous posons donc :

$$\tau_2 = e^{-\alpha * l} \tag{12}$$

avec α coefficient d'absorption et l longueur traversée (épaisseur de la lentille)

Connaissant la transmission mesurée τ_{tot} de la lame échantillon (cf. section 4.2), la transmission τ_0 calculée en fonction de l'indice de réfraction n et l'épaisseur l de la lame, nous pouvons calculer le coefficient d'absorption α :

$$\tau_2 = \frac{\tau_{tot}}{\tau_0} = e^{-\alpha * l} \tag{13}$$

$$ln\frac{\tau_{tot}}{\tau_0} = -\alpha * l \tag{14}$$

$$\alpha = -\frac{1}{l} * ln\frac{\tau_{tot}}{\tau_0} \tag{15}$$

$$\Rightarrow \alpha = \frac{1}{l} * ln\frac{\tau_0}{\tau_{tot}} \tag{16}$$

Pour les lentilles bancs optiques :

– Lame échantillon en polypropylène d'épaisseur 2.0065 mm et de transmission égale à 0.865 par la méthode radiométrique à 240 μm..

$$\alpha = \frac{1}{2.0065} * ln\frac{0.9216}{0.865} = 0.03159\ mm^{-1} \tag{17}$$

– Lame échantillon en polypropylène d'épaisseur 10.41 mm et de transmission égale à 0.649 +/- 0,002 par la méthode radiométrique à 240 μm. Cette mesure pour le calcul du coefficient d'absorption est plus précise car pour une épaisseur plus importante l'absorption est plus grande, cela augmente la précision.

$$\alpha = \frac{1}{10.41} * ln\frac{0.9216}{0.649} = 0.03369\ mm^{-1} \tag{18}$$

– Lame échantillon en polypropylène d'épaisseur 2.0065 mm et de transmission égale à 0.86 par la méthode spectrométrique à 240 μm.

$$\alpha = \frac{1}{2.0065} * ln\frac{0.9216}{0.86} = 0.03448\ mm^{-1} \tag{19}$$

– Lame échantillon en polypropylène d'épaisseur 2.0065 mm et de transmission égale à 0.9 par la méthode spectrométrique 550 μm.

$$\alpha = \frac{1}{1.98} * ln\frac{0.9159}{0.9} = 0.0118\ mm^{-1} \tag{20}$$

Par les différentes méthodes de mesure, le coefficient d'absorption diffère.

L'objectif est de calculer un coefficient d'absorption α précis du polypropylène.

En nous concentrant sur les 2 précédentes mesures radiométriques, et sachant que les transmissions τ_{lame1} pour la première mesure et τ_{lame2} pour la seconde sont : cf. formule (12)

$$\begin{aligned} \tau_{lame1} &= e^{-\alpha * l_{lame1}} \\ \tau_{lame2} &= e^{-\alpha * l_{lame2}} \end{aligned} \tag{21}$$

Alors par le rapport de ces deux expressions nous nous s'affranchissons des effets systématiques du photomètre utilisé pour réaliser les mesures.

$$\frac{\tau_{lame1}}{\tau_{lame2}} = \frac{e^{-\alpha * l_{lame1}}}{e^{-\alpha * l_{lame2}}} \tag{22}$$

$$e^{-\alpha(l_{lame1}-l_{lame2})} = \frac{\tau_{lame1}}{\tau_{lame2}} \tag{23}$$

$$-\alpha(l_{lame1} - l_{lame2}) = ln\frac{\tau_{lame1}}{\tau_{lame2}} \tag{24}$$

$$\alpha = \frac{1}{(l_{lame2} - l_{lame1})} * ln\frac{\tau_{lame1}}{\tau_{lame2}} \tag{25}$$

$$\alpha = \frac{1}{(10.41 - 2.0065)} * ln\frac{0.865}{0.649} \tag{26}$$

$$\alpha = 0.03419 \tag{27}$$

Pour couvrir tout l'intervalle d'incertitude des mesures et les méthodes de mesures utilisées, nous posons un coefficient d'absorption avec une incertitude :

$$\boxed{\alpha_{240\mu m} = 0.034 + / - 0,0005\ mm^{-1}} \tag{28}$$

$$\boxed{\alpha_{550\mu m} = 0.0118\ mm^{-1}} \tag{29}$$

B Emissivité

Les équations ci-dessous permettent de calculer l'emissivité d'une interface (lentille ou lame) n'ayant pas subit de traitement anti-reflet sur les deux faces.

Nous savons que (avec 2R pour une réflexion par face) :

$$A + \tau + 2R = 1 \tag{30}$$

Or d'après la loi du rayonnement de Kirchhoff :

$$A = \varepsilon \tag{31}$$

Donc :

$$\varepsilon = 1 - \tau - 2R \tag{32}$$

C Transmission totale lame parallèle

Ci-dessous une estimation de transmission considérant une lame parallèle, sorte d'une transmission moyenne d'une lentille bombée. Pour une valeur précise, utiliser le logiciel Zemax. Les lentilles du BCN et du BFTS sont considérées comme parallèles, d'épaisseur respective égale à 15 et 22 mm.

Connaissant l'épaisseur des lentilles et sachant que $\tau_2 = e^{-\alpha * l}$ (l en mm), cela nous permet d'en déduire la transmission.

De plus nous savons que $\tau_{tot} = \tau_1 * \tau_2 * \tau_3$
et sur une surface sans un anti-reflet,
Nous avons $\tau_{tot} = \tau_2 * \tau_0$

C.1 Cas imagerie BCN

Epaisseur lentille = 22 mm

C.1.1 A 240 μm

Coefficient d'absorption $\alpha = 0.034 \pm 0,0005\ mm^{-1}$
D'après calcul :

$$\tau_2 = e^{-\alpha l} = 0.4733 \tag{33}$$

$$\tau_1 * \tau_3 = 0.9216 \tag{34}$$

$$\tau_{tot} = \tau_1 * \tau_2 * \tau_3 = 0.4362 \tag{35}$$

et

$$\varepsilon = 1 - \tau - 2R = 0.4838 \tag{36}$$

avec R = 0.04

C.1.2 A 550 μm

Coefficient d'absorption $\alpha = 0.0118\ mm^{-1}$
D'après calcul :

$$\tau_{tot} = 0.7101 \tag{37}$$

$$\varepsilon = 0.209 \tag{38}$$

C.2 Cas spectral BFTS

Epaisseur lentille = 15 mm

C.2.1 A 240 μm

Coefficient d'absorption $\alpha = 0.034 \pm 0,0005\ mm^{-1}$
D'après calcul :

$$\tau_2 = e^{-\alpha l} = 0.6005 \tag{39}$$

$$\tau_1 * \tau_3 = 0.9216 \tag{40}$$

$$\tau_{tot} = \tau_1 * \tau_2 * \tau_3 = 0.553 \tag{41}$$

et

$$\varepsilon = 1 - \tau - 2R = 0.3666 \tag{42}$$

avec R = 0.04

C.2.2 A 550 μm

Coefficient d'absorption $\alpha = 0.0118\ mm^{-1}$
D'après calcul :

$$\tau_{tot} = 0.772 \tag{43}$$

$$\varepsilon = 0.148 \tag{44}$$

C.3 Cas fenêtre de sortie du FTS

Epaisseur lame parallèle = 3 mm

C.3.1 A 240 μm

Coefficient d'absorption $\alpha = 0.034 \pm 0,0005\ mm^{-1}$
D'après calcul :

$$\tau_2 = e^{-\alpha l} = 0.903 \tag{45}$$

$$\tau_1 * \tau_3 = 0.9216 \tag{46}$$

$$\tau_{tot} = \tau_1 * \tau_2 * \tau_3 = 0.832 \tag{47}$$

et

$$\varepsilon = 1 - \tau - 2R = 0.088 \tag{48}$$

avec R = 0.04

C.3.2 A 550 μm

Coefficient d'absorption $\alpha = 0.0118\ mm^{-1}$
D'après calcul :

$$\tau_{tot} = 0.8895 \tag{49}$$

$$\varepsilon = 0.030 \tag{50}$$

D Caractéristiques optiques des lentilles BCN et BFTS

D.1 Cas imagerie BCN

Lentille L_{BCN} : épaisseur 22 mm, et diamètre 120 mm.
- La distance entre la source et la lentille est de 210 mm et la lentille par rapport au miroir de renvoi est de 200 mm.
- Focale équivalente f_{eq} = 1200 mm.
- Nombre d'ouverture F/# = 10.
- Champs en taille, pour une distance objet finie, Champs $\pm$12 mm.

D.2 Cas imagerie BFTS

Lentille L_{BFTS} : épaisseur 15 mm, et diamètre 100 mm. Lentille considérée comme à lame parallèle.
- La distance entre la lentille et le centre de miroir de renvoie est de 300 mm. La distance entre la fenêtre de photomètre et le centre du miroir de renvoi est de 175 mm (TBC). La distance entre la fenêtre de sortie du FTS et la lentille est de 205 mm (côte non exigeante).
- De ce fait la distance focale globale (équivalente) est f_{eq} = 2062 mm.
- Nombre d'ouverture F# = 20.44.
- Champs en angle, pour une distance objet infinie FOV = +-0.57^o.

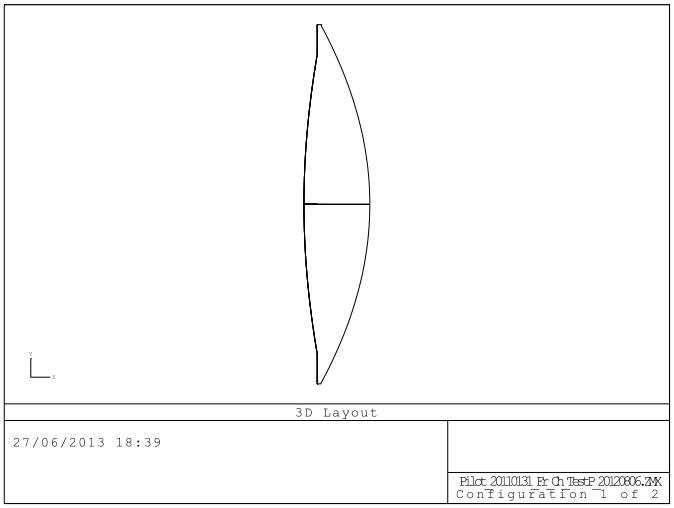


FIGURE 7: Géométrie de la lentille BCN

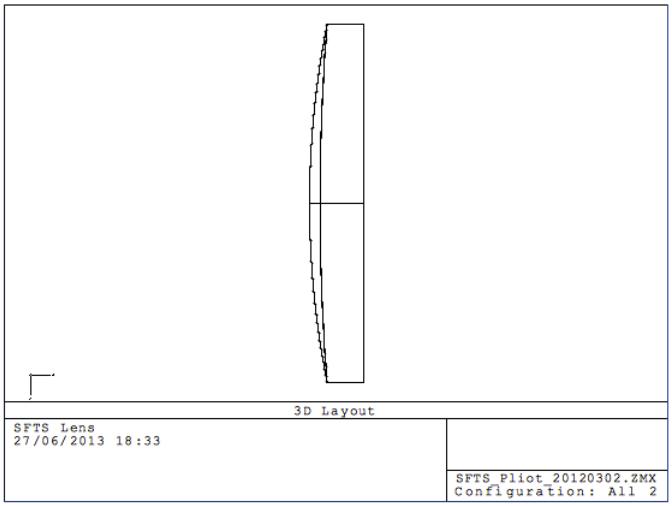


FIGURE 8: Géométrie de la lentille BFTS

Annexe B

Simulation photométrique

B.1 Mesures de transmissions

B.1.1 Fenêtre d'entrée de la caméra PILOT

La transmission de la fenêtre d'entrée (figure B.1) a été mesurée avec le spectromètre à transformée de Fourier de l'IAS. Son intervalle de mesure est compris entre 30 µm et 1.8 mm. Aux bornes de cette intervalle les mesures sont très bruitées, mais d'un point de vue instrumentale impossible à améliorer. Dans le modèle photométrique des essais sol à l'IAS, j'ai utilisé les données brutes. La partie des données bruitées a naturellement était atténuée par les filtres de coupures PILOT lors du produit de chaque transmission. Je n'ai pas calculé de valeur de transmission dans les zones bruitées.

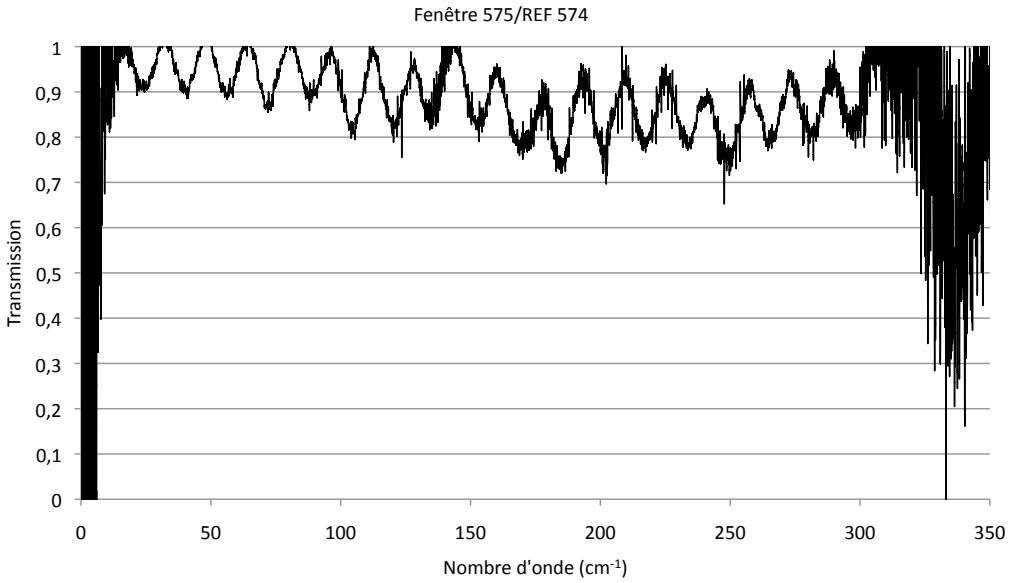


FIGURE B.1 – Transmission de la fenêtre d'entrée de la caméra.

B.1.2 Filtres de la caméra PILOT

La liste des données de transmission des filtres thermiques de la caméra PILOT, et des filtres de coupures à 240 µm et 550 µm est détaillée dans le tableau B.1. Les courbes de transmission correspondantes sont présentées pour les filtres thermiques dans la figure B.2, pour les filtres de coupures à 240 µm dans la figure B.3, et pour les filtres de coupures à 550 µm dans la figure B.4.

PILOT	position	reference	transmission data	data range
COMMON FILTERS				
flight window	300K	2x75um hotpressed complete.		
ground test window	300K			
Therm 1	300K	C8-C12	**T0787R7**	10 to 40 cm-1
			T0903R37	30 to 510 cm-1
			U0137R41	500 to 6000 cm-1
Therm 2	140K	C8-C12	**T0787R7**	10 to 40 cm-1
			T0903R37	30 to 510 cm-1
			U0137R41	500 to 6000 cm-1
65cm-1 LPE	80K	W1360	**T1111R10**	37 to 600 cm-1
			T1110R13	3 to 37 cm-1
Therm 3	40K	C12-C16	**T0786R4**	10 to 40 cm-1
			T0909R46	21 to 535 cm-1
			U0136R26	532 to 6000 cm-1
60cm-1 LPE	2.5K	W1359(PFIL3 type)+ARC	**T1116R16**	3 to 38 cm-1
			T1117R4	38 to 600 cm-1
80cm-1 LPE	2,5K	W1337	**T1071R19**	10 to 94 cm-1
			T1071R7	94 to 650 cm-1
half wave plate			**See HWP data**	See HWP data
Polarizer P10	BS for arrays	filter 1796		
240um BAND FILTERS				
Band1: 36cm-1 HPE	array	3 x W 1356	**T1111R25**	20 to 600 cm-1
		1 x W1506	**T1257R10**	20 to 600 cm-1
Band1: 48cm-1 LPE	array	3 x W1336	**T1071R16**	10 to 48 cm-1
			T1071R10	48 to 650 cm-1
		1 x W875	**T0308R13**	10 to 140 cm-1
Band1: 58cm-1 LPE	array	3 x W1375	**T0146R34**	5 to 600 cm-1
		1 x W1371	**T1117R25**	25 to 600 cm-1
550um BAND FILTERS				
Band2: 15.2cm-1 HPE	array	W984	**T0491R10**	3 to 40 cm-1 at 300K
			T0638R7	5 to 60 cm-1 at 1,5K
Band2: 21.2cm-1 LPE	array	W1376	**T1127R4**	5 to 140 cm-1
Band2: 25cm-1 LPE	array	W892	**T0328R18**	15 to 40 cm-1

TABLE B.1 – Liste des données de transmission des filtres de la caméra PILOT

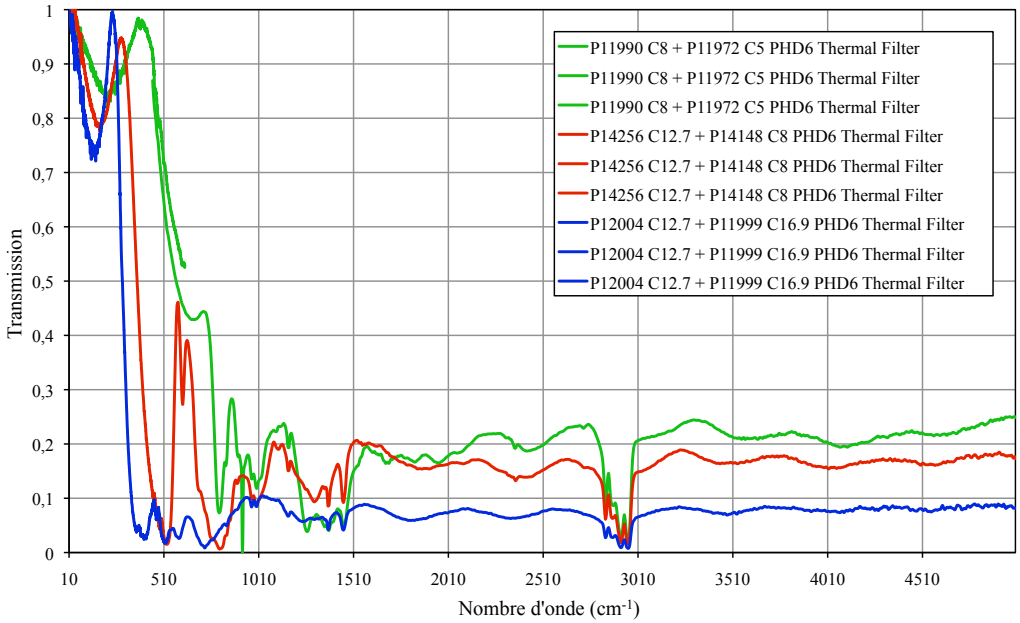


FIGURE B.2 – Filtres thermiques

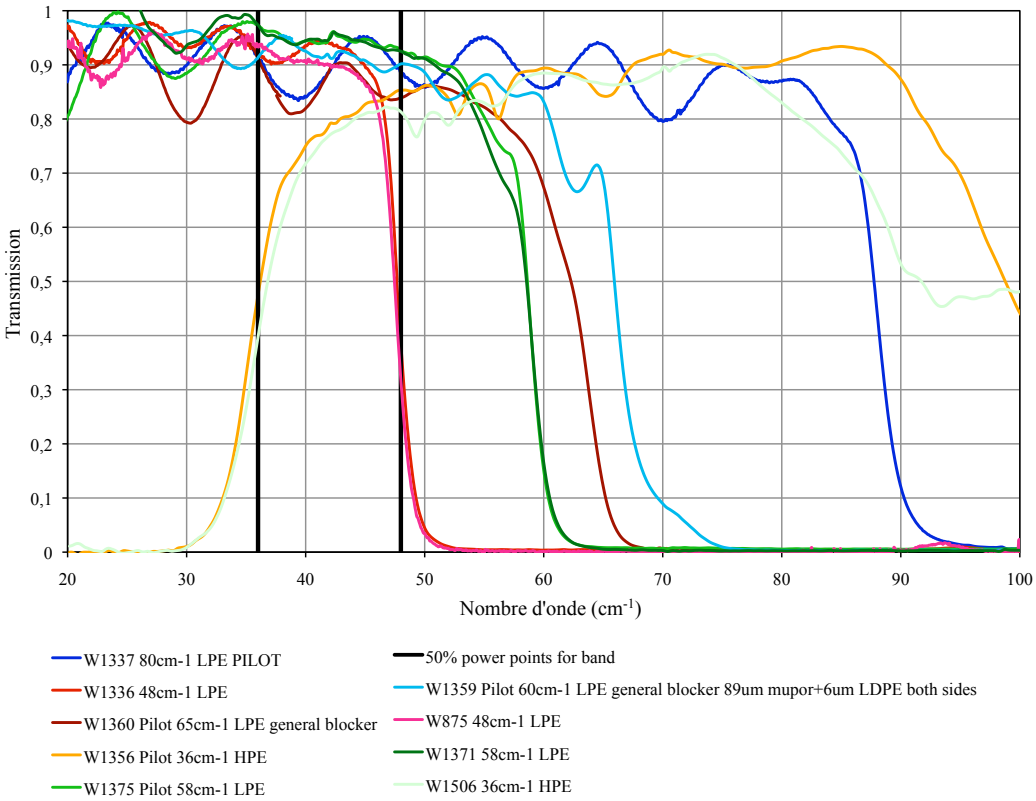


FIGURE B.3 – Filtres de coupures à 240 µm

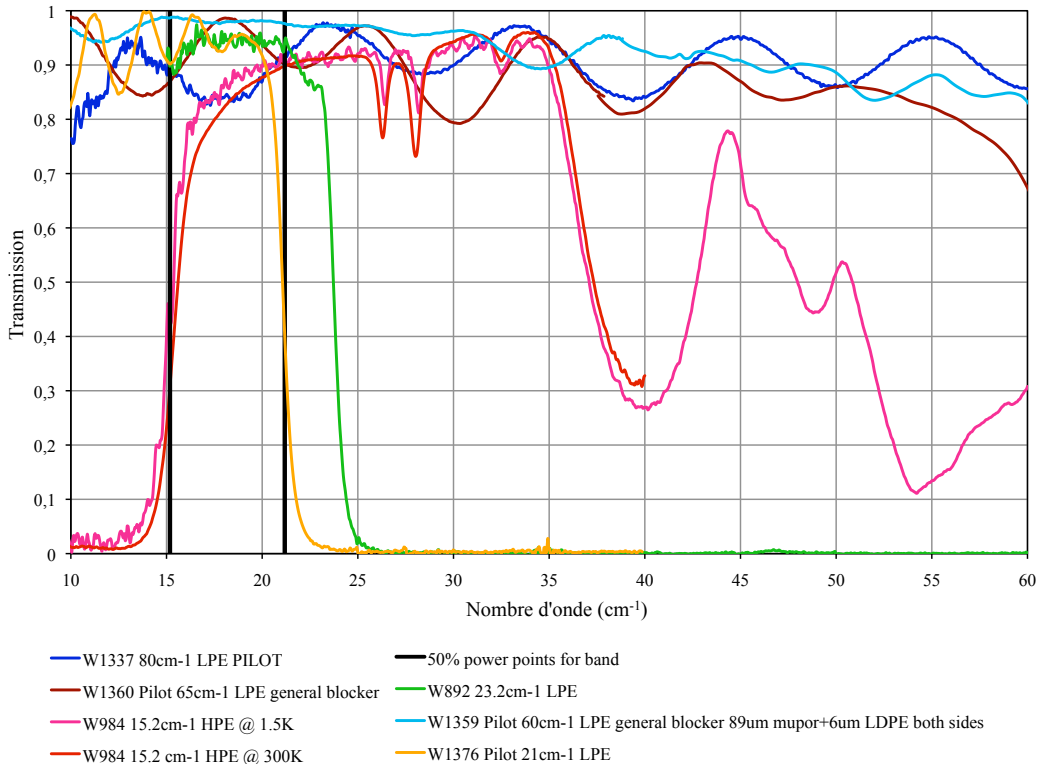


FIGURE B.4 – Filtres de coupures à 550 µm

B.1.3 Lame demi-onde

Les mesures de transmissions de la lame demi-onde en co-polarisation sont en figure B.5, et les mesures de transmissions de la lame demi-onde en cross-polarisation figure B.6.

B.2 Estimations spécifiques

Cette section regroupe les calcules et estimations faites sur les paramètres nécessaires au bilan photométrique.

B.2.1 Etendue géométrique d'un pixel du détecteur PILOT

Configuration Vol

Afin de calculer l'étendue géométrique G, nous considérons que le pixel central du détecteur voit le miroir primaire M1. L'élément source est le pixel central du détecteur et l'élément récepteur est le miroir primaire M1 (figure 3.1).

Surface d'un pixel :

$$S_{source} = c^2 \tag{B.1}$$

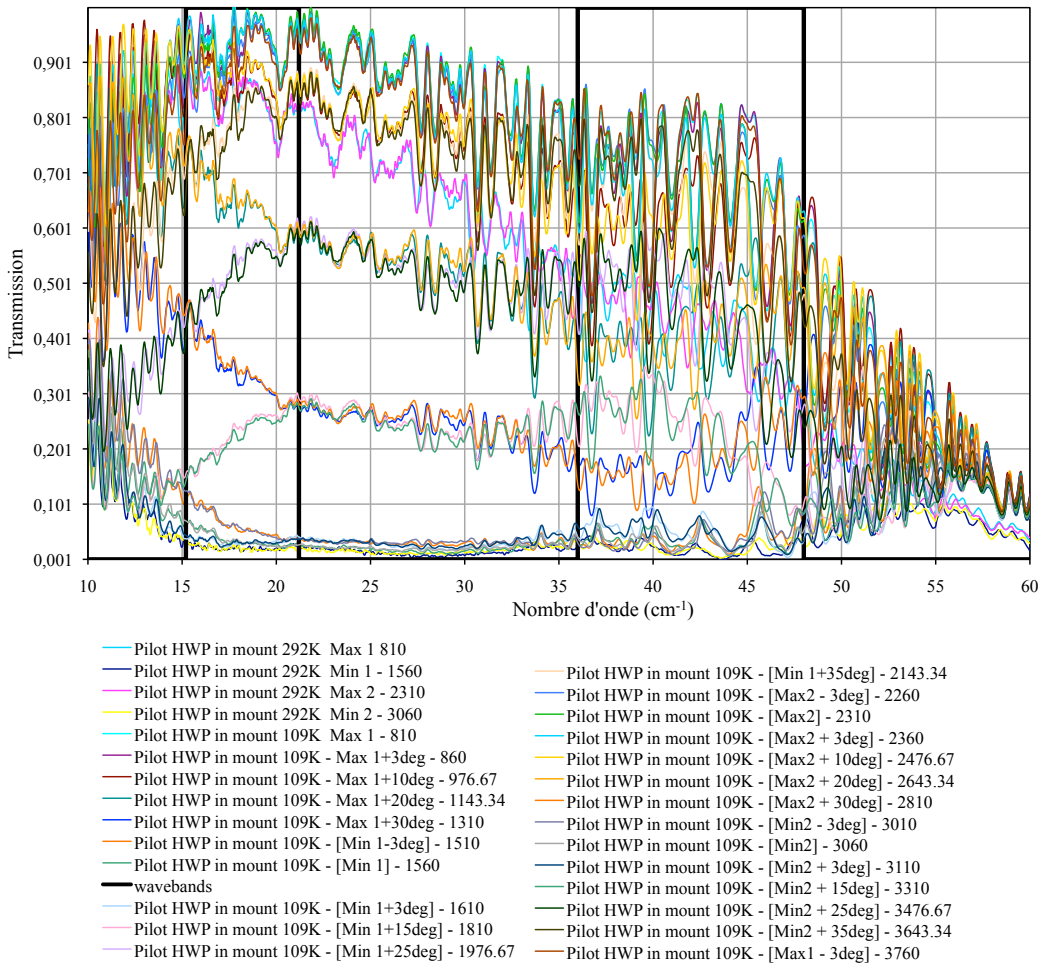


FIGURE B.5 – Transmission de la lame demi-onde en co-polarisation

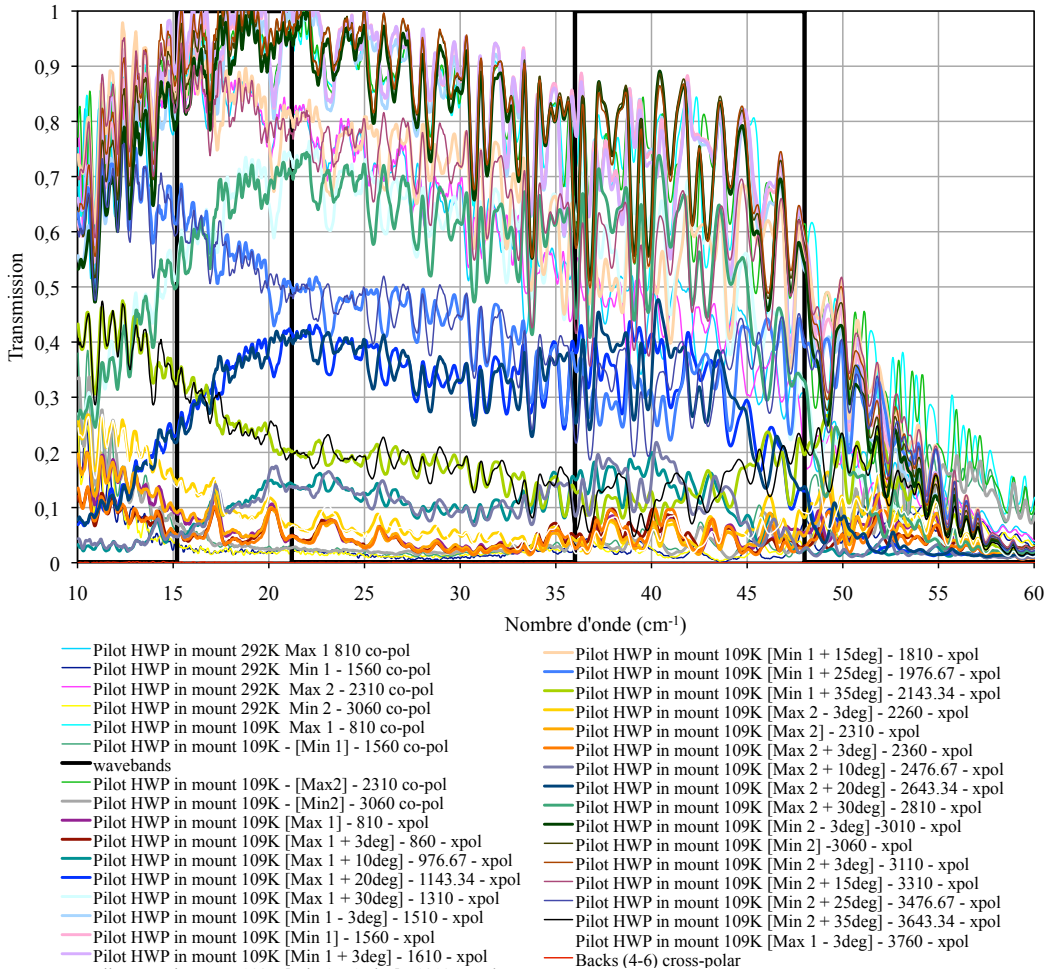


FIGURE B.6 – Transmission de la lame demi-onde en cross-polarisation

Angle d'ouverture θ :

$$tan\theta = \frac{1}{2} * \frac{1}{F/\#} \tag{B.2}$$

$$\theta = arctan\left(\frac{1}{2} * \frac{1}{F/\#}\right) \tag{B.3}$$

Angle solide Ω :

$$\Omega = 2\pi(1 - cos\theta) \tag{B.4}$$

Etendue géométrique G :

$$G = S_{source}\Omega \tag{B.5}$$

D'après les caractéristiques des détecteurs nous savons qu'un pixel est une surface carré de côté égale à c=750 µm, et d'après les caractéristiques du télescope (tableau 2.1), l'ouverture numérique du système optique est égale à F/#=2.5. En utilisant les équations B.1 à B.5, nous pouvons en déduire les estimations suivantes :

$$\begin{aligned} S_{source} &= 5.625 * 10^{-7} m^2 \\ \theta &= 11.31^o \\ \Omega &= 0.122\ sr \\ G_{M1} &= 6.86 * 10^{-8} m^2 sr \end{aligned}$$

Configuration BCN

D'après les simulations numériques détaillées dans l'annexe A.2, l'ouverture numérique du système optique BNC est égale à F/#=10. En utilisant les équations B.1 à B.5, nous pouvons en déduire les estimations suivantes :

$$\begin{aligned} S_{source} &= 5.625 * 10^{-7} m^2 \\ \theta &= 2.86^o \\ \Omega &= 0.0078\ sr \\ G_{MPBCN} &= 4.41 * 10^{-9} m^2 sr \end{aligned}$$

Configuration BFTS

D'après les simulations numériques détaillées dans l'annexe A.2, l'ouverture numérique du système optique BFTS est égale à F/#=20.44. En utilisant les équations B.1 à B.5, nous pouvons en déduire les estimations suivantes :

$$\begin{aligned} S_{source} &= 5.625 * 10^{-7} m^2 \\ \theta &= 1.4^o \\ \Omega &= 1.88 * 10^{-3}\ sr \\ G_{MPBFTS} &= 1.057 * 10^{-9} m^2 sr \end{aligned}$$

B.2.2 Bandes spectrales

A la longueur d'onde centrée sur λ=240 µm, la largeur de bande à mi-hauteur est de 20%. A la longueur d'onde centrée sur λ=550 µm, la largeur de bande à mi-hauteur est de 33% (Savini et al. 2010; Engel et al. 2008).

Unité	λ_{240} <	λ_{240}	λ_{240} >	λ_{550} <	λ_{550}	λ_{550} >
µm	216	240	264	459.25	550	640.75
cm^{-1}	46.3	41.66	37.88	21.77	18.18	15.61
GHz	1388.9	1250	1136	653	545	468

TABLE B.2 – Définition des bandes spectrales PILOT

B.2.3 Efficacité du détecteur

L'efficacité du détecteur η_{det} varie en fonction de la longueur d'onde centrée sur 240 µm et 550 µm (Rodriguez 2008). Pour l'étude photométrique, la valeur de l'efficacité η_{det} utilisée est égale à 1.

B.3 Développement informatique

Le modèle photométrique que j'ai développé en IDL®, permet de calculer la puissance totale reçue sur chaque pixel, soit pour une simulation de la configuration vol de la caméra, soit pour les bancs optiques BCN et BFTS. Dans chacun des cas il est possible de choisir l'angle de polarisation de la lame demi-onde et de faire passer le faisceau soit aux centres soit aux bords des lentilles.

Ce que la simulation numérique photométrique fait :

— une lecture de donnée de transmission optique, d'émissivité, de température mesurée et estimée pour chaque source et chaque élément optique,
— une interpolation des transmissions, pour créer un échantillonnage commun du nombre d'onde,
— un calcul des étendues géométriques des différentes configurations,
— un calcul de la puissance optique reçue sur chaque pixel issue de l'émission thermique de chaque élément optique,
— un calcul de la puissance totale reçue sur chaque pixel, issue de la totalité des émissions thermiques des éléments optiques.

Annexe C

Test de fuite en hélium 3 et 4

PILOT	Compte rendu d'essai Détection de fuite hélium 3 du réfrigérateur n°1 dans cryostat PILOT	Ref.: 2012_06_01_CRE_Detection_fuite_3He_IAS Date: 05 juin 2012 Page: - 1 -

Compte rendu d'essai

Détection de fuite hélium 3 du réfrigérateur n°1 dans cryostat PILOT

Prepared by	Vinent Buttice	Author(s)
Agreed by	Jean-Pierre Dubois	Local manager
Approved by	Christophe Marty Jean Philippe Bernard	Instrument Project Manager Prime Investigator

date	Modifications	Name
05/06/12	First version	Buttice

Reference documents

Applicable documents

Contents

1 RESUME DU DOCUMENT 2

2 MATERIELS ET MONTAGE....2

3 ETALONNAGE DU DETECTEUR DE FUITE 2

4 DETECTION DE FUITE HELIUM 3

5 COMPARAISON 3

6 CONCLUSION....3

7 ANNEXES....4

1 RESUME DU DOCUMENT

Ce document décrit les étapes de mesure de la détection de fuite d'hélium 3 du réfrigérateur numéro 1 dans le cryostat PILOT. Une première série de mesures est réalisée pour vérifier l'étalonnage du détecteur de fuite, une seconde série de mesures pour déterminer le taux d'hélium 3 piégé dans le cryostat, et enfin une dernière série de mesures pour vérifier la valeur du précédent taux de fuite mesuré.

2 MATERIELS ET MONTAGE

Description :

- Le photomètre est en phase de réchauffement, la température la plus basse est au plan focal FPU1 = 38,87 K. Le vide d'isolement est sur lui-même depuis 8 jours.
- Fuite étalon hélium 4 = 1.10^{-7} atm.cm^3/s (ou mbar.l/s), étalonnée en 2011
- Fuite étalon hélium 3, n°973 = 8.10^{-8} atm.cm^3/s (ou mbar.l/s), étalonnée en 2011
- Modèle du détecteur de fuite Adixen ASM.142

Les deux fuites d'hélium et le photomètre (via la vanne du vide d'isolement) sont reliés au détecteur de fuite, comme sur les images 1, 2 et 3 en Annexes.

3 ETALONNAGE DU DETECTEUR DE FUITE

La première étape est de vérifier si nous mesurons le même taux de fuite que les fuites étalons avec le détecteur de fuite.
Une première mesure est faite sur le tuyau entre le détecteur de fuite et la fuite étalon. Dans ce cas la vanne vers le cryostat et les vannes des fuites étalon sont fermées. Puis une seconde mesure est faite pour mesurer le taux de fuite de la fuite étalon à mesurer. Dans ce cas la vanne vers le cryostat est fermée et la vanne de la fuite étalon à mesurer est ouverte. Pour une mesure hélium 4 ou hélium 3, le détecteur de fuite est paramétré réciproquement sur He4 ou He3.

PILOT	Compte rendu d'essai Détection de fuite hélium 3 du réfrigérateur n°1 dans cryostat PILOT	Ref.: 2012_06_01_CRE_Detection_fuite_3He_IAS Date: 05 juin 2012 Page: - 3 -

	Taux de fuite (mbar.l/s)		Fuite étalon
	vanne étalon fermée	vanne étalon ouverte	
He4	5.10^{-8}	1.10^{-7}	1.10^{-7}
He3	$4{,}2.10^{-9}$	5.10^{-8}	8.10^{-8}

Le détecteur de fuite est correctement étalonné sur une détection d'hélium 4, par contre pour une détection d'hélium 3 l'ordre de grandeur est correct, à un facteur 1,6 près.

4 DETECTION DE FUITE HELIUM

Dans cette deuxième étape nous avons mesuré le taux d'hélium 4 puis d'hélium 3 piégé dans le vide d'isolement du cryostat. Dans ce cas les vannes des fuites étalon restent toujours fermées. Une première mesure est faite sur le tuyau entre le détecteur de fuite et le cryostat. Dans ce cas la vanne vers le cryostat est ouverte et la vanne du vide d'isolement est fermée. Puis une seconde mesure est faite pour mesurer le taux d'hélium dans le cryostat. Dans ce cas la vanne vers le cryostat est ouverte et la vanne du vide d'isolement est ouverte progressivement.

	Taux de fuite (mbar.l/s)	
	vanne vide fermée	vanne vide ouverte
He4	$1{,}5.10^{-8}$	9.10^{-5}
He3	$4{,}2.10^{-9}$	$1{,}4.10^{-8}$

Nous observons un facteur 6000 entre le taux d'hélium 4 et d'hélium 3. Le taux d'hélium 4 est élevé, c'est pour cela que le taux d'hélium 3 mesuré n'est peut-être qu'une détection de "l'aile" de la raie hélium 4.

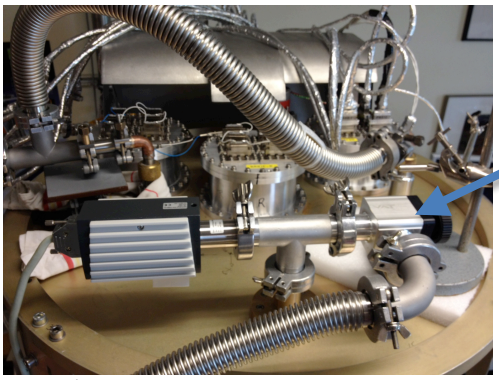
5 COMPARAISON

Pour vérifier si nous avons détecté une fuite d'hélium 4 ou d'hélium 3, nous avons refait la même mesure que précédemment avec un bidon rempli avec 100% hélium 4 (cf. Annexes image 4).
Le détecteur de fuite paramétré sur hélium 4 et une vanne pointeau permettent de régler un taux de fuite constant et identique au taux de fuite d'hélium 4 précédemment mesuré dans le cryostat, soit 10^{-4} mbar.l/s. Puis le détecteur de fuite paramétré sur hélium 3 et en gardant ce taux de fuite constant, la mesure donne un taux de fuite égal à $1{,}4.10^{-8}$ mbar.l/s.

6 CONCLUSION

Le taux d'hélium 3 piégé dans le cryostat mesuré est égal à $1{,}4.10^{-8}$ mbar.l/s, et le taux de fuite d'hélium 3 mesuré avec le bidon 100% hélium 4 est égal à $1{,}4.10^{-8}$ mbar.l/s. Nous pouvons en conclure qu'il n'y a pas d'hélium 3 piégé dans le cryostat, donc pas de fuite du réfrigérateur hélium 3 numéro 1.

7 ANNEXES



Vanne vide d'isolement

Image 1

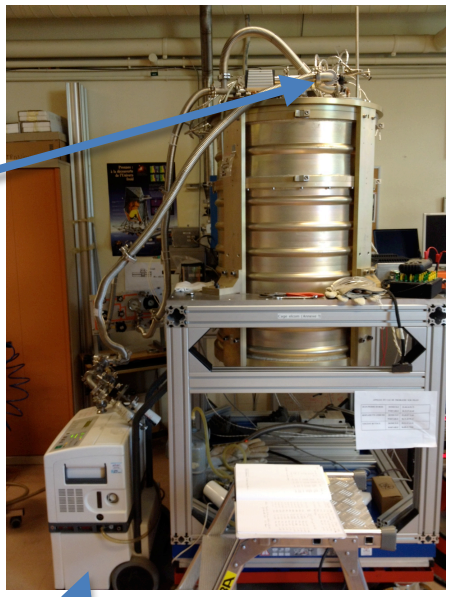
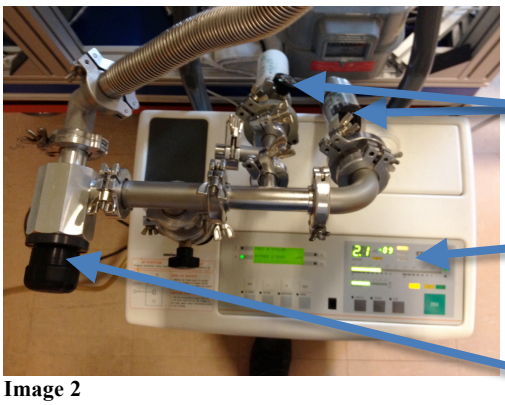


Image 3

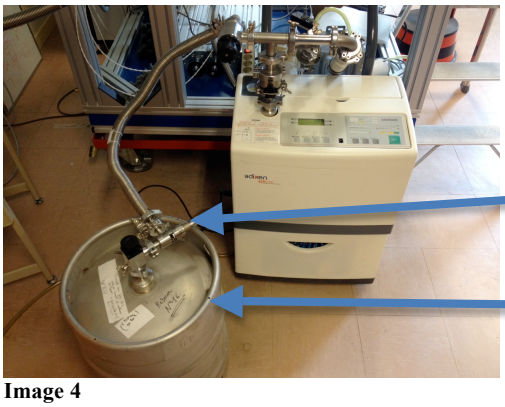


Fuites étalon et vannes

Détecteur de fuite

Vanne vers cryostat

Image 2



Vanne pointeau

Bidon 100% He4

Image 4

Annexe D

Chaîne d'acquisition et de traitement des données

D.1 Chaîne d'acquisition des données

Pour mesurer la réponse spectrale de l'instrument j'ai besoin de faire l'acquisition des données suivantes : la position du miroir mobile du spectromètre, la position de la lame demi-onde et la réponses de bolomètres, le tout synchronisé en temps. Pour cela je dois pouvoir contrôler différents éléments du système : le moteur de déplacement du miroir du spectromètre, le moteur de la lame demi-onde, et les détecteurs. D'où la nécessité de développer des logiciels de contrôle et d'acquisition des données de servitude de la caméra PILOT et du spectromètre utilisés pour la mesure de la réponse spectrale de la caméra. Sur l'organigramme simplifié en figure 5.8, nous pouvons voir les moyens informatiques et électroniques. Les équipements vol et sol de la caméra étaient sous la responsabilité de l'IRAP (annexe D.2), et les équipements sol de l'étalonnage étaient sous la responsabilité de l'IAS (annexe D.3). Pour le développement du code de traitement de données, j'ai utilisé le code déjà existant développé par l'IRAP en y ajoutant des modules spécifiques à l'étalonnage spectral (annexe D.4).

D.2 Acquisition des données de servitude et des bolomètres de PILOT

La définition de l'architecture logicielle, développée par l'IRAP (Marty 2013) pour le contrôle de l'ensemble de l'instrument scientifique pour les campagnes de tests et de vols, est représentée par la figure D.1.

Le calculateur de bord (OBC) de l'instrument exécute le logiciel de bord (OBSW). Les principales tâches du logiciel sont la lecture des données et le pilotage de l'ensemble des sous-systèmes composant l'instrument scientifique (HWPM, BOLC, UGTI, GPS, Gondola), et sauvegarde les données à bord de l'instrument avant la transmission au sol. De plus, le logiciel exécute des séquences de lecture, date les données, les formate et les

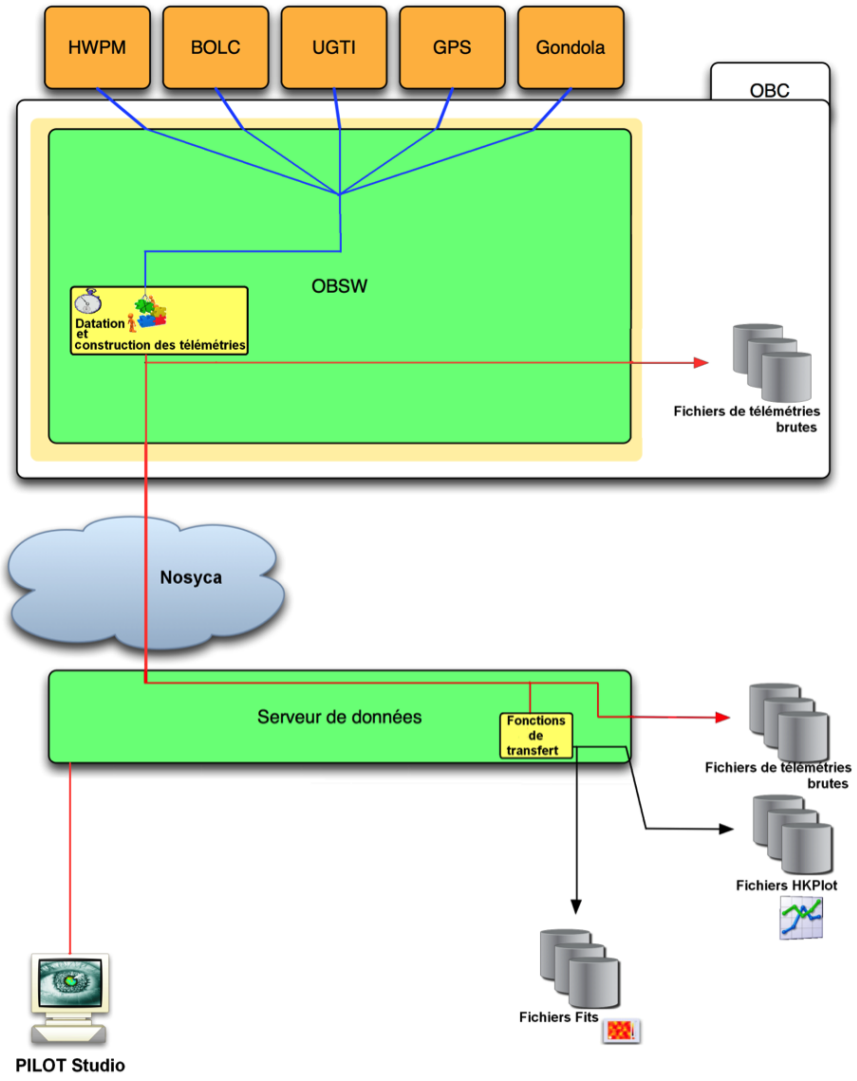


FIGURE D.1 – Architecture logicielle de l'instrument scientifique

transfert au sol.

Le serveur de données est le programme qui s'interface directement au logiciel bord. Son rôle est de transformer les données brutes des télémétries venant de l'OBC en données exploitables par les utilisateurs. Il assure trois niveaux de sauvegarde au sol. Les données de bord sont sauvegardées dans des fichiers de télémétries brutes. Ces données sont ensuite traitées numériquement par des fonctions de transfert pour les exploiter avec des grandeurs physiques, et elles sont de nouveau sauvegardées dans des fichiers sous deux formats. Des fichiers binaires exploitables par le logiciel de visualisation PILOT-Studio en temps réel, et des fichiers FITS exploitables pour le traitement de données scientifiques.

PILOT-Studio est composé de plusieurs logiciels permettant le pilotage de l'instrument et l'affichage des données pour le suivi en temps réel de l'instrument scientifique.

D.3 Acquisition des données du spectromètre

D.3.1 Interactions Homme-Machine

Au vue des paramètres de configuration définis dans la section 5.4.4, j'ai développé un logiciel de contrôle et d'acquisition de données du spectromètre. Une interface de commande développée avec le logiciel LabView® permet de modifier ces paramètres. Les besoins étant de pouvoir contrôler le déplacement du miroir mobile du spectromètre, et de faire l'acquisition des données de télémétrie du module de contrôle du miroir mobile (Aerotech 2003), en vue de les synchroniser avec les données des bolomètres.

L'interface représentée par la figure D.2 est composée en quatre blocs. Le premier est un bloc d'état indiquant le statut instantané de plusieurs paramètres de l'axe de translation du miroir mobile. Le second bloc est un bloc de visualisation graphique avec un historique de trois paramètres du miroir mobile (position, erreur de la position et erreur de la vitesse). Le troisième bloc est un bloc de commandes immédiates. Et le quatrième bloc est un bloc de commandes avec des boucles de commandes en balayage rapide (Rapid-scan) ou en plusieurs pause d'intégration (Step-and-integrate).

Le logiciel développé inclus deux modes de déplacement possibles, un mode en "Rapid-scan" et un mode en "Step-and-integrate". Dans ces deux cas, tous les paramètres de réglages et les télémétries sont stockés dans un fichier de données (tableau D.1). Les télémétries sont stockées à une fréquence de 4 Hz (250 ms).

	Rapid-scan		
	Définition	IHM	Unités
Paramètres de réglages	Position initiale	Start position	pas
	Position finale	End position	pas
	Vitesse de déplacement	Velocity	pas/s
	Temps de rampe	Ramp time	s
	Nombre de balayage	Number of scan	
	Nombre de postion HWP	HWP	
	Temps d'attente entre les positions HWP	Wait	s
Paramétres sauvegardés	date		s
	Position du miroir		pas
	Vitesse de déplacement		pas/s
	Numéro du balayage		
	Numéro de la position HWP		
	Bit de synchronisation du miroir		

	Step-and-integrate		
	Définition	IHM	Unités
Paramètres de réglages	Position initiale	Start position	pas
	Position finale	End position	pas
	Vitesse de déplacement	Velocity	pas/s
	Temps de rampe	Ramp time	s
	Nombre de balayage	Number of scan	
	Nombre de postion HWP	HWP	
	Temps d'attente entre les positions HWP	Wait	s
	Nombre de point d'arrêt sur le déplacement	Step	
	Temps de pause sur chaque point	Integration	ms
Paramétres sauvegardés	date		s
	Position du miroir		pas
	Numéro du point d'arrêt sur le déplacement		
	Numéro de la position HWP		
	fréquence chopper interne du FTS		Hz
	Bit de synchronisation du chopper du FTS		

TABLE D.1 – Extrait de la liste des télécommandes et des télémétries de la platine de translation du miroir mobile du spectromètre, en modes "Rapid-scan" et "Step-and-integrate".

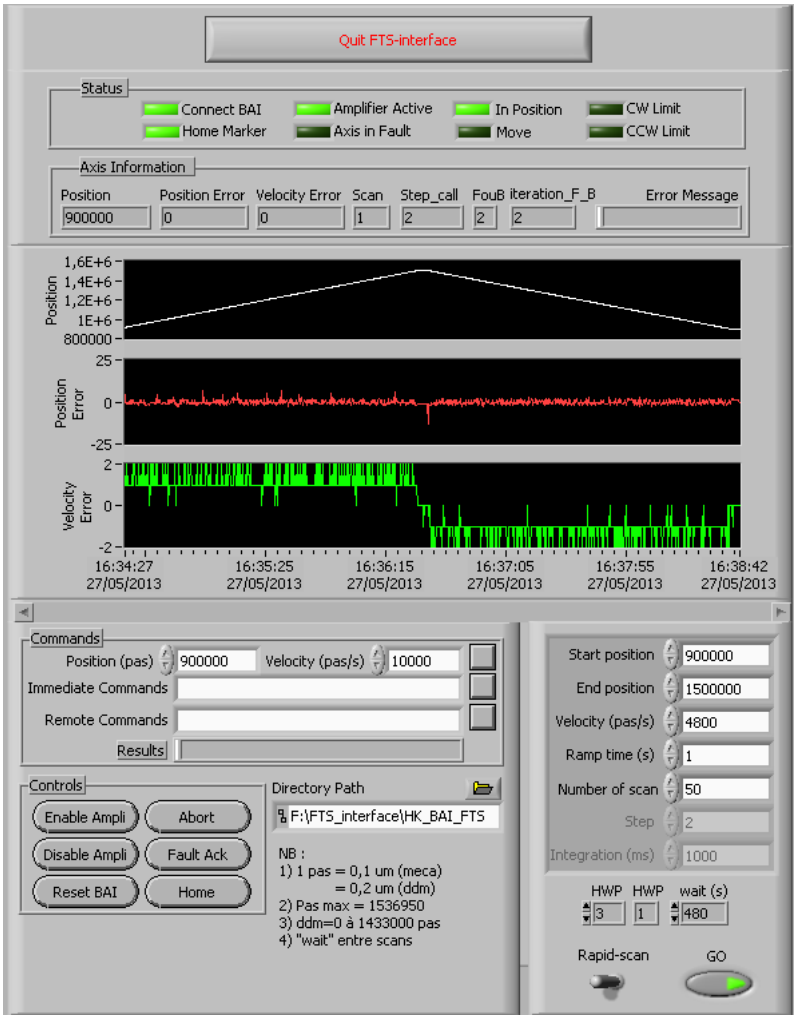


FIGURE D.2 – Interface de contrôle de la platine de translation du miroir mobile du spectromètre FTS.

Dans le cas de la mesure en "Rapid-scan" c'est le balayage du miroir qui module le signal, et dans le cas "Step-and-integrate" c'est la rotation du chopper qui module le signal. Lors de l'étalonnage, nous avons utilisé uniquement le mode de déplacement en "Rapid-scan". Au lancement des mesures, le miroir répète donc un certain nombre de déplacement d'une position de début de course à une position de fin de course. Durant ce déplacement les télémétries du module de contrôle de la platine de translation du miroir mobile et les données bolomètres sont stockées en continues.

D.3.2 Méthode de synchronisation

Afin de synchroniser les donner en temps, un bit de synchronisation du déplacement du miroir est stocké sur l'ordinateur de contrôle du miroir mobile, envoyé à l'OBC et stocké sur PC-server (PILOT-Studio). Lors du déplacement du miroir le bit = 1, à

l'arrêt le bit = 0. De même pour la synchronisation du chopper interne du spectromètre. Lorsque le chopper est ouvert le bit = 1, et fermé le bit = 0. Les bits ainsi stockés sont alors datés avec le même temps que les données des bolomètres.

D.4 Traitement des données scientifiques

D.4.1 Nature physique du problème

Mesurer la réponse spectrale de la caméra PILOT dont le plan focal est composé de 8*16*16 pixels.

D.4.2 Méthode de résolution

Utilisé de manière interactive, le code "PILOT Data Processing" est composé de plusieurs outils. Des outils IDL® sont développés spécifiquement pour lire les données FITS générées par le calculateur de bord PILOT, pour lire les données générées par le spectromètre de l'IAS, et pour synchroniser les données en temps. Des outils IDL® supplémentaire sont spécifiquement développés pour construire des interférogrammes et calculer des transmissions par transformée de Fourier (figure D.3) nécessaire à l'étalonnage spectral de la caméra PILOT.

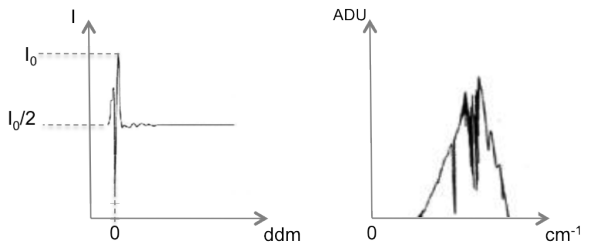


FIGURE D.3 – Représentation schématique d'un interférogramme et d'un spectre de transmission.

Le code permet d'initialiser une structure de données (appelée " !pilot_data") et de la remplir avec des données. La structure peut contenir des HK aussi bien BolC que UGTI, ICS, des données bolomètres (8*16*16), des données du spectromètres de l'IAS, etc. La structure de données étant une variable système IDL®, elle est accessible de tout programme IDL®, sans duplication des variables. Le code correspondant se trouve sur le CVS Pilot de l'IRAP (Toulouse) dans PILOT/src/DATAREAD. Les séquences du code sont décrites dans l'organigramme D.4.

Il existe deux méthodes de traitement afin de calculer la réponse spectrale par une transformée de Fourier. La première méthode est basée sur la moyenne des interférogrammes (figure D.5). La méthode consiste dans un premier temps à construire chaque interférogramme par pixel et par balayage du miroir mobile du spectromètre, puis dans un second temps de calculer la moyenne des interférogrammes de tous les balayages par

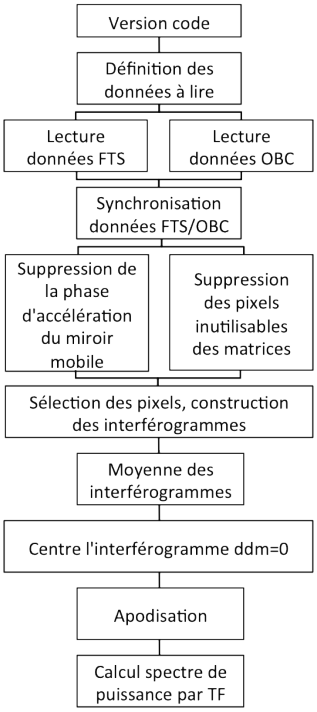


FIGURE D.4 – Organigramme du traitement de données.

pixel, et enfin dans un dernier temps de calculer la transmission de ces interférogrammes moyens par pixel, puis de moyenne les transmissions obtenues soit par matrice entières ou par plan focal, soit par région. La fonction utilisée pour cette première méthode est nommée "pdp_average_interferogram.pro" (annexe D.4.3).

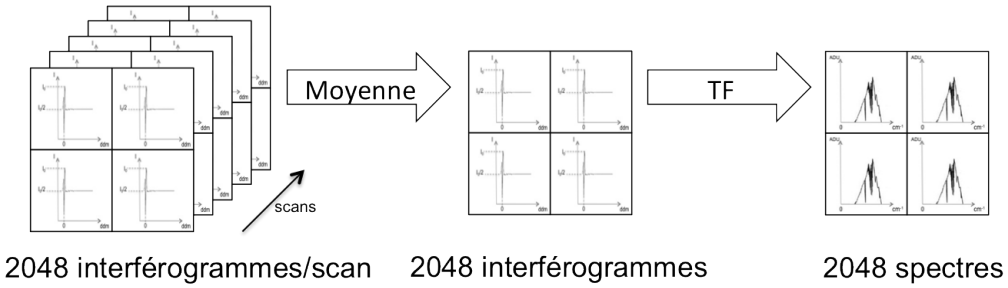


FIGURE D.5 – Méthode par la moyenne des interférogrammes.

La seconde méthode est basée sur la moyenne des transmissions (figure D.6). La méthode consiste dans un premier temps à construire chaque interférogramme par pixel et par balayage, puis dans un second temps de calculer la transmission de chacun de ces interférogrammes par pixels et par balayage, et enfin de calculer la moyenne de ces transmissions de tous les balayages par pixel, puis de moyenne les transmissions obtenues soit par matrice entières ou par plan focal, soit par région. La fonction utilisée pour cette seconde méthode est nommée "pdp_average_fts_transmission.pro" (annexe D.4.3)

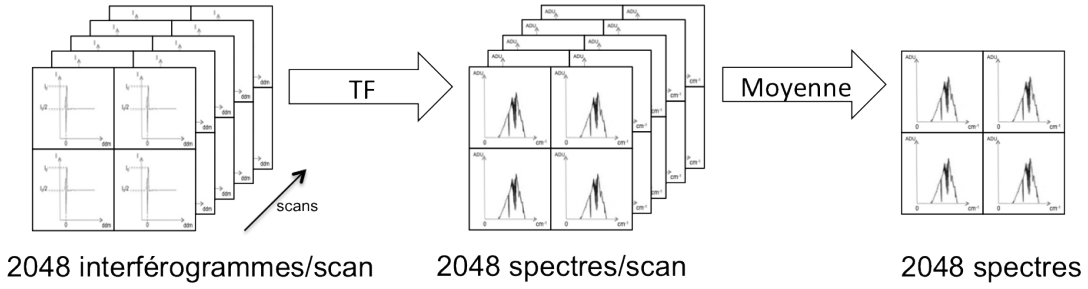


FIGURE D.6 – Méthode par la moyenne des spectres de transmission.

D.4.3 Modules de lecture et de traitement des données

— "pdp_init" : initialise la version.
— "pdp_info" : liste le contenu courant de l'ensemble de données et donne les formules utilisables dans un code pour récupérer les valeurs.
— "pdp_read_fts" : lit les données du spectromètre de l'IAS.
— "pdp_read_pilot_data" : lit les données de l'ordinateur de bord PILOT.
— "pdp_synchro_fts_obc" : synchronise les données spectromètre et ordinateur de bord, supprime les phases d'accélération du miroir mobile.
— "pdp_set_bad_pixels" : supprime les pixels inutilisables.
— "pdp_average_interferogram" : sélectionne des pixels, construit des interférogrammes correspondants, calcule la moyenne des interférogrammes et calcule la transmission par une transformée de Fourier.
— "pdp_average_fts_transmission" : sélectionne des pixels, construit des interférogrammes correspondants, calcule les transmissions correspondantes par une transformée de Fourier et calcule la moyenne des transmissions.

Annexe E

Publication SPIE

Buttice et al., "The PILOT experiment for the measurement of interstellar dust polarization : The camera ground calibration", in [Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy VI], edited by Wayne S. Holland, Jonas Zmuidzinas, Proc. of SPIE (2012) Vol. 8452

The PILOT experiment for the measurement of interstellar dust polarization : The camera ground calibration

Buttice V.[a], Pajot F.[a], Bernard J.-P.[b], Bouzit M.[a], Caillat A.[a], Crane B.[a], Chaigneau M.[a], Dubois J.-P.[a], Leriche B.[a], Longval Y.[a], Marty C.[b]

[a]Institut d'Astrophysique Spatiale - UMR 8617, Université Paris-Sud Bâtiment 121, 91405 Orsay, France;

[b]Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie - UMR 5277, 9 avenue du Colonel Roche BP 44346, 31028 Toulouse, France

ABSTRACT

The Polarized Instrument for Long wavelength Observation of the Tenuous interstellar medium (PILOT) is a balloon borne experiment designed to measure the polarized emission from dust grains in the galaxy in the submillimeter range. The payload is composed of a telescope at the optical focus of which is placed a camera using 2048 bolometers cooled to 300 mK. The camera performs polarized optical measurements in two spectral bands (240 μm and 550 μm). The polarization measurement is based on a cryogenic rotating half-wave plate and a fixed mesh grid polarizer placed at 45° separating the beam into two orthogonal polarized components each detected by a detector array. The Institut d'Astrophysique Spatiale (Orsay, France) is responsible for the design, integration, tests and spectral calibration of the camera. Two optical benches have been designed for its imaging and polarization characterization and spectral calibration. Theses setups allow to validate the alignment of the camera cryogenic optics, to check the optical quality of the images, to characterize the time and intensity response of the detectors, and to measure the overall spectral response. A numerical photometric model of the instrument was developed for the optical configuration during calibration tests (spectral), functional tests (imager) on the ground, and flight configuration at the telescope focus, giving an estimate of the optical power received by the detectors for each configuration.

Keywords: Bolometer arrays, interstellar dust, polarization, spectral calibration, submillimeter

1. INTRODUCTION

One major challenge in cosmology is the accurate measurement of the polarization of the Cosmic Microwave Background (CMB). The CMB is seen through several foregrounds emissions (clusters of galaxies, galaxies, free free, synchrotron, dust, zodiacal,...). The separation of these components requires a detailed knowledge of each of them. One of these is the polarized emission from dust grains in our galaxy. The Planck satellite has polarization measurements capabilities up to 353 GHz (Planck Collaboration[1]). PILOT was developed to measure this polarized emission at higher frequency, in the submillimeter range, at the peak of emission.

The main scientific objectives (J-P. Bernard et al.[2]) are the study of the properties of grain alignment with the galactic magnetic field, the determination of its large scale geometry, and the characterization of the dust emission polarization in the diffuse regions of the sky, where the dust is a foreground emission overlaid on the CMB.

Further author information: (Send correspondence to Buttice V.)
Buttice V.: E-mail: vincent.buttice@ias.u-psud.fr, Telephone: +33 169 858 611

Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy VI, edited by Wayne S. Holland, Jonas Zmuidzinas, Proc. of SPIE Vol. 8452, 84520U © 2012 SPIE · CCC code: 0277-786X/12/$18 · doi: 10.1117/12.925187

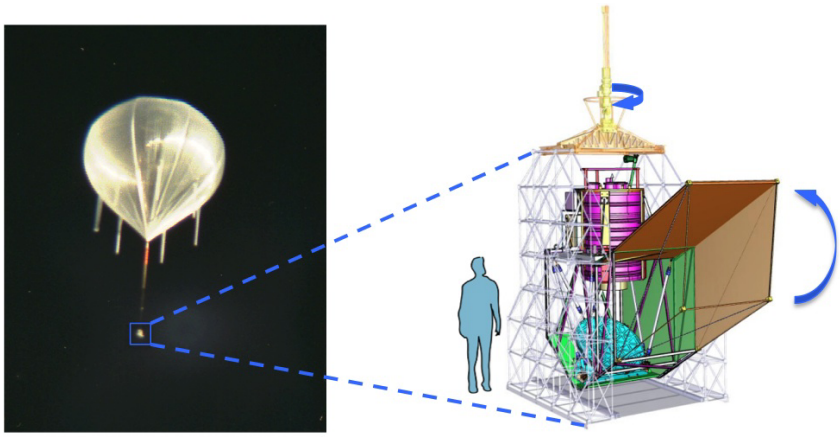


Figure 1. PILOT: Primary mirror (blue), camera (purple)

2. INSTRUMENTAL CONCEPT

PILOT is a balloon borne experiment floating at an altitude of 40 km over most of the Earth's atmosphere which has a high absorption in the submillimeter range.

The experiment is composed of a gondola developed by CNES, and the payload (Fig. 1). The pointing is controlled by a star tracker. The sky survey is done by scanning the sky. Scans are centered on the galaxy, and cover $\pm 30^o$ in azimuth and 20° to 60° in elevation. The payload is composed of a primary mirror (parabolic) of one meter in diameter and a camera (Fig. 2).

The fraction of polarized emission in the expected galactic signal is small (typically 5% to 10%). Several conditions are met to get a good signal/noise ratio. The optical design follows the Mizuguchi-Dragone condition, the secondary mirror (elliptical) together with the primary mirror (parabolic) composing an off-axis Gregory telescope. This combination reduces the straylight and the polarization induced by the telescope. All optical elements are at cryogenic temperatures (2K) excepted the primary mirror. This reduces the instrumental thermal background on the detectors.

The camera combines two functions, imaging and polarimetry in two spectral bands (240 μm and 550 μm). The polarization detection is based on a cryogenic rotating half-wave plate and a fixed mesh grid polarizer placed at 45° splitting the beam into two orthogonal polarized components each detected by a detector array.

The two focal plane arrays are composed each of four 16x16 pixels sub-arrays of bolometers (Fig. 3) cooled at 300 mK by means of a 3He sorption fridge (Torre and Chanin[3]). This large number of detectors (2048 bolometers) increases the number of simultaneous measurements, therefore increasing both the mapping speed and the sensitivity for measuring the polarization.

The PILOT project is under IRAP (Toulouse, France) overall responsibility. The PILOT camera and its characterization are under IAS (Orsay, France) responsibility.

3. GROUND TESTS AND CALIBRATION OF THE CAMERA

Two optical benches have been developed for the ground tests, one for checking imaging and polarization characteristics, and one for the spectral calibration of the camera.

3.1 Functional test

The entrance window of the camera is closed by an aluminum plate for the functional test. The test allows the validation of all subsystems of the camera: the temperature sensors, the internal calibration source, the mechanism rotating the half-wave plate, the detectors. These functional tests are performed in different configurations: under atmospheric pressure, under vacuum at 300 K, 77 K, 4 K, 2 K and 300 mK, with the cryostat upright

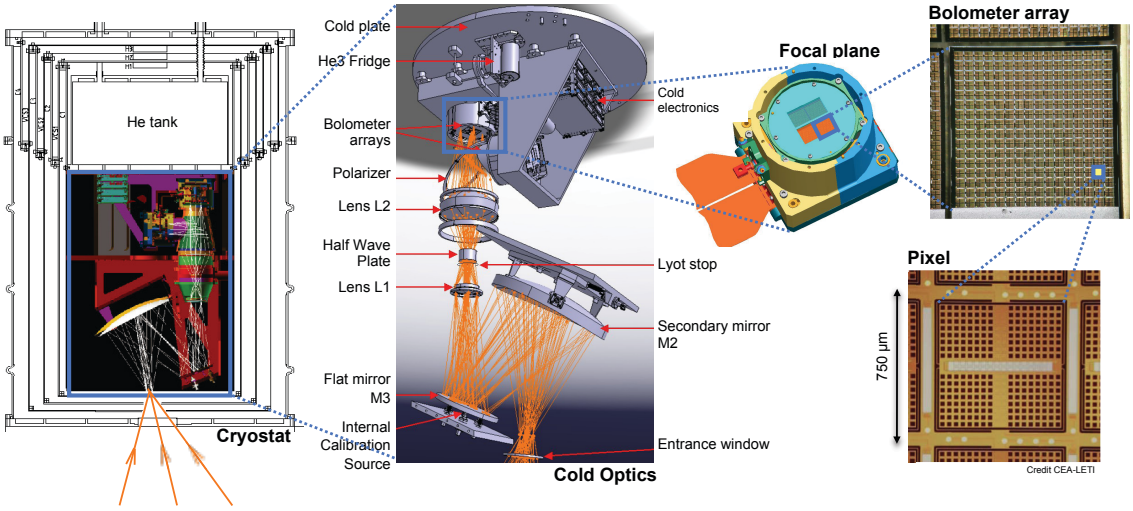


Figure 2. Camera.

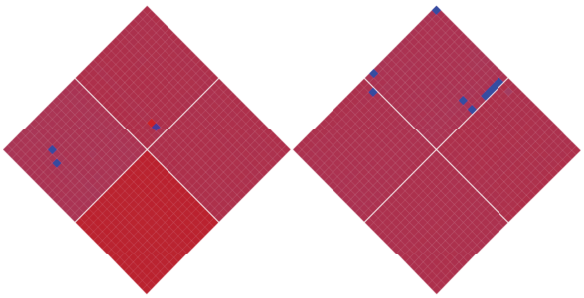


Figure 3. Detector arrays quicklook.

and inclined. The detectors are calibrated for a set of 300 mK stage base temperature in order to optimize their response.

3.2 Imagery test

The optical bench for the imagery tests is composed of an optical interface coupling a source (hot spot) and the camera. The image of the source covers about 20 pixels in diameter on the detector array with a source of 1 mm in diameter, and can be moved across it by means of a set of translation stages. This interface is kept under nitrogen atmosphere to limit absorption by water vapor. This bench (Fig. 4A) allows to validate the alignment of the camera internal cold optics, to check the optical quality of the images, and to determine the detector temporal response.

3.3 Spectral test and calibration

Spectral band mismatch between the two polarized focal planes can induce systematic errors in the polarization properties. We use two sets of bandpass filters at 240 μm. Therefore a precise spectral calibration of the two focal plane arrays is required. It is measured for all angular positions of the half-wave plate.

The optical bench developed for the spectral test and calibration is based on a Martin-Puplett type Fourier transform spectrometer (FTS) used as a spectrally modulated source. This method was successfully used for the Planck/HFI spectral calibration (Pajot et al.[4]). This bench (Fig. 4B) allows to characterize the overall spectral response.

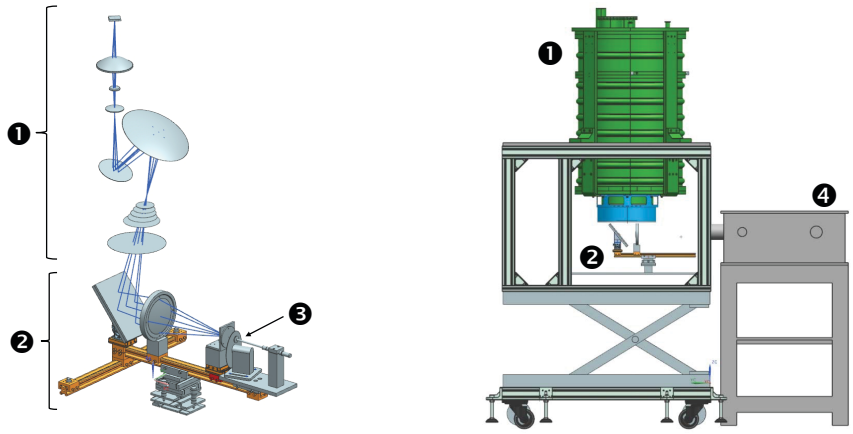


Figure 4. Optical benches : A) Optical design of optical bench for imager test. B) Optical bench for spectral test. 1-Photometer, 2-Source/Photometer interface, 3-Source, 4-Spectrometer with internal source

A first software, developed in LabView (TM), controls the FTS moving mirror translation and the camera data acquisition. The synchronization between the bolometer readout and the FTS optical path difference allows to split the data timeline into interferograms using a second software developed in IDL (TM) (Interactive Data Language). The spectral response is computed for each pixel of the array by Fourier transform of the corresponding interferogram. Given the large number of pixels, specific tools allow to perform a statistical analysis of the spectral response on groups of pixels (mean, standard deviation).

4. PHOTOMETRIC SIMULATION

A numerical photometric model of the instrument was developed for the optical configuration during the functional tests and the calibration on the ground, for both imagery and spectral setups, and the flight configuration at the telescope focus. This model gives an estimate of the background optical power received by the detectors for each configuration. This estimate is equal to the sum of the contributions of the thermal emission of each element on the optical path of the instrument. (Equation (1) and Principles of optics[5])

$$P(\nu) = \sum_{i=0}^{N} \left[\int_0^{\infty} \varepsilon_i \left(\prod_{j=i+1}^{N} \tau_j(\nu) \right) B_\nu(T_i, \nu) \eta_{det}(\nu) S_{pix} \Omega_i d_\nu \right] \tag{1}$$

where ε_i is the emissivity of the element i, $\tau_j(\nu)$ is the optical transmission at frequency ν of element j, $B_\nu(T_i, \nu)$ is the blackbody surface brightness at frequency ν for the temperature T_i of the element i, η_{det} is the detector efficiency as a function of frequency ν, S_{pix} is the pixel area, and Ω_i is the solid angle of illumination of a pixel of the array by the optical element i.

Knowledge of the temperature, emissivity and the transmission of each element is required (Table 1). The spectral transmission of the entrance window, the half-wave plate (HWP), and the filters are measured at the component level on the two PILOT bandwidths. For the HWP the measurements are performed for several positions between a polarizer and an analyzer oriented in co-polarization and in cross-polarization. The calculation of the lenses transmission is based on the absorption coefficient α of the polypropylene they are built of, and the path length traveled by each ray. Lenses L1 and L2 are aspherical. The thickness at the center of L1 is 14 mm and that of L2 is 38 mm. The large absorption of these lenses has a strong impact on the total transmission of the camera.

The two plots on Fig. 5 represents the transmission of the camera for three positions of the HWP, in co-polarization and in cross-polarization, one at the maximum, one at the minimum and one at an intermediate

Table 1. Inventory of the optical elements of the photometer

i	Element	T (K)	Emissivity		Transmission (average)	
			240 μm	550 μm	240 μm	550 μm
0	Primary mirror M1	253	0.01	0.01	0.980	0.980
1	Entrance window	253	0.004	0.004	0.912	0.981
2	Thermal filter 1	253	0.01	0.01	0.990	0.997
3	Thermal filter 2	140	0.01	0.01	0.990	0.997
4	Blocking filter 65 cm^{-1}	80	0.03	0.01	0.875	0.985
5	Thermal filter 3	40	0.01	0.01	0.937	0.977
6	Blocking filter 60 cm^{-1}	2.5	0.03	0.02	0.915	0.979
7	Blocking filter 80 cm^{-1}	2.5	0.03	0.03	0.880	0.839
8	Secondary mirror M2	2.5	0.02	0.02	0.980	0.980
9	Flat mirror M3	2.5	0.02	0.02	0.980	0.980
10	Lens 1	2.5	1-τ	1-τ	[0.551 ; 0.793]	[0.885 ; 0.929]
	Half wave plate					
	τ_{HWP}^{max} position					
11	co-polarization 0°	2.5	0.03	0.01	0.757	0.937
	cross-polarization 45°	2.5	0.03	0.01	0.737	0.987
12	Lens 2	2.5	1-τ	1-τ	[0.213 ; 0.346]	[0.717 ; 0.752]
13	Polarizer	2.5	0.03	0.03	0.500	0.500
	Selective filters					
	240 μm, *set* #1					
14	36 cm^{-1}	0.3	0.03	-	0.780	-
15	48 cm^{-1}	0.3	0.03	-	0.941	-
16	58 cm^{-1}	0.3	0.03	-	0.946	-
	Selective filters					
	240 μm, *set* #2					
14	36 cm^{-1}	0.3	0.03	-	0.762	-
15	48 cm^{-1}	0.3	0.03	-	0.901	-
16	58 cm^{-1}	0.3	0.03	-	0.949	-
	Selective filters					
	550 μm					
14	15.2 cm^{-1}	0.3	-	0.03	-	0.867
15	21.2 cm^{-1}	0.3	-	0.03	-	0.938
16	25 cm^{-1}	0.3	-	0.03	-	0.947
	Total Transmission			co-pol 0°	0.04	0.183
				x-pol 45°	0.039	0.193

position. The variations are due to two parameters : the travel of the rays, at the lens edge or at the lens center and the absorption coefficient α of the polypropylene. We note the two pics at the PILOT range.

The results obtained for the ground configurations demonstrate the need of an attenuator to prevent an excessive flux to saturate the detectors. The results for the flight configuration determine the choice of detectors (Table 2). The current photometric estimate demonstrated the possible use of the existing Herschel PACS spare detectors for the first flight at 240 μm. Eight 16x16 matrices were available (Simoens et al.[6]).

Table 2. Photometric model results.

Configurations	Expected flux (pW/px)		
	240μm, set #1	240μm, set #2	550μm
Imagery test	[58.35 ; 136,42]	[53.08 ; 124.10]	[58,02 ; 68.88]
Spectral calibration	[57.21 ; 133.75]	[52.04 ; 121.67]	[55.87 ; 61.51]
Flight	[2.29 ; 5.36]	[2.09 ; 4.90]	[2.01 ; 2.21]

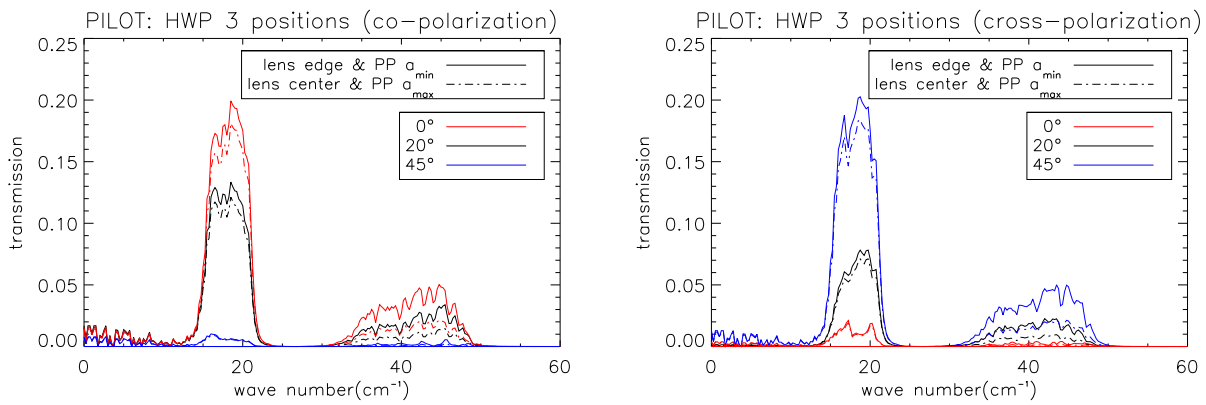


Figure 5. Optical transmission of the PILOT camera, with the 550 μm and the 240 μm (set #1) selective filters: A) co-polarization. B) cross-polarization. Note that the intermediate position is not centered.

5. CONCLUSION

The PILOT camera is now undergoing the functional test phase. All validation tests are nominal. After the characterization and the spectral calibration, the camera will be delivered at the Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie (Toulouse, France). The camera will then be aligned and integrated with the primary mirror of the telescope on the CNES gondola, for characterization and optical polarization calibration of the complete instrument. The first flight is planned for mid 2013.

REFERENCES

[1] Planck Collaboration, "Planck early results. I. the planck mission," *Astronomy and Astrophysics* **536**, A1 (2011).

[2] Bernard, J.-P. et al., "PILOT: Measuring polarization in the interstellar medium," *EAS Publications Series* **23**, 189–203 (2007).

[3] Torre, J.-P. and Chanin, G., "Miniature liquid3He refrigerator," *Review of Scientific Instruments* **52**(2) (1984).

[4] Pajot, F. et al., "Planck pre-launch status: HFI ground calibration," *Astronomy and Astrophysics* **520**, A10 (2010).

[5] Born, M. and Wolf, E., [*Principles of optics - Electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light*], Cambridge university press, 7 (expanded) ed. (1999).

[6] Simoens, F. et al., "Submillimeter bolometers arrays for the pacs/herschel spectro-photometer," in [*Millimeter and Submillimeter Detectors for Astronomy II*], Zmuidzinas, J., Holland, W., and Withington, S., eds., **5498**, 177–186, SPIE (2004).

Liste des figures

1.1 Carte du fond diffus cosmologique 2
1.2 Grain de poussière interstellaire 2
1.3 Les avant-plans du CMB 3
1.4 Spectre électromagnétique 3
1.5 Nuage de poussières sombre Barnard 68 4
1.6 Carte de polarisation WMap 5
1.7 Spectre Infrarouge/Micro-onde d'émission des poussières 6

2.1 Le ballon stratosphérique et la nacelle scientifique 11
2.2 La charge pointée 12
2.3 La caméra 12
2.4 Schéma optique du télescope PILOT 13
2.5 Schéma optique du ré-imageur 14
2.6 Simulation de l'observation du plan galactique 16
2.7 Le miroir primaire 17
2.8 Enveloppe extérieure et écrans thermiques 18
2.9 La fenêtre d'entrée et le chauffage fenêtre 18
2.10 Filtres commun et thermique 19
2.11 Positionnement des filtres commun et thermique 20
2.12 Les lentilles L1 et L2 20
2.13 Miroir elliptique M2 21
2.14 Miroir plan M3 21
2.15 Alignement optique des miroirs M2 et M3 22
2.16 Lame demi-onde et HWPM 23
2.17 Essais de rotation du mécanisme de la lame demi-onde à 4K 25
2.18 Polariseur 25
2.19 Filtres de coupure 25
2.20 Décomposition d'un plan focal 26
2.21 Réponse des matrices du plan focal transmission 27
2.22 Réponse des matrices du plan focal réflexion 28
2.23 Carte des signaux des matrices des plans focaux 29
2.24 Réfrigérateur hélium 3 29
2.25 Organigramme fonctionnel de l'architecture des électroniques 30
2.26 Diagramme de Gantt 33

3.1 Angle solide 37
3.2 Montage optique configuration vol 39
3.3 Transmission atmosphérique 38 km 40
3.4 Transmissions en configuration vol 46

4.1 Banc optique essais fonctionnels 50
4.2 Système de pompes à vide 51
4.3 Descente cryogénique des écrans et de l'évaporateur 53
4.4 Descente cryogénique des optiques froides 53
4.5 Signal du fond thermique à 300 K sur un pixel 55
4.6 Carte du fond thermique à 300 K 56
4.7 Carte du fond thermique à 77 K 56
4.8 Evolution du signal d'un bolomètre suivant les fonds thermiques à 300 K et à 77 K 57
4.9 NEP du plan focal transmission à 300 K 58
4.10 NEP du plan focal réflexion à 300 K 59
4.11 Modulation de la source interne d'étalonnage 59
4.12 Image de la source interne d'étalonnage 60
4.13 ICS et position HWP 61
4.14 Mesure HWP sur le plan focal transmission 62
4.15 Mesure HWP sur le plan focal réflexion 62

5.1 Banc optique des essais d'imagerie 65
5.2 Interface du BCN 66
5.3 Schéma optique du banc BCN 67
5.4 Construction d'un interférogramme 73
5.5 Banc optique des essais de mesures spectrales 75
5.6 Schéma optique du spectromètre à transformée de Fourier 76
5.7 Interface du BFTS 78
5.8 Organigramme simplifié de l'architecture électronique de l'instrument . . 78
5.9 Bruit sur les spectres en fonction du nombre de balayages 80
5.10 Schéma optique du banc BFTS 81
5.11 Filtre atténuateur 88
5.12 Transmission atténuateur 89

6.1 Alignement optique de l'interface BCN 92
6.2 Image de la source du BCN 93
6.3 Simulation de la PSF de la source du BCN 94
6.4 Eclairement de la source sur les matrices 95
6.5 Position du miroir mobile du FTS et de HWP 96
6.6 Comparaison d'interférogrammes 97
6.7 Représentation en 2D des interférogrammes d'une matrice 98
6.8 Réponse spectrale de la matrice 1 99
6.9 Réponse spectrale sur un large intervalle spectral 99

6.10 Evolution de la réponse spectrale en fonction de la position HWP 100
6.11 Réponses spectrales : polarisation horizontale, HWP 1 et 8 101
6.12 Réponses spectrales : polarisation horizontale, HWP 5 102
6.13 Réponses spectrales : polarisation verticale, HWP 1 et 8 103
6.14 Réponses spectrales : polarisation verticale, HWP 5 104
6.15 Comparaison entre les transmissions mesurées et estimées en co-polarisation 106
6.16 Réponses spectrales avec ou sans atmosphère d'azote 106

B.1 Transmission de la fenêtre d'entrée de la caméra 143
B.2 Filtres thermiques 145
B.3 Filtres de coupures à 240 µm 145
B.4 Filtres de coupures à 550 µm 146
B.5 Transmission de la lame demi-onde en co-polarisation 147
B.6 Transmission de la lame demi-onde en cross-polarisation 148

D.1 Architecture logicielle de PILOT 158
D.2 Interface de contrôle du miroir mobile 160
D.3 Représentation schématique d'un interférogramme et d'un spectre 161
D.4 Organigramme du traitement de données 162
D.5 Méthode par la moyenne des interférogrammes 162
D.6 Méthode par la moyenne des spectres 163

Liste des tableaux

1.1 Essais en fonction des objectifs 7

2.1 Les spécifications 15
2.2 Caractéristiques des filtres de la caméra PILOT 19

3.1 Liste des paramètres photométriques 36
3.2 Caractéristiques des sources en configuration vol 40
3.3 Caractéristiques des éléments optiques de la caméra en vol 42
3.4 Résultats Configuration Vol, dans le cas CO-polarisation 44
3.5 Résultats Configuration Vol, dans le cas CROSS-polarisation 44
3.6 Détail des résultats en configuration vol 45
3.7 Résultat de simulation IRAP/IAS 47

4.1 Orientation et numérotation des matrices BolC 55
4.2 Orientation et numérotation des matrices pour le traitement des données 55

5.1 Caractéristiques des sources BCN 68
5.2 Caractéristiques des éléments optiques de l'interface BCN 68
5.3 Caractéristiques des éléments optiques de la caméra BCN 69
5.4 Résultats en configuration BCN, dans le cas co-polarisation 71
5.5 Résultats en configuration BCN, dans le cas cross-polarisation 71
5.6 Atténuateur pour le banc optique BCN 72
5.7 Caractéristiques du spectromètre 76
5.8 Caractéristiques de la table de translation du miroir mobile du FTS . . . 77
5.9 Caractéristiques des sources BFTS 82
5.10 Caractéristiques des éléments optiques du spectromètre 82
5.11 Caractéristiques des éléments optiques de l'interface BFTS 83
5.12 Résultats en configuration BFTS, dans le cas co-polarisation 85
5.13 Résultats en configuration BFTS, dans le cas cross-polarisation 85
5.14 Atténuateur pour le banc optique BFTS 86
5.15 Facteur d'atténuation de l'atténuateur pour bancs optiques 87
5.16 Simulation photométrique avec atténuateur 87
5.17 Transmission atténuateur 89

6.1 Largeur à mi-hauteur de la tache image 93

6.2 Campagne d'étalonnage spectral 96
6.3 Réponses spectacles maximales suivant les matrices 100
6.4 Caractéristiques des bandes spectrales mesurées 105

B.1 Liste des données de transmission des filtres de la caméra PILOT 144
B.2 Définition des bandes spectrales PILOT 150

D.1 Télécommandes et télémétries de la platine de translation du miroir FTS 159

Liste des acronymes

AIT/AIV	Assemblage, Intégration, Test, Validation
ARC	Anti Reflection Coating
BAI	Electronique de contrôle de la platine de translation du miroir mobile du spectromètre (Aerotech BA-Intellidrive)
BCN	Banc optique Corps Noir
BFP	Bolometer Focal Plane
BFTS	Banc optique avec FTS
BolC	Electronique des bolomètres
CA	Clear Aperture diameter
CEA	Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives
CESR	Centre d'Etude Spatiale des Rayonnements
CP	Cold Plate
CNES	Centre National d'Etudes Spatiales
CMB	Cosmic Microwave Background
FTS	Fourier Transform Interferometer
HK	House Keeping
HPE	High Pass Edge
HWP	Half Wave Plate
HWPM	Half Wave Plate Mechanism
IAS	Institut d'Astrophysique Spatiale
ICS	Internal Calibration Source
IRAP	Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie
ISO	International Organization for Standardization
LBCN	Lentille du Banc Corps Noir
LBFTS	Lentille du Banc FTS
LHE	Hélium 4 liquide
LN2	Azote liquide
LPE	Low Pass Edge
M1	Miroir primaire de PILOT (Parabolique)
M2	Miroir secondaire froid (Elliptique)

M3	Miroir de renvoi froid (Plan)
MPBCN	Miroir Plan du Banc Corps Noir
MPBFTS	Miroir Plan du Banc FTS
NEP	Noise-Equivalent Power
OBC	On Board Computer
OBSW	On Board SoftWare
OD	Outside Diameter
PILOT	Polarized Instrument for Long wavelength Observation of the Tenuous interstellar medium
PP	Polypropylène
PSF	Point Spread Function
SBCN	Source du Banc optique Corps Noir
TC	Télécommande
TM	Télémétrie
TSBCN	Trou Source Banc Corps Noir
UGTI	Unité de Gestion des données Techniques de l'Instrument
ZDP	Zero Path Difference

Bibliographie

Aerotech. BA-Intellidrive. User's Manual EDU163 (V1.5), Aerotech, www.aerotech.com, November 2003.

J.-P. Bernard. Preliminary Results of the PILOT Integrated Photometer Tests . Note Technique PILOT-CRE-012-002-IRAP, IRAP, Juillet 2012.

J.-Ph. Bernard, C. Leroy, P. Hargrave, C. Meny, M. Griffin, and T. Maffren. Internal Calibration Source Definition Document. Definition Document PILOT-DD-0125-001-CESR, CESR, August 2008.

J.-Ph. Bernard et al. PILOT : Measuring polarization in the Interstellar Medium. *EAS Publications Series*, 23 :189–203, 2007.

M. Born and E. Wolf. *Principles of optics - Electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light.* Pergamon Cambridge university press, 7 (expanded) edition, 1999.

O. Boulade. Caractérisation des matrices PILOT sous flux Plan focal « TRANS » 11-02. Note Technique SAp-PILOT-OB-314159 version 1, CEA, Octobre 2011a.

O. Boulade. Caractérisation des matrices PILOT sous flux Plan focal « REFLEX » 11-01. Note Technique SAp-PILOT-OB-31416 version 1, CEA, Juillet 2011b.

V. Buttice, F. Pajot, J.-P. Bernard, M. Bouzit, A. Caillat, B. Crane, M. Chaigneau, J.-P. Dubois, B. Leriche, Y. Longval, and C. Marty. The PILOT experiment for the measurement of interstellar dust polarization : The camera ground calibration. In Wayne S. Holland and Jonas Zmuidzinas, editors, *Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy VI*, volume 8452 of *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*. SPIE, September 2012. doi : 10.1117/12.925187.

A. Caillat and V. Buttice. Alignement des miroirs M2 et M3 dans le photomètre PILOT. Technical Report PILOT-CRE-0123-001-IAS, IAS, Juillet 2012.

C. Engel, Y. Longval, B. Leriche, J. Ph. Bernard, I. Ristorcelli, M. Bouzit, G. Roudil, P.R. Ade, C. Marty, G. Otrio, F. Pajot, M. Griffin, P. Hargrave, C. Leroy, B. Maffei,

J. Pimentao, N. Ponthieu, L. Rodriguez, M. Salatino, G. Savini, J.P. Torre, and C. Tucker. Optical design for PILOT : a submm balloon borne experiment for polarization measurement. International Conference on Space Optics, 2008.

C. Engel, C. Marty, B. Mot, J.-Ph Bernard, I. Ristorcelli, G. Otrio, B. Leriche, Y. Longval, F. Pajot, G. Roudil, A. Caillat, J.P. Dubois, M. Bouzit, V. Buttice, and T. Camus. PILOT, a balloon borne experiment under ground tests. International Conference on Space Optics, October 2010.

C. Engel, I. Ristorcelli, J.-P. Bernard, Y. Longval, C. Marty, B. Mot, G. Otrio, and G. Roudil. Characterization and performances of the primary mirror of the PILOT balloon-borne experiment. *Experimental Astronomy*, 36 :21–57, August 2013. doi : 10.1007/s10686-013-9332-7.

P. Hargrave. Internal Calibration Source (ICS). Interface Control Document PILOT-IF-0125-001-Cardiff, Cardiff, March 2006.

Peter Hargrave, Tim Waskett, Tanya Lim, and Bruce Swinyard. Performance of flight-model on-board calibration sources on Herschel-SPIRE. In *Millimeter and Submillimeter Detectors and Instrumentation for Astronomy III*, volume 6275. SPIE, 2006.

D.K. Lambert and P.L. Richards. Martin-Puplett interferometer : an analysis. *Applied Optics*, 17(10), May 1978.

B. Leriche, J.-Ph. Bernard, C. Marty, Y. Longval, M. Bouzit, and J. Pimentao. Photometer. Definition Document PILOT-DD-012-001-IAS, IAS, 2009.

C. Marty. Dossier de définition instrument. Definition Document PILOT-DD-01-002-CESR, CESR, Mars 2010.

W. Marty. Architecture informatique. Definition Document PILOT-DD-015-003-CESR, CESR, Mars 2013.

S. Masi, P. de Bernardis, B. Leriche, J. Pimentao, and M. Bouzit. Cryostat. Definition Document PILOT-DD-0121-001-IAS, IAS, July 2010.

F. Pajot, B. Stepnik, J.-M. Lamarre, J.-P. Bernard, X. Dupac, M. Giard, G. Lagache, B. Leriche, C. Meny, G. Recouvreur, J.-C. Renault, C. Rioux, I. Ristorcelli, G. Serra, and J.-P. Torre. Calibration of the PRONAOS/SPM submillimeter photometer. *Astronomy & Astrophysics*, 447 :769–781, February 2006. doi : 10.1051/0004-6361:20034226.

Planck Collaboration. Planck early results. I. the Planck mission. *Astronomy & Astrophysics*, 536 :A1, 2011.

Planck Collaboration, P. A. R. Ade, N. Aghanim, C. Armitage-Caplan, M. Arnaud, M. Ashdown, F. Atrio-Barandela, J. Aumont, C. Baccigalupi, A. J. Banday, and et al. Planck 2013 results. I. Overview of products and scientific results. *ArXiv e-prints*, March 2013.

N. Ponthieu, J.P. Bernard, C. Leroy, and E. Pointecouteau. Polarisation measurement with the PILOT experiment. Technical note PILOT-NT-041-001-ALL, IAS and IRAP, Aout 2008.

D. Rambaud, J.-P. Bernard, and S. Maëstre. Instrument On Board Computer. Definition Document PILOT-DD-015-001-CESR, CESR, August 2008.

I. Ristorcelli, J.-P. Bernard, B. Stepnik, A. Abergel, F. Boulanger, M. Giard, G. Lagache, J.-M. Lamarre, C. Mény, J.-P. Torre, and G. Serra. ELISA : A small balloon-borne experiment to guide future observations with FIRST. In G. L. Pilbratt, J. Cernicharo, A. M. Heras, T. Prusti, and R. Harris, editors, *The Promise of the Herschel Space Observatory*, volume 460 of *ESA Special Publication*, page 301, Juillet 2001.

L. Rodriguez. BOLC Bolometer arrays warm electronics. Definition Document PILOT-DD-0128-002-CEA, CEA, March 2006.

L. Rodriguez. Bolometer focal planes description. Definition Document PILOT-DD-0128-001-CEA, CEA, August 2008.

Maria Salatino and Paolo de Bernardis. HWPM. Definition Document PILOT-DD-0127-001-ROME, Sapienza Università di Roma, May 2010.

G. Savini, J.-P. Bernard, and N. Ponthieu. Wave-plate. Definition Document PILOT-DD-0126-001-CARDIFF, Cardiff, February 2007.

G. Savini, C. Tucker, P. Ade, B. Maffei, GP. Pisano, and B. Leriche. Spectral filtering and quasi-optical components. Definition Document PILOT-DD-0124-002-Cardiff, Cardiff, July 2010.

Sciencetech. Standalone FTir Spectrometer SFTS. User's Manual 1.0, Sciencetech, www.sciencetech-inc.com, September 2006.

F. Simoens et al. Submillimeter bolometers arrays for the PACS/Herschel spectrophotometer. In J. Zmuidzinas, W.S. Holland, and S. Withington, editors, *Millimeter and Submillimeter Detectors for Astronomy II*, volume 5498, pages 177–186. SPIE, 2004.

J.-P. Torre and G. Chanin. Miniature liquid-^{3}He refrigerator. *Review of Scientific Instruments*, 56 :318–320, February 1985. doi : 10.1063/1.1138350.

J.-P. Torre and B. Leriche. He3 Fridges. Definition Document PILOT-DD-0122-001-IAS, IAS, Aout 2008.