



HAL
open science

Contribution à l'étude des effets systématiques pour le traitement des données de l'instrument Planck-HFI

Christophe Leroy

► **To cite this version:**

Christophe Leroy. Contribution à l'étude des effets systématiques pour le traitement des données de l'instrument Planck-HFI. Astrophysique [astro-ph]. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2007. Français. NNT: . tel-00448104

HAL Id: tel-00448104

<https://theses.hal.science/tel-00448104>

Submitted on 18 Jan 2010

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.

UNIVERSITÉ TOULOUSE III - PAUL SABATIER
U.F.R. Physique, Chimie et Automatismes

THÈSE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Discipline : Instrumentation spatiale et Astrophysique

présentée par

Christophe LEROY

Contribution à l'étude des effets systématiques pour le traitement des données de l'instrument Planck-HFI

Soutenue le 10 Mai 2007 à Toulouse devant le jury composé de :

Adam	WALTERS	Professeur à l'Université de Toulouse	Président
François	COUCHOT	Directeur de recherche CNRS au LAL, Orsay	Rapporteur
Ken	GANGA	Directeur de recherche CNRS à l'APC, Paris	Rapporteur
Cécile	RENAULT	Chargée de recherche CNRS au LPSC, Grenoble	Rapporteur
Jean-Philippe	BERNARD	Chargé de recherche CNRS au CESR, Toulouse	Directeur de thèse
Jean-François	TROUILHET	Maître de conférence à l'Université de Toulouse	Directeur de thèse
Jean-Loup	PUGET	Directeur de recherche CNRS à l'IAS, Orsay	Examineur

Laboratoire d'Astrophysique de Toulouse Tarbes, UMR 5572
Observatoire Midi-Pyrénées, 14 avenue Edouard Belin, 31400 TOULOUSE

Centre d'Etude Spatiale des Rayonnements, UMR 5187
9 avenue du Colonel Roche, 31028 TOULOUSE

Remerciements

Je voudrais remercier tout d'abord ceux qui ont contribué à rendre cette thèse possible :

Un grand merci à Armelle Barelli de la délégation régionale 14 du CNRS pour avoir pu obtenir le financement de cette thèse par le fond structurel FSE de l'Union Européenne.

Merci également à Sylvie Roques la directrice du Laboratoire d'Astrophysique de Toulouse-Tarbes pour m'avoir proposé ce financement FSE.

Merci à mes directeurs de thèse Jean François Trouilhet et Jean-Philippe Bernard pour avoir accepté d'encadrer cette thèse, pour leur grande disponibilité et pour leur bonne humeur depuis le début de mon stage de DEA.

Merci aussi à Peter Von-Balmoos et Henri Remes les responsables du DEA APS de Toulouse pour m'avoir accueilli dans leur formation.

Je remercie aussi Benoît Mosser et Alain Abergel les responsables du Master professionnel OSAE de l'école doctorale d'Astrophysique d'Ile de France pour m'avoir encouragé à effectuer un doctorat après ce Master.

Enfin, je tiens à remercier également mes précédents responsables de stage : Olivier Saint-Pé, Franck Larnaudie et Laurent Koechlin qui par la qualité de leur encadrement et par leur appréciation de mes travaux ont conforté mon envie d'effectuer des recherches dans le domaine de l'instrumentation spatiale pour l'astrophysique.

Je veux remercier ensuite l'ensemble des membres de mon jury de thèse. D'abord son président Adam Walters. Ensuite mes rapporteurs : Cécile Renault, François Couchot et Ken Ganga qui par leurs questions, remarques et suggestions ont grandement enrichis ce manuscrit. Un grand merci enfin à Jean-Loup pour avoir accepté de participer à ce jury et pour m'avoir recruté en post-doc à l'IAS pour poursuivre les travaux que nous avons amorcés ensemble sur la thermique de Planck-HFI.

Je remercie également l'ensemble des membres des collaborations Planck-HFI et PILOT avec qui j'ai travaillé durant cette thèse. Ils sont hélas trop nombreux pour que je puisse tous les citer ici dans une liste exhaustive. Néanmoins, parce qu'il aura été un collègue patient, attentif et très pédagogue, notamment sur les effets thermiques, Michel Piat a été pour moi un vrai "guide" durant cette thèse. Je l'en remercie très chaleureusement. De même, merci à Jean-Michel Lamarre, François-Xavier Désert, Guy Guyot et François Pajot pour avoir toujours pris le temps de répondre patiemment à mes questions sur le fonctionnement de Planck et d'HFI. Merci aussi à Juan pour nos discussions fructueuses sur les méthodes de pré-processing des données d'HFI. Merci aux membres du DPC avec lesquels j'ai travaillé durant le projet TIPS et après, en particulier Jean-Marc Delouis et Didier Vibert pour leur disponibilité sans faille. Un grand merci aux membres du BE de l'IAS pour leur accueil chaleureux lors de mes

nombreuses missions à Orsay. Enfin, merci à tous les collègues de l'équipe calibration d'HFI pour nos glorieuses heures de travail à l'IAS, de jour, de nuit et les week-ends lors des tests à froid d'HFI dans Saturne.

Le travail présenté ici est également le fruit des efforts de nombreux CDD et stagiaires. Je pense notamment à Sylvain Varesi, Fredrik Ledjström, Ayanthan Mahendran et Mathieu Maisonneuve à qui j'exprime ici toute ma reconnaissance.

Je souhaite remercier aussi tous les collègues toulousains "du quotidien" c'est à dire l'ensemble des membres scientifiques et ITA des équipes "Univers Froid" du CESR et "Signal Image et Instrumentation" du LATT pour la bonne humeur et l'excellente ambiance de travail qui règne dans ces deux groupes dirigés par Martin Giard et Hervé Carfanthan. Un merci particulier à Claude Meny mon voisin de bureau au CESR grâce à qui j'ai pu découvrir entre autres les joies de l'enseignement à l'INSA. Enfin, un merci plein de reconnaissance à l'ensemble des membres des services informatiques et administratifs du LATT et du CESR pour leur patience et leur grande disponibilité.

Je tiens à remercier aussi les thésards/CDD ITA/Post-Doc du LATT et du CESR pour la bonne ambiance qui règne parmi les "jeunes" de ces laboratoires, notamment grâce aux divers apéros et soirées auxquels j'ai pu participer durant cette thèse. Je tiens à saluer en particulier Sylvain dit "Moustache", Lionel "le Marseillais", Mika Rod, Nico P, Romain, Pierre D, Nico "Beach spirit", Denis S "la Malice", Natacha et Deborah. Un petit salut amical aussi pour les anciens : Bérengère "Bébère", Mathias, Ludo "l'homme orchestre", Loïc Jahan et Vincent Boq. Merci enfin à Florence et Sébastien mes sympathiques voisins de bureau et accessoirement "secrétaires" au LATT.

Un très grand merci à mes amis parisiens : Olivier M, JC, Vianney, Benjamin, Manu B, Medhi, Sandrine et Sophie pour m'avoir hébergés à l'occasion et avoir rendu ainsi mes séjours parisiens (presque mensuels) toujours très agréables.

Merci à mes parents et à mon frère Sébastien pour avoir toujours cru en moi et m'avoir soutenu durant ces "longues" années études.

Enfin, un merci très spécial à Marie qui m'a supporté et encouragé tous les jours durant ces trois fantastiques années! :-)

Table des matières

Remerciements	3
Acronymes	11
Introduction	13
I Les effets systématiques et l'étude du CMB	15
1 Le contexte de la cosmologie observationnelle	17
1.1 La cosmologie et l'étude du CMB	17
1.1.1 Une brève histoire de la cosmologie	18
1.1.2 Le CMB	23
1.1.3 Les avant-plans Astrophysique	25
1.1.4 Les effets systématiques	28
1.2 Contraintes des modèles cosmologiques par les observations du CMB	29
1.3 Les expériences COBE, Archeops et WMAP	34
1.3.1 COBE	34
1.3.2 Archeops	37
1.3.3 WMAP	39
1.4 Le Projet Planck	42
1.4.1 Les objectifs scientifiques de Planck	42
1.4.2 Le satellite et ses instruments	43
1.4.3 La stratégie d'observation	46
1.4.4 La stratégie d'étalonnage	47
1.4.5 Le Planck Data Processing Center	47
1.4.6 Le calendrier du projet Planck	48
1.5 Les futures expériences d'étude du CMB	49
1.5.1 Pourquoi mesurer la polarisation du CMB?	49
1.5.2 Comment mesurer la polarisation du CMB?	49
1.5.3 Les expériences programmées actuellement pour étudier la polarisation du CMB	50
2 L'instrument Planck-HFI	51
2.1 Le système cryogénique	51
2.1.1 Architecture thermique d'HFI	52

2.1.2	Le Sorption Cooler à 18K	53
2.1.3	Le réfrigérateur à 4K	56
2.1.4	Le refroidisseur 0.1K à dilution	58
2.2	Le système optique	61
2.3	Les bolomètres	63
2.3.1	Principe de mesure bolométrique	63
2.3.2	Les bolomètres de Planck-HFI	64
2.3.3	Les bruits de mesure bolométrique	65
2.4	La chaîne électronique de lecture	69
2.4.1	Description de la chaîne	69
2.5	Le DPU	73
2.6	Le système de contrôle de la température	73
2.6.1	Les thermomètres fins	73
2.6.2	Les thermomètres Cernox	74
2.6.3	Le système de contrôle passif	75
2.6.4	Le système de contrôle actif avec régulations PID	77
3	Les effets systématiques dans Planck-HFI	79
3.1	Les différents effets systématiques dans Planck-HFI et leurs effets sur le signal	79
3.1.1	Description des différentes sources possibles de systématiques	79
3.1.2	Effets sur le signal pour chaque effet systématique	83
3.2	Identification et étalonnage des effets systématiques pour le projet Planck-HFI	85
3.2.1	Les différents niveaux d'étalonnage des effets systématiques	86
3.2.2	Le plan d'étalonnage du modèle de vol de Planck-HFI	86
3.3	Effets systématiques étudiés	90
3.3.1	La diaphonie électronique	90
3.3.2	Les effets thermiques	91
II	Etalonnages au sol des effets systématiques dans Planck-HFI	97
4	Les effets thermiques	99
4.1	Mesures des fonctions de transfert thermiques entre les étages cryogéniques d'HFI	99
4.1.1	Fonctions de transfert thermiques mesurées sur le CQM dans le cryostat Saturne	99
4.1.2	Fonctions de transfert thermiques mesurées sur le PFM dans Saturne	111
4.1.3	Résumé des fonctions de transfert thermiques obtenues pour HFI avec les tests TSS	116
4.2	Les tests systèmes au CSL sur le satellite CQM	117
4.2.1	Description du test au CSL	117
4.2.2	Effet de l'étage à 4K sur les bolomètres	119
4.2.3	Mesure des fonctions de transfert thermiques sur le satellite CQM	120
4.3	Tests du système de contrôle thermique actif d'HFI	131
4.3.1	Tests de stabilisation des étages 0.1K par régulation PID	131
4.3.2	Tests de régulation de l'étage 1.6K	135

4.3.3	Tests de régulation de l'étage 4K	135
4.4	Conclusion et bilan sur les effets thermiques	139
4.4.1	Emission thermique du SVM	140
4.4.2	Emission thermique du télescope	140
4.4.3	Effets thermiques sur l'étage à 4 K	140
4.4.4	Effets thermiques sur l'étage à 0.1 K	142
4.4.5	Effets thermiques sur l'étage à 1.6 K	143
4.4.6	Possibles fluctuations de température attendues en vol pour Planck et HFI144	
5	La diaphonie électronique	147
5.1	Le modèle de diaphonie après les mesures CQM	147
5.1.1	Le modèle de diaphonie	147
5.1.2	Les hypothèses du modèle de diaphonie	148
5.2	Mesures de diaphonie électronique sur le PFM	149
5.2.1	Mesures sur les bolomètres aveugles	149
5.2.2	Mesures avec des stimulus en courant	158
5.2.3	Comparaison avec les résultats des mesures de diaphonie optique sur le PFM	162
5.3	Conclusion	162
III	Simulation et correction des effets systématiques	165
6	Simulation de la chaîne de régulation PID de l'étage à 4 K d'HFI	167
6.1	Description de la chaîne de régulation PID à simuler	167
6.2	Description du modèle SIMULINK de la chaîne de régulation	168
6.2.1	Le bloc "Sum Température"	168
6.2.2	Le bloc "Température transfer function"	169
6.2.3	Les blocs REU (1&2)	170
6.2.4	Le bloc "PID regulation"	171
6.2.5	Le bloc de transfert entre la consigne de chauffage en ADU et la température de la ceinture chauffante	171
6.3	Résultats de la modélisation	172
6.3.1	Mesures de référence	172
6.3.2	Génération du bruit dans la simulation	172
6.3.3	Modèle bruité	173
6.3.4	Modèle non bruité	174
6.3.5	Simulation des fluctuations des côtés de la boîte à 4 K	175
6.4	Conclusion	176
7	Simulation et correction des effets thermiques dans Planck-HFI	179
7.1	Modélisation des effets thermiques dans Planck-HFI	179
7.1.1	Les différents modèles nécessaires	179
7.1.2	Essais de modélisation thermique d'HFI	180
7.2	Correction par décorrélation du signal des thermomètres	186
7.2.1	Test sur les simulations TIPS	186

7.2.2	Test sur les mesures CSL-CQM	186
7.3	Modélisation par réseau de neurones des effets thermiques dans Planck : Discussion et tests	188
7.3.1	Identification des entrées des réseaux associés aux effets à prédire par apprentissage supervisé	190
7.3.2	Résultats des réseaux sur la diffusion thermique sur l'étage 4K d'HFI	190
7.4	Conclusion	192
8	Etude des effets systématiques pour la conception de l'expérience PILOT	195
8.1	Description de l'expérience PILOT	195
8.1.1	Objectifs scientifiques	195
8.1.2	Le projet	197
8.1.3	La plateforme	197
8.1.4	La charge pointée	197
8.2	Le modèle photométrique de PILOT	199
8.2.1	Les éléments du modèle photométrique	200
8.2.2	Bandes spectrales	200
8.2.3	Etendue de faisceau	202
8.2.4	Puissance de fond incidente sur chaque bolomètre	204
8.2.5	Conclusion	204
8.3	Calcul de la sensibilité des observations PILOT	205
8.3.1	Bruit des détecteurs	205
8.3.2	Bruit de Photon	205
8.3.3	Vitesse de balayage optimale	205
8.3.4	Limite de détection	205
8.4	Etalonnage des mesures des bolomètres PILOT	206
8.5	Dimensionnement d'une source interne de calibration	207
8.5.1	Description	207
8.5.2	Spécifications de l'ICS	208
8.6	Conclusion	211
	Conclusion	213
	ANNEXES	217
A	Rapport d'étalonnage PFM-CAL des fonctions de transfert thermiques à l'intérieur du FPU de Planck-HFI	217
B	Note sur la mesure de la polarisation par l'expérience PILOT	233
C	Historique des températures d'HFI durant la campagne d'étalonnage PFM-CAL	247
D	Historique des mesures TSS réalisées sur Planck-HFI	255
E	Liste de publications	257

Table des figures	259
Bibliographie	271

Acronymes

ADU : “Analog Digital Unit”
CALTECH : California Institute of Technology
CMB : “Cosmic Microwave background”
CPV : “Calibration & Performances Verification”
CQM : “Cryogenic Qualification Model”
CRTBT : Centre de Recherche sur le Très Basses Températures
CSL : Centre Spatial de Liège
CSL-CQM : Campagne de test du modèle cryogénique de qualification de Planck au CSL
CSL-PFM1 : Campagne de test du SVM et du Sorption Cooler au CSL
CSL-PFM2 : Campagne de test du modèle de vol de Planck au CSL
CS2 : “Calibration Source 2”
CSM : “Calibration Source Mirror”
CT-WG3 : “Core-Team Working Group 3”
DCCU : “Dilution Cooler Control Unit”
DMC : “Data Management Component”
DPC : “Data Processing Center”
DPC-L2 : “Data Processing Center Level2”
DPU : “Data processing Unit”
ELS : “External Light Source”
ERCSC : “Early Release Compact Source Catalogue”
EXT : “Electronic Cross-Talk”
FDT : Fonction de transfert
FFT : “Fast Fourier Transform”
FPU : “Focal Plane Unit”
FSL : “Far Side Lobes”
fspin : Fréquence de spin
FTS : “Fourier Transform Spectrometer”
HEMT : “High Electron Mobility Transistor”
HFI : “High Frequency Instrument”
HK : “House Keeping”
HoY : Holmium Yttrium
HST : “Hubble Space Telescope”
IPAC : “Infrared Processing and Analysis Center”
JFET : “Junction Field Effect Transistor”
JPL : Jet Propulsion Laboratory
JT : Joule-Thomson

LFI : “Low Frequency Instrument”
LVHX : “Liquid-Vapor Heat Exchanger”
M1 : Miroir primaire
NTD : “Neutron Transmuted Detector”
OMT : “Ortho-Mode Transducer”
OXT : “Optical Cross-Talk”
PACE : “Pipe Assembly Cold End”
PAU : “Pre-Amplifier Unit”
PBR : “Phase Binned Ring”
PI : “Principal Investigator”
PID : Réseau correcteur à action Proportionnel Integral Dérivée
PIOLIB : “Planck Input Output LIBrary”
PFM : “Proto-Flight Model”
PFM-CAL : Campagne de calibration au sol du modèle de vol d’HFI à Orsay
PFM-CAR : Campagne de caractérisation au sol du modèle de vol d’HFI à Orsay
ProC : “Processus Coordinator”
PSB : “Polarization Sensitive Bolometer”
PSF : “Point Spread Function”
QLA : “Quick Look Analysis”
RAL : Rutherford Appleton Laboratory
REU : “Readout Electronic Unit”
SC : “Sorption Cooler”
SVM : “SerVice Module”
SWB : “SpiderWeb Bolometer”
TC : TéléCommande
TOI : “Time Ordered Information”
TSA : “Temperature Stabilization Assembly”
TSS : “Thermal Stages Sensitivity”
WR : “Warm Radiator”

Introduction

*« Je n'attends pas la fin du monde
Je prends juste mon temps pour tout comprendre. »*

Didier Wampas

L'observation du Fond Cosmique Micro-Onde a été l'un des champs d'étude les plus prolifiques de l'Astrophysique ces quarante dernières années. Couronnée par deux prix Nobel, cette découverte majeure a permis de confirmer de façon spectaculaire la théorie du Big-Bang. L'étude détaillée de ce fond micro-onde a également permis de mieux contraindre les différents modèles d'Univers issus de la cosmologie. Avec l'expérience Planck de l'ESA ("European Space Agency") qui va succéder en 2008 à COBE et WMAP (présentés au premier chapitre), la cosmologie entre dans une nouvelle ère, celle de la "cosmologie observationnelle de précision". Jamais une expérience spatiale aussi sensible n'aura effectué un relevé complet du ciel micro-onde avec une aussi grande résolution angulaire. La grande sensibilité de Planck implique la nécessité d'un contrôle accru des effets systématiques. Cette thèse s'inscrit dans le cadre du contrôle de ces effets systématiques dans Planck, en particulier pour son instrument hautes fréquences HFI (High Frequency Instrument). Contrôler les effets systématiques implique trois types d'activités : l'identification, la quantification et la correction de ces effets. Cette thèse présente essentiellement le travail d'identification et de quantification des effets systématiques d'origine thermique auxquels j'ai contribué dans Planck-HFI. Pour mener à bien ces travaux, j'ai participé à l'ensemble des campagnes de tests et d'étalonnages au sol de Planck-HFI durant la phase D (Réalisation, intégrations et tests) de ce projet.

Après une courte introduction à la cosmologie, le premier chapitre de cette thèse présente les différentes expériences qui ont précédé et inspiré le projet Planck : COBE, Archeops et WMAP. La mission Planck, ses objectifs scientifiques et la description du satellite sont également présentés dans ce chapitre.

Le deuxième chapitre détaille ensuite le fonctionnement et les performances attendues pour l'instrument HFI. En particulier, le fonctionnement de la chaîne cryogénique utilisée, pour refroidir à une température de 0.1 Kelvin les détecteurs bolométriques d'HFI est présentée dans ce second chapitre.

Les différents effets systématiques dans Planck-HFI sont ensuite présentés dans le troisième chapitre. Les deux types d'effets sur lesquels j'ai travaillé (les effets thermiques et la diaphonie électronique) sont alors approfondis. La spécification sur l'amplitude maximale de ces deux effets y est décrite.

Le quatrième chapitre présente l'ensemble des résultats obtenus sur l'identification et la quantification des effets thermiques durant les étalonnages et les tests à froid de l'instrument et du satellite. La compréhension actuelle du comportement thermique, déduite des différents tests au sol pour les différents étages thermiques de l'instrument, est résumée à la fin de ce chapitre. Nous verrons en particulier que l'optimisation de la stabilisation de température par régulation PID (Correction Proportionnelle Intégrale Dérivée) des étages à 4 K et 0.1 K de l'instrument est cruciale afin que les effets thermiques ne perturbent pas les observations du Fond Cosmique Micro-onde.

Le cinquième chapitre montre ensuite comment j'ai pu démontrer que la spécification sur le niveau maximal de diaphonie électronique sur les bolomètres aveugles d'HFI était respectée sur le modèle de vol de cet instrument : le PFM (Planck Flight Model). Il présente également la procédure de mesure, que j'ai mise au point et testée avec succès durant les étalonnages au sol du PFM, afin de déterminer les coefficients de diaphonie entre les 72 voies de l'électronique de lecture d'HFI (soit 5112 couples).

Le sixième chapitre présente le travail que j'ai supervisé afin de simuler la chaîne de régulation de température de l'étage à 4 K d'HFI pour pouvoir optimiser les réglages de cette chaîne basée sur un contrôleur de type PID. Une simulation similaire peut également être envisagée pour l'étage à 0.1 K. Une fois régulés, les fluctuations résiduelles de température des étages à 4 K et 0.1 K pourront finalement être corrigées dans le traitement des données de Planck-HFI, grâce à des algorithmes de correction dédiés.

Le septième chapitre présente le travail que j'ai coordonné pour simuler de façon globale le comportement thermique de l'étage à 4K, afin de tester les méthodes de correction envisagées pour les effets thermiques résiduels. La corrélation entre les signaux des bolomètres et des thermomètres placés sur les étages à 4 K et 0.1 K d'HFI a ainsi été testée dans le cadre d'une collaboration transverse entre les responsables scientifiques de l'instrument et du traitement de données d'HFI. La prédiction des effets thermiques sur la platine à 4 K avec des réseaux de neurones a également été étudiée. Les résultats obtenus avec ces deux méthodes sont détaillés dans ce chapitre, après une présentation des méthodes utilisées pour simuler le comportement thermique d'HFI.

Enfin, le huitième chapitre présente ma contribution aux études de phase 0 (Faisabilité) et phase A (Définition préliminaire) pour le contrôle des effets systématiques dans l'expérience ballon PILOT. Ce projet peut être considéré comme un précurseur pour les prochaines expériences d'étude de la polarisation du CMB. PILOT réalisera en effet deux premières importantes pour ces futures expériences. PILOT mesurera tout d'abord pour la première fois l'émission de la poussière du milieu interstellaire à 240 et 550 μm . La connaissance de la polarisation de ces poussières déduite des observations de PILOT sera importante pour le dimensionnement des futures expériences d'étude de la polarisation du fond micro-onde. PILOT mettra également en œuvre pour la première fois des matrices de bolomètres couplées à un système d'analyse de la polarisation pour ses observations. L'utilisation de telles matrices et le contrôle des effets systématiques associés à ces détecteurs sont également fondamentaux pour pouvoir accroître suffisamment la sensibilité des observations du fond cosmique, afin d'y détecter les traces de polarisation les plus infimes. L'utilisation et la spécification d'une source interne d'étalonnage, dédiée au contrôle des effets systématiques dans PILOT sera en particulier détaillée dans ce dernier chapitre.

Première partie

Les effets systématiques et l'étude du CMB

Chapitre 1

Le contexte de la cosmologie observationnelle

*« Derrière les étoiles il y a encore des étoiles qui brillent plus finement.
Et derrière ces étoiles il y a encore des étoiles qui brillent infiniment.
Petit enfant, vois-tu, l'univers est comme un ballon gonflé par personne.
Si je voulais te le décrire, il me faudrait des mots que n'ont pas les gens.
Alors je me contenterai de te parler de nos étoiles mondaines qui
pétillent adroitement dans le ciel. »*

Vincent Calvet

La cosmologie observationnelle est la science qui vise à utiliser les observations astronomiques de l'Univers dans le but de contraindre les modèles cosmologiques issus des théories de la Gravitation et de la physique des particules. L'observation des anisotropies du Fond Cosmique Micro-onde (ou CMB pour Cosmic Microwave Background en anglais) est l'un des piliers de cette science. Ce fond cosmique a précédemment été étudié grâce aux expériences spatiales COBE et WMAP dédiées à l'observation des anisotropies du CMB. Désormais, avec la mission Planck de l'Agence Spatiale Européenne (ESA), l'étude du CMB entre dans l'ère de la cosmologie observationnelle de précision.

1.1 La cosmologie et l'étude du CMB

La cosmologie est la science qui étudie les mécanismes physiques qui régissent le fonctionnement et l'histoire de l'Univers. Au cours du XX^{ème} siècle, un modèle « standard » de l'histoire de l'Univers, basé sur la théorie du « Big-Bang » s'est imposé. Dans cette théorie, une singularité primordiale aurait donné naissance à l'expansion de l'Univers observée aujourd'hui. Juste après le Big-Bang, c'est à dire au début de l'expansion et avant une probable période d'inflation, l'Univers était beaucoup plus dense et chaud. Il était alors constitué d'un plasma photons-électrons-baryons opaque. D'après la théorie du Big-Bang, il existe une trace de cette époque chaude et dense : le Fond Cosmique Micro-onde, observable aujourd'hui aux longueurs d'onde millimétriques et sub-millimétriques, dans toutes les directions du ciel.

1.1.1 Une brève histoire de la cosmologie

Fille de l’astrophysique et de la physique des particules, la cosmologie est apparue en tant que Science à part entière au début du XX^{ème} siècle. Les différentes découvertes qui ont jalonné l’histoire de la cosmologie moderne sont présentée ci-dessous par ordre chronologique.

La théorie de la relativité générale, 1915

La théorie de la relativité générale découverte par Albert Einstein en 1915 [25] explique l’attraction gravitationnelle de deux corps massiques par une courbure de ce qu’il appelle “l’Espace-Temps”.

Le modèle d’Univers statique d’Einstein, 1917

En essayant d’appliquer ses équations de la relativité générale à l’ensemble de l’Univers, Einstein bâtit en 1917 le premier modèle cosmologique de l’histoire au sens moderne de la cosmologie. Son modèle d’Univers est homogène, isotrope et statique. Dans ce modèle, il a recours à une “constante cosmologique” noté Λ afin d’éviter l’effondrement gravitationnel de l’Univers sur lui-même. La même année, Willem De Sitter trouve la solution des équations de la relativité correspondant à ce modèle d’Einstein [19].

La découverte de l’expansion de l’univers par Hubble, 1929

En 1929, l’astronome Edwin Hubble découvre que le spectre lumineux des galaxies se décale vers le rouge. C’est le phénomène du “Redshift” en Astronomie. En assimilant ce décalage spectrale à un effet Doppler, il en déduit que toutes les galaxies qu’il observe s’éloignent de la Voie Lactée. Compte-tenu du principe cosmologique qui veut que les propriétés de l’Univers soient homogènes et isotropes, il en déduit que l’ensemble de l’Univers est en expansion et que plus une galaxie est éloignée d’une autre plus celle-ci s’éloigne rapidement de la première à cause de ce mouvement globale d’expansion [39]. Le taux d’expansion de l’univers est alors donné par la constante H_0 dite “constante de Hubble”.

Le modèle de Friedeman-Lemaître, 1927

Ce modèle découvert par Alexandre Friedman en 1922 correspond à la solution relativiste pour un Univers en expansion. Ce modèle est redécouvert en 1927 par Georges Lemaître qui explique pour la première fois les observations de Hubble grâce à ce modèle [51]. Lemaître fut également le premier à établir directement le lien entre le Redshift et l’expansion de l’espace.

La détection de la matière sombre, 1933

En 1933, Fritz Zwicky après avoir appliqué le théorème du viriel à ses observations de l’amas de la Coma déduit l’existence d’une certaine quantité de matière “sombre” inconnue afin d’expliquer ses observations réalisées depuis le Mont Palomar [111] & [112]. Plus tard, durant les années 70, l’existence d’une quantité de matière sombre importante dans l’Univers fut également avancée afin d’expliquer les courbes de rotation des galaxies déduites de l’observation de leur émission dans le domaine visible.

La « naissance » du Big-Bang, 1948

Fred Hoyle propose son modèle d'Univers stationnaire. A l'occasion d'un débat radiophonique de la BBC sur le modèle de Friedeman-Lemaître, Hoyle dénigre ce modèle, qualifiant de "Big-Bang" la singularité primordiale qui aurait du être alors à l'origine de l'expansion de l'Univers. Désormais, le modèle cosmologique standard d'un Univers en expansion est couramment désigné sous le nom de théorie du Big-Bang.

La prédiction de Gamow, 1948

En étudiant la synthèse primordiale des éléments par capture neutronique après le Big-Bang, Georges Gamow prédit l'existence d'un rayonnement de corps noir, baignant l'ensemble de l'Univers, et pour lequel il estime que la température devrait être égale à 10 Kelvin environ [30]. Ce rayonnement fossile constituerait le premier rayonnement émis par l'Univers lors du découplage de la matière et des photons juste après la formation des premiers atomes.

La découverte du Fond Cosmique Micro-onde, 1965

C'est en juillet 1965 que la revue *Astrophysical Journal* publie les résultats de deux Radio-Astronome Arno Penzias et Robert Wilson [78]. Suite aux mesures réalisées avec une antenne cornet de 3 mètres de diamètre, propriété de la compagnie de téléphone Bell, Penzias et Wilson annoncèrent la découverte d'un bruit de fond uniforme en provenance de toutes les directions du ciel (Figure 1.1). A partir de leurs mesures, ils trouvèrent une température de corps noir

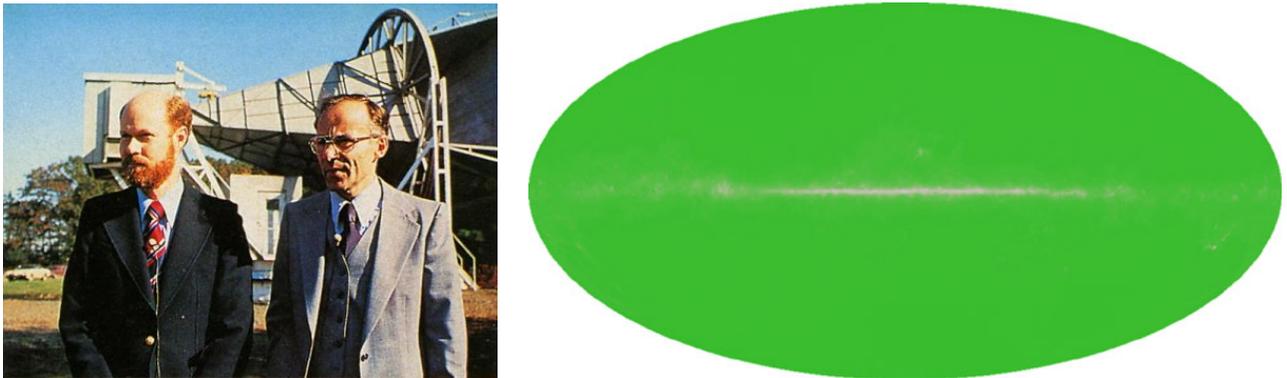


FIG. 1.1 – *Gauche : Photographie de Penzias et Wilson devant leur antenne radio du Bell Labs. Droite : Simulation du ciel tel que l'antenne de Penzias et Wilson l'aurait observé si il avait été possible d'effectuer un relevé complet du ciel avec celle-ci (extrait de [28]).*

équivalente de 3.5 ± 1 K pour ce rayonnement de fond. Leur antenne était équipée d'un détecteur de type MASER observant à la longueur d'onde de 7.3 cm soit 4.08 GHz de fréquence d'observation. Dans le même temps, Robert Dicke, Jim Peebles, Peter Roll et David Wilkinson quatre Astrophysiciens de l'Université de Princeton expliquent dans le même numéro de l'*Astrophysical Journal*, que Penzias et Wilson viennent de découvrir la signature du Big-Bang, prédite dès 1948 par George Gamow. Désormais, ce Fond Cosmique Micro-onde sera l'un des piliers les

plus solides de la théorie du Big-Bang. Cette découverte du CMB vaudra à Penzias et Wilson l'honneur de se partager le prix Nobel de Physique en 1978.

La théorie de l'inflation, 1981

Guth propose une théorie de l'inflation qui suppose une phase d'accélération de l'expansion de l'Univers juste après le Big-Bang [32]. L'existence d'une phase d'inflation est aujourd'hui retenue dans le modèle standard de la cosmologie afin d'expliquer l'uniformité de l'Univers aux grandes échelles.

Le modèle CDM, 1982

Le modèle CDM (Cold Dark Matter) est proposé par James Peebles [77]. Ce modèle est basé sur l'existence d'une quantité importante de matière sombre froide dans l'Univers. Ce modèle standard permet d'expliquer l'essentiel des observations cosmologiques durant les années 80.

La découverte des anisotropies du Fond Cosmique Micro-onde, 1992

En 1992, les résultats de l'expérience COBE de la NASA sont publiés pour la première fois. Les résultats de l'expérience DMR [99] révèlent que le CMB contient de très faibles anisotropies de température (Figure 1.2). Ces anisotropies sont la trace des excès de densité qui ont générés toutes les structures observées dans l'Univers aujourd'hui (amas, galaxies, ...). Les observations de COBE ont été récompensées en 2006 par le prix Nobel conjoint de John C. Mather et George Smoot (Figure 1.2), respectivement responsables scientifique des instruments FIRAS et DMR.

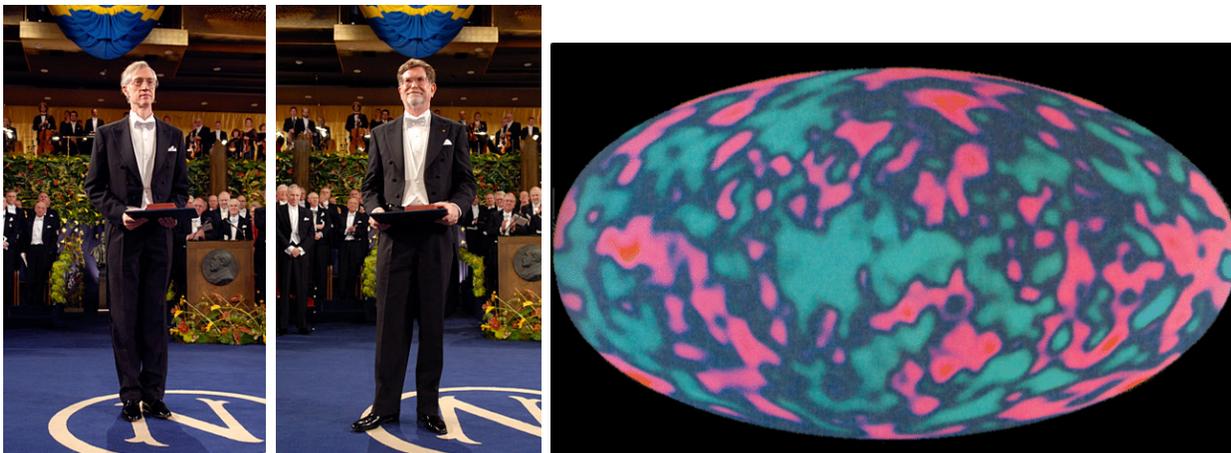


FIG. 1.2 – Gauche : Photographie de John C. Mather et George Smoot lors de la cérémonie de remise de leur prix Nobel. Droite : Première carte des anisotropies du CMB obtenue avec DMR et publiée en 1992 après deux ans d'observations. Cette carte est obtenue après soustraction du dipôle et d'un modèle d'émission galactique.

La découverte de l'accélération de l'expansion de l'Univers, 1998

Le Cosmology Supernova Project [81] découvre l'accélération de l'expansion de l'Univers à partir de l'observation des Supernovae de type Ia (SNIa). En supposant que les SNIa peuvent être utilisées comme des chandelles standards (leur magnitude est fonction de leur distance, c'est à dire leur redshift), l'observation de leur maximum de magnitude en fonction de leur redshift a alors permis de déduire que l'expansion devait s'accélérer avec le temps afin d'expliquer les observations des Supernovae. Le modèle Λ CDM est alors proposé pour expliquer ce résultat, confirmé par la suite par d'autres observations indépendantes des Supernovae. Ce modèle Λ CDM utilise une constante cosmologique noté Λ dans les équations de la relativité générale afin d'expliquer l'accélération de l'expansion.

Les résultats des expériences MAXIMA et BOOMERANG, 2000 et 2001

L'observation des fluctuations du CMB sur une partie du ciel avec une résolution de l'ordre de 15' par les expériences ballons MAXIMA [34] et BOOMERANG [49] a permis de démontrer que l'Univers est "plat", c'est à dire que sa topologie est de type Euclidienne. La densité d'énergie de l'Univers, caractérisée par le paramètre cosmologique Ω_{tot} est alors égale à 1. La précision des données MAXIMA et BOOMERANG était de 10% environ sur Ω_{tot} . C'est l'utilisation conjointe des résultats des observations des SNIa et des effets de lentilles gravitationnelles faibles qui permettent de trouver $\Omega_{tot}=1$ avec une précision meilleure que 1%. Comme nous le verrons par la suite, l'utilisation de ces cartes du CMB de grande résolution angulaire permet de contraindre également de nombreux paramètres cosmologiques autres que Ω_{tot} .

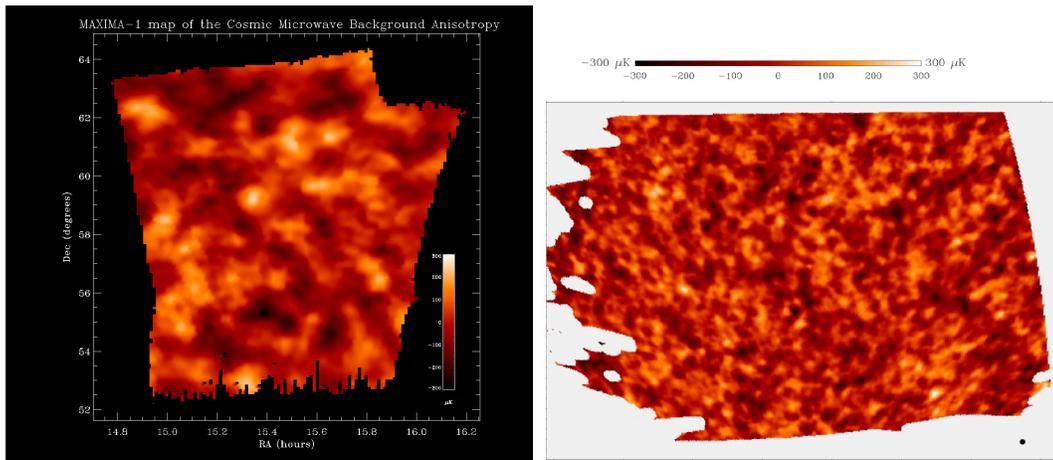


FIG. 1.3 – Gauche : Carte des fluctuations du CMB obtenue avec MAXIMA. Droite : Carte des fluctuations du CMB obtenue avec BOOMERANG.

Les résultats d'Archeops, 2003

L'expérience ballon Archeops a réussi pour la première fois à cartographier les fluctuations du CMB sur 30% du ciel avec une résolution de 15' (Figure 1.4). Archeops a ainsi pu confirmer

de façon indépendante les résultats de MAXIMA et BOOMERANG sur la statistique des fluctuations du CMB.

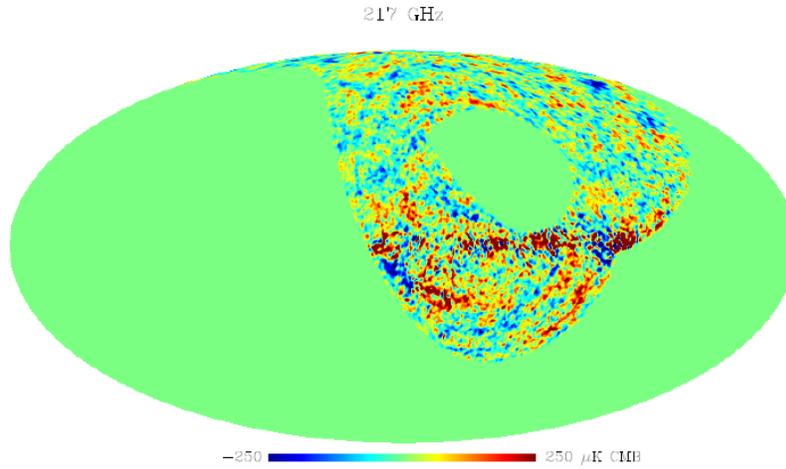


FIG. 1.4 – Carte des fluctuations du CMB mesurées à 217 GHz par Archeops. Cette carte est le résultat de la combinaison linéaire du signal de deux bolomètres (extrait de [61]).

Si l'on fixe la valeur de la constante de Hubble H_0 à partir des observations des céphéïdes par le télescope spatial HST (“Hubble Space Telescope”), les résultats d’Archeops sont également compatibles avec un univers de densité $\Omega_{tot}=1$ ($0.98 \leq \Omega_{tot} \leq 1.03$) [4]. Enfin, Archeops était équipé de détecteurs sensibles à la polarisation notamment pour son canal photométrique à 353 GHz qui a permis d’apporter les premières contraintes sur l’émission polarisée des poussières galactiques [91] pour cette bande de fréquence.

Les résultats de WMAP, 2003 et 2006

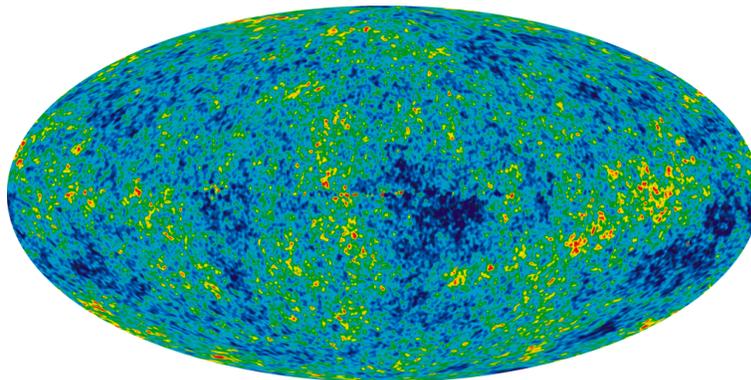


FIG. 1.5 – Carte des fluctuations du CMB obtenue avec WMAP (extrait de [37]).

La publication de la carte des fluctuations du CMB par WMAP (Figure 1.5) avec une résolution et une sensibilité environ respectivement 33 et 45 fois meilleures que pour COBE-DMR a permis notamment de confirmer les résultats de MAXIMA et BOOMERANG sur les différents paramètres des modèles cosmologiques, tout en augmentant fortement la précision de mesure de ces différents paramètres. WMAP était également équipé de détecteurs sensibles à la polarisation. Les effets de la polarisation du CMB aux grandes échelles angulaires ont ainsi pu être mesurés pour la première fois par WMAP.

1.1.2 Le CMB

Description

Le Fond Cosmique Micro-onde possède plusieurs propriétés importantes. Tout d'abord, ce rayonnement est isotrope c'est-à-dire qu'il rayonne avec un flux constant dans toutes les directions du ciel. Ensuite, la variation de son intensité avec la longueur d'onde obéit parfaitement à une loi de corps noir. La brillance d'un corps noir à la fréquence d'observation ν , pour une température T est donnée par la formule suivante :

$$B(\nu, T) = \frac{2hv^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{hv}{k_b T}} - 1} \quad (1.1)$$

En appliquant la loi de corps noir aux mesures du CMB, on obtient une température de corps noir équivalente à 2.728 Kelvin environ (Figure 1.6). Les anisotropies ou fluctuations du

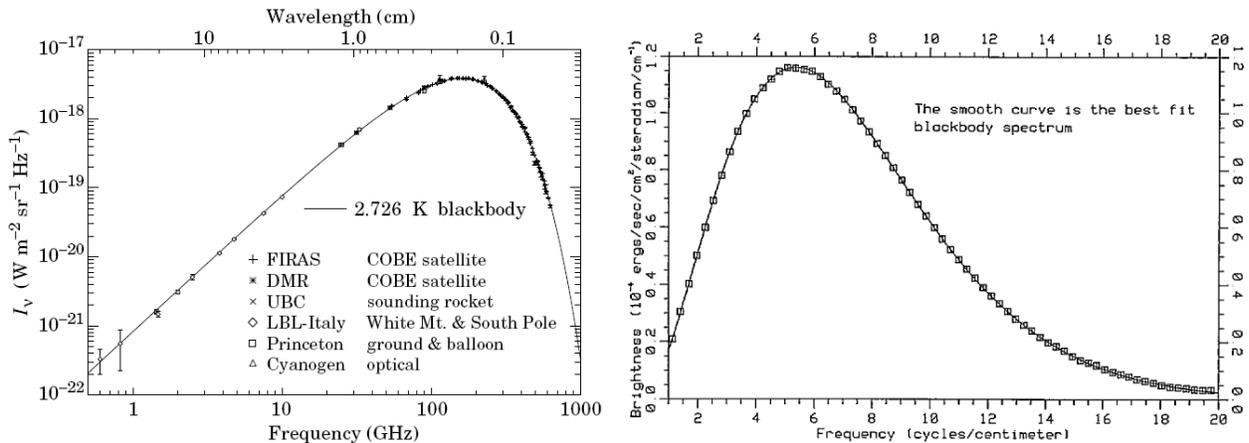


FIG. 1.6 – Gauche : Différentes mesures indépendantes du spectre de corps noir du CMB ajustées par un spectre de corps noir de température 2.73 K (extrait de [98]). Droite : Spectre de corps noir ajusté sur les mesures COBE-FIRAS (extrait de [67]). La température du spectre de corps noir ajustée ici sur les données FIRAS est de 2.728 Kelvin.

CMB sont quant à elle très faibles. Elles sont de l'ordre de 1/100000 ème du signal du CMB. Ce sont ces fluctuations qui ont été mesurées pour la première fois en 1992 avec l'expérience DMR à bord du satellite COBE après soustraction du signal dipolaire du CMB (Figure 1.7). Ce signal dipolaire est dû principalement au mouvement de la Voie Lactée par rapport au Fond

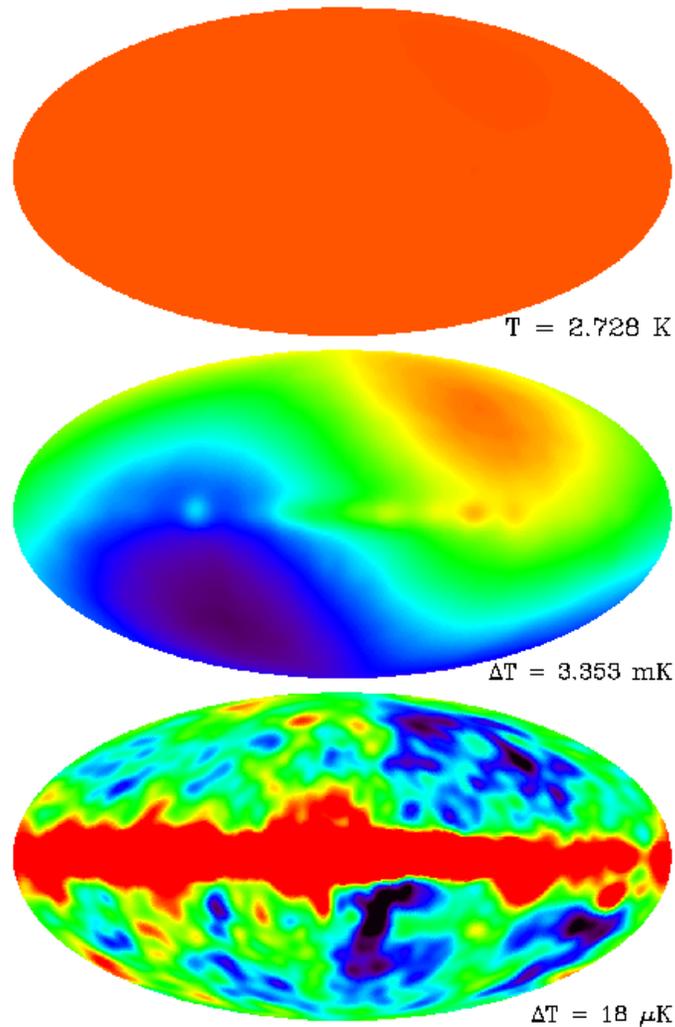


FIG. 1.7 – Cartes du ciel à 53 GHz obtenue avec l'instrument COBE-DMR. En haut : observations représentée sur un échelle de 0 à 4 K afin d'illustrer l'uniformité du CMB autour de 2.728 K. Au milieu : carte avec une échelle adaptée au dipôle, le dipôle et la Galaxie peuvent être distingués. En bas : la Galaxie et les anisotropies du CMB après soustraction du dipôle.

Cosmique. Son amplitude déduite des observations de WMAP est de 3.358 ± 0.017 mK. Les coordonnées galactiques de la direction du dipôle sont $l=263.86 \pm 0.04^\circ$ et $b=48.24 \pm 0.1^\circ$ [37]. Un autre effet de dipôle se superpose à l'effet du mouvement d'ensemble de la Galaxie pour générer ce signal de dipôle. Il s'agit du dipôle orbital correspondant à l'effet du mouvement de la Terre par rapport au Soleil qui contribue à hauteur de 10% au dipôle total.

Explication cosmologique

Le rayonnement de corps noir à 2.728 K détecté par Penzias et Wilson et mesuré précisément avec COBE-FIRAS avait été prédit par le modèle cosmologique de Gamow [30] en 1948. Gamow

explique le CMB comme le premier rayonnement émis par l'Univers lors du découplage de la matière et des photons contenus dans l'Univers juste après la formation des premiers éléments. D'après les résultats de WMAP [100], on estime aujourd'hui que ce rayonnement a été émis 380000 ans après le Big-Bang. Le maximum du spectre de ce rayonnement est aujourd'hui observé dans le domaine micro-onde, car le spectre du CMB a subi le phénomène de Redshift ou de décalage des longueurs d'onde dû à l'expansion de l'espace durant plusieurs milliards d'années depuis son émission.

1.1.3 Les avant-plans Astrophysique

Plusieurs sources d'émission d'avant-plan existent et gênent la mesure des fluctuations du CMB. Il s'agit, soit de sources d'origine galactique, soit de sources extra-galactiques. Ces sources ont heureusement des distributions spectrales (Figure 1.8) et spatiales différents entre elles et de ceux du CMB, ce qui devrait permettre de mettre en place des méthodes de séparation des composantes efficaces, basées par exemple sur des techniques de séparation de sources. Certaines de ces sources sont significativement polarisées, d'autres non, ce qui pourra également aider à les identifier et à les séparer des fluctuations du CMB. La description succincte présentée ci-dessous ne retient que les sources d'émission étendues d'origine galactiques. Les sources cosmologiques, telles que l'effet Sunyaev-Zel'Dovich (SZ) sur les amas de galaxies, et la contribution intégrée des galaxies (CIB) ne sont pas décrites ici.

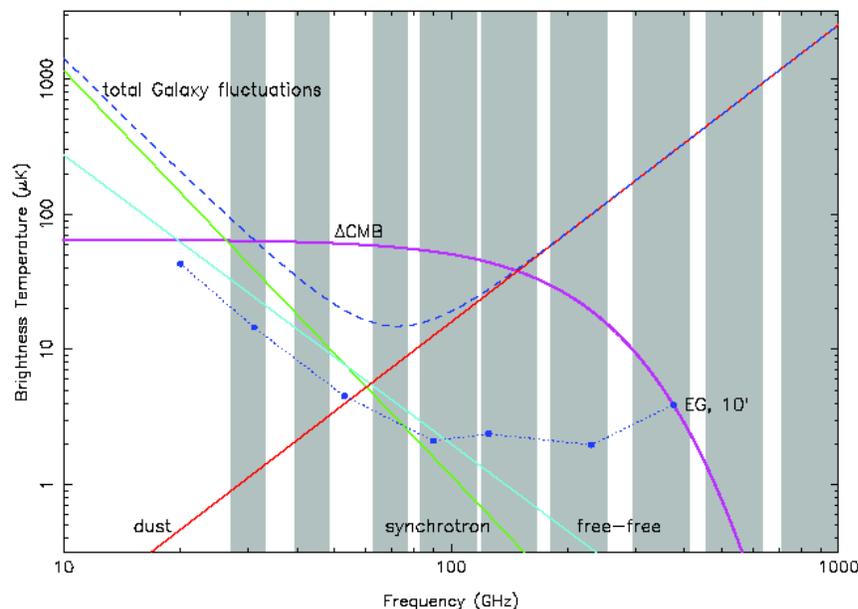


FIG. 1.8 – Les 9 bandes d'observation de Planck superposées aux spectres d'intensité associés à chaque composantes astrophysique exprimée en température de brillance (extrait de [105]). En vert, l'émission synchrotron, en bleu l'émission free-free, en rouge l'émission des poussières et en violet les fluctuations du CMB.

Emission de la poussière

Les grains de poussière présents dans le milieu inter-stellaire diffus sont des fragments solides composés essentiellement de Silicate amorphe et de Graphite, dont les tailles sont comprises entre quelques nanomètres et une centaine de nanomètres ($0.1 \mu m$). Contrairement aux plus petits des grains (PAH pour "Polycyclic Aromatic Hydrocarbons" et VSG pour "Very Small Grains"), les plus gros grains (BG pour "Big-Grains") sont à l'équilibre thermique avec le rayonnement Visible-UV des étoiles qui les chauffent. Ils sont alors portés à une température de quelques dizaines de degrés Kelvin et leur émission domine l'émission de la poussière, aux fréquences d'intérêt pour la cosmologie du CMB. La forme spectrale de ce rayonnement (Figure 1.9) est proche de celle d'un corps noir dont l'emissivité serait une loi de puissance de la fréquence, avec un indice spectral proche de 2 ($\epsilon \propto \nu^2$). La forme exacte de l'émission des grains de poussière dans l'IR lointain, le submillimétrique et le millimétrique, est encore débattue et pourrait significativement être affectée par la nature amorphe des grains.

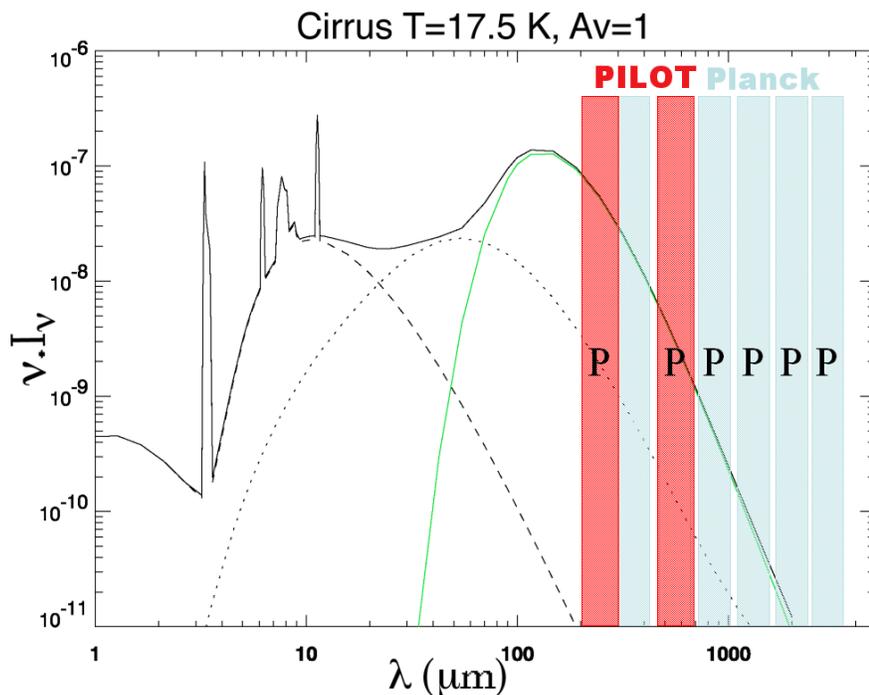


FIG. 1.9 – Spectre Infrarouge/Micro-onde de l'émission des poussières du milieu interstellaire. Les bandes d'observation de Planck-HFI et de PILOT sont superposées au spectre. Les voies polarisées sont repérées par la lettre P.

La distribution spatiale de l'émission thermique des gros grains est très structurée à toutes les échelles spatiales, comme en témoignent entre autres, les images obtenues par le satellite IRAS. Cette émission semble suivre assez bien celle du gaz neutre (tracé par la raie HI à 21 cm) et moléculaire. Une composante associée au gaz ionisé est aussi probablement présente.

Il est également possible que les plus petits des grains aient une contribution non négligeable aux longueurs d'ondes millimétriques, en particulier du fait de leur rotation rapide. Une telle émission ("Spinning Dust" en anglais) a potentiellement été détectée dans les données du sat-

telite WMAP, mais une interprétation définitive repose sur la séparation de l'émission d'origine synchrotron, qui s'avère difficile. Mais l'observation depuis le sol de certains nuages de poussière semblent indiquer qu'une telle émission est bien présente. Son importance à grande échelle reste difficile à déterminer.

Emission Synchrotron

Les électrons relativistes qui spiralent autour des lignes de champs magnétique dans notre Galaxie émettent un rayonnement de type synchrotron, similaire à celui généré par les particules circulant dans les anneaux de stockage des accélérateurs sur Terre. La position du pic de cette émission dépend de l'énergie des particules, mais se situe en général dans le domaine radio. Loin du pic, le spectre d'émission est une loi de puissance. Dans le milieu interstellaire, la distribution d'énergie des particules est elle-même une loi de puissance, et le spectre de brillance intégré observé dans le domaine radio et millimétrique est également une loi de puissance de la fréquence. Les particules les plus énergétiques de la distribution étant celles qui perdent le plus vite leur énergie par rayonnement synchrotron, le vieillissement de la population d'électrons après leur accélération initiale conduit à une modification du spectre d'énergie des électrons, et donc également du rayonnement synchrotron. Dans le domaine millimétrique, on s'attend à ce que la pente du rayonnement varie sur le ciel, les régions les plus éloignées des sites d'accélération des électrons (localisées dans le plan de notre galaxie) présentant un spectre plus "pentu". Ces variations spatiales de l'indice de l'émission synchrotron constituent la difficulté majeure à surmonter pour la séparation des composantes.

Emission free-free

Dans le milieu interstellaire ionisé, l'interaction des électrons libres avec les protons conduit à la production de rayonnement libre-libre ("free-free", en anglais). Tout comme le rayonnement synchrotron, le rayonnement free-free présente un spectre en loi de puissance dans le domaine spectral d'intérêt pour l'étude du CMB. Dans le milieu ionisé, les recombinaisons occasionnelles produisent également des transitions entre les niveaux d'énergies de l'atome d'hydrogène. Certaines de ces raies de transition, comme la raie H_α peuvent être utilisées pour tracer la distribution spatiale du gaz ionisé.

Lumière zodiacale

Tout comme les grains de poussière du milieu interstellaire (MIS), les grains présents dans notre système solaire émettent un rayonnement thermique, appelé émission zodiacale. Étant plus chauds que les grains du MIS, leur émission est maximum dans l'IR moyen (vers $\lambda = 20 \mu m$). Cette émission est très homogène à petite échelle, mais présente des variations importantes à grande échelle, du fait de la géométrie du nuage de poussière. Bien que décroissant rapidement vers les fréquences d'intérêt pour l'étude du CMB, cette émission pourrait jouer un rôle non négligeable. Il faut noter que, du fait de l'inclinaison de l'orbite terrestre par rapport au nuage zodiacal, cette émission varie temporellement au cours de l'année en tout point du ciel, ce qui peut offrir une façon de la mettre en évidence.

Polarisation des avant-plans

Du fait que les grains de poussière ne sont pas sphériques, leur émission propre peut être significativement polarisée linéairement, dans la direction du plus grand axe du grain. En outre, certains mécanismes physiques permettent un alignement du grand axe des grains, en particulier du fait de la mise en rotation des grains vis-à-vis des lignes de champ magnétique présentes dans le MIS. Ces mécanismes conduisent à un alignement à grande échelle des grands-axes, et à une émission globalement polarisée linéairement dans une direction orthogonale à la direction du champs magnétique projetée sur le plan du ciel. Cet effet est observé, à la fois en absorption dans le domaine Visible (où l'absorption est polarisée, mais cette fois avec une direction de polarisation parallèle au champs projeté) et en émission dans l'IR lointain et le sub-millimétrique. Le degré de polarisation de l'émission est de l'ordre de quelques pourcents dans le visible et de 5% en moyenne pour l'émission diffuse du plan galactique, d'après les mesures de l'expérience ballon Archeops [91]. Certains nuages sombres pourraient être polarisés jusqu'à des taux plus élevés. On s'attend également à d'importantes variations du degré de l'angle de la polarisation avec la position sur le ciel, du fait des variations de la géométrie des lignes de champs magnétiques sur le ciel et le long de la ligne de visée. Pour l'heure, le niveau de polarisation dans le milieu diffus à haute latitude galactique est encore inconnu. Les mesures Planck et PILOT permettront de mieux contraindre cette composante.

L'émission synchrotron est également polarisée linéairement, dans la direction de rotation des particules relativistes. La combinaison des vitesses conduit à une polarisation nette orthogonale à la direction du champs magnétique projetée sur le ciel. Dans le domaine radio, cette direction de polarisation peut être affectée par la propagation du rayonnement dans un milieu contenant un champs magnétique parallèle à la direction de propagation, par effet de la rotation Faraday. Ce phénomène, aux conséquences observationnelles spectaculaires dans le domaine radio, contribue à dépolariser l'émission, mais est néanmoins faible dans le domaine millimétrique, du fait de sa forte dépendance en fréquence ($\propto \nu^2$).

Il faut noter que l'émission des galaxies extérieures non résolues, qui est produite par la poussière dans ces galaxies, même si elle est atténuée du fait de la symétrie dans le faisceau, pourrait être faiblement polarisée. De même, on ne peut pas exclure que la lumière zodiacale soit faiblement polarisée, du fait de processus d'alignement d'origine radiative. Par contre, la polarisation de l'effet SZ est très faible et l'on ne s'attend pas à une polarisation significative du CIB, du fait de la contribution d'un très grand nombre de galaxies orientées aléatoirement.

1.1.4 Les effets systématiques

Des effets systématiques perturbent le signal de toute mesure astrophysique sous différentes formes : signaux parasites, biais, variations de réponse... Leur niveau de contrôle et la précision de correction de ceux-ci constituent la limite finale de sensibilité pour des détecteurs aussi sensibles que les bolomètres de Planck-HFI.

La définition des effets systématiques dans le groupe de travail dédié dans Planck est la suivante : "On appelle effet systématique toute déviation par rapport au signal que donnerait un instrument avec un faisceau gaussien parfait, un pointage parfait et un bruit purement blanc et gaussien". Pour des expériences cosmologiques de précision comme Planck-HFI, le contrôle des propriétés du bruit (en particulier des corrélations dans le bruit) sont essentielles.

Le contrôle et la précision de correction des effets systématiques doivent donc être tels qu'ils soient négligeables devant le bruit blanc (bruit des détecteurs et électroniques de lecture) lui-même si possible dominé par les bruits inévitables (bruit de photon de l'objet astrophysique étudié), ce qui est le cas pour Planck HFI.

1.2 Contraintes des modèles cosmologiques par les observations du CMB

Après la publication des résultats de WMAP en 2003 et 2006, la plupart des paramètres du modèle cosmologique standard ont pu être contraints avec une bonne précision. A partir de la carte des anisotropies du CMB (Figure 1.5), le spectre de ces fluctuations dans l'espace des harmoniques sphériques est d'abord calculé (Figure 1.10).

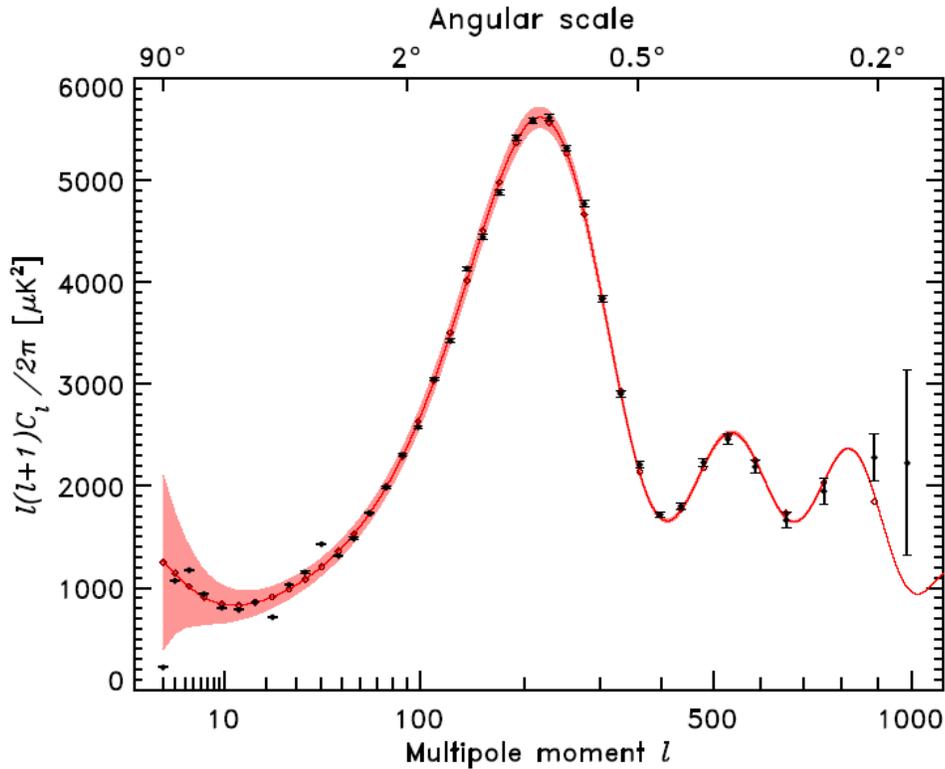


FIG. 1.10 – Spectre des fluctuations de température du CMB obtenu à partir de la carte WMAP (extrait de [37]). Les points en noir correspondent aux mesures déduites de la cartes des fluctuation du CMB. Les barres d'erreur estimées pour chaque point du spectre et déduit du bruit estimé sur les pixels des cartes WMAP sont également représentées. La courbe en rouge est le meilleur ajustement du modèle Λ CDM. Le bandeau rose correspond à l'erreur induite par la variance cosmique pour un intervalle de confiance de 1σ dans la formule d'incertitude sur les C_l [41].

Pour un multipole l donné, le lien du coefficient C_l avec l'anisotropie de température de

corps noir est donnée par :

$$\left\langle \frac{\Delta T}{T} \right\rangle^2 = \frac{l(l+1)C_l}{2\pi} \quad (1.2)$$

Plus la valeur du l est grande sur le spectre, plus l'échelle angulaire correspondante sur la carte est petite. Le plus haut pic, désigné sous le nom de "1er pic acoustique" caractérise l'échelle angulaire la plus représentée statistiquement dans la carte. Le premier pic acoustique dans les meilleures observations du spectre du CMB (WMAP, Archeops, BOOMERANG, MAXIMA, ...) se situe vers $l=220$, ce qui correspond à une échelle angulaire de 1° sur les cartes.

Des simulation des "spectre des C_l " prédits par les modèles cosmologiques sont ensuite comparés aux mesures afin de déterminer quelles paramètres cosmologiques ajustent le mieux les mesures. Les différents paramètres cosmologiques ainsi déduits du spectre des C_l de WMAP sont résumés dans le tableau 1.1.

Parameter	Description	Definition
H_0	Hubble expansion factor	$H_0 = 100h \text{ Mpc}^{-1} \text{ km s}^{-1}$
ω_b	Baryon density	$\omega_b = \Omega_b h^2 = \rho_b / 1.88 \times 10^{-26} \text{ kg m}^{-3}$
ω_c	Cold dark matter density	$\omega_c = \Omega_c h^2 = \rho_c / 18.8 \text{ yoctograms/ m}^{-3}$
f_ν	Massive neutrino fraction	$f_\nu = \Omega_\nu / \Omega_c$
$\sum m_\nu$	Total neutrino mass (eV)	$\sum m_\nu = 94 \Omega_\nu h^2$
N_ν	Effective number of relativistic neutrino species	
Ω_k	Spatial curvature	
Ω_{DE}	Dark energy density	For $w = -1$, $\Omega_\Lambda = \Omega_{DE}$
Ω_m	Matter energy density	$\Omega_m = \Omega_b + \Omega_c + \Omega_\nu$
w	Dark energy equation of state	$w = p_{DE} / \rho_{DE}$
$\Delta_{\mathcal{R}}^2$	Amplitude of curvature perturbations \mathcal{R}	$\Delta_{\mathcal{R}}^2(k = 0.002/\text{Mpc}) \approx 29.5 \times 10^{-10} A$
A	Amplitude of density fluctuations ($k = 0.002/\text{Mpc}$)	See Spergel et al. (2003)
n_s	Scalar spectral index at $0.002/\text{Mpc}$	
α	Running in scalar spectral index	$\alpha = dn_s / d \ln k$ (assume constant)
r	Ratio of the amplitude of tensor fluctuations to scalar potential fluctuations at $k=0.002/\text{Mpc}$	
n_t	Tensor spectral index	Assume $n_t = -r/8$
τ	Reionization optical depth	
σ_8	Linear theory amplitude of matter fluctuations on $8 h^{-1} \text{ Mpc}$	
Θ_s	Acoustic peak scale (degrees)	see Kosowsky et al. (2002)
A_{SZ}	SZ marginalization factor	see appendix A
b_{sdss}	Galaxy bias factor for SDSS sample	$b = [P_{sdss}(k, z = 0) / P(k)]^{1/2}$ (constant)
C_{220}^{TT}	Amplitude of the TT temperature power spectrum at $\ell = 220$	
z_s	Weak lensing source redshift	

TAB. 1.1 – *Les différents paramètres cosmologiques ajustés sur le spectre des C_l de WMAP (extrait de [100]).*

Parmi les paramètres cosmologiques les plus utilisés, la densité d'énergie Ω_{tot} peut être contrainte fortement grâce aux cartes du CMB. De même la densité de matière Ω_m et la densité

d'énergie sombre Ω_Λ associé à la constante cosmologique Λ peuvent également être contraints. La matière est quant à elle constituée de matière baryonique (atomes, protons et électrons) et de matière sombre. On note respectivement Ω_b et Ω_c les densités de matière baryonique et de matière sombre. On a alors :

$$\Omega_m = \Omega_b + \Omega_c \quad (1.3)$$

Au final, on a :

$$\Omega_{tot} = \Omega_m + \Omega_\Lambda \quad (1.4)$$

Ces différents paramètres de densité de l'Univers peuvent alors être contraints à partir du spectre des C_l du CMB moyennant d'autres observables comme les SNIa par exemple. Les valeurs prédites pour Ω_m et Ω_Λ à partir des observations de BOOMERANG et des SNIa sont représentées sur la Figure 1.12. Cette figure montre bien que les résultats de BOOMERANG sont compatibles avec un modèle d'univers plat c'est à dire de topologie euclidienne.

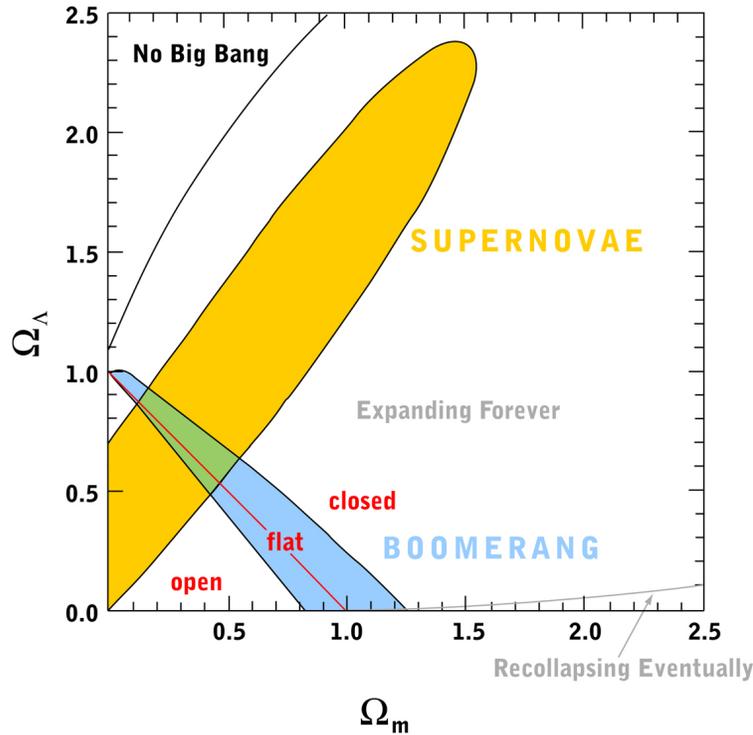


FIG. 1.11 – Les différents type d'univers possibles en fonction des valeurs des paramètres cosmologiques Ω_m et Ω_Λ . Les contraintes des observations du CMB par BOOMERANG sont représentées en bleu. Les contraintes des observations des SNIa sont également indiquées en jaune. Un modèle d'univers plat avec $\Omega_{tot}=1$ est ici parfaitement compatible avec les observations du CMB par BOOMERANG.

Les résultats de WMAP combinés à d'autres observables permettent également de contraindre fortement Ω_m et Ω_Λ (Figure 1.12). Sur la Figure 1.12, on constate que la valeur de Ω_{tot} est centré sur 1 avec des incertitudes meilleures que quelques pourcents. Les valeurs des principaux paramètres cosmologiques obtenus avec uniquement les données WMAP et en supposant $\Omega_{tot}=1$ sont présentés dans le tableau 1.2.

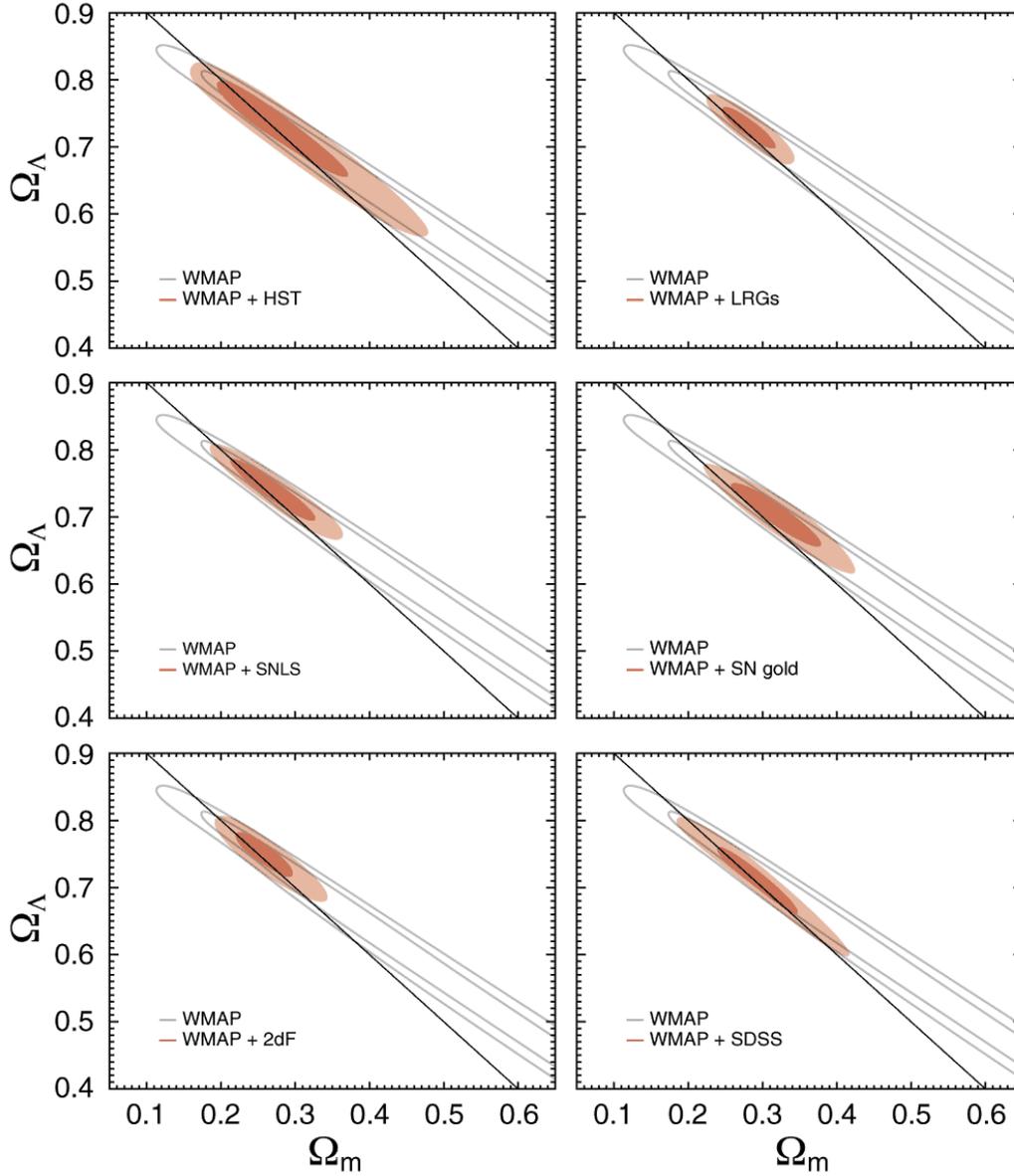


FIG. 1.12 – Contraintes apportés par les données WMAP et d'autres résultats observationnels pour les paramètres cosmologiques Ω_m et Ω_Λ (extrait de [100]). La zone en rouge correspond au contour de l'intervalle de confiance à 1σ pour les paramètres cosmologiques. La zone en rose représente l'intervalle de confiance à 2σ . Les zone avec un contour gris représentent les intervalles de confiances à 1 et 2σ déduits des données WMAP seules pour les paramètres cosmologiques.

Enfin, depuis la publication des résultats de WMAP, le modèle standard de la cosmologie prédit donc un Univers contenant principalement de l'énergie sombre (environ 75%) et un quart de matière (sombre et baryonique). La matière baryonique ne représente quant à elle que 4% du total du contenu énergétique de l'Univers. La topologie de l'Univers est de type

WMAP Cosmological Parameters	
Model: lcdm	
Data: wmap	
$10^2 \Omega_b h^2$	2.229 ± 0.073
$\Delta_{\mathcal{R}}^2(k = 0.002/\text{Mpc})$	$(23.5 \pm 1.3) \times 10^{-10}$
h	$0.732^{+0.031}_{-0.032}$
H_0	$73.2^{+3.1}_{-3.2} \text{ km/s/Mpc}$
$\log(10^{10} A_s)$	3.156 ± 0.056
$n_s(0.002)$	0.958 ± 0.016
$\Omega_b h^2$	0.02229 ± 0.00073
$\Omega_c h^2$	$0.1054^{+0.0078}_{-0.0077}$
Ω_Λ	0.759 ± 0.034
Ω_m	0.241 ± 0.034
$\Omega_m h^2$	$0.1277^{+0.0080}_{-0.0079}$
σ_8	$0.761^{+0.049}_{-0.048}$
τ	0.089 ± 0.030
θ_A	0.5952 ± 0.0021 [◻]
z_r	$11.0^{+2.6}_{-2.5}$

TAB. 1.2 – Valeurs des principaux paramètres cosmologiques obtenus avec les données WMAP en supposant $\Omega_{tot}=1$ (extrait de [28]).

euclidienne avec une courbure moyenne de l'espace-temps nulle. Enfin, l'âge de l'Univers déduit de la constante de Hubble estimé à partir des cartes WMAP est de 13.7 ± 0.3 milliards d'années. Comme on l'a vu, ce modèle standard est le meilleur modèle compatible avec les observations WMAP. Il est également compatible avec la théorie de l'inflation qui prédit un univers plat avec $\Omega_{tot}=1$.

1.3 Les expériences COBE, Archeops et WMAP

Les missions COBE et WMAP de la NASA sont les deux principales missions précurseurs de Planck pour l'observation spatiale des anisotropies du CMB sur l'ensemble de la sphère céleste. Les concepts instrumentaux et les principaux résultats de ces deux missions sont présentés dans cette partie. L'expérience ballon Archeops qui constitue le banc d'essai de Planck-HFI est également présenté ici.

1.3.1 COBE

Le satellite COBE (COsmic Background Explorer) de la NASA (Figure 1.13) a été lancé le 18 novembre 1989 par une fusée Delta. COBE était placé en orbite circulaire polaire à 900km

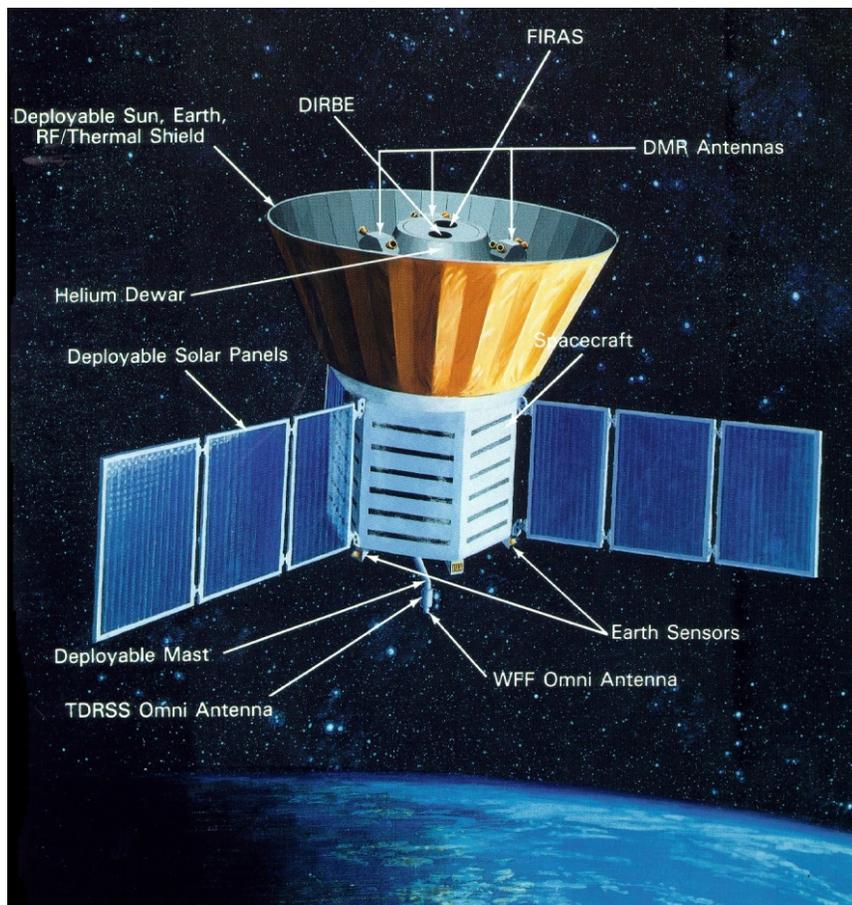


FIG. 1.13 – Vue d'artiste du satellite COBE et de ses différents éléments. Les trois boîtiers DMR à 31, 53 et 90 GHz peuvent être distingués ici, ainsi que le Dewar contenant FIRAS et DIRBE.

d'altitude environ autour de la Terre. Le satellite était équipé de trois instruments : FIRAS, DMR et DIRBE. FIRAS et DIRBE étaient placés à l'intérieur d'un Dewar permettant de refroidir les détecteurs de ces deux instruments.

FIRAS

FIRAS (Far Infrared Absolute Spectrophotometer) est un interféromètre de Michelson différentiel. Il effectue ainsi la transformée de Fourier de la différence entre l'émission du ciel et l'émission d'un corps noir embarqué. L'entrée de l'instrument était constitué d'un cornet aligné avec l'axe de rotation du satellite (Figure 1.14). L'émission du ciel était mesurée différemment par rapport à un corps noir placé à l'intérieur de l'instrument (Figure 1.15). La réponse de l'instrument était étalonnée grâce à une source d'étalonnage mobile embarquée sur l'instrument dont l'émissivité était meilleure que 0.9999 [68]. Les détecteurs étaient des bolomètres refroidis à 1.5 K par l'Hélium liquide contenu dans le Dewar du Satellite.

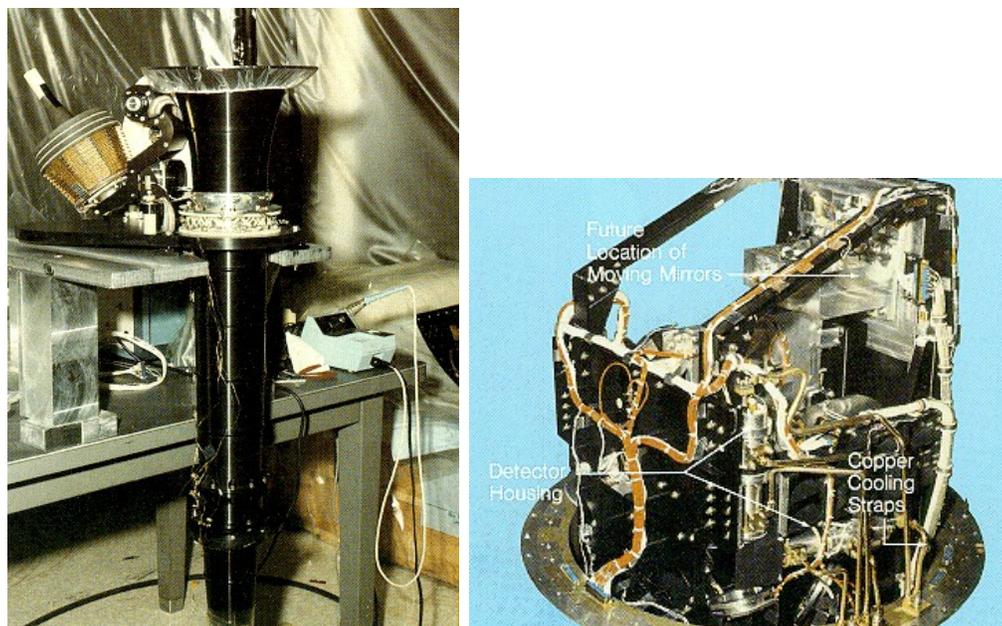


FIG. 1.14 – Gauche : Photographie du cornet d'entrée de FIRAS avec la source mobile d'étalonnage de l'instrument fixé à l'entrée. Droite : Photographie de FIRAS sans cornet d'entrée et sans miroir mobile (extraits de [28]).

FIRAS permettait d'observer entre 0.1 to 10 mm en balayant ce domaine de fréquence dans deux canaux séparés de 0.5 mm avec une résolution spectrale d'environ 5% pour chaque canal.

La résolution spatiale des cartes du ciel obtenues avec FIRAS est de 7° .

La calibration absolue de FIRAS est importante ici car c'est cette mesure qui est utilisée comme référence pour de nombreuses missions dans l'infra-rouge lointain : DIRBE, IRIS, ... Les observations FIRAS seront également utilisées pour l'étalonnage absolu des voies à 545 et 857 GHz de Planck-HFI. Pour les canaux d'HFI dominés par le CMB à plus basses fréquences, le signal du dipôle dû au mouvement de la Terre autour du Soleil sera utilisé comme source d'étalonnage absolu [84].

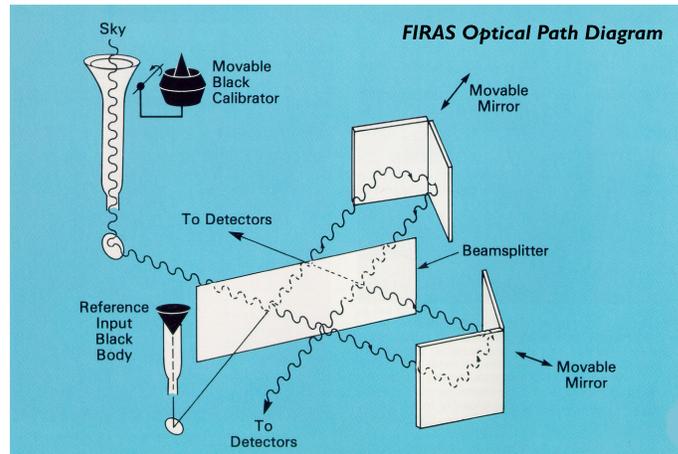


FIG. 1.15 – Principe de mesure de COBE-FIRAS (extrait de [28]).

DMR

DMR (Differential Microwave Radiometers) est constitué de trois radiomètres différentiels observant à 31.5, 53 et 90 GHz (Figure 1.16).

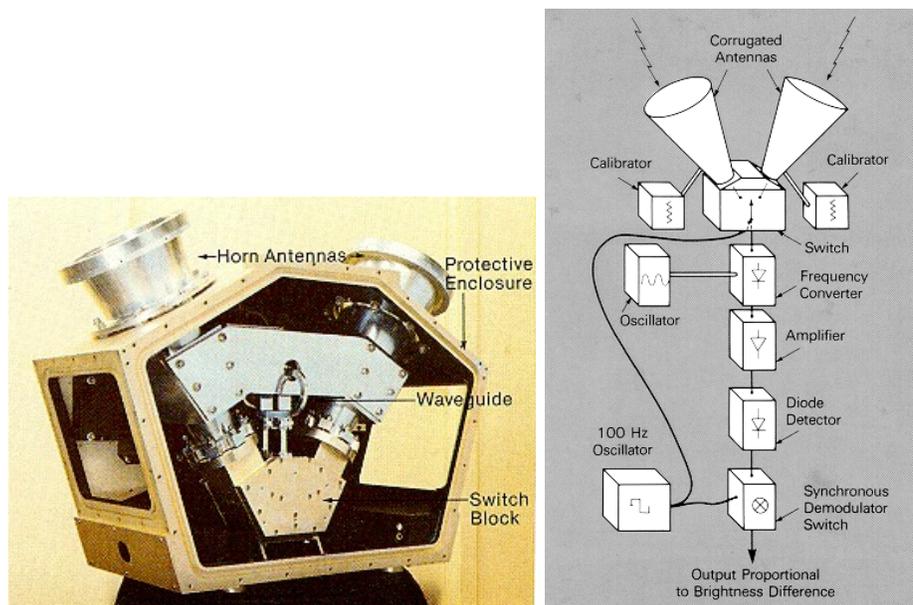


FIG. 1.16 – Gauche : Photographie du récepteur DMR à 31.5GHz en cours d'assemblage. Droite : Principe de mesure de COBE-DMR (extraits de [28]).

La résolution spatiale des cartes du ciel obtenues avec DMR est également de 7° .

DIRBE

DIRBE (Diffuse Infrared Background Experiment) est un imageur infrarouge qui observait dans 10 bandes spectrales réparties entre 1.25 et 240 μm . Les observations DIRBE sont étalonnées en absolu grâce à une source embarquée dont le niveau de référence est lui-même étalonné par rapport à FIRAS. DIRBE était équipé de 16 détecteurs infrarouge refroidis également par l'Hélium liquide du Dewar. Un système de mesure de la polarisation linéaire à 1.2, 2.2, and 3.5 μm était également installé sur l'instrument. Le champ de vue instantané était de 42' x 42' pour chacun des 10 canaux photométriques.

La résolution effective sur le ciel est de 1° environ pour les cartes DIRBE.

Les résultats de COBE ont été publiés en 1992. Les principaux résultats pour la cosmologie sont la carte des anisotropies du CMB établie par DMR (Figure 1.2) ainsi que le spectre du CMB mesuré par FIRAS (Figure 1.6).

1.3.2 Archeops

Archeops est un instrument dédié à la mesure des fluctuations du CMB embarqué sous ballon stratosphérique. La Figure 1.17 montre une vue schématique de la nacelle embarquant l'instrument Archeops.

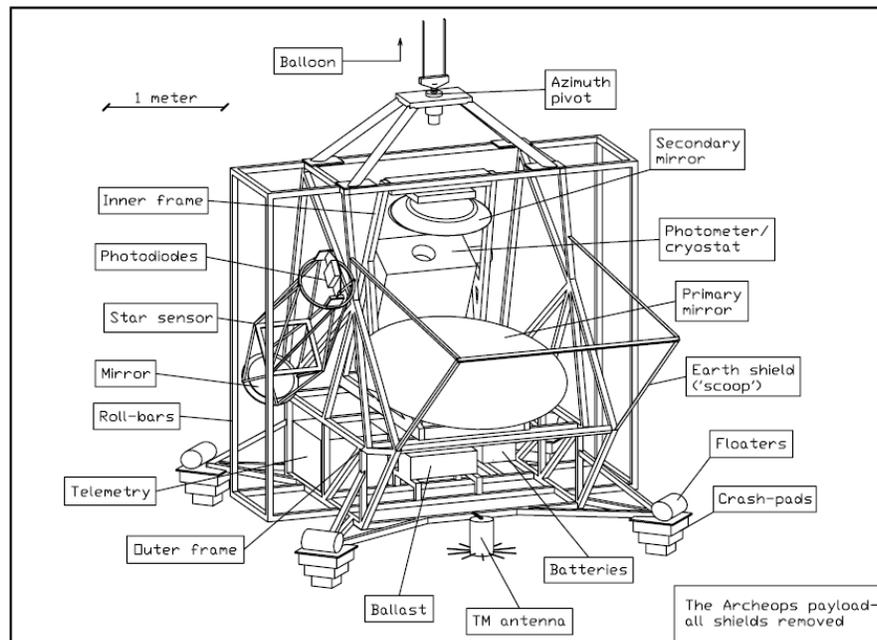


FIG. 1.17 – La nacelle de l'expérience ballon Archeops. On distingue entre autre le télescope, le cryostat et le senseur stellaire.

Archeops a volé et observé le ciel quatre fois entre 1999 et 2002. Archeops observait dans quatre bandes photométriques à 143, 217, 353 et 545 GHz. Archeops constituait un banc de test pour les technologies utilisées sur Planck-HFI puisque le télescope grégorien hors-axe, les bolomètres en toile d'araignée, le système d'optiques froides et le système de dilution d' ^3He

Vol	Trapani	KS1	KS2	KS3
Date	Juillet 1999	Janvier 2001	Janvier 2002	Février 2002
Durée	4h	7.5h	2h	12h
Lieu	Trapani	Kiruna	Kiruna	Kiruna

TAB. 1.3 – *Caractéristiques des différents vols d’Archeops. Les résultats publiés par le consortium Archeops ont été obtenus à partir des mesures du vol KS3.*

dans l’ ^4He utilisé pour refroidir les détecteurs à 0.1 K étaient du même type que pour HFI. Les cartes des fluctuations du CMB obtenues avec Archeops à 143 et 217 GHz après séparation des composantes sont présentées Figure 1.4. A partir de ces cartes qui couvrent 30% du ciel, Archeops a permis de mesurer pour la première fois tout le spectre des fluctuations du CMB entre la fin du plateau Sach-Wolfe mesuré par COBE-DMR ($l = 10$) et au-delà du premier pic acoustique jusqu’à $l = 700$ (Figure 1.18).

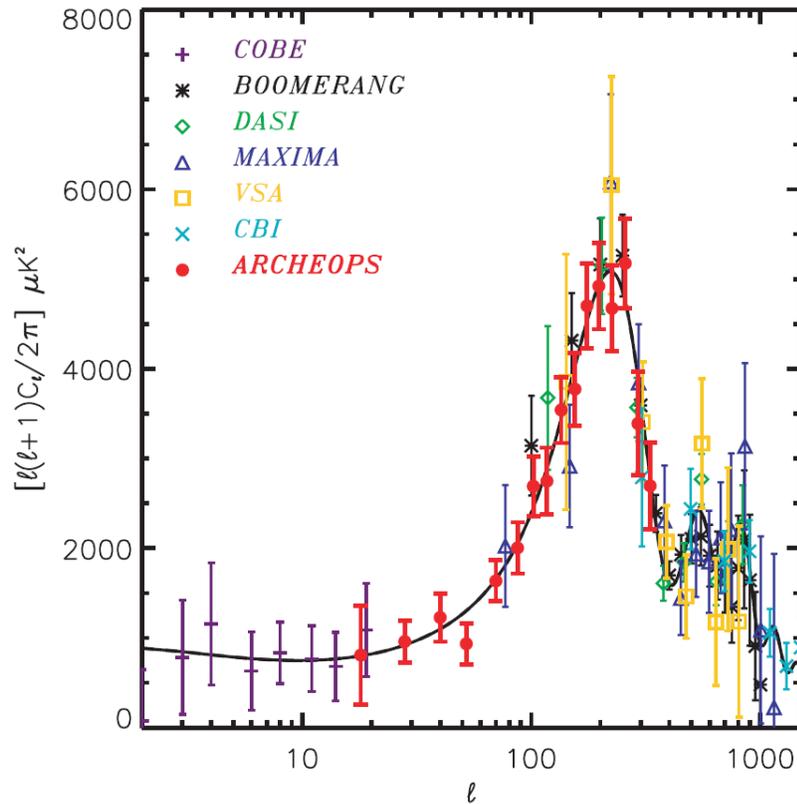


FIG. 1.18 – *Mesures du spectre du CMB dans l’espace des harmoniques sphériques obtenu avec Archeops et d’autres expériences (extrait de [4]). Les points rouge représentent les mesures d’Archeops avec leurs incertitudes. Les mesures Archeops présentées ici ont été obtenues en effectuant le spectre d’une carte moyenne des fluctuations du CMB déduites des deux cartes à 143 GHz et 217 GHz à haute latitude ($b > 30^\circ$). La courbe obtenue avec un modèle ΛCDM ajusté sur ces données est également tracé en noir ici.*

Archeops a également permis de mesurer l'émission polarisée du ciel à 353 GHz pour la première fois puisqu'il était équipé de système d'analyse de la polarisation de type OMT (Ortho-Mode Transducer) à cette fréquence. Grâce à Archeops, il a ainsi été possible d'établir qu'en moyenne, dans le plan galactique, 5% de l'émission du ciel était polarisée à 353 GHz (Figure 1.19). Jusqu'à 10% de polarisation a été observé dans certaines régions [5].

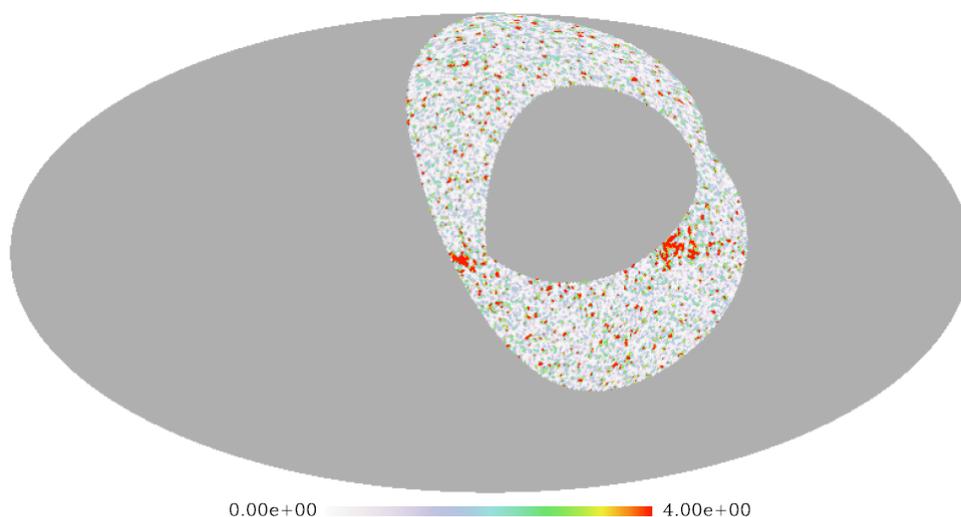


FIG. 1.19 – Carte du pourcentage de polarisation sur le ciel mesurée par Archeops (extrait de [5]).

1.3.3 WMAP

Le satellite WMAP de la NASA (Figure 1.20) a été lancé par une fusée Delta II le 20 juin 2001. Ce télescope spatiale micro-onde a été placé en orbite autour du point de Lagrange L2 du système Soleil-Terre (orbite similaire à celle de Planck). WMAP réalise une mesure différentielle de l'émission micro-onde du ciel comme pour COBE-DMR. Pour cela WMAP est constitué de deux télescopes grégoriens dos à dos. Les dimensions du primaire de chaque télescope est de $1.4 \text{ m} \times 1.6 \text{ m}$. Au foyer des deux télescopes se trouve les radiomètres différentiels de WMAP (Figure 1.21). En plus de l'intensité, ces radiomètres permettent de mesurer la polarisation de la lumière qu'ils reçoivent (Figure 1.21). Ils sont équipés de détecteurs de type HEMT (High Electron Mobility Transistor). Les performances des radiomètres de WMAP sont résumées dans le tableau 1.4.

Les résultats de WMAP ont été publiés en 2003 et 2006 respectivement après un et trois ans d'observation. La sensibilité des cartes publiées en 2006 est donc meilleure avec un facteur $\sqrt{3}$ par rapport à celles de 2003. Au total, 5 cartes d'intensité dans cinq bandes de fréquence allant de 23 à 94 GHz ont été publiées. A partir des cinq cartes d'intensité et moyennant l'utilisation de méthodes de traitement du signal par combinaison linéaire des composantes Astrophysique, l'équipe WMAP a pu établir la carte des anisotropies de température du CMB présentée Figure 1.5.

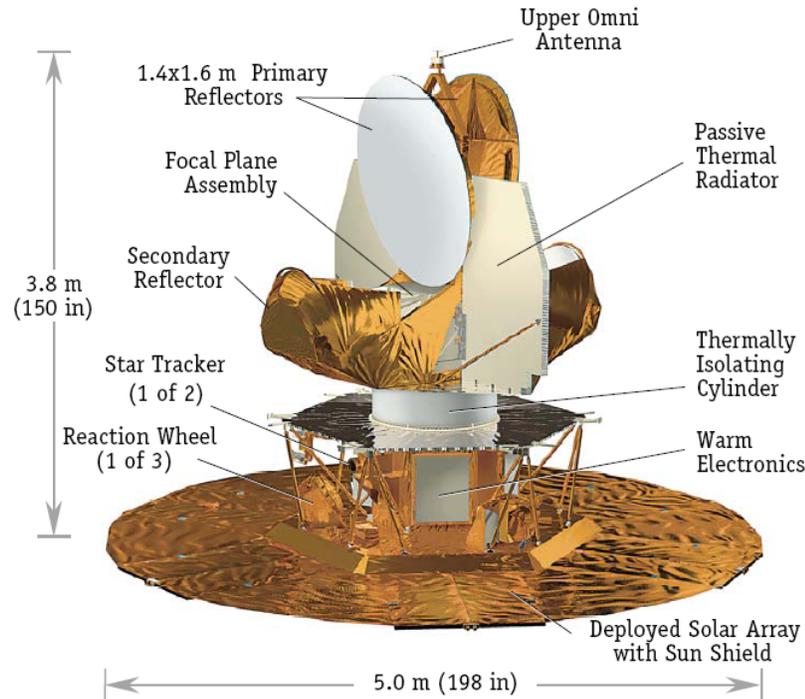


FIG. 1.20 – Dessin légendé de la sonde WMAP.



FIG. 1.21 – Gauche : Instrument focal de WMAP. Droite : Illustration du principe de mesure de la polarisation avec WMAP.

Pour chaque bande de fréquence les cartes Q et U permettant de remonter à la polarisation du ciel [11] ont également été publiées. Grâce à ses détecteurs sensible à la polarisation, WMAP a pu détecter marginalement les modes E de la polarisation du CMB (Figure 1.22).

Seule une limite supérieure sur la valeur des modes B de la polarisation du CMB a pu être

établie (Figure 1.22). L'éventuelle détection des modes B de la polarisation du CMB serait un résultat majeur pour la cosmologie dans les années à venir puisque cela imposerait des contraintes importantes sur le modèle d'inflation.

Bande	K	Ka	Q	V	W
Longueur d'onde (mm)	13	9.1	7.3	4.9	3.2
Fréquence (GHz)	23	33	41	61	94
Largeur de bande (GHz)	5.5	7.0	8.3	14.0	20.5
Nombre de détecteurs différentiels	1	1	2	2	4
Nombre de radiomètres	2	2	4	4	8
Taille de faisceau (deg)	0.88	0.66	0.51	0.35	0.22
Température des détecteurs (K)	29	39	59	92	145

TAB. 1.4 – *Caractéristiques des radiomètres de WMAP.*

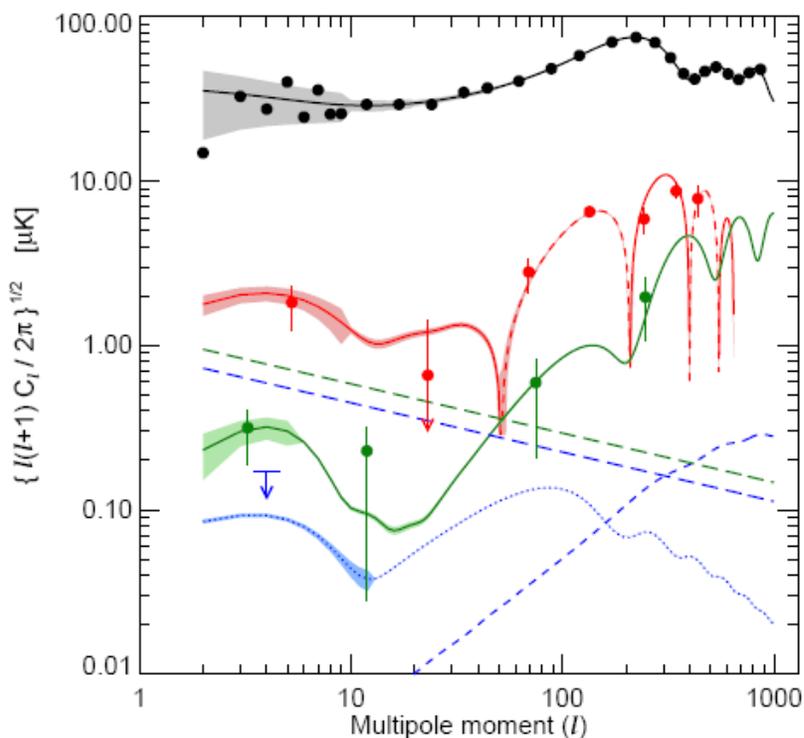


FIG. 1.22 – *Spectres de la polarisation du CMB déduit des données WMAP superposé au spectre des fluctuations de température du CMB tracé ici en noir. Le spectre de corrélation TE entre les fluctuations de température et des fluctuations associées aux modes E de la polarisation du CMB est tracé en rouge. Le spectre EE des fluctuations associées aux modes E de la polarisation du CMB est tracé en vert. La limite supérieure estimée pour le niveau du spectre des modes B est tracée en bleu.*

1.4 Le Projet Planck

Le satellite Planck de l'ESA [104] sera lancé en 2008. Planck est un télescope spatial observant dans le domaine des micro-ondes. L'objectif scientifique principal de Planck est de réaliser un relevé complet des anisotropies du CMB avec une grande résolution angulaire et une sensibilité suffisante pour mesurer les fluctuations les plus faibles prédites par les modèles cosmologiques standards. Planck constitue la troisième génération d'expérience spatiale de mesure des fluctuations du CMB après COBE et WMAP. Le projet Planck est actuellement en fin de Phase D (Fabrication, Intégration et Tests).

1.4.1 Les objectifs scientifiques de Planck

Planck effectuera un relevé complet du ciel aux longueurs d'ondes millimétriques et submillimétriques entre 30 et 857 GHz dans neuf bandes de fréquences (Figure 1.23)

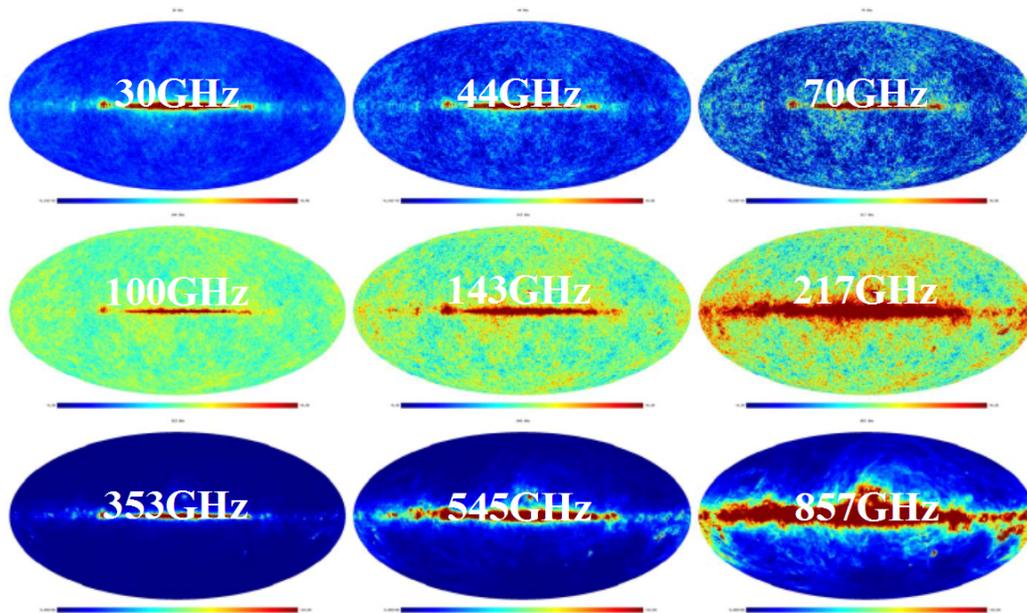


FIG. 1.23 – Simulation des 9 cartes du ciel observées par Planck (extrait de [105]).

L'utilisation combinée de ces neuf cartes produites par Planck permettra d'obtenir une carte des anisotropies du CMB sur le ciel (Figure 1.24) avec une résolution angulaire de 5 minutes d'arc et une sensibilité de $2 \cdot 10^{-17}$ Watts/ \sqrt{Hz} . Cette carte sera alors beaucoup plus résolue et précise que celle de WMAP. Elle permettra d'observer le spectre des fluctuations du CMB pour des échelles angulaires allant jusqu'à $l=2500$ (Figure 1.25). En plus des contraintes sur le CMB, Planck produira des observations inédites de ce que l'on appelle les « anisotropies secondaires ». Avec neuf bandes d'observation micro-onde (Figure 1.8) Planck permettra de tester les modèles d'émission galactique. Les émissions des poussières du milieu interstellaire mais aussi les émissions synchrotron et Free-Free seront ainsi mesurées par Planck. Ces deux dernières émissions ont déjà été mesurées par WMAP. La vraie nouveauté concernera donc l'émission des

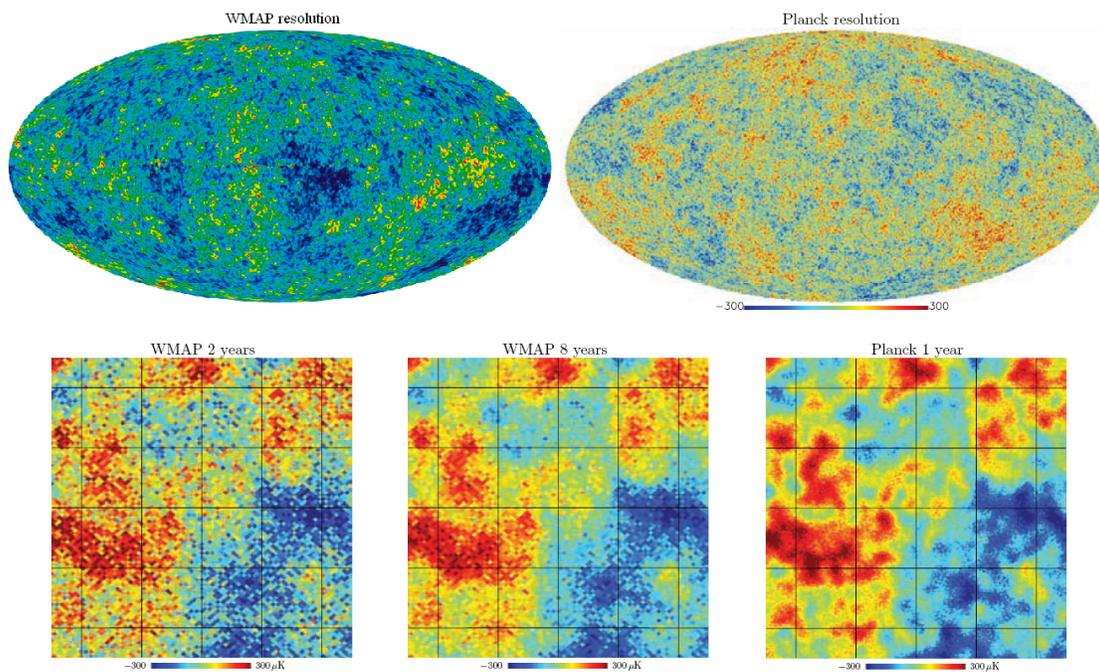


FIG. 1.24 – *Gauche : Carte des anisotropies du CMB mesurée par WMAP. Droite : Simulation de la carte des anisotropies du CMB mesurée par Planck (extrait de [105]).*

poussières et en particulier leur émission polarisée. Les relevés Planck permettront également la détection de l'effet Sunyaev-Zeldovich [102] en direction des amas de galaxies sur les cartes. Pour pouvoir séparer les anisotropies du CMB des autres composantes astrophysiques ci-dessus, une méthode de séparation de composantes des cartes de Planck sera nécessaire. Plusieurs méthodes sont alors possibles et dès à présent testées : analyse en composantes indépendantes, combinaisons linéaires, maximum d'entropie, ...

Enfin, sept des neuf fréquences d'observation de Planck seront équipées de détecteurs sensibles à la polarisation. Les observations polarisées de Planck à 30, 44, 70, 100, 143, 217 et 353 GHz devraient permettre de mesurer la polarisation du CMB et apporter ainsi des contraintes importantes sur les modèles cosmologiques et éventuellement sur les modèles l'inflation en particulier en cas des détection des modes B.

1.4.2 Le satellite et ses instruments

Le satellite Planck (Figure 1.26) est constitué d'une plateforme ou SVM pour « SerVice Module ». Cette plateforme est fabriquée par Alcatel Alenia Space. Elle assure l'alimentation et la mise en oeuvre d'une charge utile constituée d'un télescope de type Grégorien hors-axe et de deux instruments de mesure le "Low Frequency Instrument" (LFI) et le "High Frequency Instrument" (HFI) (Figure 1.27). Le télescope d'un diamètre utile de 1.5 mètres est développé par un consortium d'instituts Danois emmené par H. U. Norgaard-Nielsen du Danish Space Researchs Institute. Le télescope est constitué d'un miroir primaire et d'un secondaire de formes elliptiques. Ses performances sont proches de celle d'un télescope respectant la configuration

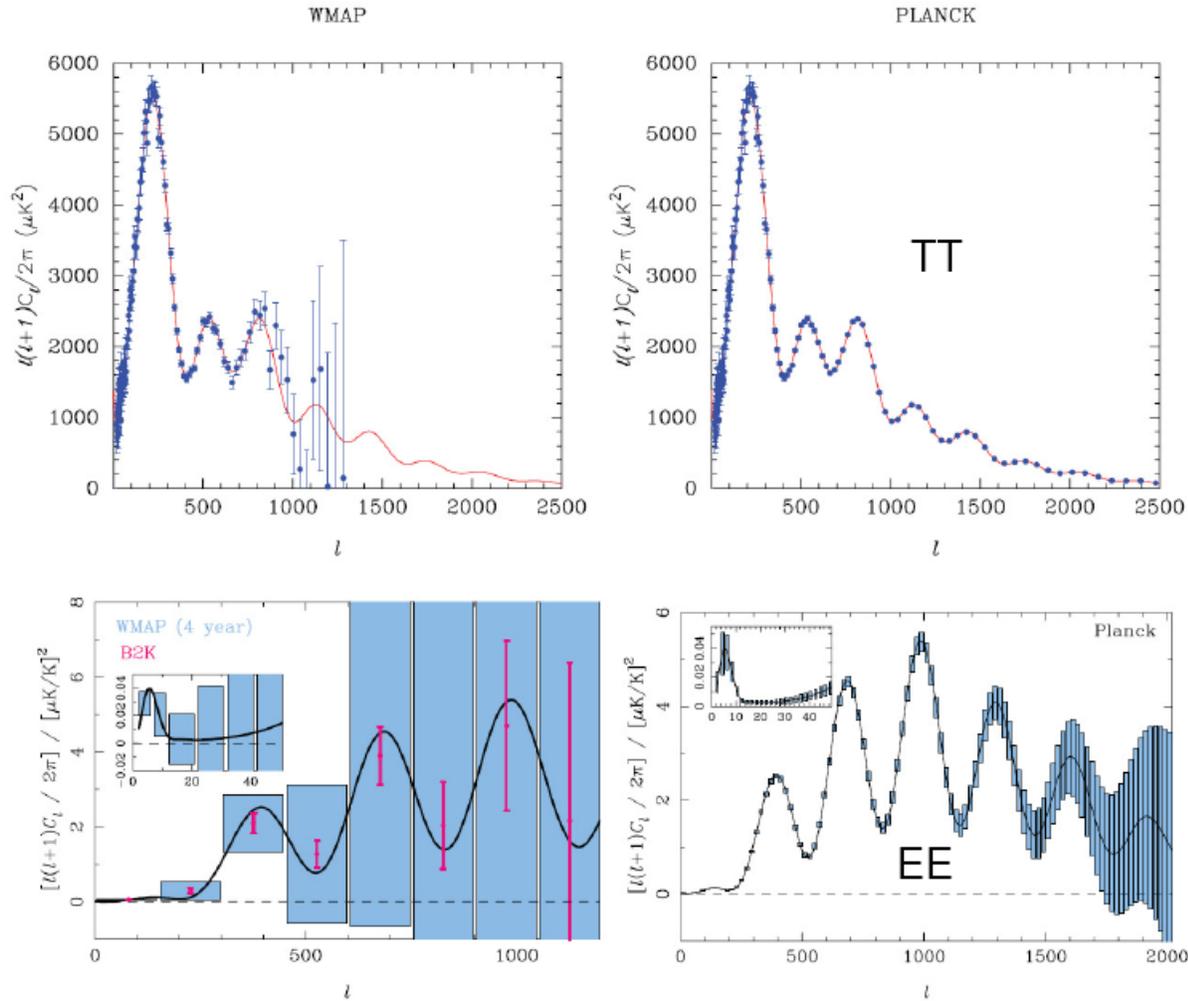


FIG. 1.25 – Gauche : Spectres de puissances TT et EE du CMB tels qu'ils ont été mesurés par WMAP. Les barres d'erreur associées à chaque point de mesure sont représentées en bleu. Droites : Spectres TT et EE tels qu'ils devraient être mesurés par Planck avec les barres d'erreur attendues en bleu (extrait de [105]).

Mizuguchi-Dragone.

L'instrument LFI [65] observe dans trois bandes de fréquence à 30, 44 et 70 GHz. Il est développé sous la responsabilité du PI ("Principal Investigator") Reno Mandolesi de l'IASF à Bologne. LFI est équipé de 22 détecteurs de type HEMT (High Electron Mobility Transistors) refroidis à 20 Kelvins par un système cryogénique embarqué : le "Sorption Cooler". Les trois bandes d'observation de LFI sont équipées de systèmes permettant la mesure de la polarisation du ciel à ces fréquences : les OMT (Ortho-Mode Transducers). Afin d'étalonner LFI en absolu, la température de l'étage à 4 K de HFI sera utilisée comme signal de référence.

L'instrument HFI (Figure 1.28, [47]) observe dans 6 bandes de fréquence entre 100 et 857 GHz. Il est développé sous la responsabilité du PI Jean-Loup Puget de l'Institut d'Astrophysique Spatiale (IAS) à Orsay. HFI est équipé de 52 détecteurs de type bolomètres refroidis à 0.1 Kelvin

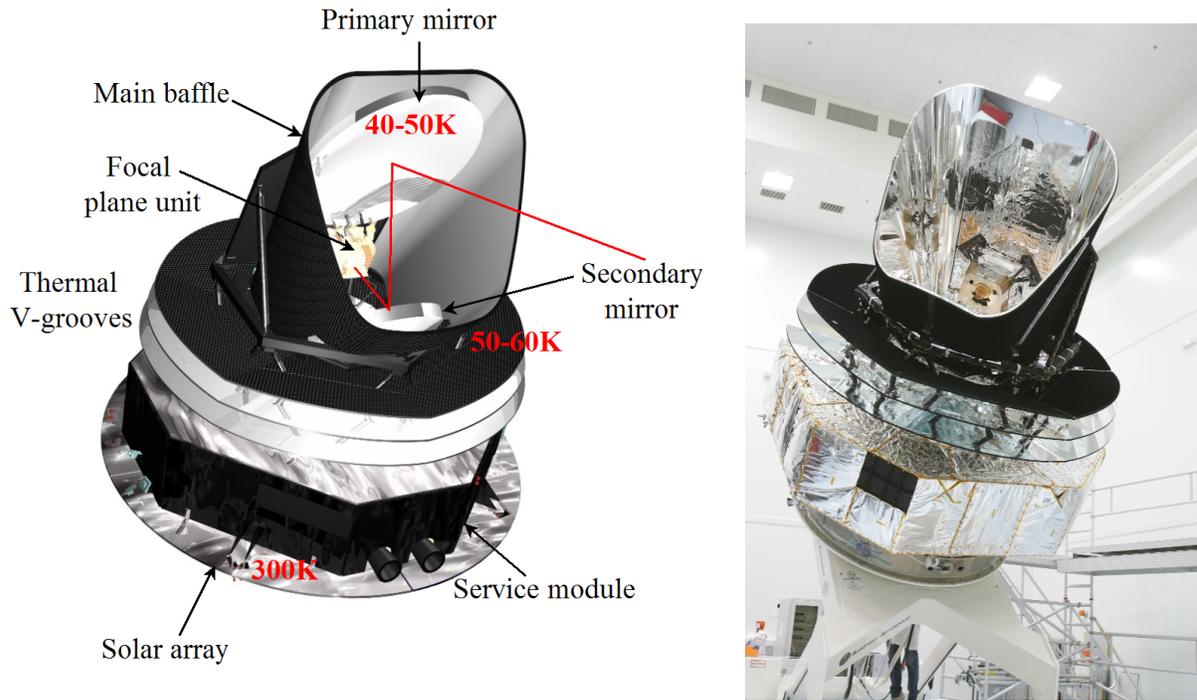


FIG. 1.26 – Vue CAO du satellite Planck et photographie de son prototype : le “Cryogenic Qualification Model” (CQM).

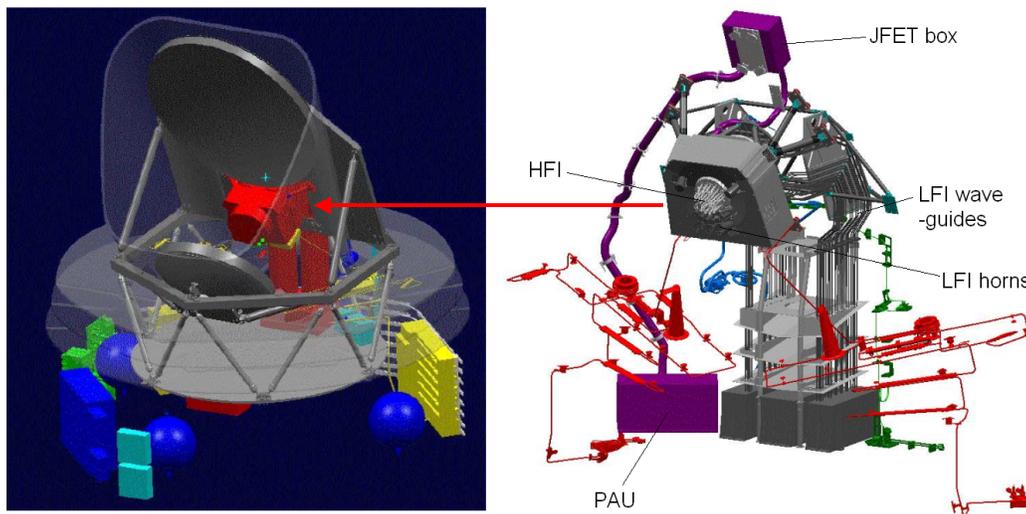


FIG. 1.27 – Localisation des instruments HFI et LFI au centre du satellite Planck.

par un système cryogénique embarqué, basé sur un refroidisseur à dilution de l’hélium 3 dans l’hélium 4.

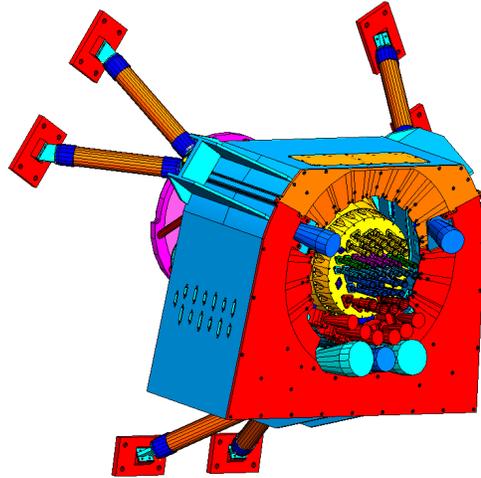


FIG. 1.28 – L' instrument HFI fixé au centre du support des cornets des radiomètres du Low Frequency Instrument.

1.4.3 La stratégie d'observation

Afin de pouvoir achever un relevé complet du ciel, le satellite Planck sera placé en orbite autour du point de Lagrange L2 du système Soleil-Terre et mis en rotation sur lui même à la vitesse d'un tour par minute (Figure 1.29).

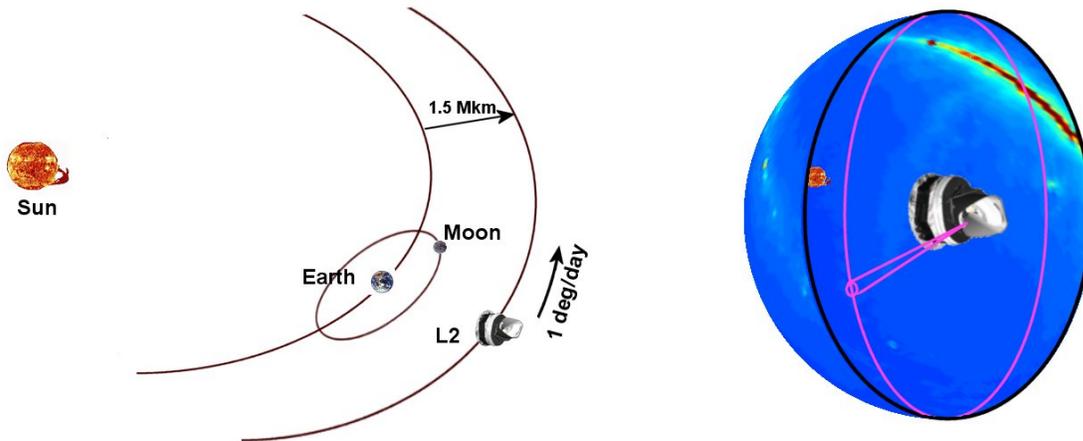


FIG. 1.29 – La stratégie de balayage du ciel par Planck.

La stratégie de pointage du télescope Planck a ensuite été choisie afin de pouvoir réaliser un relevé complet du ciel en 7 mois environ. La direction de pointage du télescope a également été choisie pour minimiser la lumière parasite d'origine solaire et terrestre. Pour cela, Planck pointera avec un angle constant de 85° par rapport à l'axe de rotation du satellite qui sera aligné avec la direction anti-solaire à plus ou moins 10° . De plus, toutes les heures, le télescope

sera dépointé de 2.5 minutes d'arc afin de couvrir tout le ciel en 7 mois. Dans cette stratégie de balayage chaque point du ciel est observé indépendamment au moins 50 fois par chaque détecteur du plan focal durant un survey. Planck balaye le ciel en réalisant des grands cercles qu'il répète donc 50 fois environ en autant de minutes. Ces 50 cercles mesurés sont ensuite moyennés pour obtenir des "Phased Binned Rings" (PBR) qui seront ensuite utilisés pour construire les cartes Planck. La direction de pointage suit également une oscillation sinusoïdale afin d'homogénéiser la redondance sur le ciel au maximum.

1.4.4 La stratégie d'étalonnage

L'étalonnage absolu des quatre canaux entre 100 et 353 GHz d'HFI se fait sur le signal du dipôle orbital [84]. L'avantage de l'utilisation de ce dipôle pour cet étalonnage est que l'on connaît parfaitement son amplitude, sa direction et son spectre.

Pour les canaux hautes-fréquences, l'étalonnage absolu s'effectue à partir des cartes de COBE-FIRAS [84]. Enfin, les réponses des bolomètres ainsi étalonnés sont ensuite vérifiées sur le signal des planètes. Le signal des planètes est également utilisé pour quantifier l'effet de non-symétrie des lobes du système optique.

1.4.5 Le Planck Data Processing Center

Le traitement des données des Instruments HFI et LFI de Planck est organisé dans le "Planck Data Processing Center" (DPC). Il existe deux DPC Planck : le DPC HFI et le DPC LFI. Le DPC HFI est organisé en quatre niveaux qui correspondent à quatre sous-groupes dont les tâches sont définies de la façon suivante :

Niveau 1 : Mise en forme des données brutes extraites de la télémétrie du satellite qui est collectée à Darmstadt (Allemagne) au centre de contrôle des missions de l'ESA. Le niveau 1 rassemble donc toutes les données utiles pour HFI puis les convertit au format DMC ("Data Management Component") en les organisant par groupes dans une base de données située à l'IAS.

Niveau 2 : Fabrication des cartes étalonnées du ciel à partir des données du niveau 1 pour les six bandes de fréquence d'HFI. Le niveau 2, désigné par le sigle DPC-L2 doit pour cela construire ces cartes à partir des vecteurs de données ("Time Ordered Data") issus des bolomètres d'HFI et des coordonnées de pointage du satellite. La correction des effets systématiques et l'étalonnage photométrique se font au niveau L2.

Niveau 3 : Séparation des composantes astrophysiques (CMB, émissions galactiques et extra-galactiques) à partir des cartes HFI générées au niveau 2. Le catalogue ERCSC ("Early Release Compact Source Catalogue") est également produit au niveau 3 par le DPC américain coordonné à IPAC ("Infrared Processing and Analysis Center").

Niveau 4 : Archivage et diffusion publique des données et des résultats de Planck.

Niveau S : Simulation des observations de Planck (simulation des composantes astrophy-

siques et des effets de réponse simplifiés des deux instruments).

Les niveaux 4 et S sont communs aux deux DPC des deux instruments HFI et LFI.

1.4.6 Le calendrier du projet Planck

L'historique et le planning du projet Planck est résumé dans le tableau 1.5.

Mai 1993	Proposition française à l'ESA d'une mission spatiale dédiée à l'étude du CMB (projet SAMBA)
Février 1998	Proposition HFI envoyée à l'ESA après 5 ans d'étude
Février 1999	Annnonce officielle par l'ESA des laboratoires sélectionnés pour le consortium Planck-HFI
Novembre 2004	Campagne d'étalonnage du modèle cryogénique de qualification d'HFI (CQM) à l'Institut d'Astrophysique Spatiale à Orsay (IAS)
Août-Septembre 2005	CSL-CQM : Test système au sol du CQM à Liège (CSL)
Mars 2006	<ul style="list-style-type: none"> – PFM-CAR : Caractérisation du modèle de vol d'HFI (PFM) à l'IAS – CSL-PFM1 : Test système du module de service (SVM) et du Sorption Cooler de Planck au CSL
Juillet 2006	PFM-CAL : Campagne d'étalonnage du PFM
Décembre 2006	Intégration d'HFI et LFI sur le satellite Planck à Cannes par Alcatel Alenia Space
Février 2008	CSL-PFM2 : Test système du modèle de vol de Planck au CSL
Août 2008	Lancement d'Herschel/Planck par une Ariane 5 ESC-A
Novembre 2008	CPV phase : Calibration et vérification des performances en vol de Planck

TAB. 1.5 – *Historique et calendrier du projet Planck.*

La proposition du consortium HFI a été retenue en Février 1999 par l'ESA pour le projet Planck d'étude du CMB à "l'horizon 2000". De 1999 à 2004 le consortium HFI a travaillé à la mise au point d'un premier prototype le "Cryogenic Qualification Model" (CQM) qui a été étalonné en novembre 2004 dans un environnement spatial simulé (vide et basses températures) dans le cryostat Saturne de l'IAS. Ce prototype a également été intégré sur une maquette du satellite Planck qui a été testé au niveau système, également en environnement spatial simulé au Centre Spatiale de Liège en Août 2005. Durant l'année 2006 le modèle de vol de l'instrument a été étalonné à 0.1 K pendant plusieurs semaines à l'IAS avant d'être livré à Alcatel Alenia Space l'industriel responsable de l'intégration du satellite Planck. L'année 2008 sera marquée par le test système de Planck au CSL en Février, avant son lancement prévu en Août 2008.

1.5 Les futures expériences d'étude du CMB

1.5.1 Pourquoi mesurer la polarisation du CMB ?

En plus de mesurer les fluctuations du CMB, Planck sera équipé de détecteurs sensibles à la polarisation du rayonnement micro-onde. Les mesures de polarisation réalisées par Planck devraient apporter des contraintes importantes sur la nature de la polarisation du CMB. Les modèles cosmologiques prédisent l'existence de « modes B » de la polarisation du CMB. Selon ces modèles, ces modes B seraient la signature d'ondes gravitationnelles primordiales émises pendant la phase d'inflation post-BigBang et décrites dans le modèle standard de la cosmologie. La détection de ces modes B permettrait de contraindre les modèles cosmologiques d'inflation ainsi que la théorie de Grande Unification de la physique des particules. C'est pourquoi, la mesure de la polarisation du ciel micro-onde est devenue aujourd'hui primordiale pour l'avenir de la cosmologie. En fonction du niveau de polarisation du CMB par les modes B, Planck détectera peut être ces modes B du CMB si la sensibilité finale de ses observations le permet.

1.5.2 Comment mesurer la polarisation du CMB ?

Pour pouvoir mesurer les modes B de la polarisation du CMB, il existe trois difficultés majeures :

- La première est la sensibilité nécessaire qui doit être dix à cent fois plus importante que pour Planck.
- La seconde est la nécessité d'un contrôle efficace des effets systématiques spécifiques et non-spécifiques à la polarisation.
- La troisième est la contamination de la lumière polarisée du CMB par la lumière polarisée émise par les avants-plans du fond cosmique (émission polarisée de la poussière du milieu interstellaire et du synchrotron principalement).

Le rapport signal sur bruit des mesures de Planck-HFI est limité par le bruit de photon du CMB lui-même. Dans ce cas, le rapport signal sur bruit de la mesure augmente comme la racine du temps d'observation. Augmenter la sensibilité revient alors à augmenter le temps d'intégration ce qui ne peut être fait qu'en augmentant le temps d'observation ou le nombre de détecteurs dans le plan focal par rapport à Planck. Ainsi, afin de pouvoir augmenter la sensibilité il devient nécessaire d'augmenter massivement le nombre de détecteurs et donc de recourir à une nouvelle génération de détecteurs : les matrices de bolomètres. Pour résoudre le problème des effets systématiques spécifiques à la mesure de la polarisation, des études et des efforts de simulations de ces effets sont actuellement en cours et doivent être poursuivis. Enfin, pour l'étude de la contamination des mesures du CMB par les avants-plans polarisés, des instruments d'observation dédiés à l'étude de la polarisation du milieu interstellaire et des poussières en particulier doivent être développés.

C'est dans ce contexte qu'a été étudié à partir de 2004 le projet PILOT de télescope micro-onde embarqué sous ballon stratosphérique. Les résultats de ce projet ballon contribueront de façon très importante à la définition de solutions futures au problème de contamination de la polarisation du CMB par l'émission polarisée des poussières. PILOT observera dans deux bandes de longueur d'onde à $240\mu m$ et $550\mu m$. Cet instrument utilisera deux matrices de bolomètres (une matrice par bande d'observation) développées pour l'instrument PACS du

télescope spatiale Herschel. Ces matrices sont constituées de 1024 pixels chacune contre 8 pixels par bande dans le plan focal de Planck. PILOT constituera donc un premier banc d'essai majeur pour la mesure de la polarisation avec des matrices de bolomètres. Il permettra notamment de développer les méthodes de traitement de données optimales associées à de telles mesures.

1.5.3 Les expériences programmées actuellement pour étudier la polarisation du CMB

Deux projets spatiaux sont en cours d'étude pour la mesure de la Polarisation du ciel micro-onde : EPIC aux Etats Unis, B-pol en Europe. Le CNES a également financé une étude française de phase 0 pour un mini-satellite dédié à la détection des modes B dans la polarisation du CMB. Il s'agit du projet SAMPAN. Les conclusions principales de l'étude sont que la stratégie d'observation nécessaire pour une telle mesure à bas l (grandes échelles angulaires) est une orbite autour du point de Lagrange L2 comme pour Planck et WMAP. Une telle mission coûterait plus cher qu'une simple mission de type mini-satellite. Le CNES encourage donc l'ESA à engager le financement d'une mission plus ambitieuse que SAMPAN : B-pol.

Par ailleurs, des projets sol et ballon sont déjà en cours de réalisation. La fréquence et la résolution de l'essentiel de ces expériences prévues actuellement sont présentés sur la Figure 1.30.

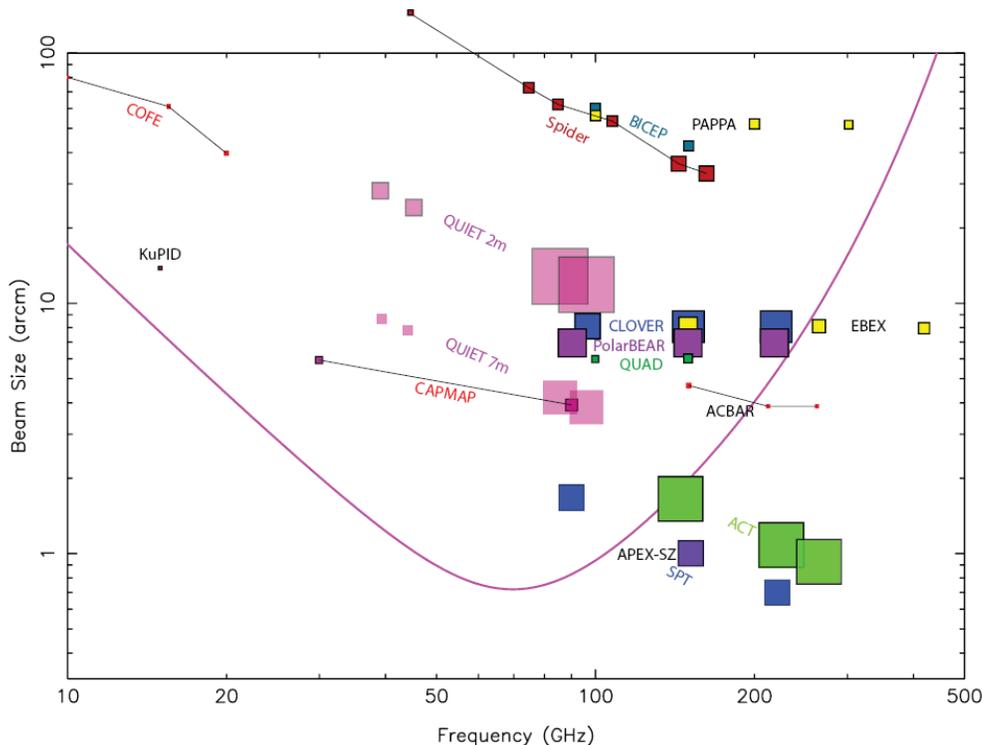


FIG. 1.30 – Répartition en fréquence et taille de faisceau des futures expériences dédiées à l'étude de la polarisation du CMB (extrait de [50]). La surface des carrés est proportionnelle à la sensibilité associée à chaque expérience. La courbe en rose représente l'amplitude relative des émissions galactiques d'avant-plan à chaque fréquence d'observation.

Chapitre 2

L'instrument Planck-HFI

« C'est à peu près comme si notre instrument devait mesurer, de la Terre, la chaleur dégagée par un lapin qui vivrait sur la Lune, tout en étant capable d'éliminer la chaleur d'un homme qui se trouverait à côté du détecteur. »

Jean-Michel Lamarre

Le "High Frequency Instrument" de Planck est équipé d'un plan focal ou FPU (Focal Plane Unit) composé de 36 canaux photométriques répartis dans six bandes de fréquences à 100, 143, 217, 353, 545 et 857GHz. Le champ de vue instantané d'HFI est de 1 degré sur le ciel. Chaque canal du plan focal d'HFI est équipé de 1 ou 2 détecteurs de type bolomètre refroidis à 0.1 Kelvin. HFI est ainsi équipé de 52 bolomètres au total.

L'instrument est construit autour d'un cryostat refroidi à 4 degrés Kelvin (Figure 2.1) qui contient l'étage cryogénique à 0.1 K refroidissant les bolomètres placés en son centre. Les 36 cornets correspondant aux 36 canaux photométriques d'HFI sont fixés sur ce cryostat. Les bolomètres du plan focal de détection à 0.1 K sont alignés dans l'axe de ces cornets. Ce FPU est également contenu à l'intérieur d'un étage cryogénique intermédiaire refroidi à 1.6K.

2.1 Le système cryogénique

Un réfrigérateur cryogénique actif à dilution d'³He dans l'⁴He développé par le CRTBT ("Centre de Recherche sur les Très Basses Températures") est utilisé pour refroidir à 0.1K les bolomètres d'HFI. Ce système à dilution doit être pré-refroidi à 4K pour fonctionner. Cette température de 4K est obtenue avec un réfrigérateur actif basé sur le principe de la détente Joule-Thomson (JT) d'Hélium. Ce réfrigérateur à 4K doit quant à lui être pré-refroidi à 18K. Un réfrigérateur à adsorption/désorption d'Hydrogène est utilisé à cette fin. Ce réfrigérateur 18K appelé "Sorptions Cooler" (SC) est pré-refroidi passivement à 50K par l'environnement spatial. L'utilisation conjointe de ces trois réfrigérateurs actifs permet un lancement à chaud des détecteurs. Ce lancement à chaud permet d'économiser l'utilisation d'un cryostat avec une

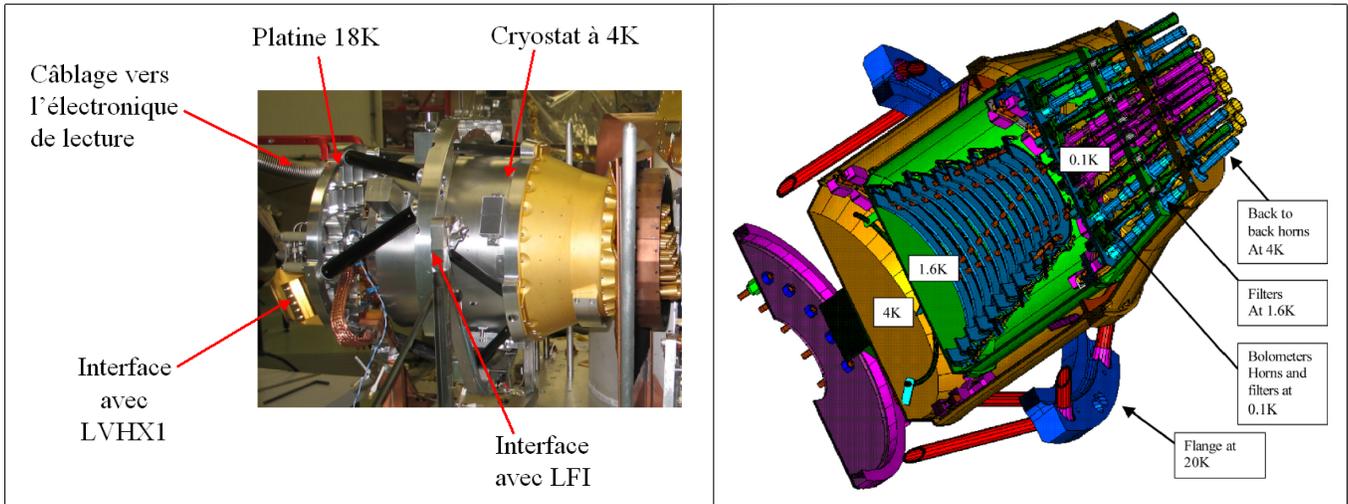


FIG. 2.1 – Gauche : Photographie légendée du modèle de vol d'HFI. Droite : Vue en coupe de l'instrument HFI.

fenêtre d'entrée dont l'émission thermique à la température de l'Azote liquide (77K) risquerait de réduire la sensibilité des détecteurs en accroissant fortement la charge thermique des bolomètres. Par ailleurs, la fenêtre nécessaire devant les cornets d'HFI et LFI aurait une surface trop grande pour un cryostat. Enfin, les fluctuations de température des bords de cette éventuelle fenêtre d'entrée risqueraient de générer de la lumière interne parasite comme ce fut le cas sur Archeops. Pour toutes ces raisons, un lancement à chaud a été choisi pour Planck.

2.1.1 Architecture thermique d'HFI

Le télescope et les instruments focaux de Planck sont refroidis passivement par l'environnement spatiale. Une température de 50K environ est ainsi atteinte. Un système de trois écrans successifs (V-grooves de la Figure 1.26) permet d'isoler thermiquement cette charge utile froide des éléments plus chauds (300K environ) du SVM. Les trois réfrigérateurs actifs de Planck sont ensuite connectés au FPU (Figure 2.2).

Le SC développé par le JPL ("Jet Propulsion Laboratory") permet de refroidir à 20 K environ l'instrument LFI (Figure 2.2) en générant une détente Joule-Thomson d'hydrogène en cycle fermé. La puissance de refroidissement de LFI via la tête froide LVHX2 (Figure 2.2) du SC fixe alors directement la température de l'interface HFI/LFI (Figure 2.1) qui se situe sur les côtés du cryostat à 4K d'HFI. Le SC pré-refroidit également à 18K l'Hélium utilisé par le réfrigérateur à 4K. Pour cela, une platine 18K est fixée à l'arrière d'HFI (Figure 2.1). Cette platine est ensuite connectée à la tête froide du SC et aux tuyaux d'Hélium qui alimentent le réfrigérateur à 4K et la dilution. Le câblage entre les bolomètres d'HFI et la chaîne électronique de lecture (Figure 2.1) est fixé sur cette platine afin de limiter l'échauffement de l'étage à 4K par l'électronique de lecture beaucoup plus chaude.

L'étage à 4K est refroidi par le réfrigérateur à 4K du RAL ("Rutherford Appleton Laboratory") qui utilise une détente Joule-Thomson d'Hélium en cycle fermé également.

L'étage intermédiaire à 1.6K est ensuite obtenu par une détente JT du mélange d'Héliums

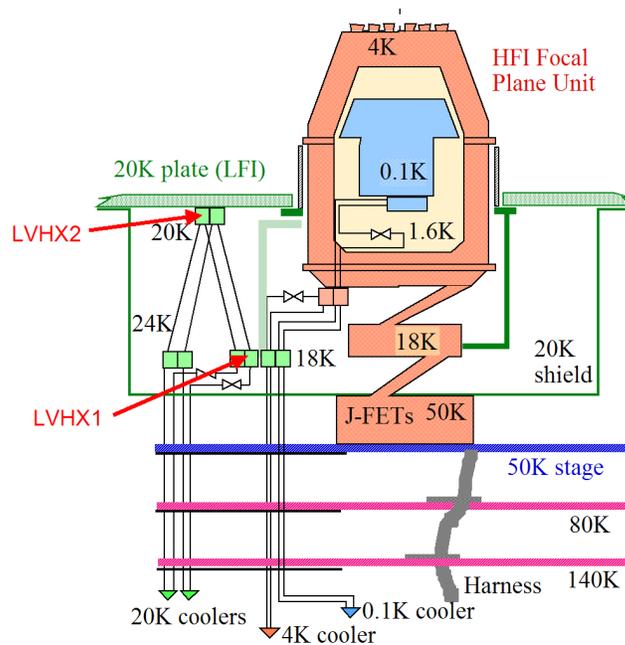


FIG. 2.2 – Vue en coupe du système cryogénique d'HFI.

de la dilution 0.1K qui se réchauffe à 1.6K dans l'échangeur de chaleur placé entre l'étage 0.1K et l'étage 1.6K.

2.1.2 Le Sorption Cooler à 18K

Principe de fonctionnement

La compression de l'Hydrogène pour la détente JT dans le SC est réalisée grâce à un compresseur à adsorption[13].

Le principe de fonctionnement de ce compresseur à adsorption repose sur les propriétés uniques du matériau utilisé pour adsorbé l'Hydrogène : l'hydrure $\text{LaNi}_{4.78}\text{Sn}_{0.22}$. Cet hydrure peut adsorber une grande quantité d'Hydrogène à basse pression et température. Il permet également de produire de l'Hydrogène chaud à haute pression par désorption en chauffant à volume constant l'hydrure. Le compresseur du SC est constitué de six chambres à adsorption en hydrure (Figure 2.3).

Des résistances électriques chauffantes sont utilisées pour chauffer ces chambres en hydrure. Elle sont chauffées jusqu'à 473K environ puis refroidis passivement à $270\text{K} \pm 10\text{K}$ en les connectant au radiateur situé sur le panneau SC du SVM (Figure 2.4).

Le rôle de ce compresseur à adsorption est d'injecter du gaz chaud à pression constante dans le circuit JT. Cet Hydrogène est ensuite pré-refroidi par les trois V-grooves du satellite grâce à des échangeurs de chaleur fixés sur le circuit JT. L'hydrogène subit enfin une détente Joule-Thomson dans une valve (Figure 2.5) située en amont des deux tubes échangeurs de chaleur LVHX1 et LVHX2. De l'Hydrogène liquide basse pression respectivement à 18K et 20K circule dans ces deux échangeurs avant de retourner vers une chambre froide du compresseur

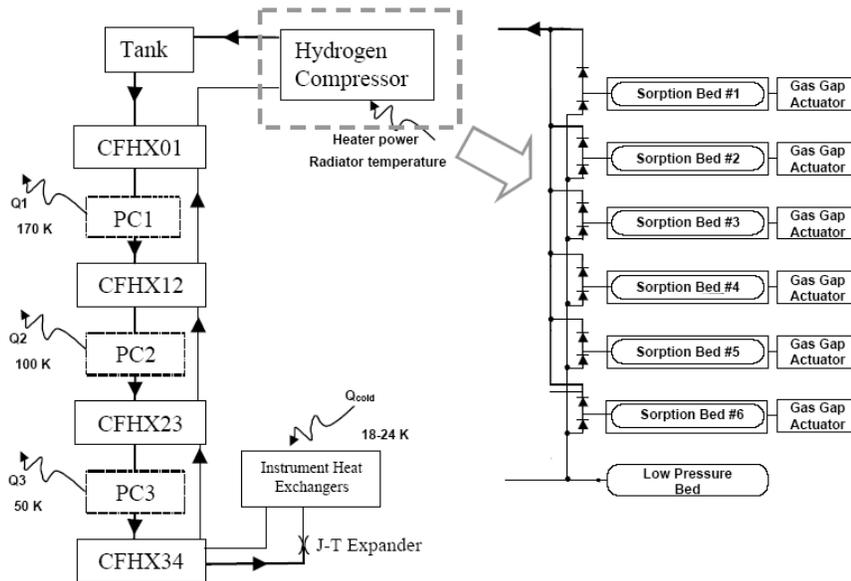


FIG. 2.3 – Représentation schématique du Sorption Cooler.

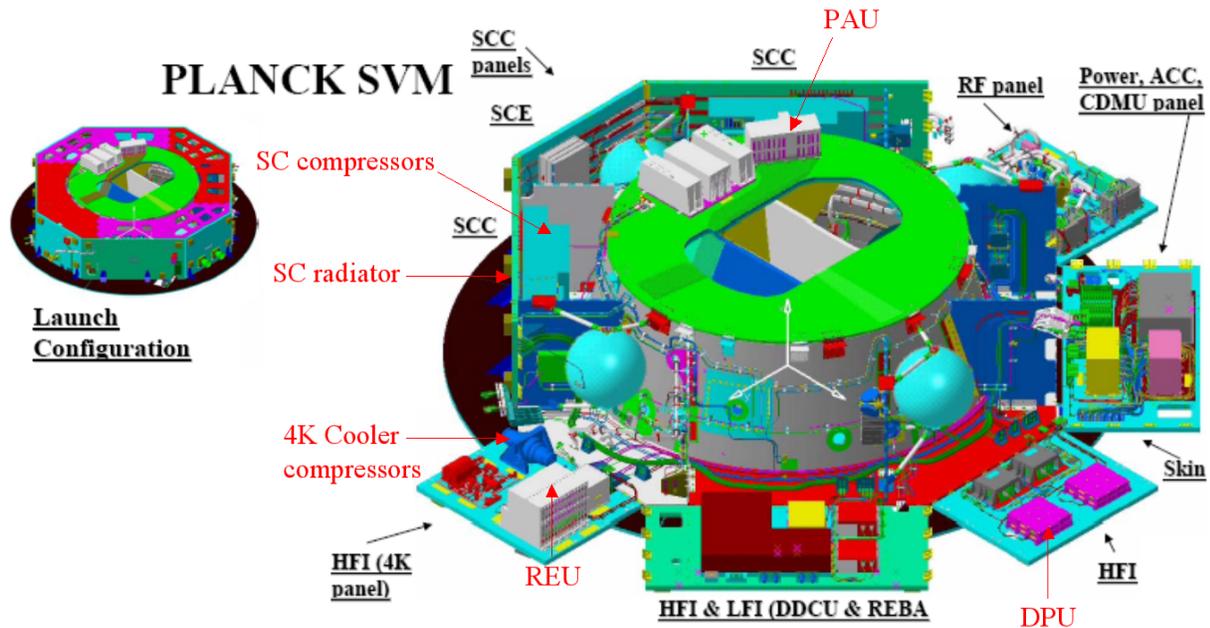


FIG. 2.4 – Le module de service de Planck (SVM).

pour subir une nouvelle adsorption.

Dans ce système, chaque chambre à adsorption du compresseur suit donc le cycle suivant : (i) injection d'Hydrogène gazeux basse pression qui se colle par adsorption sur les parois froides de la chambre en hydrure ; (ii) chauffage des parois de la chambre par une résistance électrique chauffante (chaufferette) jusqu'à 473 K pour désorber le gaz et l'envoyer à haute pression

(4.8 MPa) dans le circuit JT du SC ; (iii) une fois le gaz haute pression envoyé dans le circuit JT, la chambre en hydrure est refroidie à 270K par contact avec le radiateur froid du SVM grâce à un actuateur à gaz. Cette actuateur est constitué d'une réserve de gaz qui, lorsqu'elle est chauffée par une résistance chauffante (chaufferette²), se dilate et met en contact la chambre et le radiateur du SVM. La durée du cycle de chaque chambre est ajustable. Par défaut sa valeur est de 667 secondes. Six compresseurs fonctionnent en parallèle sur le SC. A chaque instant une chambre chaude désorbe de l'Hydrogène à 4.8 Mpa vers le circuit JT, trois autres chambres adsorbent du gaz basse pression pendant qu'une chambre est en cours de chauffage et la dernière en cours de refroidissement avec le radiateur froid du SVM.

La température de chauffage de la chaufferette² fixe la température des tête froides LVHX1 et LVHX2 car la température de la chaufferette² fixe la basse pression dans le circuit JT du SC.

Planck est équipé de deux Sorption Coolers (Figure 2.5) : un nominal et un redondant. Durant les opérations en vol un des deux SC sera allumé pendant que le second sera gardé en réserve pour pallier une défaillance ou pour une éventuelle extension de mission.

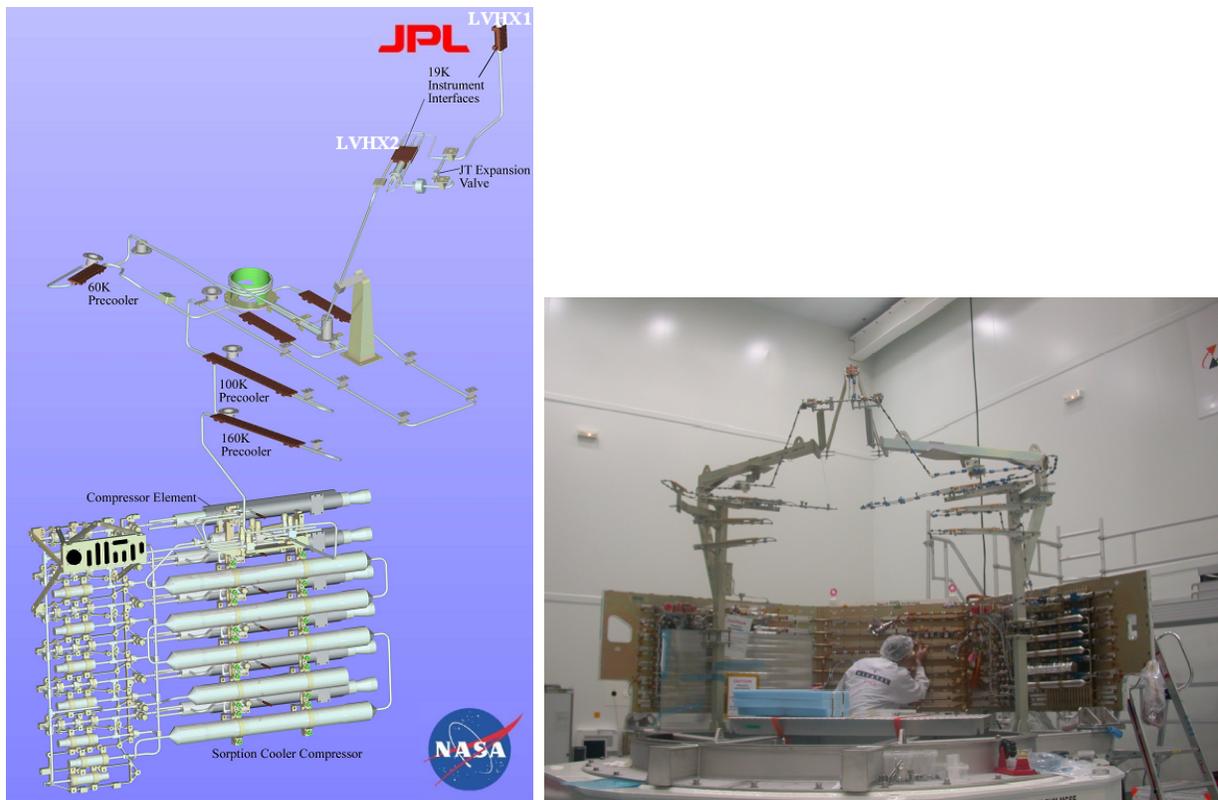


FIG. 2.5 – Gauche : Dessin du Sorption Cooler. Droite : Photographie des deux Sorption Cooler de Planck durant leur intégration sur les panneaux du SVM.

Sur chaque refroidisseur se trouve les deux têtes froides : LVHX1 sur laquelle HFI est connecté et LVHX2 qui est connectée à LFI (Figure 2.5). Entre LVXH2 et LFI un système TSA (Température Stabilization Assembly) basé sur un algorithme de correction PID permet

de réguler les fluctuations de la tête froide LVHX2. Ce système TSA n'a aucune influence sur les fluctuations au niveau de LVHX1.

Température de la tête froide

La température de LVHX1 dépend directement de la température du radiateur froid du SVM (désigné par le sigle WR). Il est donné par la relation suivante [92] :

$$T_{LVHX1}(Kelvin) = 17.2 + 0.1(T_{WR} - 270.5) \quad (2.1)$$

La température du radiateur froid dépend du choix de la durée du cycle dans les chambres du compresseur du SC. On trouve $T_{WR}=270K$ et $290K$ respectivement pour les périodes à 667 et 940 secondes.

Puissance de refroidissement

La spécification de puissance de refroidissement pour la tête froide LVHX1 du Sorption Cooler est comprise entre 50 et 115 mW [92]. Une spécification comprise entre 30 et 75 mW est nécessaire pour le pré-refroidissement du réfrigérateur à 4K. Les 20 à 40 mW supplémentaires sont nécessaires à la thermalisation des tuyaux et du harnais associés au réfrigérateur à dilution. Au total, la puissance de refroidissement totale mesurée sur le modèle de vol du SC est de 1.1 W (pour LVHX1 et LVHX2).

Puissance électrique

La puissance électrique consommée par le SC pour chauffer les chambres du compresseur dépend de la durée du cycle dans celles-ci. On trouve 387 et 297 W respectivement pour les cycles à 667 et 940 secondes.

Durée de vie

La durée de vie du SC est fixée par l'usure des chambres en hydrure. A chaque chauffage, c'est à dire à chaque cycle du SC, les hydrures s'abîment. Au bout d'un grand nombre de cycles des fuites d'Hydrogène apparaissent inexorablement dans les chambres. On essaiera donc de minimiser la puissance électrique injectée dans les chambres à chaque cycle afin de réduire leur usure. La puissance électrique nécessaire au cycle long de 940 secondes étant la plus petite on peut conclure que cette configuration permet de maximiser le temps de vie du SC. Finalement, la durée de vie du SC devrait être supérieure à celle de la dilution 0.1K afin que cette dernière fixe la durée de vie de Planck-HFI.

2.1.3 Le réfrigérateur à 4K

Principe de fonctionnement

Le réfrigérateur cryogénique à 4K [16] utilise un compresseur mécanique pour réaliser une détente Joule-Thomson d'Hélium qui refroidit à 4K le cryostat d'HFI. L'Hélium en entrée du réfrigérateur 4K est pré-refroidi à 18K par l'échangeur de chaleur LVHX1 du SC. L'Hélium

circule ensuite dans un échangeur de chaleur jusqu'à l'orifice de détente JT situé à l'arrière de la boîte 4K d'HFI (Figure 2.6).

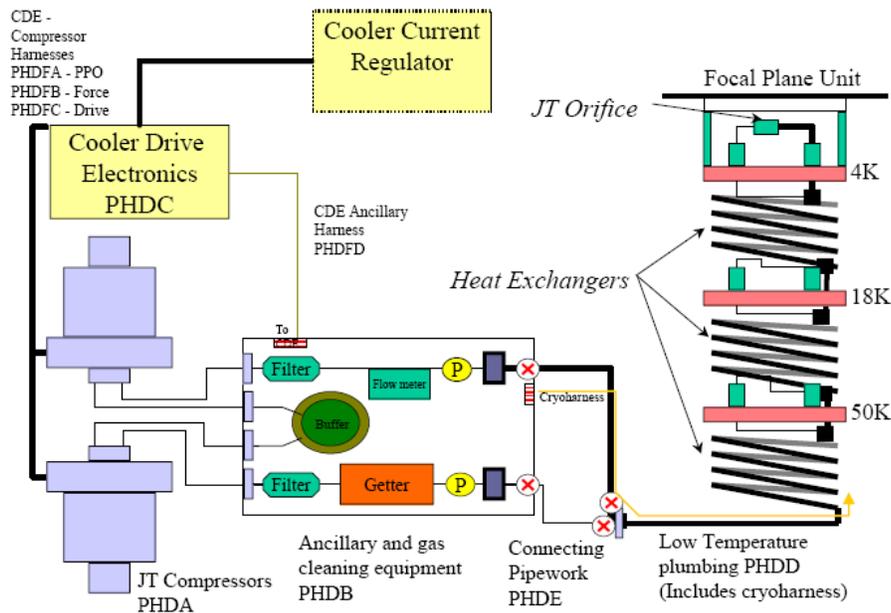


FIG. 2.6 – Représentation schématique du réfrigérateur à 4K d'HFI.

Une fois que l'Hélium a été refroidi à 4.7K environ par la JT, il repart dans un tuyau échangeur de chaleur vers les compresseurs mécaniques situés sur le panneau 4K du SVM.

Puissance de refroidissement

Dans le pire cas, le réfrigérateur 4K a été conçu pour pouvoir fournir un minimum de 12 mW de puissance de refroidissement.

Puissance électrique

La puissance électrique nécessaire au fonctionnement du réfrigérateur 4K est de 100 W.

Durée de vie

La durée de vie du réfrigérateur à 4K est fixée par la durée de vie du système d'alimentation électrique des compresseurs si l'on considère que les fuites d'Hélium sont négligeables dans le système. On peut donc penser que le système 4K devrait fonctionner jusqu'à la défaillance du système électrique qui est supérieure à 500000 heures soit plus de 5 ans.

2.1.4 Le refroidisseur 0.1K à dilution

Principe de fonctionnement

Dans une dilution classique dite "en cycle fermé", on utilise un mélange d' ^3He et d' ^4He liquides qui, en dessous de 0.87K forme deux phases : une phase diluée riche en ^4He et une phase concentrée riche en ^3He . Dans une dilution classique on pompe l' ^3He vers la phase diluée afin de diluer l' ^3He dans l' ^4He . Ce mélange se refroidit alors instantanément. La tête froide d'une dilution classique se situe donc au niveau de la boîte de mélange où a lieu cette dilution (Figure 2.7).

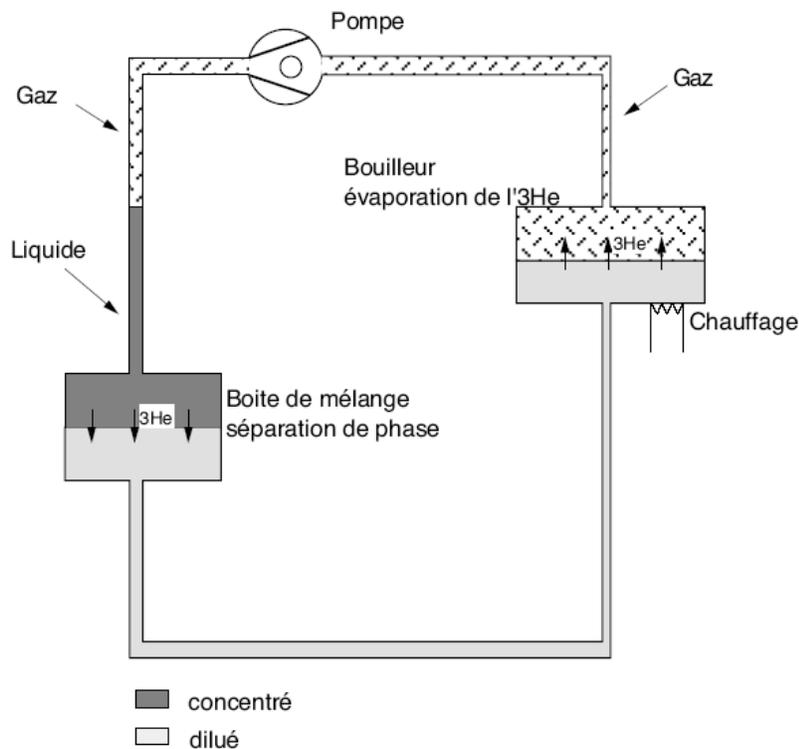


FIG. 2.7 – Représentation schématique d'un réfrigérateur à dilution classique (extrait de [62]).

Le taux maximum d' ^3He dans la phase diluée est de 6%. Pour éviter de saturer en ^3He la phase diluée on utilise un bouilleur qui vaporise le ^3He qui est ensuite extrait par le système de pompage de la dilution.

L' ^3He et l' ^4He sont séparés dans le bouilleur grâce à la pesanteur. En apensateur un tel système à dilution ne peut plus fonctionner. C'est pourquoi le réfrigérateur à dilution de Planck-HFI effectue une dilution en cycle ouvert. Dans ce système développé par Alain Benoît et Serge Pujol [8], il n'y a plus de système de recyclage de l' ^3He . Le bouilleur est remplacé par le dégazage dans le vide de la phase diluée (Figure 2.8).

Afin de mélanger l' ^3He et l' ^4He , trois capillaires sont utilisés : deux capillaires pour l'injection des deux isotopes d'Hélium et un capillaire de mélange (Figure 2.9).

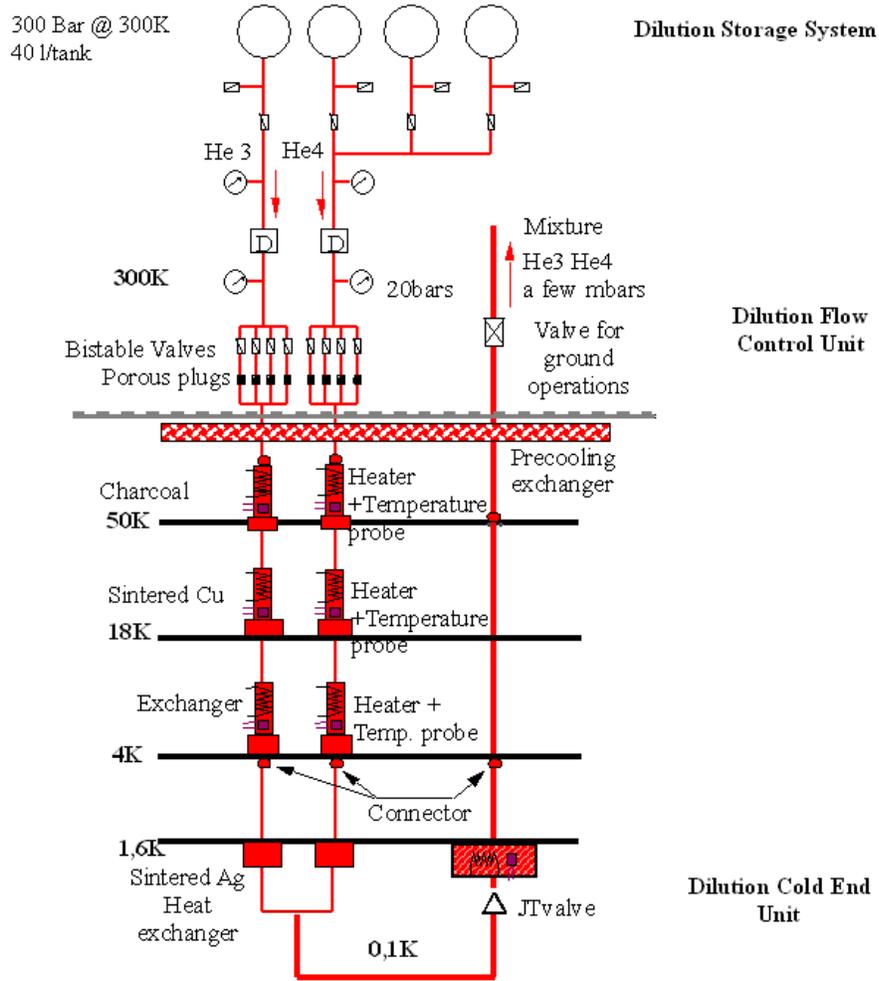


FIG. 2.8 – Représentation schématique du réfrigérateur 0.1K à dilution d'HFI (extrait de [43]).

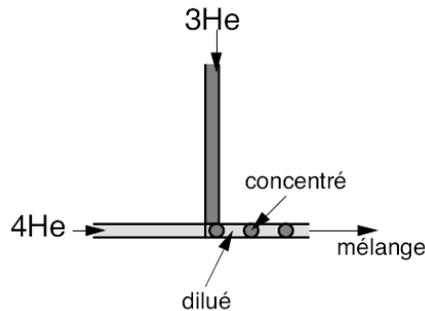


FIG. 2.9 – Capillaires de mélange (extrait de [62]).

Le mélange se sépare ensuite en deux phases : diluée et concentrée. Des bulles de mélange concentré apparaissent et circulent dans la phase diluée. La dilution de l' ^3He dans l' ^4He se

produit à l'interface de la bulle et du mélange dilué. L'utilisation d'un capillaire de mélange très fin ($300\mu\text{m}$ de diamètre environ) permet de maintenir ces bulles par tension superficielle à l'intérieur du mélange. La dilution s'effectue tout le long du capillaire et refroidit au passage la platine dilution qui se thermalise enfin avec la platine supportant les bolomètres à laquelle elle est connectée.

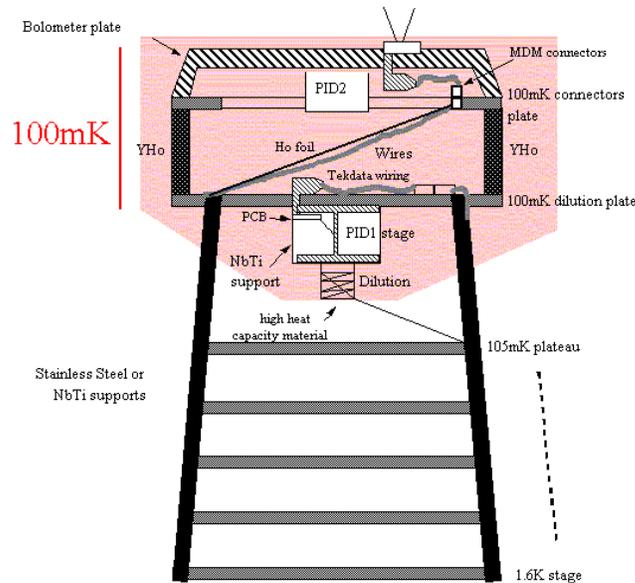


FIG. 2.10 – Localisation des plots d'Holmium Yttrium (HoY) et des résistances chauffantes PID1 et PID2 sur les deux étages 0.1K d'HFI : platines dilution et bolomètres (extrait de [85]).

Le mélange circule ensuite dans un tube échangeur de chaleur enroulé en spirale sur le support de l'étage 0.1K. Une valve située au bout de cette échangeur permet de réaliser une détente JT du mélange d'Hélium. Cette dernière JT génère l'étage intermédiaire à 1.6K situé entre le FPU à 0.1K et le cryostat à 4K.

Puissance de refroidissement

La puissance de refroidissement dépend du débit d'hélium dans les deux circuits d' ^3He et d' ^4He . La spécification de puissance de refroidissement est de 100 nW à 0.1 K pour la tête froide de la dilution.

Puissance électrique

La puissance électrique nécessaire à l'alimentation de la DCCU ("Dilution Cooler Control Unit") qui contrôle la dilution est de 11 W.

Durée de vie

La durée de vie du refroidisseur à dilution est fixée par les pertes d'Hélium du système en boucle ouverte. La quantité d'Hélium évacuée dans l'espace par le système durant toute la mission doit alors être inférieure aux réserves d'Hélium du satellite. La durée de vie est alors directement fixée par le choix des débits d' ^3He et d' ^4He dans les tuyaux de la dilution. Les réserves d'Hélium de Planck sont fixées pour permettre d'accomplir au moins deux relevés complets du ciel ce qui correspond à une durée de vie minimale de 14 mois environ.

L'ensemble de la chaîne cryogénique d'HFI met environ 34 jours (dont 14 jours de décontamination) en vol pour atteindre la température cryogénique de 0.1K sur les bolomètres. Durant les tests au sol d'HFI, une boucle de pré-refroidissement à 10 K à base d'Hélium liquide est utilisée pour refroidir les étages 4K, 1.6K et 0.1K durant la descente en froid. Cette boucle de pré-refroidissement permet de ramener à 24 jours la durée nécessaire pour atteindre 0.1K sur les bolomètres d'HFI au sol malgré l'absence de refroidissement passif.

2.2 Le système optique

Les canaux photométriques d'HFI sont constitués de différents éléments optiques refroidis (Figure 2.11). Chaque canal est tout d'abord constitué d'un système de cornets dos à dos (back

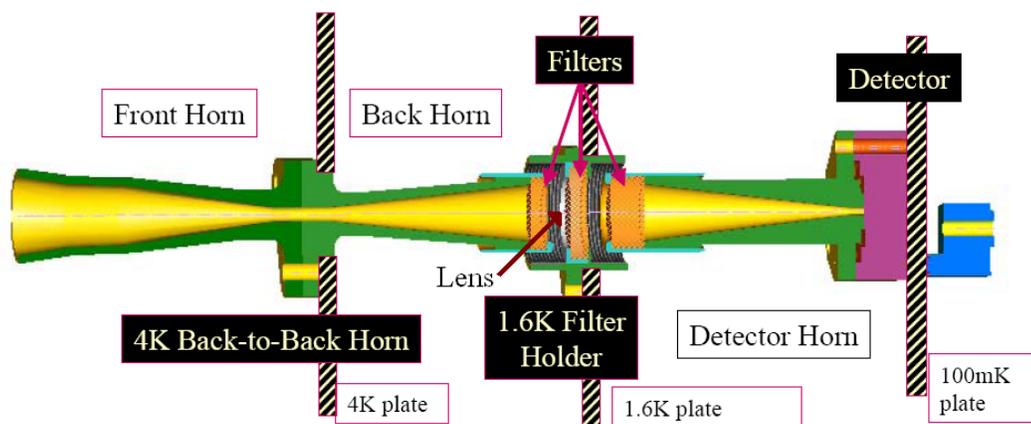


FIG. 2.11 – Vue en coupe de l'optique froide associée à chaque canal photométrique d'HFI. De gauche à droite : cornets dos à dos à 4K, filtre à 4K, filtres et lentille à 1.6K, filtre à 0.1K, cornet à 0.1K et bolomètre.

to back horns) qui couple le télescope avec les bolomètres d'HFI. Ces cornets dos à dos sont des guides d'onde dont le diamètre fixe le champ de vue du détecteur ainsi que la longueur d'onde maximale acceptée par le système optique associé au canal. Il joue donc le rôle de passe-haut fréquentiel (passe-bas en longueur d'onde). L'utilisation de filtres passe-bas à 4K, 1.6K et 0.1K permet de fixer ensuite la fréquence de coupure basse fréquence de la bande d'observation du détecteur associé au canal (Figure 2.12).

Le système optique d'HFI fonctionne à la limite de diffraction. La résolution de chaque canal de l'instrument se calcule à partir du diamètre D du télescope éclairée (fixé ici par l'angle

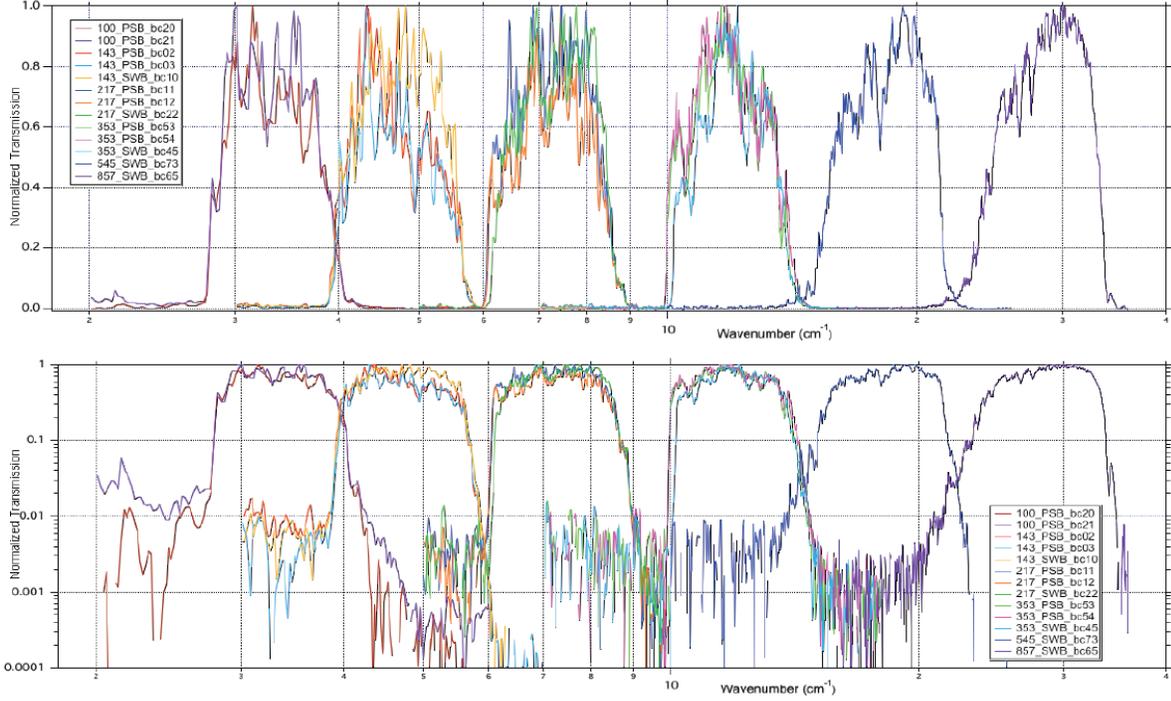


FIG. 2.12 – Transmissions spectrales mesurées sur plusieurs bolomètres (SWB et PSB) de chaque bande du modèle de vol d’HFI (extrait de [76]).

d’ouverture des cornets) avec la formule classique :

$$\theta = 1.22 \frac{\lambda}{D} \quad (2.2)$$

Les résolutions obtenues pour chaque bande HFI est résumée dans le tableau 2.1.

Fréquence (GHz)	100	143	217	353	545	857
λ (mm)	3.00	2.10	1.38	0.85	0.55	0.35
Résolution (arcminute)	10.0	7.1	5.0	5.0	5.0	5.0
Diamètre M1 éclairée (mètre)	1.44	1.42	1.33	0.82	0.53	0.34

TAB. 2.1 – Résolution et diamètre de la surface éclairée du primaire pour chaque bande HFI.

La résolution finale des cartes HFI est ensuite fixée par la fréquence de lecture des bolomètres et la vitesse de balayage sur le ciel. La fréquence d’échantillonnage du signal de sortie des bolomètres par l’électronique d’HFI est de 172 Hz environ. Avec une vitesse de rotation d’un tour par minute sur le ciel, l’écart angulaire sur le ciel entre deux observations est de 2.1 arcminutes. En choisissant une résolution de 5 arcminutes pour les fréquences allant de 217 à 857 GHz on obtient $(2.39)^2$ points de mesure pour chaque pixel des cartes reconstruites, ce qui permet d’avoir un bon échantillonnage du lobe durant les observations. Pour les fréquences à 100 et 143 GHz la résolution maximale accessible avec un miroir de 1.5 m de diamètre est moins bonne que 5 arcminutes. On choisit donc les ouvertures des cornets dans ces deux bandes

d'observation pour obtenir des résolutions de 10 et 7.1 arcminutes respectivement pour les cartes (tableau 2.1).

2.3 Les bolomètres

2.3.1 Principe de mesure bolométrique

Un bolomètre est un détecteur thermique. L'élevation de température induite par le rayonnement incident sur un bolomètre génère un changement d'impédance du détecteur qui peut ensuite être déduit en mesurant la tension aux bornes du bolomètre. Un bolomètre est constitué de deux éléments de base (Figure 2.13) : un absorbeur chargé d'absorber l'énergie du rayonnement incident et une thermistance polarisée par un courant I qui permet de mesurer le changement d'impédance à ses bornes afin d'en déduire la puissance incidente sur le détecteur.

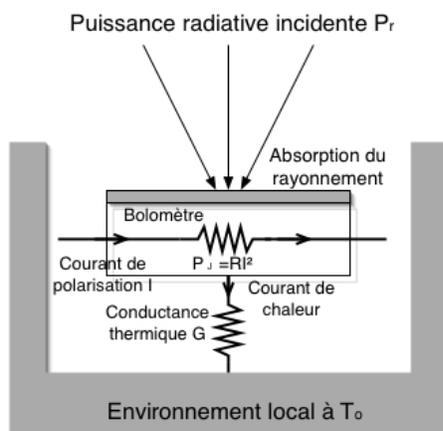


FIG. 2.13 – Représentation schématique d'un bolomètre (d'après J.-P. Torre).

Pour être suffisamment sensible aux rayonnements micro-onde, les bolomètres sont refroidis à très basse température par un bain cryogénique de température T_0 (0.1 K pour HFI).

Modèle de bolomètre statique

L'impédance aux bornes d'un bolomètre s'écrit empiriquement [66] :

$$R = R_\infty \exp \left[\left(\frac{T_{trans}}{T_1} \right)^\alpha \right] \quad (2.3)$$

T_1 est la température du bolomètre.

R_∞ , T_{trans} et α sont des constantes mesurées expérimentalement.

L'équation d'équilibre thermique d'un bolomètre s'écrit :

$$P_c = P_j + P_r \quad (2.4)$$

P_J est la charge thermique liée à la puissance Joule électrique dans le bolomètre. Elle s'écrit simplement : $P_J = VI = RI^2$

P_r est la puissance radiative totale associée au rayonnement incident sur le bolomètre.

P_c est la puissance de refroidissement du bain cryogénique. Elle s'écrit :

$$P_c = \int_{T_0}^T GdT \quad (2.5)$$

$$P_c = \frac{T_{100}G_0}{\beta + 1} \left[\left(\frac{T_1}{T_{100}} \right)^{\beta+1} - \left(\frac{T_0}{T_{100}} \right)^{\beta+1} \right] \quad (2.6)$$

G_0 et β sont mesurés et fixés expérimentalement. Dans le cas d'HFI, la convention JPL/Cardiff définit G_0 telle que : $G_0 = \frac{dP_c}{dT_1}(T_1 = T_0)$ [20].

A partir de la mesure de l'impédance R et de la température T_0 du bain cryogénique du bolomètre, il est possible de déduire la puissance incidente P_r sur le bolomètre grâce aux relations 2.4 et 2.3.

Si on pose : $G_1 = \frac{dP_c}{dT_1} = G_0 \left(\frac{T_1}{T_{100}} \right)^\beta$ et $\dot{R}_1 = \frac{dR}{dT_1}$, la réponse du bolomètre s'écrit alors :

$$S(\text{Volt/Watt}) = \left| \frac{dV}{dP_r} \right| = \frac{-\dot{R}_1}{G_1 - \dot{R}_1 I^2} = \frac{\alpha T_{trans}^\alpha R_1 I}{T_1^{\alpha+1} G_0 (T_1/T_{100})^\beta + \alpha T_{trans}^\alpha R_1 I^2} \quad (2.7)$$

Modèle de bolomètre dynamique

Hors d'équilibre, c'est à dire si P_r varie, la température du bolomètre varie et il faut alors prendre en compte la capacité calorifique $C = C_0 \left(\frac{T_1}{T_{100}} \right)^\gamma$ du bolomètre pour prédire la température du bolomètre en régime transitoire. Le système à résoudre est alors le suivant :

$$C \frac{dT_1}{dt} = P_r + RI^2 - \frac{T_{100}G_0}{\beta + 1} \left[\left(\frac{T_1}{T_{100}} \right)^{\beta+1} - \left(\frac{T_0}{T_{100}} \right)^{\beta+1} \right] \quad (2.8)$$

Comme pour tout détecteur, la réponse dynamique d'un bolomètre se caractérise par une certaine constante de temps τ . Celle-ci peut se calculer avec la formule suivante :

$$\tau = \frac{C}{G_1 - \dot{R}_1 I^2} = \frac{C_0 (T_1/T_{100})^\gamma}{G_0 (T_1/T_{100})^\beta + \alpha (T_{trans}/T_1)^{\alpha+1} R_1 I^2 / T_{trans}} \quad (2.9)$$

2.3.2 Les bolomètres de Planck-HFI

Les bolomètres d'HFI sont fabriqués dans les laboratoires de CALTECH/JPL aux USA [38]. Chaque canal d'HFI est équipé soit d'un bolomètre de type SpiderWeb (SWB, Figure 2.14) soit de deux bolomètres assemblés de façon à obtenir un système bolométrique sensible à la polarisation (PSB, Figure 2.14).

L'absorbeur des bolomètres SWB est une grille en silicium en forme de toile d'araignée. Les thermistances des SWB et PSB sont de type NTD (Neutron Transmuted Detector), des cristaux de Germanium ou de Silicium dopés par bombardement de neutrons. Les PSB sont constitués de deux absorbeurs avec des grilles à barreaux parallèles placés l'un sous l'autre orthogonalement et chacun connectés à une thermistance NTD (Figure 2.15).

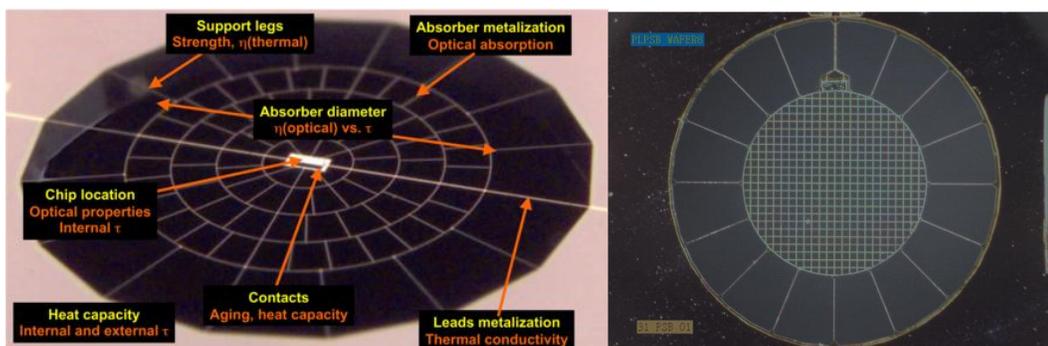


FIG. 2.14 – Gauche : Photographie d'un SWB HFI. Droite : Photographie d'un PSB HFI.

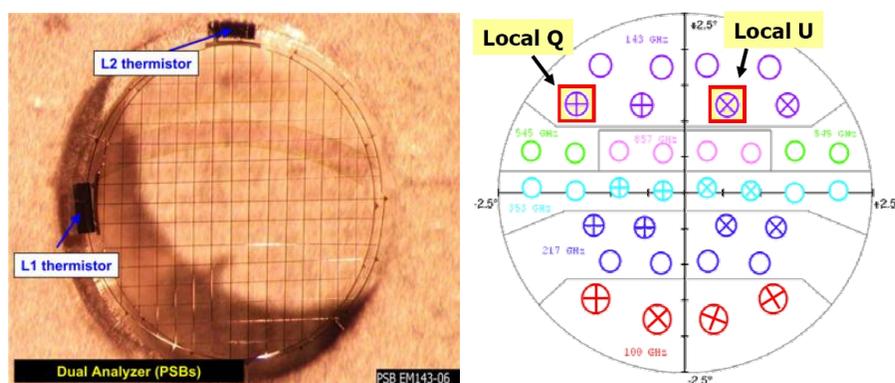


FIG. 2.15 – Gauche : Photographie des deux absorbeurs et des deux thermistances d'un PSB de type HFI. Droite : Orientation des PSBs dans le plan focal d'HFI.

Chaque PSB analyse donc le rayonnement dans les deux directions orthogonales définies par les deux absorbeurs. Pour pouvoir caractériser les paramètres I, Q et U de la polarisation du rayonnement incident, il faut ensuite utiliser les mesures de deux PSB orientés différemment dans le plan focal (Figure 2.15) afin d'avoir quatre mesures avec quatre directions d'analyse différentes.

Les 3 canaux photométriques allant de 143 à 353 GHz sont équipés de PSB (pixels carrés sur la Figure 2.16) et de SWB alors que les canaux à 545 et 857 GHz sont équipés uniquement de bolomètres SpiderWeb. Le canal à 100 GHz est équipé uniquement de PSB.

2.3.3 Les bruits de mesure bolométrique

Les bruits associés aux bolomètres sont caractérisés par la valeur de leur NEP (Noise Equivalent Power). La NEP ou puissance équivalente de bruit est reliée à son écart-type par la formule ci-dessous :

$$\sigma_{RMS} = \sqrt{\int_0^{\infty} NEP(f)^2 df} \quad (2.10)$$

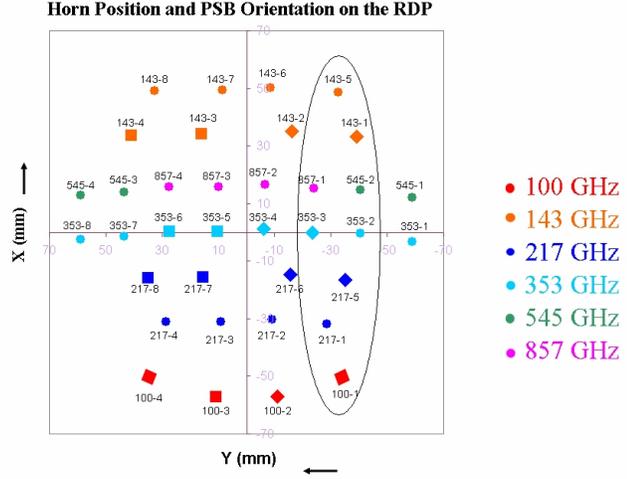
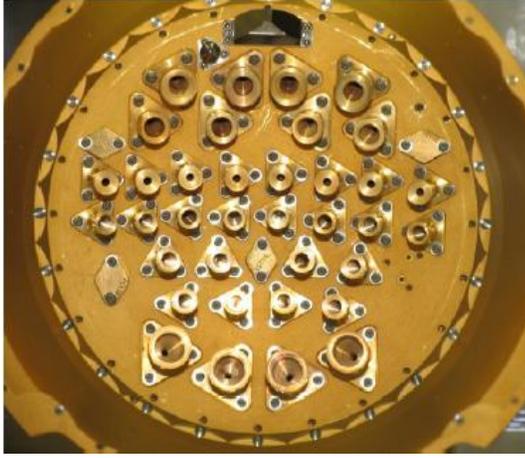


FIG. 2.16 – Gauche : Photographie des cornets à 4K d'HFI vus de face. Droite : Dénomination et coordonnées des 36 cornets à 4K d'HFI.

La NEP est donnée en $\text{Watt}/\sqrt{\text{Hz}}$. Elle correspond à l'amplitude de la fluctuation de puissance équivalente en entrée de l'instrument (en Watt) qu'aurait une fluctuation de puissance d'écart-type σ (autour d'une valeur moyenne donnée) pour une mesure avec un temps d'intégration d'une seconde, c'est à dire une bande passante de 1 Hz.

Le bruit de photons

La puissance issue d'une source optique de température T et incidente sur un détecteur du plan focal de l'instrument se calcule avec la relation photométrique suivante ([52]) :

$$P_r = \int_0^\infty [T_r(\nu)\varepsilon(\nu)B_\nu(T, \nu)A\Omega] d\nu \quad (2.11)$$

$T_r(\nu)$ est la transmission spectrale de l'instrument jusqu'au détecteur pour la fréquence ν .
 ε est l'émissivité de la source.

$B_\nu(T, \nu)$ est la brillance de corps noir émise par la source à la température T . La brillance se calcule en $\text{W}/\text{m}^2/\text{sr}/\text{Hz}$.

A est la surface du détecteur.

Ω est l'angle solide sous lequel le détecteur voit la source.

Pour une fréquence ν donnée, l'expression 2.11 s'approxime généralement très bien sous la forme suivante :

$$P_r(\nu) = T_r\varepsilon B_\nu(T, \nu)A\Omega\Delta\nu \quad (2.12)$$

Si on a N sources d'émission thermique vues simultanément par le détecteur, on a alors la puissance totale P_r ci-dessous sur le détecteur :

$$P_r(\nu) = \sum_{i=1}^N T_r\varepsilon_i B_\nu(T_i, \nu)A_i\Omega_i\Delta\nu_i \quad (2.13)$$

Dans le cas d'un détecteur d'un télescope travaillant à la limite de diffraction, on a ([52]) :

$$A\Omega \simeq \lambda^2 \quad (2.14)$$

HFI travaille effectivement à la limite de diffraction. Par contre, les cornets à haute fréquences sont des cornets multi-modes. D'après [44], l'étendue de faisceau s'écrit alors :

$$A\Omega \simeq \sum_{i=1,k} w_i \lambda^2 \quad (2.15)$$

k est le nombre de modes mesurés par le système optique associé au détecteur.

w_i est le poids associé au mode i .

Les valeurs estimées pour P_r dans chaque bande d'HFI sont présentées sur la Figure 2.17 et dans le tableau 2.2. On remarque que la puissance totale estimée dans les canaux à 545 et 857 GHz est beaucoup plus élevée en moyenne que pour les quatre autres canaux photométriques d'HFI. Cela est dû au fait que ces deux canaux haute fréquences d'HFI sont multimodes.

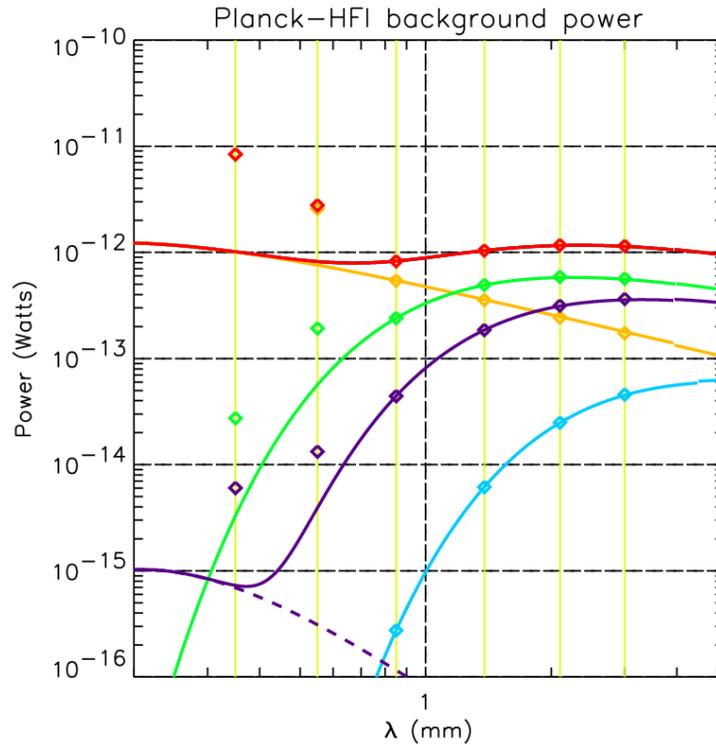


FIG. 2.17 – Puissances optiques incidentes pour les longueur d'onde d'observation d'HFI (entre 0.35 et 3 mm). Rouge : Puissance totale P_r . Orange : Emission thermique du télescope. Vert : Emission de l'étage à 4K. Violet : Emissions astrophysiques (CMB+Poussières). Bleu : Emission de l'étage à 1.6K. Les traits jaunes verticaux correspondent aux longueurs d'onde centrale des 6 bandes photométriques d'HFI.

La formule de la NEP associée au bruit de photons se calcule à partir de la puissance de background totale P_r avec la formule 2.16 [42].

$$NEP_{photons} = \sqrt{\frac{2}{\eta^2} \int_0^\infty h\nu P_r(\nu) d\nu + \frac{1+p^2}{\eta^2} \int_0^\infty \Delta(\nu) P_r(\nu) d\nu} \quad (2.16)$$

Fréquence (GHz)	857	545	353	217	143	100
Tr_{tot}	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
$Nmodes$	8	3	1	1	1	1
$A\Omega = Nmodes \times \lambda^2 (\times 10^{-6} m^2.sr)$	1.02	1.03	0.72	1.91	4.40	9.00
$\frac{\Delta\nu}{\nu}$	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
P_{Astro} (pW)	0.01	0.01	0.04	0.19	0.32	0.36
T_{50K}	50	50	50	50	50	50
$\varepsilon \times Tr_{50K}$	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
P_{50K} (pW)	8.37	2.57	0.54	0.36	0.24	0.17
T_{4K}	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
$\varepsilon \times Tr_{4K}$	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
P_{4K} (pW)	0.03	0.19	0.24	0.49	0.59	0.57
$T_{1.6K}$	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6
$\varepsilon \times Tr_{1.6K}$	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
$P_{1.6K}$ (pW)	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.05
P_r (pW)	8.40	2.78	0.83	1.04	1.17	1.15

TAB. 2.2 – Hypothèses photométriques et puissances de fond moyennes estimées en picoWatts pour chaque composante (astrophysique, 50K, 4K et 1.6K) pour un bolomètre de chaque bande HFI. La puissance totale est donnée par P_r .

La formule de la NEP du bruit de photons s'approxime très bien par la formule suivante :

$$NEP_{photon} = \sqrt{2h\nu P_r(\nu)} \quad (2.17)$$

Le bruit Johnson

La NEP du bruit Johnson ou bruit thermique aux bornes d'une résistance R se calcule avec la relation suivante :

$$NEP_{Johnson} = \frac{4Rk_bT_1}{S} \quad (2.18)$$

Le bruit Johnson associé au thermomètre du bolomètre se calcule alors avec cette formule 2.18. S est la réponse du bolomètre en Volts/Watts.

Le bruit de phonons

Le bruit de phonons ou bruit de conduction thermique est dû aux fluctuations d'énergie provenant du passage de phonons le long du lien thermique de conductance thermique G_0 . La NEP du bruit de phonons s'approxime bien avec la formule suivante [82] :

$$NEP_{phonon} = \sqrt{4k_bT_1^2G_0} \quad (2.19)$$

Le bruit de l'électronique de lecture

La NEP associée au bruit mesuré sur la chaîne électronique de lecture est de $5 \text{ nV}/\sqrt{Hz}$.

Le bruit en 1/f

En électronique, on observe aux très basses fréquences une remontée du spectre de bruit que l'on appelle bruit en 1/f. Ce bruit électronique n'est pas encore parfaitement compris pour ce qui est de son origine physique. Dans le cas de Planck-HFI la fréquence de coude du bruit en 1/f de l'électronique de lecture est plus basse que 0.01Hz. Pour les bolomètres d'HFI, la spécification choisie pour ces détecteurs est un bruit en 1/f avec une fréquence de coude maximum de 0.01Hz afin de ne pas avoir d'effet en 1/f sur chaque cercle mesuré par Planck sur le ciel.

Bilan de bruit sur les bolomètres d'HFI

La NEP totale du bolomètre est égale à la somme quadratique des NEP définies précédemment car ce sont des sources de bruits indépendantes :

$$NEP_{bolo} = \sqrt{NEP_{Johnson}^2 + NEP_{phonon}^2 + NEP_{photon}^2 + NEP_{elec}^2} \quad (2.20)$$

Les NEP totales ainsi déduites pour chaque bande d'observation d'HFI sont résumés sur le tableau 2.3.

Fréquence (GHz)	857	545	353	217	143	100
λ (mm)	0.35	0.55	0.85	1.38	2.10	3.00
P_r (pW)	8.40	2.78	0.83	1.04	1.17	1.15
$NEP_{photon} = \sqrt{2h\nu P_r(\nu)}$ ($\times 10^{-17}$ W/ \sqrt{Hz})	9.76	4.48	1.97	1.73	1.49	1.23
T_1 (K)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
G_0 ($\times 10^{-11}$ W/K)	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
NEP_{phonon} ($\times 10^{-17}$ W/ \sqrt{Hz})	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58
R (Ohms)	6100000	6100000	6100000	6100000	6100000	6100000
S (MV/W)	660	660	660	660	660	660
$NEP_{Johnson}$ ($\times 10^{-17}$ W/ \sqrt{Hz})	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88
NEP_{elec} ($\times 10^{-17}$ W/ \sqrt{Hz})	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
NEP_{bolo} ($\times 10^{-17}$ W/ \sqrt{Hz})	9.85	4.67	2.38	2.19	2.00	1.82
NEV_{bolo} ($\times nV/\sqrt{Hz}$)	65.03	30.85	15.69	14.43	13.21	12.01

TAB. 2.3 – Bilan de bruit théorique sur les bolomètres HFI.

On constate que pour Planck-HFI, le bruit total est dominé par le bruit de photon. Les performances d'HFI permettent donc d'obtenir une mesure du CMB uniquement limitée par le bruit de photon associé à ce dernier. On ne peut alors s'affranchir de cette source de bruit qu'en augmentant indifféremment soit le temps d'observation, soit le nombre d'observations.

2.4 La chaîne électronique de lecture

2.4.1 Description de la chaîne

Les signaux électriques aux bornes des 52 bolomètres d'HFI sont lus par une électronique dédiée constituée de 52 canaux de lecture en parallèle. La lecture des 52 canaux n'est donc

pas multiplexée ce qui permet d'avoir une électronique très bas bruit. Le bruit de mesure lié à l'électronique de lecture d'HFI a ainsi pu être minimisé afin d'avoir un bruit de mesure électrique négligeable devant le bruit intrinsèque des bolomètres pour les 52 canaux d'HFI. La chaîne électronique d'HFI est également en charge de la lecture de 16 thermomètres, 2 bolomètres aveugles, une résistance de référence de $10\text{ M}\Omega$ et une capacité. Au final, 72 voies sont lues en parallèle par l'électronique d'HFI à une fréquence de 172 Hz environ.

Les 72 voies sont réparties en douze modules appelés "ceinture". Chaque ceinture contient six voies de lecture en parallèle. Chacun de ces six canaux est conçu suivant le schéma électronique de la Figure 2.18.

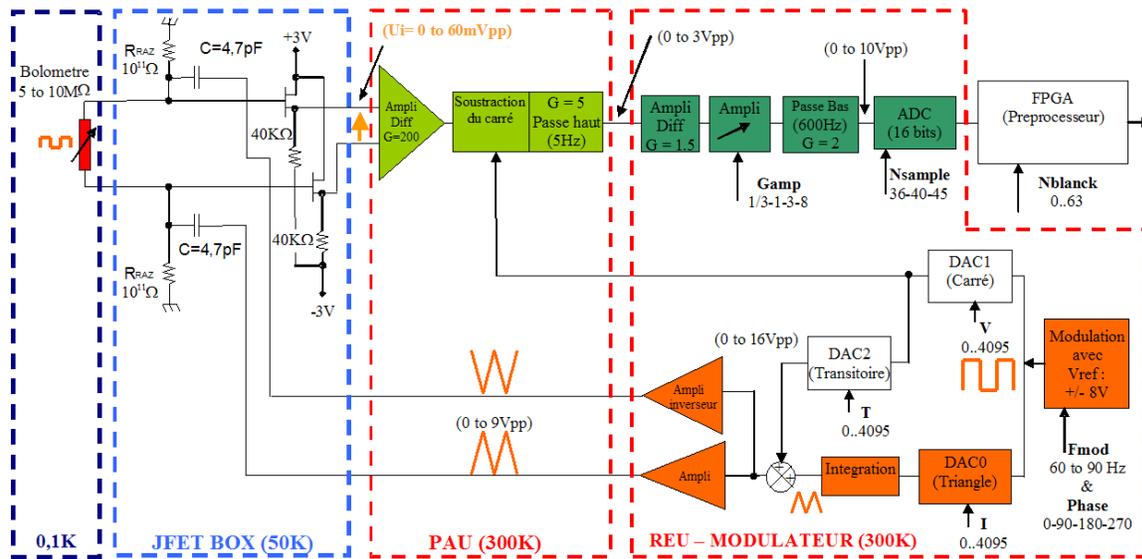


FIG. 2.18 – Schéma électronique d'un canal de la chaîne de lecture d'HFI.

La boîte JFET

La boîte JFET réalise l'adaptation d'impédance entre les thermomètres froids (dizaine de $\text{M}\Omega$) et l'électronique chaude de lecture (quelques $\text{K}\Omega$). La boîte JFET est également constituée de 12 boîtiers avec 6 voies de lecture pour chaque boîtier.

Le PAU

Le PAU ("Pre-Amplifier Unit") est le pré-amplificateur froid d'HFI. C'est un boîtier constitué de 12 cartes électroniques avec six voies analogiques destinées à amplifier le signal en sortie de la boîte JFET.

Le REU

Le REU ("Readout Electronic Unit") est le boîtier électronique qui contrôle la polarisation en courant des bolomètres ainsi que la numérisation du signal en sortie du PAU. Le REU

est également organisé en 12 boîtiers de 6 voies. Le REU réalise aussi l'asservissement des températures des étages cryogéniques mesurés par les thermomètres fins dont il est chargé de la lecture. Les corrections PID sont alors calculées en temps réel à la fréquence de 7 Hz environ dans le REU.

Répartition des voies de l'électronique de lecture

La répartition des 72 capteurs dans les 72 voies de la chaîne de lecture est présentée sur le tableau 2.4. Les douze ceintures sont numérotées de 0 à 11. Chaque ceinture contient six canaux numérotés de 0 à 5.

Nbelt / Nchannel	0	1	2	3	4	5
0	100-1a	100-1b	143-1a	143-1b	217-1	353-1
1	143-5	217-5a	217-5b	353-2	545-1	Dark 1
2	100-2a	100-2b	217-2	353-3a	353-3b	857-1
3	143-2a	143-2b	353-4a	353-4b	545-2	857-2
4	100-3a	100-3b	143-6	217-6a	217-6b	353-7
5	143-3a	143-3b	217-3	353-5a	353-5b	545-3
6	143-7	217-7a	217-7b	353-6a	353-6b	857-3
7	143-8	217-8a	217-8b	545-4	857-4	Dark 2
8	100-4a	100-4b	143-4a	143-4b	217-4	353-8
9	Ther_0.1K 1	Ther_PID2 N	Ther_PID1 N	Ther_PID1.6 N	Ther_1.6K 1	Ther_PID4 N
10	Resistor	Capa 2	Ther_0.1K 2	Ther_PID1.6 R	Ther_4KH 1	Ther_4KL 1
11	Ther_PID2 R	Ther_PID1 R	Ther_1.6K 2	Ther_PID4 R	Ther_4KH 2	Ther_4KL 2

TAB. 2.4 – Affectation des 72 voies de l'électronique de lecture d'HFI.

Principe de mesure

L'électronique de lecture d'HFI envoie sur les bolomètres un signal de polarisation $C1$ en créneau avec une fréquence de modulation f_{mod} comprise entre 70 et 112 Hz. De plus, on échantillonne ce signal de polarisation avec 72 à 90 points par période de modulation du créneau. On note N_{sample} le nombre de points par demi-période de modulation. On a alors :

$$f_{mod} = \frac{4.10^7}{2 \times (128 + f_{div}) \times 22 \times N_{sample}} \quad (2.21)$$

avec $N_{sample} = 45, 40$ ou 35 et f_{div} comprise entre 96 à 160. D'où f_{mod} comprise entre 70 et 112 Hz.

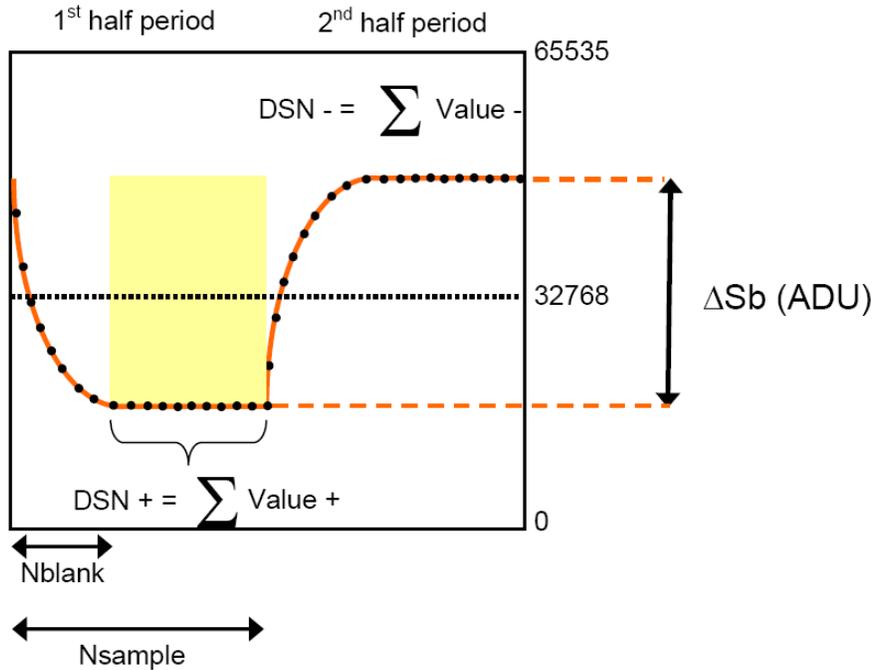


FIG. 2.19 – Signal aux bornes d'un bolomètres d'HFI polarisé avec un courant en créneau par le REU. Le signal est représenté ici pour une période de modulation de valeur f_{mod} .

Le signal aux bornes d'un bolomètre polarisé par ce créneau $C1$ est rerésenté Figure 2.19.

On additionne au signal de sortie des bolomètres un créneau de compensation $C2$ en opposition de phase ajusté à l'amplitude moyenne des N_{sample} points de mesure du créneau de sortie. On effectue pour cela une phase "d'autobalance" lancé par le DPU ("Data Processing Unit"). L'autobalance choisit alors les valeurs de DAC2¹ et DAC1 de la Figure 2.18 afin que l'amplitude de $C2$ soit à peu près égale à l'amplitude de $C1$. Le résultat de la soustraction est ensuite amplifié et envoyé vers un FPGA. Les N_{sample} premiers points ont une valeur positive, les N_{sample} suivants ont une valeur négative. Entre les deux séries de N_{sample} points, il y a un offset égale au maximum à un pas codeur de l'électronique. Cet offset correspond à l'incertitude maximum sur le choix du créneau de compensation. Les N_{sample} échantillons de chaque demi-période sont ensuite sommés par le FPGA. En sortie du FPGA, on obtient deux points de mesure correspondant au resultat de la somme des échantillons sur le créneau. Le FPGA est ensuite connecté à un DSP qui envoie les TOIs vers le DPU. Au final, on obtient des TOIs avec 140 à 228 points de mesure par seconde (car $2 \times f_{mod} = 140$ à 228 Hz). Ces TOIs en ADU fluctuent suivant les variations d'impédance en bout de chaîne. Un point sur deux possède une valeur négative. Pour exploiter ces TOIs, il faut alors, dans le traitement de données, convertir les ADU en mV en divisant par le nombre d'échantillons N_{sample} et en tenant compte entre autre des différents gains de la chaîne de mesure. Puis il faut redresser le signal modulé (démodulation). Au final, on obtient pour chaque échantillon, la variation de flux incident par rapport au flux de référence au moment de l'autobalance sur le canal.

¹le nombre de pas codeurs du DAC2 est noté V_b dans cette thèse

Pour lire la valeur de la température sur les thermomètres, le principe est le même, on envoie également un créneau de compensation. Par compte, la valeur des capacités de polarisation sont différentes et adaptées aux valeurs des impédances des thermomètres qui sont différentes de celles des bolomètres. On mesure également les variations de température aux bornes des thermomètres entre des paquets d'échantillons à 90 Hz. Comme l'on sait quel créneau de compensation on a envoyé on sait exactement quelle est la tension aux bornes des thermomètres et si ceux-ci ont été étalonnés on peut remonter à leur température à partir des courbes d'étalonnage. De même, pour les bolomètres, on peut savoir quelle est exactement la tension aux bornes de ceux-ci grâce aux étalonnages absolus de la chaîne de lecture d'HFI réalisés au CESR [70].

Le gain en Volt/ADU des 72 voies de la chaîne électronique de lecture a en effet été étalonné au CESR. Pour ces étalonnages, l'ensemble JFET/PAU/REU a été étalonné en absolu à 1/1000 sur une résistance de 7 M Ω .

2.5 Le DPU

Le DPU ("Data Processing Unit") développé au LAL à Orsay récupère les données en sortie du REU puis assure la compression du signal afin de les stocker à bord du satellite avant de les transmettre au sol via l'antenne grand gain du SVM. Le DPU permet également d'envoyer les télécommandes (TC) qui permettent de configurer entre autres le REU, en particulier les paramètres qui contrôlent le courant de polarisation et sa modulation pour chaque bolomètre et thermomètre d'HFI. Le logiciel qui permet de contrôler l'ensemble de la chaîne de lecture via le DPU est SCOS2000.

2.6 Le système de contrôle de la température

Afin d'atténuer les fluctuations de température induites par les fluctuations des trois réfrigérateurs actifs de Planck, un système de contrôle de la température équipe HFI. Ce système est basé sur l'utilisation conjointe de systèmes actifs et passifs.

2.6.1 Les thermomètres fins

Plusieurs thermomètres de type NTD avec des sensibilités allant de 10 $\mu K/\sqrt{Hz}$ à 20 nK/\sqrt{Hz} ont été installés sur les trois étages cryogénique d'HFI afin de contrôler leurs températures durant toute la mission (Figure 2.20). Ces thermomètres ont été étalonnés à basse température dans le cryostat SYMBOL de l'IAS [86]. Des thermomètres de référence de type étalon secondaire ont été utilisés pour déterminer les courbes d'étalonnage des thermomètres d'HFI.

Six thermomètres sont disposés sur l'étage à 4 K d'HFI. Quatre sur la platine supportant les cornets dos à dos et deux sur les côtés de la boîte à 4 K (Figure 2.21). La sensibilité des thermomètres 4K est comprise entre 10 et 20 $\mu K/\sqrt{Hz}$.

Quatre thermomètres fins sont placés sur l'étage à 1.6 K. Deux sur la platine supportant les filtres et deux sur les côtés de l'étage 1.6K (Figure 2.22). La sensibilité des thermomètres 1.6K est de 1 $\mu K/\sqrt{Hz}$.

Six thermomètres fins sont placés sur les deux étages 0.1K. Deux sur la platine dilution et quatre sur la platine bolomètre (Figure 2.23). La sensibilité des thermomètres 0.1 K est de

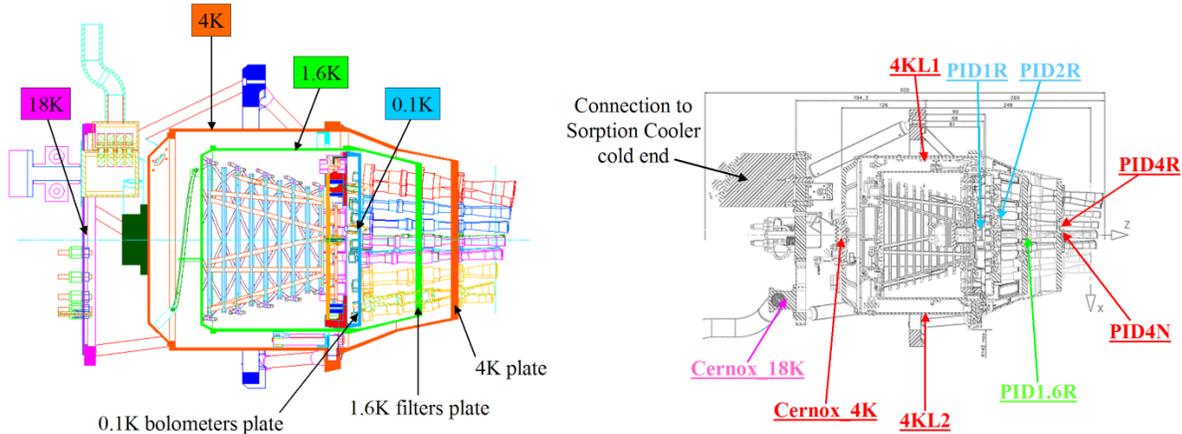
$20 \text{ nK}/\sqrt{\text{Hz}}$


FIG. 2.20 – Localisation de quelques thermomètres fins placés sur les étages cryogéniques d'HFI pour son contrôle thermique.

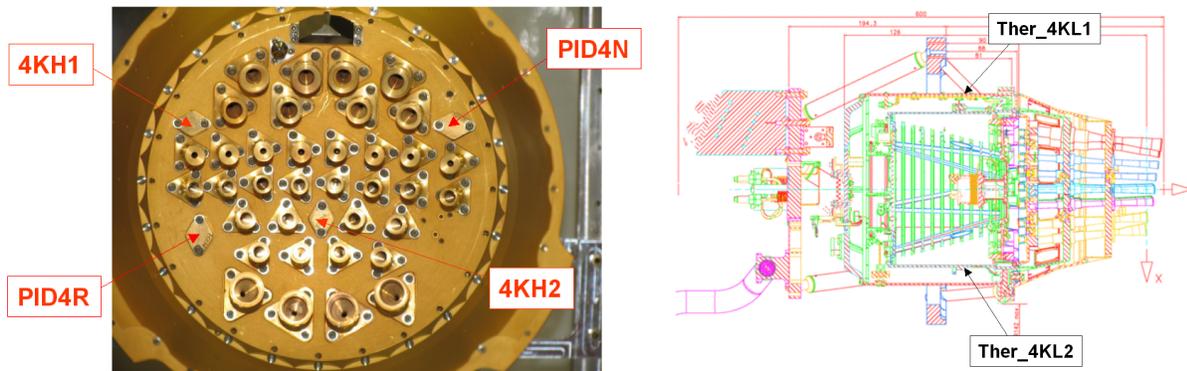


FIG. 2.21 – Gauche : Localisation des quatre thermomètres fins placés sur la platine 4K supportant les cornets d'HFI. Droite : Localisation des deux thermomètres fins situés sur les côtés de la boîte 4K.

2.6.2 Les thermomètres Cernox

Six thermomètres de type Cernox sont placés sur HFI. Ils permettent principalement le suivi de la descente en froid d'HFI. On trouve une Cernox sur chaque étage (50 K, 18 K, 4 K, 1.6 K et 0.1 K) et une sur le switch thermique 4K-1.6K. Ces six Cernox sont lues par une ceinture du REU dédiée. La lecture de ces six Cernox est multiplexée par cette électronique. Une mesure est enregistrée toutes les 70 secondes environ pour chaque Cernox.

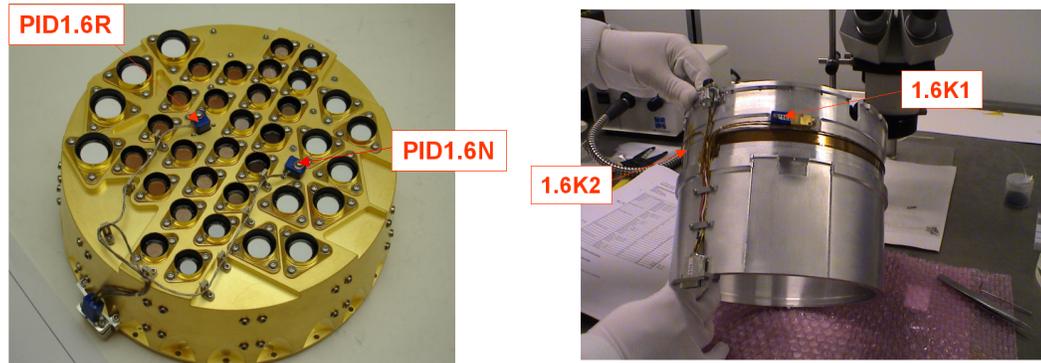


FIG. 2.22 – Gauche : Localisation des deux thermomètres fins placés sur la platine 1.6K supportant les filtres 1.6K d’HFI. Droite : Localisation des deux thermomètres fins situés sur les côtés de la boîte 1.6K.

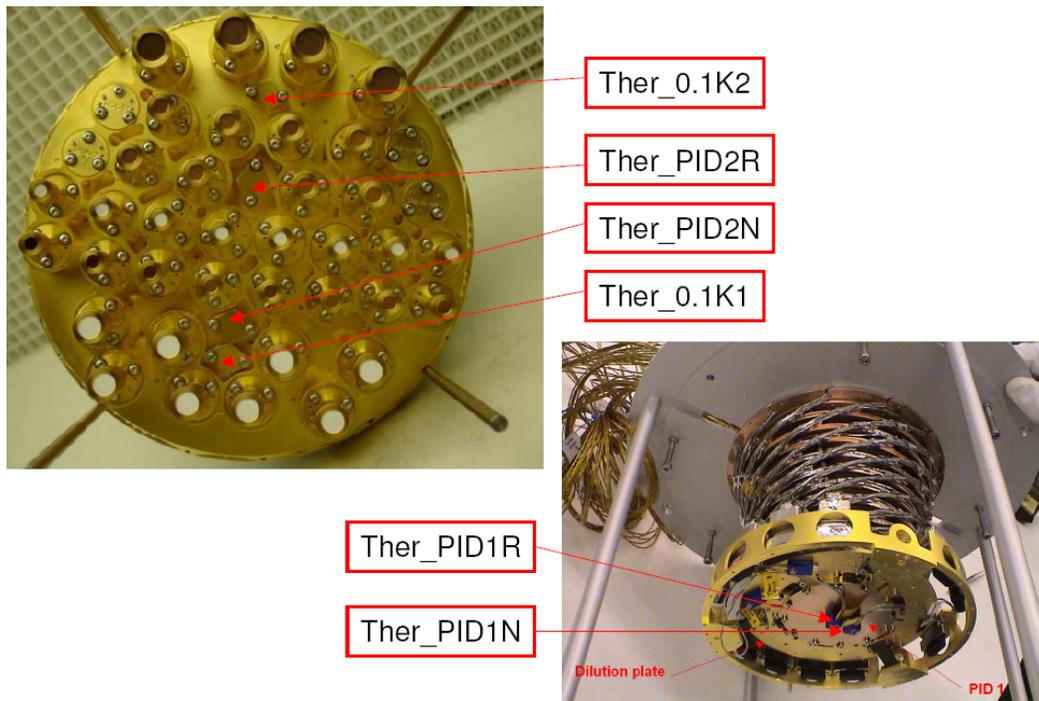


FIG. 2.23 – Gauche : Localisation des quatre thermomètres fins placés sur la platine bolomètre. Droite : Localisation des deux thermomètres fins placés sur la platine dilution.

2.6.3 Le système de contrôle passif

Afin d’atténuer les fluctuations de température des éléments de l’optique froide, différents systèmes de contrôle passif de la température équipent HFI. L’architecture mécanique et le choix des matériaux constituant HFI permet une thermalisation optimale des étages de l’instrument. L’isolement thermique de ces étages est également optimisé dans cette architecture. Les performances d’amortissement passif des fluctuations de température entre les étages cryogéniques

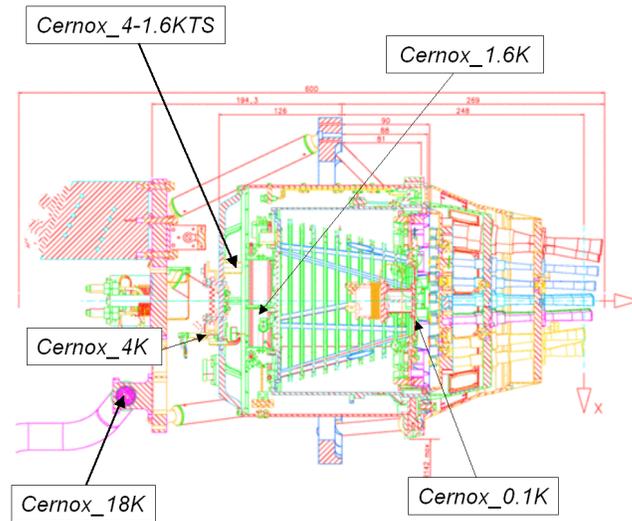


FIG. 2.24 – Localisation des thermomètres Cernox sur HFI.

d'HFI sont détaillées dans le chapitre 4 de cette thèse.

Un système d'amortissement passif particulièrement remarquable pour HFI est celui disposé entre les étages 0.1 K. Ce système repose sur l'utilisation d'un alliage d'Holmium et d'Yttrium (HoY). Cet alliage utilise la particularité de l'Holmium qui présente une anomalie de capacité calorifique à basse température (Figure 2.25) pour atténuer les fluctuations sur la platine 0.1K supportant les bolomètres d'HFI.

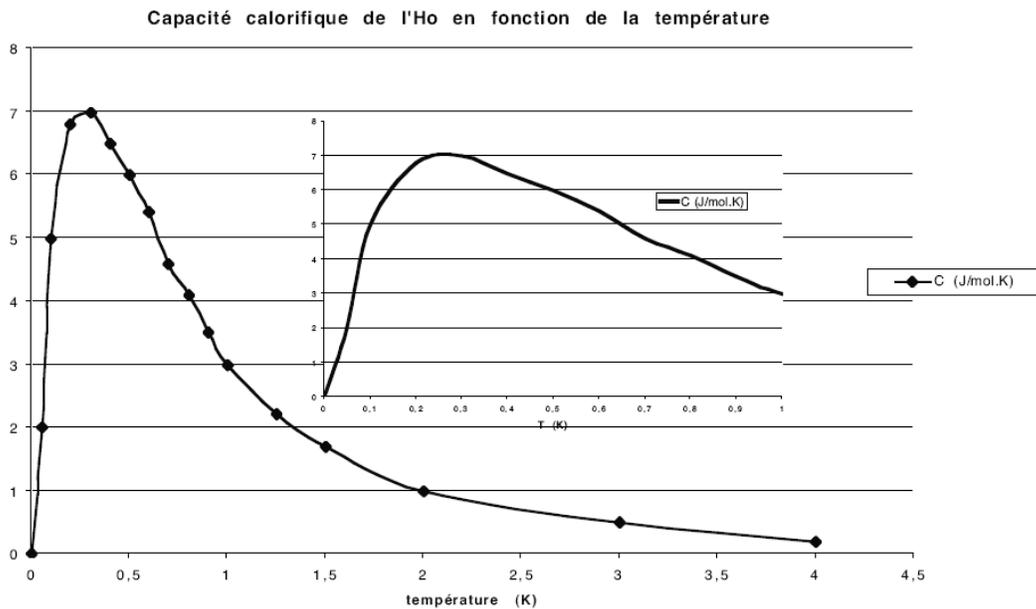


FIG. 2.25 – Capacité calorifique de l'Holmium en fonction de la température.

Des plots en HoY ont donc été utilisés pour faire l'interface entre la platine dilution et la platine bolomètre (Figure 2.10). L'utilisation de ces plots en HoY permet alors d'atténuer les fluctuations hautes fréquences de la tête froide de la dilution avant qu'elles atteignent la platine bolomètre (Figure 2.26).

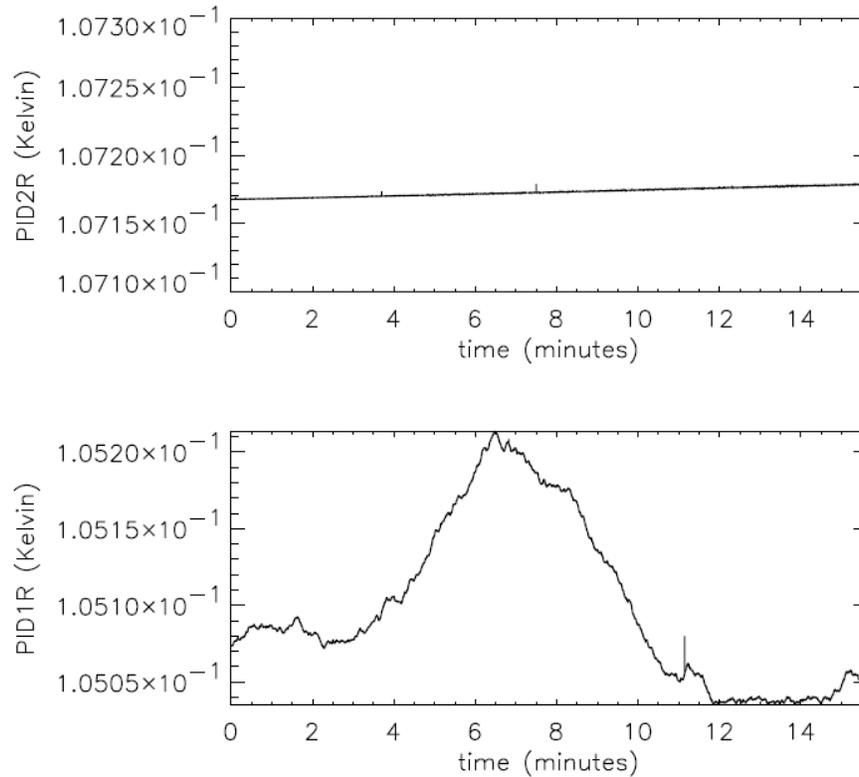


FIG. 2.26 – *Effet de l’Holmium Yttrium pour l’amortissement des fluctuations de température de la platine dilution.*

2.6.4 Le système de contrôle actif avec régulations PID

Afin de stabiliser la température des platines 1.6K et 4K d’HFI, des systèmes de régulation actifs sont utilisés. Pour chacun de ces deux étages, ces systèmes sont constitués de trois éléments : un thermomètre, une ceinture chauffante de type résistance électrique (Figure 2.27 et Figure 2.28) et un algorithme Proportionnel Integral Dérivé (PID) programmé dans le REU. Ce dernier contrôle le courant injecté dans la ceinture chauffante à chaque itération de l’algorithme PID. Le PID régule alors la puissance injectée à chaque instant sur chaque étage en fonction de la puissance nécessaire estimée à partir de la température mesurée par le thermomètre associé à la chaîne de régulation. Les thermomètres utilisés pour la régulation des étages 1.6K et 4K sont respectivement le PID4N (Figure 2.21) et le PID1.6N (Figure 2.22). Une régulation PID est également placée sur chaque étage 0.1K d’HFI. Les deux régulations 0.1K sont respectivement désignées sous les noms PID1 et PID2 (Figure 2.10) pour la platine dilution et la platine

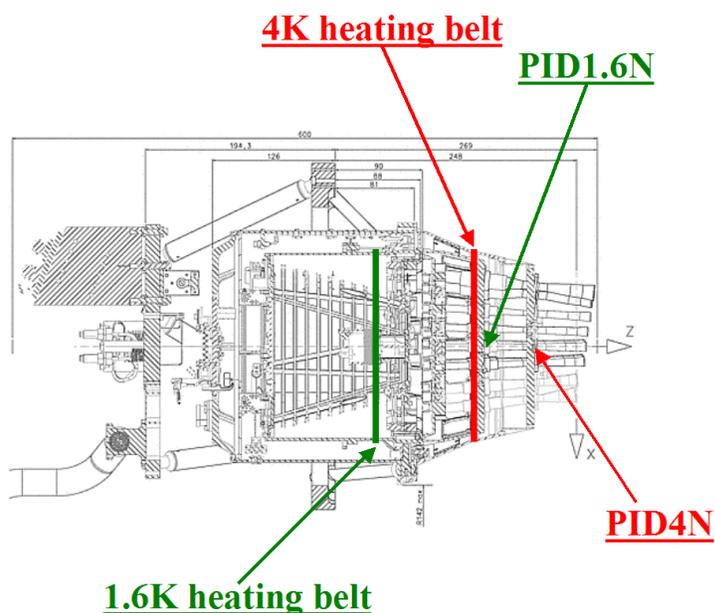


FIG. 2.27 – Localisation des ceintures chauffantes sur les étages 4K et 1.6K d'HFI (extrait de [54]).

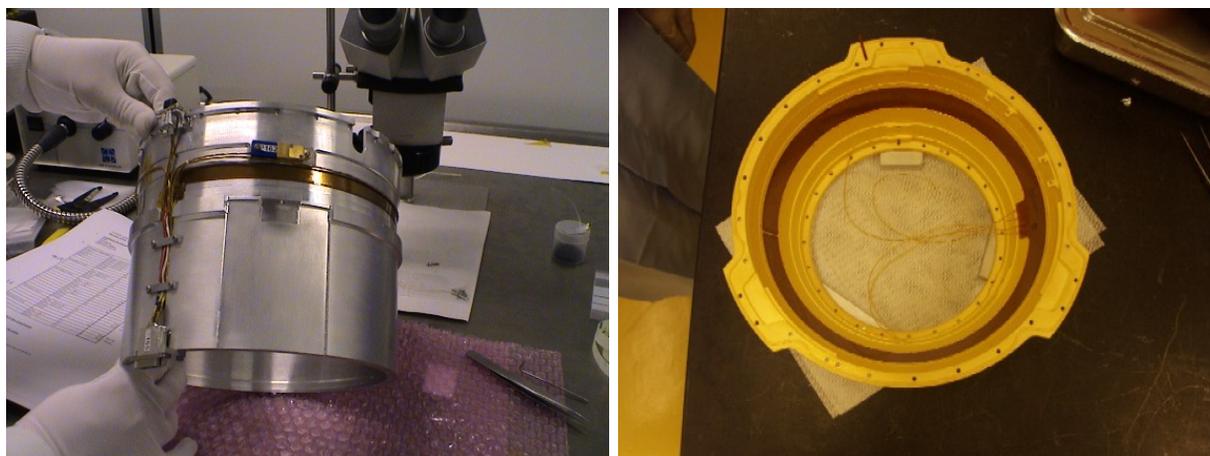


FIG. 2.28 – Photographies des ceintures chauffantes. Gauche : Ceinture de l'étage 1.6K. Droite : Ceinture de l'étage 4K.

bolomètre. Les thermomètres utilisés pour ces deux régulations sont le PID1N et le PID2N (Figure 2.23). La chaîne de régulation PID de l'étage à 4 K sera présentée en détail au chapitre 6 de cette thèse.

Chapitre 3

Les effets systématiques dans Planck-HFI

« Il suffit d'un nuage pour éclipser le soleil. »

Thomas Fuller

Les effets systématiques dans Planck et HFI en particulier ont des origines diverses : effets optiques, thermiques, électroniques, ... Leur amplitude et le niveau auquel ils pourront être contrôlés fixeront la sensibilité finale des observations de Planck. Après les avoir identifiés, il est possible d'essayer de quantifier leur impact sur les résultats scientifiques de Planck. Si les effets sont importants devant le bruit intrinsèque des mesures, des étalonnages dédiés ainsi que des méthodes de correction dans le traitement des données doivent alors être envisagés et mis au point. Durant cette thèse j'ai étudié deux types d'effets différents : les effets thermiques et le cross-talk électronique.

3.1 Les différents effets systématiques dans Planck-HFI et leurs effets sur le signal

3.1.1 Description des différentes sources possibles de systématiques

Les différentes sources de systématiques dans HFI sont présentées succinctement ci-dessous :

Changement de puissance de fond astrophysique

Le signal astrophysique mesuré par Planck entre 100 et 353 GHz est dominé par le dipôle du CMB. La puissance associée au dipôle du CMB oscille avec une période de une minute au cours de la mission. Le point de fonctionnement des bolomètres change donc durant les observations d'HFI en suivant les variations du dipôle. Les variations de réponse des bolomètres associés à cet effet basse fréquence doivent donc être corrigées dans le traitement de données si ce dernier

est estimé trop important. Pour les canaux à 545 et 857 GHz, le signal dominant est le signal de la Galaxie. Il faut donc veiller à ce que le signal des régions les plus brillantes de la Galaxie ne change pas également la réponse des bolomètres.

Bruit de "Pop-Corn"

Durant les étalonnages au sol du modèle de vol d'HFI, le signal de certains bolomètres d'HFI était affecté par des sauts d'offset irréguliers avec des périodicités variables de l'ordre de quelques dizaines de secondes. Ce phénomène a été baptisé le "pop-corn" noise. Son origine n'est pas encore comprise.

Bruit en 1/f

Comme pour toute chaîne électronique de mesure, un bruit en 1/f devrait affecter les mesures d'HFI. Afin de s'en accommoder, Planck-HFI a été conçu pour qu'un bruit en 1/f avec une fréquence de coupe plus basse que 0.01 Hz n'affecte pas les observations du CMB. Ce bruit basse fréquence peut être retiré par les méthode de "destripping" dans le traitement de données.

Compatibilité électromagnétique (EMC)

Les interférences électromagnétiques entre les bolomètres, la chaîne de lecture, LFI et les éléments du SVM (électronique des réfrigérateurs actifs, ordinateur de bord, ...) doivent être suffisamment faibles pour ne pas ajouter du bruit aux mesures. Différentes mesures dédiées aux EMC ont été réalisées tout au long des tests au sol de Planck et d'HFI afin de vérifier les performances d'ensemble vis à vis du contrôle de la compatibilité électromagnétique des différents éléments.

Compression

Avec un temps d'antenne de 3 heures par jour la bande passante disponible pour Planck-HFI est limitée. Afin de pouvoir transmettre vers le sol les données d'HFI échantillonnées à 172 Hz, elles sont comprimées par le DPU et stockées à bord du satellite. Cette compression peut entraîner une perte d'information si elle n'est pas optimale.

Constante de temps des bolomètres

Le signal des bolomètres d'HFI est filtré par un filtre dont la constante de temps est fixée par celle des bolomètres. Comme on l'a vu au chapitre 2, cette constante de temps dépend de la puissance de background incidente sur les bolomètres. La valeur des constantes de temps des bolomètres d'HFI varie donc en phase avec le background durant la mission.

Cross-talk optique

Le cross-talk ou "diaphonie" est un phénomène de mélange de signaux entre deux voies de mesures voisines. Il existe tout d'abord des sources optiques de cross-talk. Pour HFI, il peut y avoir par exemple, des fuites optiques entre les pixels du plan focal au niveau des cornets à 1.6K. La moindre fuite optique pourrait générer un signal de cross-talk parasite.

Cross-talk électronique

Une autre source possible de cross-talk est située dans la chaîne électronique de lecture des bolomètres. On distingue le cross-talk électronique en courant et le cross-talk électronique en tension. Le cross-talk en courant correspond aux changements de courant parasites induits sur un canal de l'électronique par d'autres changements de polarisation "volontaires" sur d'autres canaux de l'électronique. Le cross-talk en tension correspond lui aux phénomènes de changements de tension parasites induits sur un canal par les variations de tension sur les canaux voisins.

Dérive de température de la chaîne électronique de lecture

Toute dérive de température d'un élément de la chaîne électronique de lecture risque de modifier le gain, c'est à dire la réponse de celle-ci.

Glitches

Des glitches affectent le signal des bolomètres d'HFI aussi bien durant les tests au sol [107] que durant les opérations en vol. Les données avec des glitches doivent alors être identifiées ("flaguées") puis supprimées de l'analyse des mesures d'HFI car les données avec des glitches sont difficiles à corriger.

Asymétrie des lobes du télescope

Le lobe principal de l'optique du télescope de Planck n'est pas purement gaussien. L'étendue de faisceau associée à chaque pixel n'est donc pas parfaitement égale à $N_{modes}\lambda^2$. Des mesures de beam en vol sont donc nécessaires afin d'estimer les facteurs correctifs pour chaque mesure d'HFI.

Lobes lointains de l'optique

Diverses sources de rayonnement issues du ciel ou de l'émission thermique du satellite peuvent être vues par les lobes lointains de l'optique [9]. Même si ces lobes secondaires de l'optique de Planck sont très faibles (moins de un millième du lobe principal), ils peuvent introduire des signaux parasites dont l'amplitude est de l'ordre de celle des fluctuations du CMB si les fluctuations des sources de rayonnement vues par les lobes lointains sont importantes (exemple : Centre Galactique).

Microphonie

La microphonie est liée aux signaux induits sur les détecteurs ou l'électronique par les vibrations hautes fréquences des éléments mécaniques de l'environnement de l'instrument (satellite, machines cryogéniques, ...). Dans le cas d'HFI, le mouvement des pistons des compresseurs du 4K Cooler génère un signal parasite de fréquence 40 Hz sur le signal de sortie des bolomètres d'HFI.

Fluctuations de température de l'étage 0.1 K

Toute variation de température du bain cryogénique des bolomètres a un effet direct sur le signal aux bornes du bolomètre puisque l'impédance d'un bolomètre dépend directement de la valeur de la puissance de refroidissement du détecteur.

Fluctuations de température des étage à 4 K et 1.6 K

Les cornets et les filtres à 4K d'HFI sont refroidis par le 4K Cooler qui est lui même pré-refroidi à 18K par le Sorption Cooler. Toute fluctuation de température de la tête froide de l'un de ces deux réfrigérateurs actifs peut donc entraîner des fluctuations de température au niveau des filtres et des cornets à 4K. Les fluctuations de rayonnement de corps noir associés à ces éléments de l'optique froide risquent alors de générer un signal parasite non négligeable au niveau des bolomètres. On parle donc de "lumière parasite interne". Toute fluctuation induite sur les filtres à 1.6K et 0.1K via les fluctuations des réfrigérateurs actifs peut générer le même genre d'effet systématique thermique que pour l'étage à 4K.

Fluctuations de température du télescope

Toute fluctuation de température du télescope autour de sa température moyenne (50 Kelvin environ) peut également générer des fluctuations de rayonnement qui seront sources d'effets systématiques.

Fluctuations de température du SVM vues par les lobes lointains du télescope

Les lobes lointains de l'optique de Planck voient avec un coefficient de couplage très faible des parties du satellite sensées être masquées par le baffle de Planck. Si la température de certains panneaux du SVM fluctue de façon trop importante, le produit de l'émission thermique de ces panneaux par les lobes lointains risque de ne pas être négligeable devant les fluctuations du CMB.

Transmission spectrale

Le profil spectral de chaque pixel du FPU étant différent (Figure 2.12), il est nécessaire de prendre en compte les mesures au sol par FTS (Fourier Transform Spectrometer) pour estimer le produit $T_r \Delta\nu$ de la relation 2.12.

Effets spécifiques à la polarisation

Des effets systématiques spécifiques à la polarisation existent également. Le premier effet important pour la mesure de la polarisation est la *cross-polarisation*. Un polariseur ne polarise jamais parfaitement un rayonnement incident. Une partie de la lumière transmise conserve la polarisation incidente. Le pourcentage de rayonnement non polarisé est appelé taux de cross-polarisation. Les grilles polarisantes des bolomètres PSB d'HFI possèdent un certain pourcentage de cross-polarisation qui doit être mesuré pour pouvoir déduire la polarisation du rayonnement incident.

L'autre effet important est le problème des *angles de polarisation de référence* [89]. A une fréquence donnée, les observations de deux PSB pour un même point du ciel sont nécessaires pour remonter à la polarisation du rayonnement. L'angle d'orientation des deux PSBs sur le ciel doit donc être connu précisément pour remonter aux paramètres I, Q et U à partir des quatre mesures des deux PSBs. Deux problèmes d'angle apparaissent alors : l'angle relatif entre les deux bras d'un PSB et l'angle d'orientation du système PSB sur le ciel. Ce dernier peut alors être affecté de deux types d'effet : une erreur d'alignement du PSB dans le plan focal lors de la réalisation de ce dernier et une erreur sur l'angle de rotation lors de la restitution d'attitude du télescope. Des observations sur des sources astrophysiques de référence en vol sont envisagées désormais pour déduire la valeur de ces angles des polariseurs des PSBs.

3.1.2 Effets sur le signal pour chaque effet systématique

Les sources de systématiques affectent le signal des bolomètres de différentes façons. Deux types d'effets peuvent être distingués : les effets additifs et les effets multiplicatifs. Selon qu'ils soient additifs ou multiplicatifs, les effets systématiques peuvent être corrigés de différentes façon.

Les effets additifs correspondent aux signaux parasites de différentes natures qui se superposent au signal. Ces signaux parasites ajoutent un bruit non gaussien aux mesures qu'il faut alors corriger de façon spécifique. Les effets multiplicatifs correspondent aux effets qui induisent des variations de réponse des détecteurs (appelées aussi "effets de gain"). Les effets multiplicatifs induisent soit des effets de gain fixes, soit des non-linéarités dans la réponse des détecteurs. En particulier, toute variation de la puissance optique incidente sur un bolomètre entraîne l'apparition d'une non-linéarité dont l'amplitude est proportionnelle à la puissance optique incidente. Par exemple, lorsqu'HFI observera Jupiter, la variation de signal astrophysique sera si importante que la réponse des bolomètres au rayonnement de Jupiter sera non-linéaire. Les effets multiplicatifs doivent donc être quantifiés avec précision pour identifier lesquels doivent être corrigés dans le traitement de données d'HFI.

Quant aux effets spécifiques à la polarisation, leurs impacts sur les mesures sont plus complexes et n'entrent pas dans ces deux catégories. On parle plus volontier d'effet sur I, Q ou U, les grandeurs d'analyse de la polarisation [11].

Désormais, nombre d'effets ont pu être mesurés et quantifiés précisément durant les campagnes d'étalonnage au sol d'HFI. Compte-tenu de ces résultats, les effets attendus sur le signal pour les différents systématiques identifiés à ce jour pour Planck-HFI sont résumés dans le tableau 3.1.

Effets systématiques	Additif	Multiplicatif	Filtrage
Changement de background Astrophysique	×	×	
Bruit de Pop-Corn	*		
Bruit en 1/f	×	×	
Compatibilité électromagnétique (EMC)	×		
Compression	×		
Constante de temps des bolomètres			*
Cross-talk optique	×	×	
Cross-talk électronique en courant	*	×	
Cross-talk électronique en tension	×		
Dérive de température de la chaîne électronique de lecture		×	
Glitches	*	×	
Asymétrie des lobes optique		*	
Lobes lointains de l'optique	×	×	
Micro-phonie du 4K Cooler	*		
Fluctuations de température de l'étage 0.1K	×	×	
Fluctuations de température de l'étage 4K	*	×	
Fluctuations de température de l'étage 1.6K	×	×	
Fluctuations de température du télescope	×	×	
Transmission spectrale		*	

TAB. 3.1 – Effets sur le signal des bolomètres des différents effets systématiques possibles dans Planck-HFI (les étoiles correspondent aux effets identifiés dont le niveau a été quantifié et dont l'amplitude n'est pas négligeable pour HFI.)

3.2 Identification et étalonnage des effets systématiques pour le projet Planck-HFI

Pour pouvoir corriger les effets systématiques dans Planck-HFI, il est nécessaire de suivre les trois étapes suivantes pour chaque effet : Identification, Quantification et Correction. La Figure 3.1 résume de façon schématique comment contrôler les effets systématiques liés à un instrument d'observation.

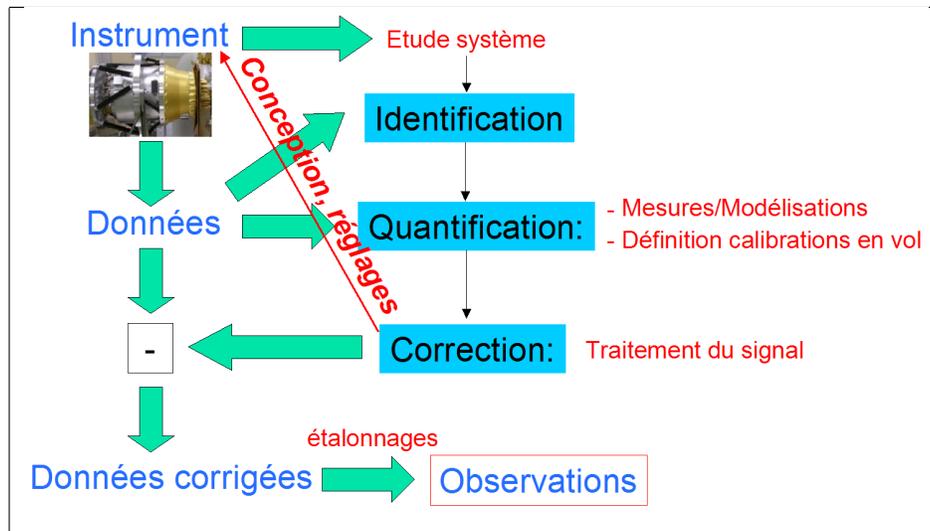


FIG. 3.1 – *Stratégie de traitement des effets systématiques théorique pour un instrument d'observation.*

Les effets susceptibles d'affecter les mesures de l'instrument en vol peuvent être identifiés de deux façons. Soit directement à partir des données où tout signal inattendu doit être compris, soit en faisant une étude système de l'ensemble instrument/satellite afin d'estimer les "instabilités" susceptibles d'affecter les interfaces de l'instrument.

Une fois les sources de systématiques identifiées, il faut quantifier leurs effets, c'est-à-dire étalonner ou simuler les effets systématiques afin d'avoir des modèles très précis des signaux parasites à corriger dans le traitement de données. Pour pouvoir quantifier ces effets, on réalise donc plusieurs séries de mesures au sol ou en vol en fonction de la faisabilité et de la représentativité de ces deux types mesures. Certaines mesures ne sont en effet possibles qu'au sol (ex : FTS) alors que d'autres ne sont réalisables qu'en vol (ex : mesure de l'asymétrie des lobes optiques). Des étalonnages en vol dédiées sont donc souvent nécessaires pour cette étape de quantification. Certains effets systématiques enfin ne peuvent pas être mesurés du tout car très faibles. Seule une modélisation des phénomènes est alors possible (ex : lobes lointains de l'optique pour tous les cornets d'HFI ajustés sur quelques mesures en base compacte pour certaines fréquences).

Une fois les effets parfaitement quantifiés, ils peuvent être soustraits des données par différentes méthodes de traitement du signal plus ou moins raffinées. Une autre façon de corriger les systématiques consiste à agir directement sur l'instrument. Tout d'abord durant sa conception en essayant d'obtenir un design qui minimise les systématiques (ex : mesures différentielles de

WMAP). Ensuite durant les opérations de l'instrument en essayant d'obtenir un réglage de l'instrument et du satellite qui minimise les sources de systématiques (ex : Optimisation de la chaîne de contrôle thermique actif de Planck).

Les deux premières étapes du traitement des effets systématiques (Identification et Quantification) doivent être effectuées si possible, avant le début du Survey pour pouvoir commencer la correction des effets systématiques dans le DPC Planck dès le début des observations.

3.2.1 Les différents niveaux d'étalonnage des effets systématiques

Afin de quantifier les effets systématiques d'HFI, plusieurs séries de mesures sont prévues tout au long de la vie du projet Planck au sol et en vol à différents niveaux : mesures sous-systèmes, système instrument et système satellite. Les différents niveaux de mesure des systématiques sont résumés dans le tableau 3.2.

3.2.2 Le plan d'étalonnage du modèle de vol de Planck-HFI

Les différentes procédures du plan d'étalonnage du PFM réalisées en Juillet 2006, durant la campagne PFM-CAL dans le cryostat Saturne de la station d'étalonnage de l'IAS (Figure 3.2) sont détaillées ici. Les différentes mesures de la campagne PFM-CAL ont été les suivantes :



FIG. 3.2 – Photographie du cryostat Saturne à l'IAS.

- **EFF**, [17] : La mesure EFF consiste à mesurer l'efficacité optique d'HFI ainsi que le produit de l'émissivité et du couplage optique des bolomètres avec les étages 1.6K et 4K. Pour cela, la température à l'intérieur du cryostat (2K shield) a été changée rapidement entre deux températures de référence pour pouvoir générer un échelon de puissance optique en entrée de l'instrument qui est ensuite utilisé pour mesurer l'efficacité optique de l'instrument (détecteurs+filtres). Le même type de créneaux de température a été généré sur les cornets à 4K et les filtres à 1.6K afin de mesurer les coefficients de couplage des

Mars 2007

	Component	Sub-system	FPU Orsay	CSL	CPV phase	In-flight
Beam						
Main beam						
Horns	horn	pixel assembly				
Sky beam		horn + telescope + model			preliminary	final
Far side lobes		horn + telescope + model			preliminary	final
Spectral dependence	horn	final (model)				
Spectral response	filters	pixel assembly	final			
Absolute response	detectors (model)	pixel assembly	estimate		preliminary	final
Polarisation						
Orientation	bolometer in housing	pixel assembly	preliminary			final
Cross-polar leakage	bolometer	pixel assembly				final
Background						
1.6K stage emissivity			preliminary		preliminary	final
4K stage emissivity			preliminary		preliminary	final
Total			estimate		preliminary	final
Readout electronics						
Capacitance			preliminary	preliminary	final	
Gains		preliminary	preliminary		final	
Phases			preliminary		final	
JFET temperature			final			
Modulation frequency			estimate	preliminary	final	
Numerical compression			preliminary		final	
Linearity		model	final			
Crosstalk						
Electrical (EXT)			preliminary	preliminary	final	
Optical (OXT)			estimate		preliminary	final (includes EXT)
Time response	detector	pixel assembly	final			verification
Detection noise	detector	detector+REU	estimate		preliminary	final
Response to Particules			preliminary			final
Thermal behavior						
Thermal stages stability			preliminary	preliminary	preliminary	final
Thermal transfer functions			final			
Compatibility						
EMC			preliminary	final	verification	verification
Vibrations (microphonics)			preliminary	final		verification

TAB. 3.2 – Les différents niveaux d'étalonnage des effets systématiques dans le projet Planck (d'après [75]).

bolomètres avec ces éléments de la chaîne optique. Les régulations PID des étages 4K et 1.6K ont été utilisées pour générer ces créneaux de température sur ces étages.

- **EFF-CS2**, [90] : La mesure EFF-CS2 utilise une source optique modulée (CS2) qui est placée à l'intérieur d'une sphère intégrante qui génère un champ plat modulé vu par tous les bolomètres d'HFI grâce au dispositif de test optique placé à l'intérieur du cryostat Saturne (Figure 3.3). Le signal modulé de CS2 est utilisé ensuite comme signal de référence

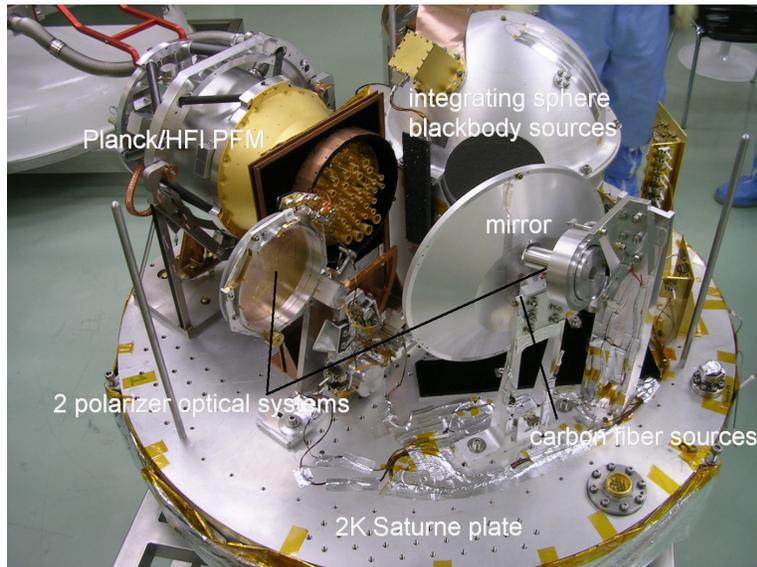


FIG. 3.3 – Photographie du dispositif de test optique d'HFI à l'intérieur du cryostat Saturne à l'IAS.

pour mesurer de façon indépendante de EFF l'efficacité optique de l'instrument.

- **EXT-CSM**, [56] : Dans cette mesure, la source optique modulée CSM qui est placée au centre du miroir du dispositif de test optique, est utilisée pour essayer de détecter un signal de cross-talk en tension sur les bolomètres aveugles d'HFI.
- **EXT**, [56] : Des stimulus en courant ont été générés successivement sur chacune des 72 voies de l'électronique d'HFI afin de mesurer les effets de cross-talk électronique sur la chaîne de lecture.
- **FTS**, [96] : Un spectromètre à transformée de Fourier (FTS) a été installé à la station d'étalonnage de l'IAS spécialement pour HFI. Ce FTS a permis de mesurer le profil spectral de chaque canal photométrique d'HFI à partir des signaux des bolomètres.
- **IVC**, [23] : Le courant a été augmenté progressivement sur chaque bolomètre d'HFI entre 0.01 et 4 nA environ dans plusieurs séries de mesures à différentes températures. La mesure de la variation de la tension V aux bornes des bolomètres en fonction du courant I permet de tracer ce qu'on appelle une courbe IV. Ces courbes permettent ensuite de déduire les courbes d'impédance des bolomètres pour différents courants à différentes températures. Les différents modèles de bolomètres peuvent finalement être testés et validés à partir de ces courbes IV obtenues à différentes températures.
- **NOI**, [22] : Afin de caractériser les propriétés de bruit d'HFI et de sa chaîne de lecture (Niveau bruit blanc, bruit en $1/f$), on a laissé observer l'instrument dans une configuration nominale et optimisée en essayant de le perturber au minimum pendant plusieurs heures, de préférence les nuits de la campagne d'étalonnage.
- **OXT**, [79] : Plusieurs sources en fibre de carbone placées sur un bras mécanique mobile

ont pu être installées temporairement devant un nombre limité de cornets d'HFI pour les éclairer séparément avec un signal optique modulé et contrôlé par un courant de polarisation d'amplitude réglable comme pour CSM. En allumant ces sources sur certains cornets, l'équipe calibration d'HFI a essayé de vérifier qu'il n'y avait pas de cross-talk optique à l'intérieur de l'instrument.

- **POL**, [95] : Sur le même bras motorisé que pour les sources OXT un polariseur rotatif presque parfait a été installé afin d'essayer de mesurer la cross-polarisation.
- **QEC**, [87] : Les mesures QEC consistent à mesurer les capacités parasites sur la chaîne de lecture d'HFI.
- **TAU-CSM**, [80] : Les créneaux générés par la source CSM ont également été utilisés comme signal de référence pour mesurer les constantes de temps de bolomètres d'HFI.
- **TAU-ELS**, [18] : La source ELS (External Light Source) du FTS a été utilisée pour mesurer les constantes de temps des bolomètres indépendamment de TAU-ELS.
- **TSS**, [60] : Les mesures TSS consistent à générer des créneaux de température sur les interfaces à 4K et 18K de l'instrument afin d'étudier le comportement thermique des étages cryogéniques d'HFI en fonctions des variations de température des interfaces entre les étages.

Durant les étalonnages du CQM et du PFM, j'ai été responsable des mesures TSS, EXT et EXT-CSM afin de quantifier précisément les effets systématiques thermiques ainsi que le cross-talk électronique.

3.3 Effets systématiques étudiés

Durant cette thèse mon travail a consisté principalement à identifier et quantifier les effets thermiques ainsi que le niveau de diaphonie électronique durant les campagnes d'étalonnage d'HFI. Des travaux avec les chercheurs en charge du DPC Planck-HFI m'ont également permis de participer à la préparation de la correction de ces effets pour le traitement des données de Planck.

3.3.1 La diaphonie électronique

La diaphonie dans Planck-HFI

Suite aux mesures que j'ai effectuées sur le CQM avec l'équipe d'étalonnage d'HFI, nous avons pu identifier que la diaphonie sur la chaîne électronique d'HFI peut se manifester de deux façons [59]. Le premier effet est l'effet en courant lié à des fuites de courant entre les fils électriques des canaux à l'intérieur la boîte JFET. Le second est lié à l'existence d'une capacité parasite entre deux canaux voisins qui entraîne l'apparition d'un signal parasite proportionnel à l'amplitude du signal sur une voie voisine (Figure 3.4).

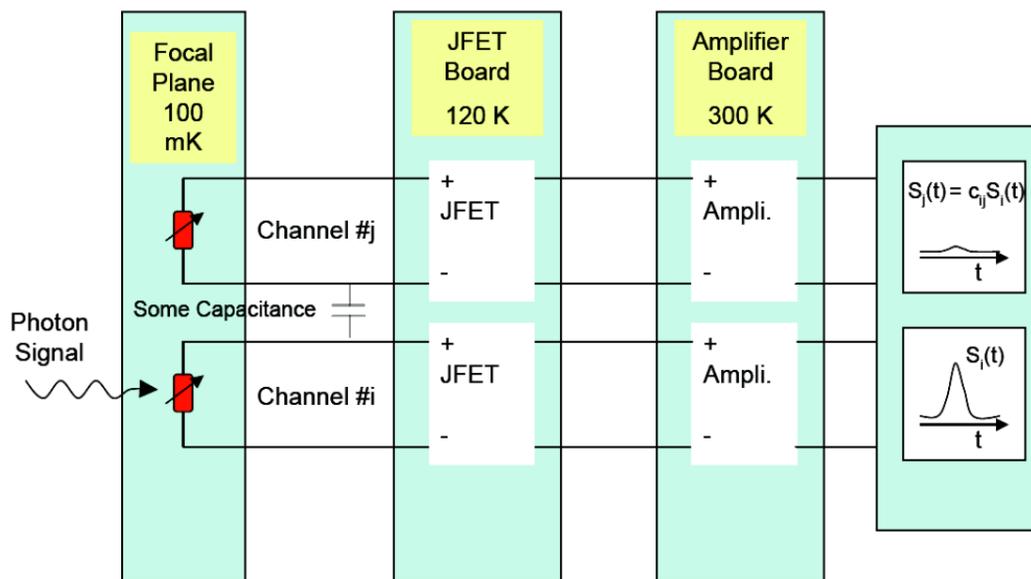


FIG. 3.4 – Illustration du phénomène de diaphonie électronique "en tension" sur la chaîne électronique d'HFI. L'existence d'une capacité parasite entre deux canaux entraîne l'apparition d'un signal parasite à la source ponctuelle observée sur le canal voisin.

Ce second effet est gênant pour les observations d'HFI. Il doit donc être parfaitement quantifié afin de vérifier que son niveau est faible par rapport au niveau maximal acceptable qui aura été spécifié.

Spécification du niveau maximal de diaphonie acceptable dans Planck-HFI

Le contraste maximal entre les sources galactiques à 857 GHz est de 10000 (l'émission des sources les plus brillantes est 10000 fois plus grande que pour les sources les plus faibles). Dans le pire cas, si un cornet voit une source brillante (d'amplitude 10000) alors qu'un autre cornet à la même fréquence d'observation image une source sombre (d'amplitude 1), le coefficient de diaphonie $C_{i/j}$ entre les deux voies associées aux deux bolomètres correspondants devra être plus petit qu'un tiers de 10^{-4} pour que le signal de cross-talk parasite sur la voie sombre soit négligeable par rapport à la source sombre observée.

$C_{i/j}$ doit donc être inférieur à $0.33 \cdot 10^{-4}$ pour le canal à 857 GHz. $C_{i/j}$ doit alors être inférieur à 90 dB si on exprime ce chiffre en décibels ($-20\log(0.33 \cdot 10^{-4})=90$).

Comme on le verra dans le Chapitre 6, la boîte JFET est la source la plus importante de diaphonie électronique dans la chaîne électronique d'HFI. C'est pourquoi, l'équipe projet d'HFI a fixé comme spécification, un niveau de diaphonie maximum de 60 dB entre chaque voies de la boîte JFET avec un objectif de performance plutôt aux alentours de 80 dB. Les résultats obtenus durant les tests de la boîte JFET donnent des valeurs meilleures que la spécification de 60 dB pour tous les couples de voies testés. Néanmoins, afin de vérifier ces mesures et de les compléter, j'ai réalisé plusieurs séries de mesure de diaphonie sur la chaîne de lecture d'HFI durant les étalonnages au sol de l'instrument. Les mesures JFET ont notamment été complétées par les mesures que j'ai coordonnées : j'ai mesuré les effets de cross-talk entre les voies des différentes ceintures, ce qui n'avait pas été fait sur la boîte JFET.

3.3.2 Les effets thermiques

Dans Planck-HFI les effets thermiques sont prépondérants puisque la sensibilité finale de l'instrument est directement proportionnelle à la température de refroidissement des détecteurs bolométriques autour de 0.1 K ainsi que sa stabilité.

Description des effets thermiques dans Planck-HFI

Les fluctuations de température des étages cryogéniques d'HFI, du télescope et du satellite peuvent générer un signal optique additif ou « lumière parasite », dont l'amplitude peut-être calculée par la loi d'émission thermique de corps noir.

Les fluctuations propres des système cryogéniques actifs de Planck [54] sont la source principale de fluctuations de température de ces éléments vus par le système optique d'HFI.

Les fluctuations attendues sur le Sorption Cooler sont caractérisées par une fluctuation périodique de plusieurs centaines de secondes correspondant aux cycles des six compresseurs du réfrigérateur (Figure 3.5). Ces fluctuations ont été mesurés au sol durant les campagnes de test du modèle de vol du réfrigérateur à JPL et à CSL (CSL-PFM1).

Les fluctuations intrinsèques du réfrigérateur 4K ont pu être mesurées pour la première fois par l'équipe calibration d'HFI lors du test CQM au CSL du prototype du réfrigérateur 4K sur le satellite. Aucune mesure sous-système n'avait pu être réalisée auparavant car la sensibilité ainsi que la fréquence de lecture des thermomètres placés sur le réfrigérateur à 4K sont insuffisantes pour cela. Durant les test CSL-CQM, j'ai utilisé la sonde Cernox placée à l'arrière de la boîte 4K d'HFI pour mesurer ces fluctuations quand le réfrigérateur à 4 K était en marche. Le résultat obtenu est présenté sur la Figure 3.6. On constate sur cette figure que le réfrigérateur à 4 K

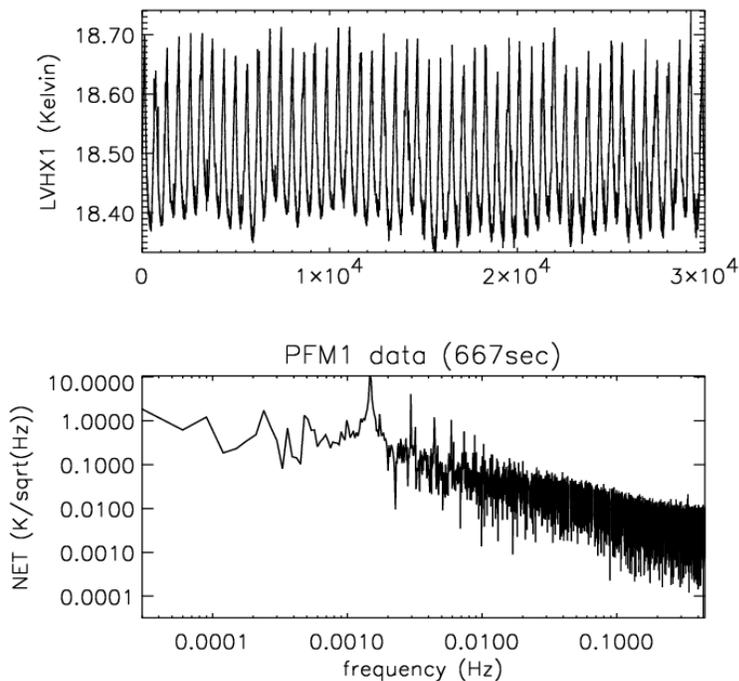


FIG. 3.5 – *Haut* : Fluctuations intrinsèques du Sorption Cooler mesurées avec 1 point par seconde durant le test PFM1 au CSL (cas 667 secondes de période). *Bas* : Spectre d'amplitude associé aux fluctuations du Sorption Cooler.

possède également des fluctuations propres de l'ordre de quelques minutes (environ 10 minutes pour la période propre de fluctuation la plus basse fréquence).

Les fluctuations intrinsèques de la tête froide de la dilution He3/He4 peuvent être observées directement sur les thermomètres fins de l'étage PID1. La Figure 3.7 présente ces fluctuations observées par la sonde PID1R durant la campagne CSL-CQM.

Nous verrons par la suite que ces fluctuations intrinsèques doivent être atténuées par les systèmes de contrôle actif et passif d'HFI pour que les effets systématiques associées soient négligeables pour Planck.

Spécification de stabilité de température des étages cryogéniques de Planck-HFI

Soit $P_r(\nu)$ la puissance de background issue d'une source thermique à la température T et incidente sur un bolomètre d'HFI. D'après l'équation 2.11, on a alors :

$$P_r(\nu) \simeq T_r \varepsilon B_\nu(T, \nu) \Delta\nu N_{modes} \lambda^2 \quad (3.1)$$

La variation de puissance incidente sur le bolomètre induite par une fluctuation de température ΔT de la source thermique se calcule alors avec la relation 3.2 :

$$\Delta P_r(\nu) \simeq T_r \varepsilon \frac{\partial B_\nu(T, \nu)}{\partial T} \Delta T \Delta\nu N_{modes} \lambda^2 \quad (3.2)$$

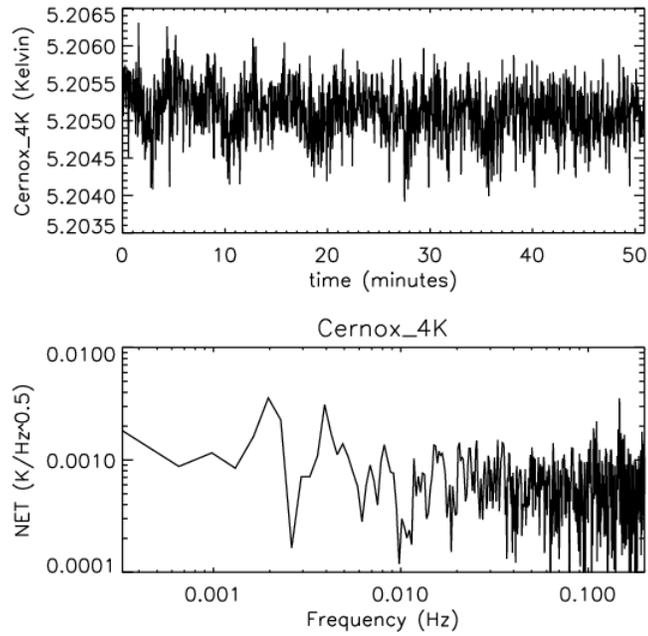


FIG. 3.6 – *Haut* : Fluctuations intrinsèques du réfrigérateur à 4 K mesurées sur le CQM durant le test CSL. *Bas* : NET associée aux fluctuations du réfrigérateur à 4 K.

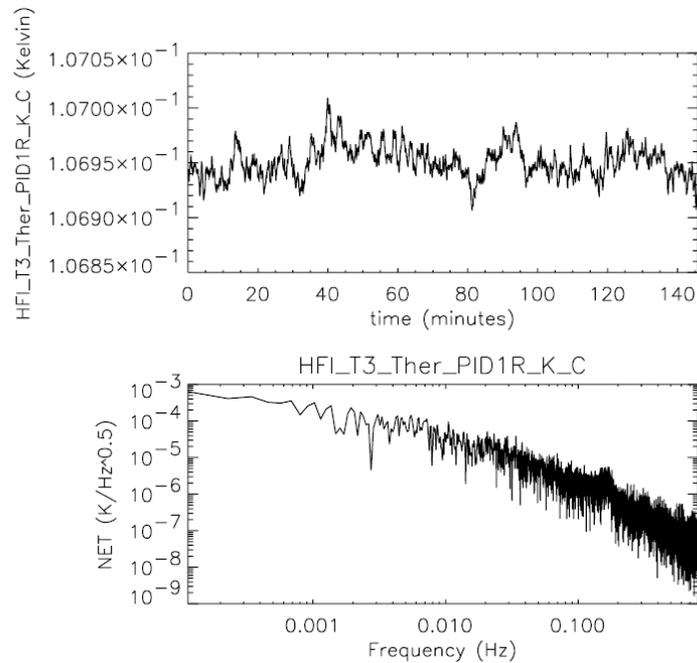


FIG. 3.7 – *Haut* : Fluctuations intrinsèques de la tête froide de la dilution mesurées sur le CQM durant le test CSL. *Bas* : NET associée aux fluctuations du réfrigérateur 0.1K à dilution.

La NEP sur le bolomètre associée à la température équivalente de bruit (NET) de la fluctuation de température ΔT se déduit directement de la relation 3.2 (d'après [43]) :

$$NEP(\nu, \Delta T) \simeq T_r \varepsilon \frac{\partial B_\nu(T, \nu)}{\partial T} NET \Delta \nu N_{modes} \lambda^2 \quad (3.3)$$

Afin que l'effet systématique associé à la fluctuation ΔT reste négligeable on impose que :

$$NEP(\nu, \Delta T) \leq \beta NEP_{bolo} \quad (3.4)$$

Le niveau maximum toléré pour l'effet systématique associé à ΔT est alors fixé par la valeur du paramètre β . En choisissant $\beta = 0.3$, on impose que la NEP associée à l'effet n'excède pas 10% environ de la NEP totale NEP_{bolo} sur les bolomètres d'HFI.

Dans le calcul de spécification de stabilité de température, on doit aussi tenir compte de la redondance des observations dans les cercles Planck sur le ciel. On choisit de se placer dans le pire cas pour HFI, celui des systématiques "spin-synchronous", c'est à dire des signaux parasites qui fluctuent avec la même périodicité que la rotation du satellite sur lui-même (60 secondes). La valeur de l'effet systématique est alors la même à chaque tour. Le moyennage sur 50 tours ou plus ne réduit pas l'effet contrairement au bruit de mesure bolométrique (NEP_{bolo}) qui est un bruit à moyenne nulle qui peut donc être réduit de façon utile en utilisant la redondance des observations sur le ciel. La valeur finale de la NEP du bruit des observations moyennées sur les cercles est alors égale à la NEP_{bolo} divisée par la racine du nombre de cercles $N_{circles}$ moyennés. Afin de tenir compte de cette inefficacité de la redondance sur les cercles pour les effets spin-synchronous, on impose donc que la NEP associée à la fluctuation ΔT soit plus petite que la NEP_{bolo} multiplié par β et divisé par la racine du nombre de cercles $N_{circles}$:

$$NEP(\nu, \Delta T) \leq \beta \frac{NEP_{bolo}}{\sqrt{N_{circles}}} \quad (3.5)$$

Par ailleurs, on doit tenir compte de la redondance des bolomètres (4 ou 8 canaux photométriques pour chaque bande dans le plan focal d'HFI). En supposant que leurs fluctuations de température sont indépendantes, on a :

$$NEP(\nu, \Delta T) \leq \beta \frac{NEP_{bolo} \sqrt{N_{bolos}}}{\sqrt{N_{circles}}} \quad (3.6)$$

A partir des relations 3.3 et 3.5, on peut alors déduire la valeur maximale autorisée pour la densité spectrale d'amplitude de température (notée NET ici) associée au rayonnement d'une source thermique de température T :

$$T_r \varepsilon \frac{\partial B_\nu(T, \nu)}{\partial T} NET_{rad} \Delta \nu N_{modes} \lambda^2 \leq \beta \frac{NEP_{bolo} \sqrt{N_{bolos}}}{\sqrt{N_{circles}}} \quad (3.7)$$

$$NET_{rad} \leq \frac{\beta NEP_{bolo} \sqrt{N_{bolos}}}{T_r \varepsilon \Delta \nu N_{modes} \lambda^2 \sqrt{N_{circles}} \frac{\partial B_\nu(T, \nu)}{\partial T}} \quad (3.8)$$

avec :

$$\frac{\partial B_\nu(T, \nu)}{\partial T} = \frac{\partial \left(\frac{\frac{2h\nu^3}{c^2}}{e^{\frac{h\nu}{k_b T}} - 1} \right)}{\partial T} = \frac{- \left(-\frac{k_b h \nu}{k_b^2 T^2} \right) e^{\frac{h\nu}{k_b T}} \frac{2h\nu^3}{c^2}}{\left(e^{\frac{h\nu}{k_b T}} - 1 \right)^2} = \frac{\frac{2h^2 \nu^4}{k_b T^2 c^2} e^{\frac{h\nu}{k_b T}}}{\left(e^{\frac{h\nu}{k_b T}} - 1 \right)^2} \quad (3.9)$$

Pour les effets par conduction des variations de température de l'étage 0.1K la variation de puissance par conduction thermique est donnée par :

$$\Delta P_{cond} \simeq \frac{\partial W}{\partial T} \Delta T = \left(G - \frac{\alpha R I^2}{T} \right) \Delta T \quad (3.10)$$

On a alors :

$$NET_{cond} \leq \frac{\beta NEP_{bolo}}{\left(G - \frac{\alpha R I^2}{T} \right) \sqrt{N_{bolos}}} \quad (3.11)$$

Les valeurs des NET maximales associées aux fluctuations de température des sources d'effets thermiques dans Planck-HFI pour un β de 0.3 sont résumées dans le tableau 3.3. Les

Fréquence (GHz)	857	545p	353	217	143	100
$NEP_{bolo} (\times 10^{-17} \text{ W}/\sqrt{Hz})$	15.04	4.89	3.11	1.82	1.54	1.30
$A\Omega (\times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{sr})$	1.45	1.45	1.45	1.91	4.40	9.00
$\frac{\Delta\nu}{\nu}$	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
T_{50K}	50	50	50	50	50	50
$\varepsilon \times Tr_{50K}$	0.004	0.002	0.004	0.004	0.004	0.004
T_{4K}	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
$\varepsilon \times Tr_{4K}$	0.30	0.15	0.30	0.30	0.30	0.30
$T_{1.6K}$	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6
$\varepsilon \times Tr_{1.6K}$	0.20	0.10	0.20	0.20	0.20	0.20
$\frac{\partial B_\nu(T,\nu)}{\partial T} _{4K} (\times 10^{-17})$	0.08	0.57	1.02	0.85	0.49	0.27
Spécification 4K ($\mu K/\sqrt{Hz}$)	241.55	30.92	9.70	10.39	11.45	10.60
$\frac{\partial B_\nu(T,\nu)}{\partial T} _{1.6K} (\times 10^{-17})$	0.00	0.00	0.01	0.09	0.16	0.15
Spécification 1.6K ($\mu K/\sqrt{Hz}$)	287498299	134783	1372	143.79	52.07	28.45
$\frac{\partial B_\nu(T,\nu)}{\partial T} _{50K} (\times 10^{-17})$	21.30	8.90	3.79	1.44	0.63	0.31
Spécification 50K ($\mu K/\sqrt{Hz}$)	69.61	147.42	196.60	457.77	677.07	707.06

TAB. 3.3 – Besoins de stabilités de température pour chaque bande HFI pour un β de 0.3 pour les fluctuations de température aléatoires entre 10 mHz et 100 Hz (Lamarre et al., 1999).

spécifications de stabilité présentées dans le tableau 3.3 ont été calculées pour des fluctuations spin-synchronous pour la fréquence de spin $f_{spin} \simeq 0.0167$ Hz. Afin d'avoir un peu de marge, on impose que les spécifications de stabilité de température soient valables jusqu'à 0.01 Hz. Pour les fluctuations aléatoires à plus haute fréquence, on impose également un β de 0.3 afin que les effets thermiques haute fréquence n'excèdent pas 10% du bruit de mesure bolométrique avant moyennage sur les cercles. Finalement, pour tous les étages cryogéniques d'HFI, la spécification entre 0.01 et 100 Hz est la même que celle calculée pour f_{spin} (tableau 3.4).

Composant	Couplage	Specification	Imposée par
Platine bolomètre à 0.1K	Conduction	$19 \text{ nK} \cdot \text{Hz}^{-0.5}$	217 GHz
Filtres et cornets à 0.1K	Radiatif	$152 \text{ } \mu\text{K} \cdot \text{Hz}^{-0.5}$	100 GHz
Filtres et lentille à 1.6K	Radiatif	$28 \text{ } \mu\text{K} \cdot \text{Hz}^{-0.5}$	100 GHz
Filtres et cornets à 4K	Radiatif	$10 \text{ } \mu\text{K} \cdot \text{Hz}^{-0.5}$	143 GHz
Télescope	Radiatif	$69 \text{ } \mu\text{K} \cdot \text{Hz}^{-0.5}$	857 GHz

TAB. 3.4 – *Spécification de stabilité de température entre 10 mHz et 100 Hz pour $\beta = 0.3$ (d'après [46]).*

Deuxième partie

Etalonnages au sol des effets systématiques dans Planck-HFI

Chapitre 4

Les effets thermiques

« Lorsqu'il fait assez sombre. On peut voir les étoiles »

Charles A. Beard

Afin de quantifier les différents types d'effets d'origine thermique sur HFI, j'ai réalisé plusieurs séries de mesures des fonctions de transfert thermique entre les étages cryogéniques sur les modèles de vol et de qualification d'HFI. La mesure de ces fonctions de transfert a alors permis de vérifier l'efficacité du système de contrôle passif de la température d'HFI. Durant les tests au sol de ces deux instruments, j'ai également pu vérifier l'efficacité du système de contrôle thermique actif d'HFI basé sur des contrôleurs de type PID. Ce chapitre présente les résultats ainsi obtenus durant cette thèse sur la quantification des effets thermiques.

4.1 Mesures des fonctions de transfert thermiques entre les étages cryogéniques d'HFI

4.1.1 Fonctions de transfert thermiques mesurées sur le CQM dans le cryostat Saturne

Description du cryostat Saturne

Le cryostat Saturne, qui équipe la station d'étalonnage de l'IAS à Orsay, permet de tester l'instrument HFI en le faisant fonctionner à très basse température. Le coeur du cryostat est refroidi à 2 K par remplissage d'hélium liquide d'une platine d'aluminium : "la platine 2K" (Figure 4.1). L'étage à 4 K d'HFI est relié à cette platine par un lien thermique. Dans ce cryostat, les interfaces suivantes sont régulées sur HFI : la platine 18K, les "flanges" à 18K et l'arrière de la boîte 4K (Figure 4.2).

Ces systèmes de régulation sont basés sur l'utilisation d'un algorithme PID (voir chapitre 2 et 6) couplé à des systèmes de résistances chauffantes reliées à ces interfaces. L'arrière de la boîte 4K est donc maintenu à une température résultant de l'équilibre entre la puissance

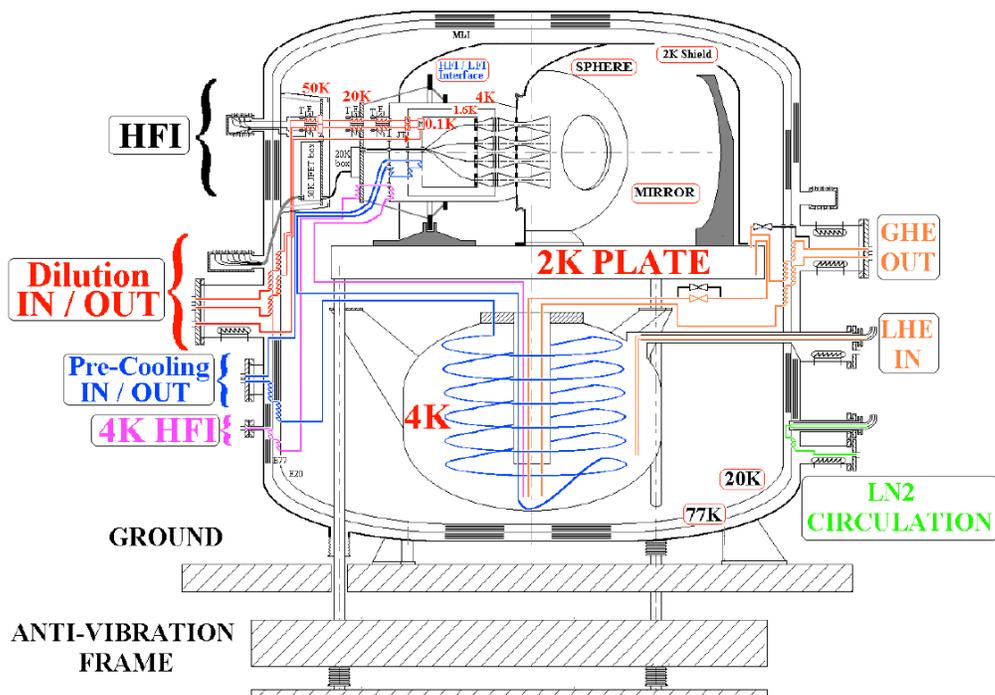


FIG. 4.1 – Vue schématique en coupe du cryostat Saturne.

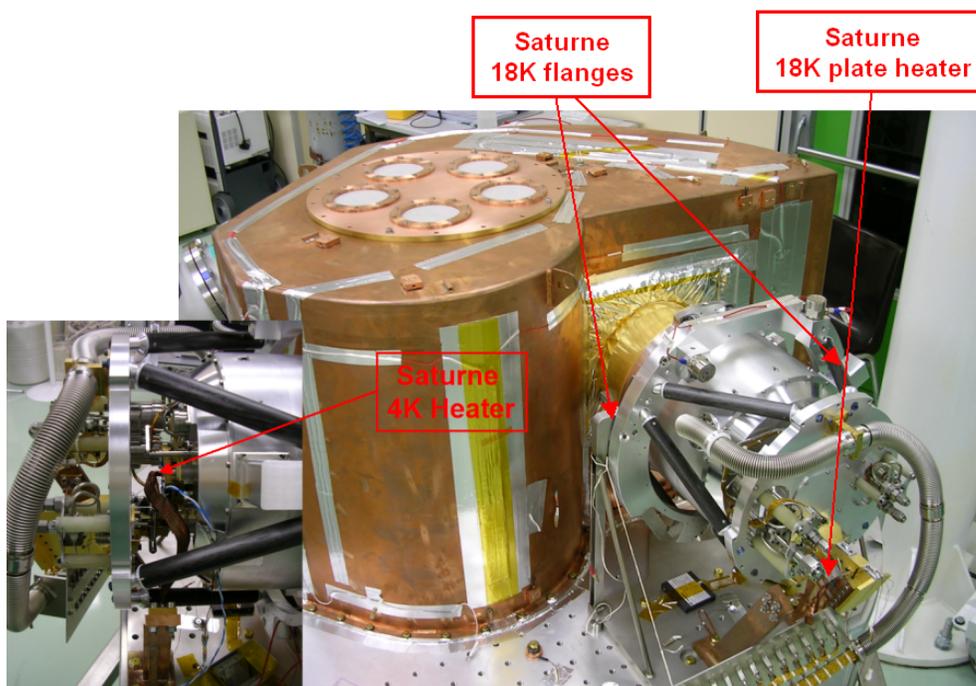


FIG. 4.2 – Les trois interfaces d'HFI régulées dans le cryostat Saturne.

de refroidissement de la platine 2K et la puissance de chauffage de la régulation placée sur cette boîte. La température de régulation à l'arrière de la boîte 4K est complètement ajustable par les opérateurs du cryostat Saturne présents à la station d'étalonnage durant chaque campagne d'étalonnage de test d'HFI. Les températures des interfaces de la platine à 18K et des 18K "flanges" sont contrôlées suivant le même principe. Les températures des étages à 4 K et 18 K d'HFI dans Saturne sont donc entièrement contrôlées et fixées par les paramètres des trois régulations PID présentées ci-dessus. Une fois l'étage à 4 K d'HFI stabilisé autour de sa température de fonctionnement, le système à dilution de l'étage 0.1K entre en fonction. Après un courte semaine de « descente en froid », les étages à 0.1 K et 1.6 K ont atteints leur température de fonctionnement et l'instrument HFI peut alors être testé dans des conditions de fonctionnement opérationnelles.

Description des mesures TSS sur le CQM

J'ai pu réaliser une série de mesures des fonctions de transfert thermique sur le prototype d'HFI lors de la campagne de calibration CQM [57]. Pour cela, deux types de stimuli thermiques ont été générés sur HFI : une sinusoïde et des créneaux de différentes périodes. Durant la campagne CQM, seule la régulation à l'arrière de la boîte 4K d'HFI (Figure 4.2) a été utilisée pour générer des stimuli thermiques sur les étages cryogéniques de l'instrument. Ces mesures, désignées dans le plan d'étalonnage d'HFI sous le sigle TSS pour "Thermal Stages Sensitivity", ont été toutes réalisées le 21 novembre 2004 entre 16h00 et 20h00 (heures QLA).

La Figure 4.3 présente une première mesure TSS sur le CQM avec un stimulus de type sinusoïde de 10 minutes de période. Dans cette mesure aucune des quatre régulations PID d'HFI (4K, 1.6K, PID1 et PID2) n'était allumée. Cette mesure permet donc d'évaluer les performances du système de contrôle passif de la température entre les étages cryogéniques d'HFI. Sur cette première mesure, on voit clairement que les fluctuations de l'étage 4K induisent des fluctuations parasites sur les étages 1.6K et 0.1K (PID1). L'effet du 4K sur la température du bolomètre 100-1 est également visible sur cette première figure. Même si au premier ordre, le signal du bolomètre semble monotone et suivre linéairement la dérive de température de l'étage 0.1K, on devine un signal périodique de 16 minutes presque en phase avec celui du thermomètre PID4C superposé à la dérive. Puisque la dérive du signal du bolomètre est corrélée à la dérive de température du bain cryogénique à 0.1K, le signal périodique détecté aux bornes du bolomètre s'explique bien par un effet radiatif de l'étage à 4K sur le bolomètre.

Une seconde mesure avec un stimulus de type créneau et de période 12 secondes environ est représentée Figure 4.4. Dans cette mesure, on peut quantifier l'effet du 4K sur l'étage dilution pour des périodes rapides de 12 secondes. L'amplitude des fluctuations de l'étage à 4K étant beaucoup plus faible que précédemment, l'effet sur le signal du bolomètre 100-1 ne peut pas être distingué sur la figure 4.4.

Une troisième mesure d'amortissement passif a également été réalisée sur le CQM. Cette mesure avec 12 stimuli successifs de type créneau et de période 40 secondes environ est représentée Figure 4.5. Sur cette figure, l'effet du 4K sur le signal du bolomètre 100-1 est clairement visible car l'amplitude du changement de température sur les cornets à 4K est très importante. Une telle mesure peut donc être utilisée pour quantifier le couplage optique des bolomètres avec les cornets à 4K. Malheureusement, il n'en est rien pour cette mesure car il a été établi a posteriori que la source optique modulée CS2 présente sur le setup optique de Saturne était restée allumée

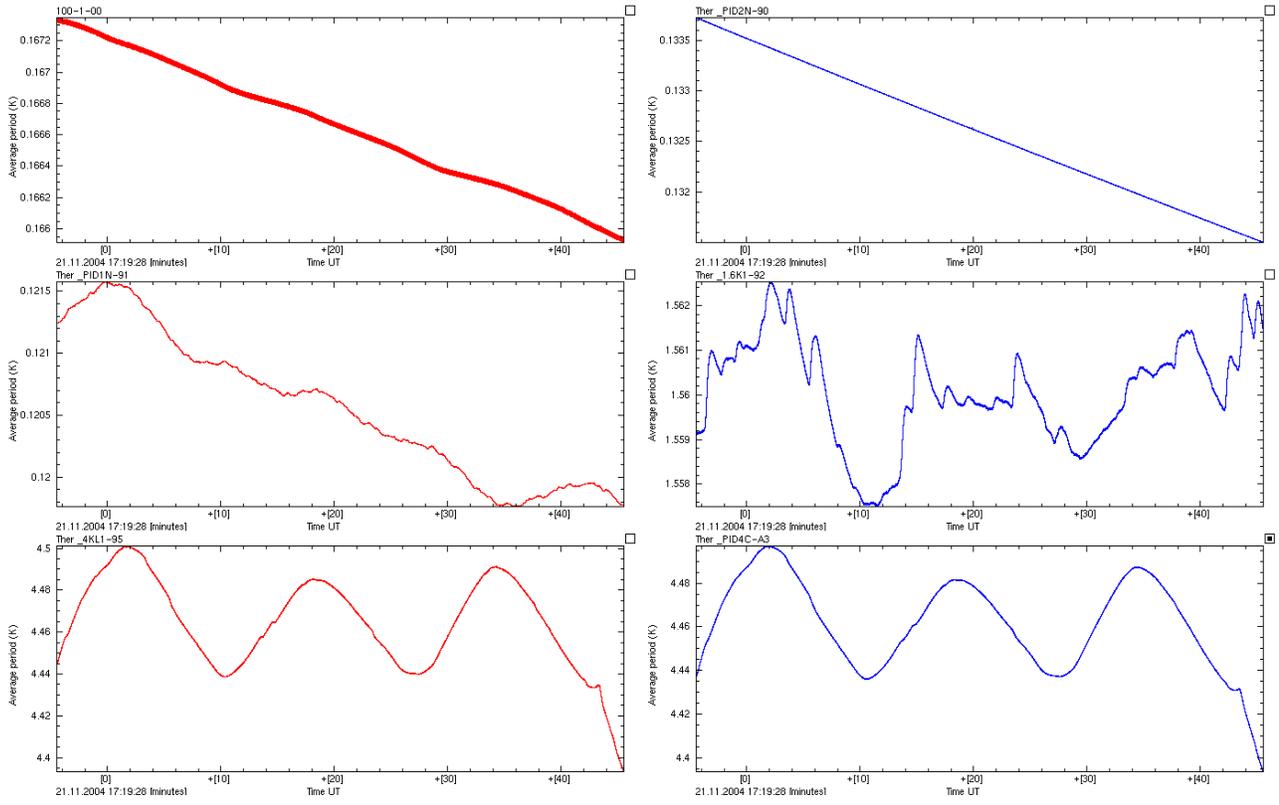


FIG. 4.3 – Mesures TSS sur le CQM avec une sinusoïde de 16 minutes de période. Les températures des cornets à 4K (PID_{4C}), du côté de la boîte 4K (4KL1), des filtres 1.6K (1.6K1), des étages 0.1K (PID1N et PID2N) et de la température du bolomètre 100-1 (100-1-00) sont représentées ici (voir la partie 2.6 pour la localisation exacte des thermomètres).

par erreur durant les mesures TSS sur le CQM (Figure 4.6). Le signal de CS2 se superpose alors à l'effet du 4K sur le signal des bolomètres ce qui réduit la précision de mesure de l'effet du 4K avec ces données.

A partir de ces trois mesures TSS, il est possible de déduire différentes fonctions de transfert (FDT) à l'intérieur de la boîte 4K et vers les étages cryogéniques inférieurs. Les différents FDT déduites sont présentées ci-dessous.

Fonction de transfert entre l'arrière et les cornets de la boîte 4K

A partir de l'analyse spectrale des mesures TSS présentées précédemment, il est possible de déduire la FDT entre l'arrière de la boîte 4K et les cornets dos à dos. L'analyse spectrale de la mesure avec le stimulus sinusoïdal de 16 minutes est représentée sur la Figure 4.7. Le pic à la fréquence 1/940 Hz (0.00106 Hz) est clairement visible sur les spectres des thermomètres tt1340 et PID4C. Le rapport de ces deux pics permet de déduire un premier point de mesure de la FDT correspondante. J'ai trouvé une valeur de 100% pour ce premier point de mesure de la fonction de transfert entre l'arrière et les cornets de la boîte 4K. Le gain statique attendu pour ce transfert sur la boîte 4K est de 1 ce qui est logique puisque toute élévation de température

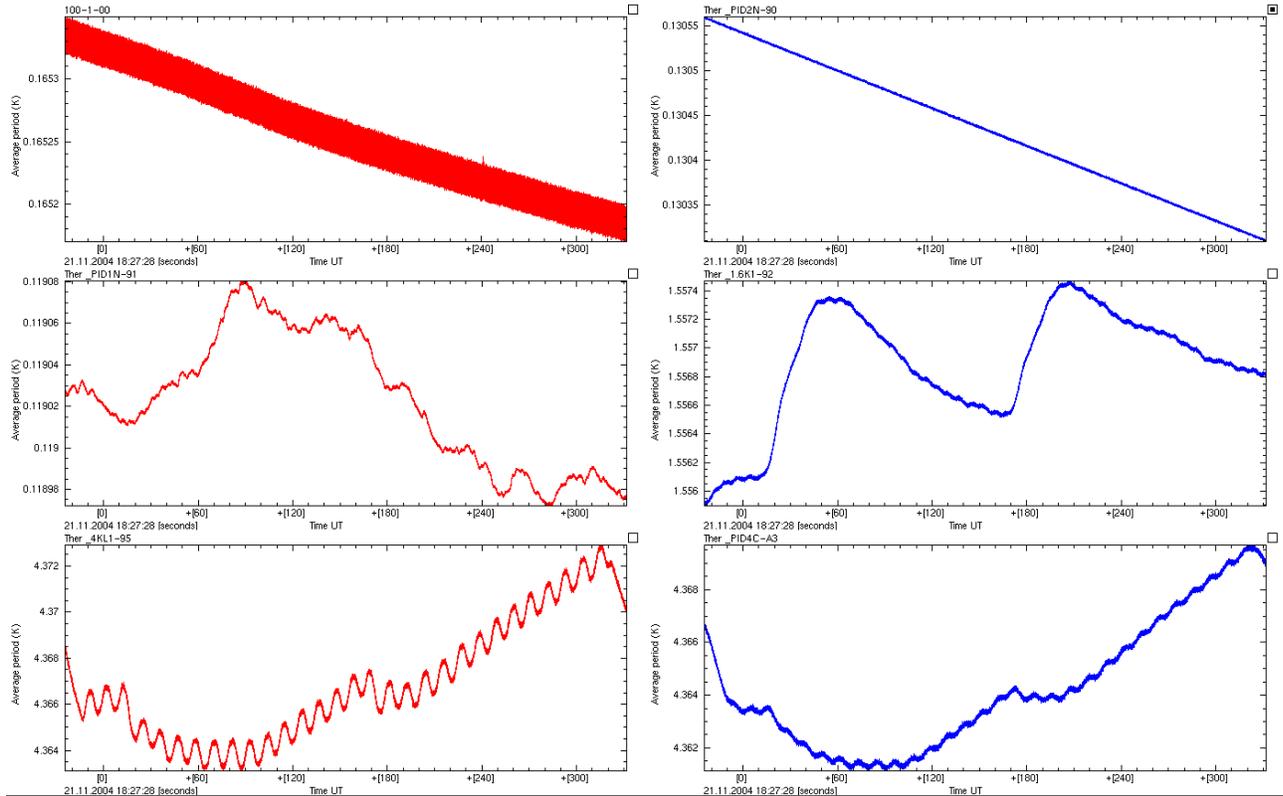


FIG. 4.4 – Mesures TSS sur le CQM avec un créneau de 12 secondes de période. Les températures des cornets à 4K (PID4C), du côté de la boîte 4K (4KL1), des filtres 1.6K (1.6K1), des étages 0.1K (PID1N et PID2N) et de la température du bolomètre 100-1 (100-1-00) sont représentées ici.

d'un point de la boîte 4K se propage à l'ensemble de la boîte 4K, qui peut être considérée comme un système isolé.

Pour essayer de déterminer la fréquence de coude de la fonction de transfert j'ai effectué ensuite l'analyse spectrale de la mesure avec les créneaux de 40 secondes de période. Il faut pour cela au préalable corriger de la dérive basse fréquence superposée au stimulus. Pour corriger cette dérive, j'ai soustrait un vecteur de type polynôme d'ordre 2 ajusté sur les données (Figure 4.8). Après correction on obtient les spectres représentés sur la Figure 4.9.

En effectuant le rapports des pics des spectres des figures 4.7 et 4.9, deux points de la fonction de transfert sont finalement déduits. Les valeurs des points de la FDT obtenues sont données dans le tableau 4.1

L'incertitude sur le point obtenu à la fréquence 1/40 Hz est importante car la sonde tt1340 est échantillonnée à seulement 0.1 Hz ce qui ne permet pas d'avoir une analyse spectrale très fine. La méthode pic à pic n'est pas satisfaisante également car la correction de la dérive basse fréquence n'est pas suffisamment précise pour la même raison. C'est pourquoi, aucun ajustement n'a été fait à partir de ces deux points. D'autres mesures sont nécessaires pour pouvoir déduire la valeur de la constante de temps entre l'arrière et l'avant de la boîte 4K.

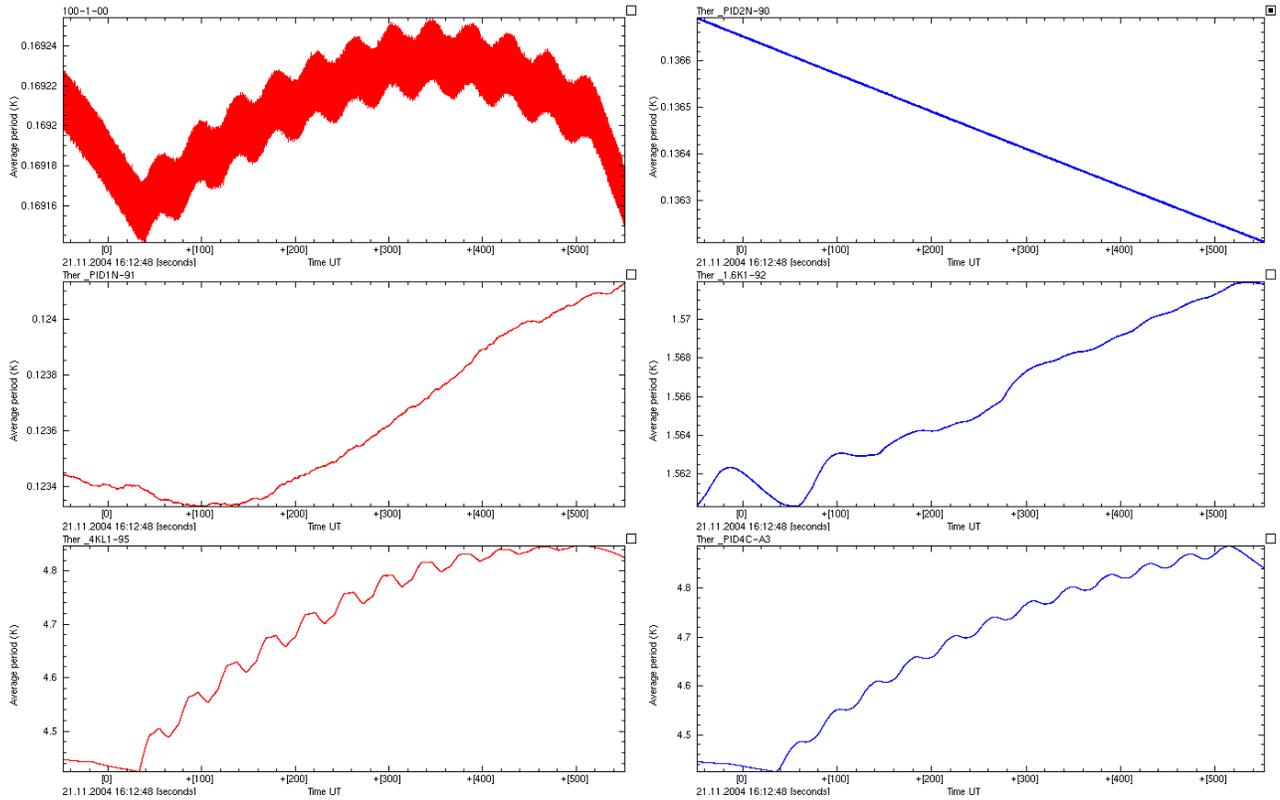


FIG. 4.5 – Mesures TSS sur le CQM avec un créneau de 40 secondes de période. Les températures des cornets à 4K (PID4C), du côté de la boîte 4K (4KL1), des filtres 1.6K (1.6K1), des étages 0.1K (PID1N et PID2N) et de la température du bolomètre 100-1 (100-1-00) sont représentées ici.

Fréquence (Hz)	1/960	1/40
Pic tt1340 (K/ \sqrt{Hz})	0.504126	1.49208
Pic PID4C (K/ \sqrt{Hz})	0.512994	0.108983
Fonction de transfert (K/K)	1.01759	0.0730412

TAB. 4.1 – Valeurs des points mesurés sur la fonction de transfert entre l'arrière et les cornets de la boîte 4K sur le CQM.

Fonction de transfert entre les côtés et les cornets de la boîte 4K

L'analyse spectrale de la mesure avec le stimulus sinusoïdal de 16 minutes pour le thermomètre 4KL1 placé sur le côté de la boîte 4K est représentée Figure 4.10. L'analyse spectrale de la mesure avec les créneaux de 40 et 12 secondes de période pour les mêmes thermomètres sont présentées Figures 4.11 et 4.12. La même analyse a été effectuée pour le thermomètre 4KL2 et les fonctions de transfert présentées Figure 4.13 sont finalement déduites. Les valeurs des points des FDT déduites sont données dans les tableaux 4.2 et 4.3

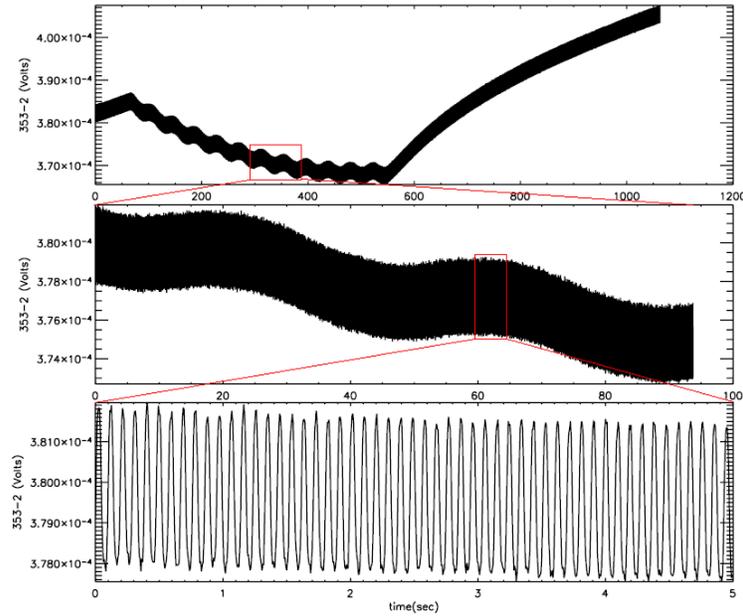


FIG. 4.6 – Zooms successifs sur le signal du bolomètre 353-2 pendant les mesures TSS des étalonnages du CQM.

Fréquence (Hz)	1/960	1/40	3/40	1/12
Pic 4KL1 (K/\sqrt{Hz})	0.918052	0.208413	0.0237727	0.0037004
Pic PID4C (K/\sqrt{Hz})	0.912325	0.115514	0.00570374	0.000619846
Fonction de transfert (K/K)	0.993762	0.554254	0.239928	0.167508

TAB. 4.2 – Valeurs des points mesurés sur la fonction de transfert entre le thermomètre 4KL1 et les cornets de la boîte 4K sur le CQM.

Fréquence (Hz)	1/960	1/40	3/40	1/12
Pic 4KL2 (K/\sqrt{Hz})	1.05984	0.227081	0.0236239	0.00375139
Pic PID4C (K/\sqrt{Hz})	0.912325	0.115514	0.00570374	0.000619846
Fonction de transfert (K/K)	0.860814	0.508688	0.241439	0.165231

TAB. 4.3 – Valeurs des points mesurés sur la fonction de transfert entre le thermomètre 4KL2 et les cornets de la boîte 4K sur le CQM.

Fonction de transfert entre l'arrière de la boîte 4K et les étages 1.6K et 0.1K

J'ai essayé d'utiliser les mesures CQM pour quantifier l'amplitude de l'effet du 4K sur les deux étages cryogéniques à l'intérieur de la boîte 4K. J'ai donc analysé en détail l'effet de l'oscillation basse fréquence de 16 minutes de période sur les étage 1.6K et 0.1K. L'analyse spectrale confirme qu'il y a bien un effet induit à la même fréquence sur ces deux étages (Figure 4.14). Malheureusement, cette analyse ne permet pas de déterminer de façon précise la valeur de la FDT associée, car des oscillations parasites existent sur les mesures des thermomètres

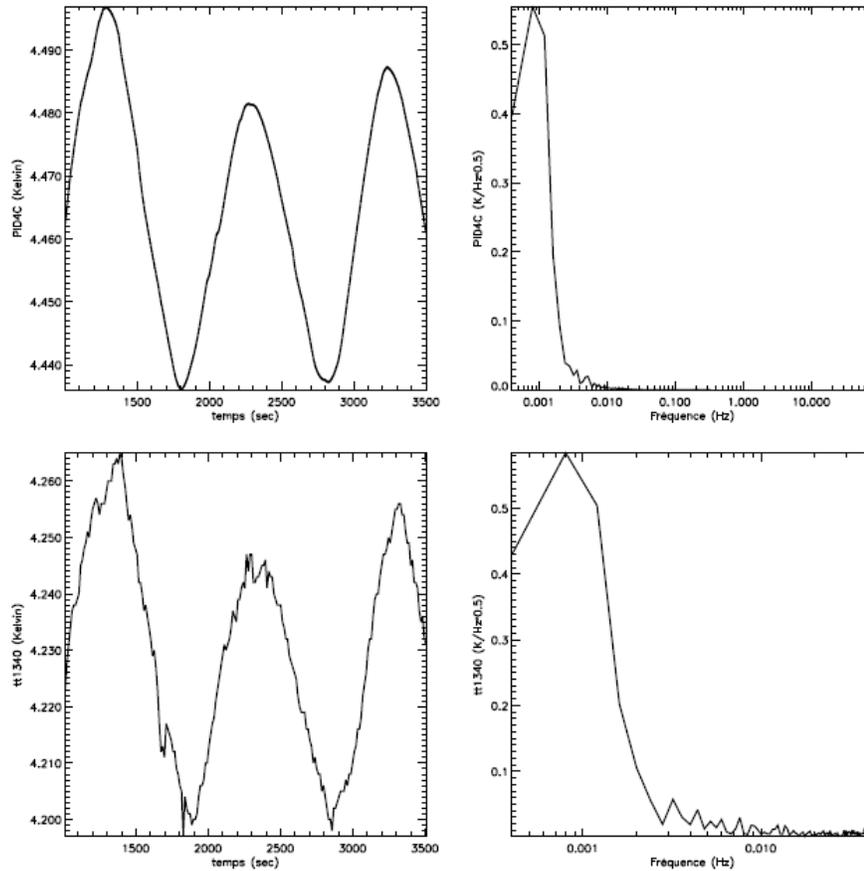


FIG. 4.7 – Analyse spectrale du résultat du stimulus sinusoïdal basse fréquence entre l'arrière et les cornets de l'étage 4K du CQM. En haut à gauche, le signal du thermomètre PID_4C placé sur les cornets à 4K est représenté. Le spectre du signal du thermomètre PID_4C est ensuite représenté en haut à droite. Le signal du thermomètre $tt1340$ placé à l'arrière de la boîte à 4 K est représenté en bas à gauche. Son spectre est représenté en bas à droite.

PID_{1N} et $ther1.6K1$. Des mesures complémentaires ont donc été nécessaires sur le PFM pour pouvoir mesurer les FDT associés à ces deux effets identifiés sur le CQM.

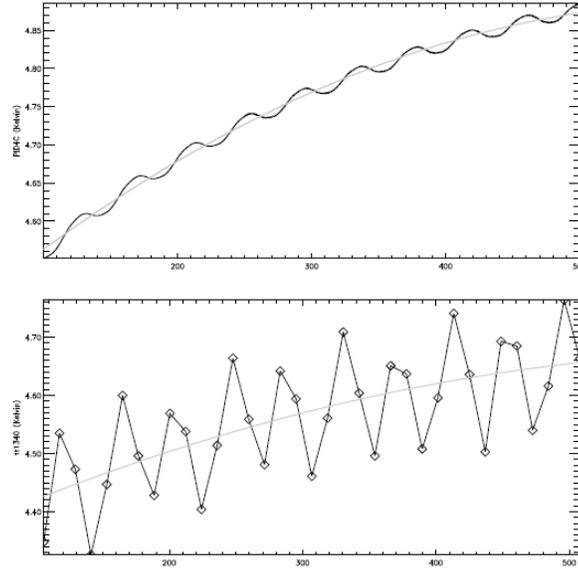


FIG. 4.8 – En noir : Mesures TSS avec les créneaux de 40 secondes de période. Les carrés pour le thermomètre tt1340 représentent les points mesurés. En gris : Polynômes d'ordre 2 ajustés sur les dérivées des mesures des thermomètres PID4C et tt1340 durant ce test.

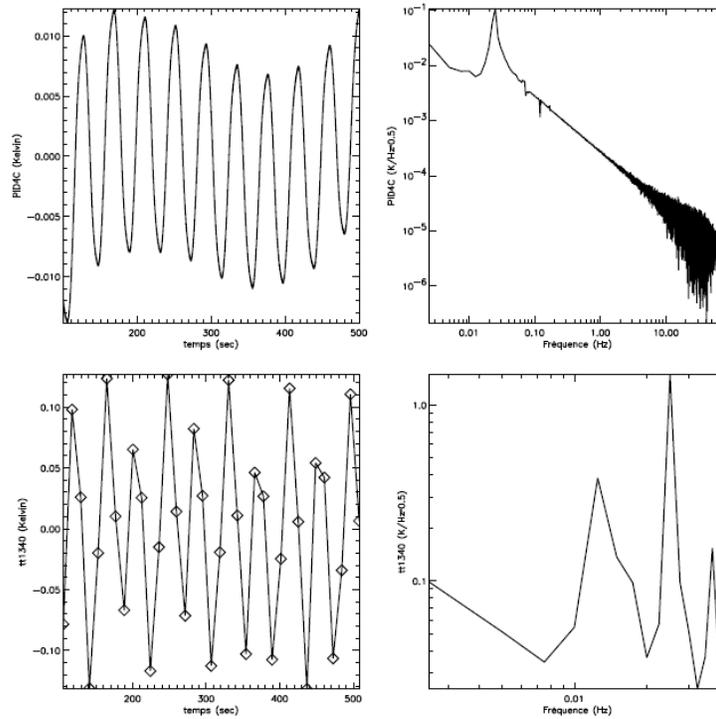


FIG. 4.9 – Analyse spectrale du résultat du stimulus en créneau de 40 secondes de période depuis l'arrière vers les cornets de l'étage 4K du CQM. La dérive basse fréquence des deux thermomètres a préalablement été soustraite par ajustement d'un polynôme du second ordre.

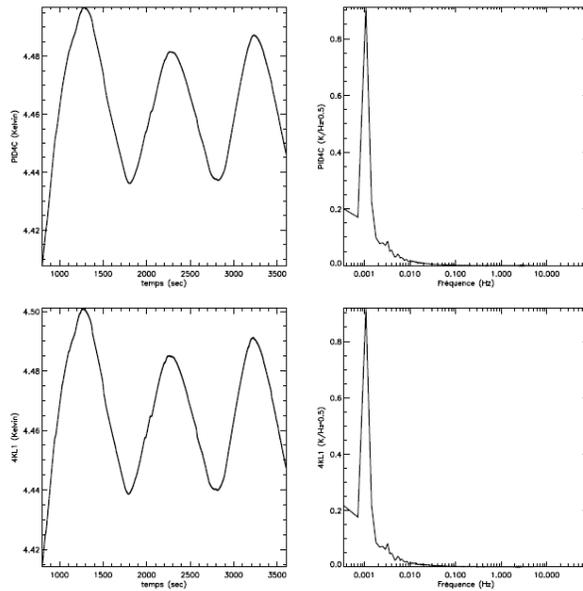


FIG. 4.10 – Analyse spectrale du résultat du stimulus sinusoïdal basse fréquence entre le thermomètres 4KL1 et les cornets de l'étage 4K du CQM.

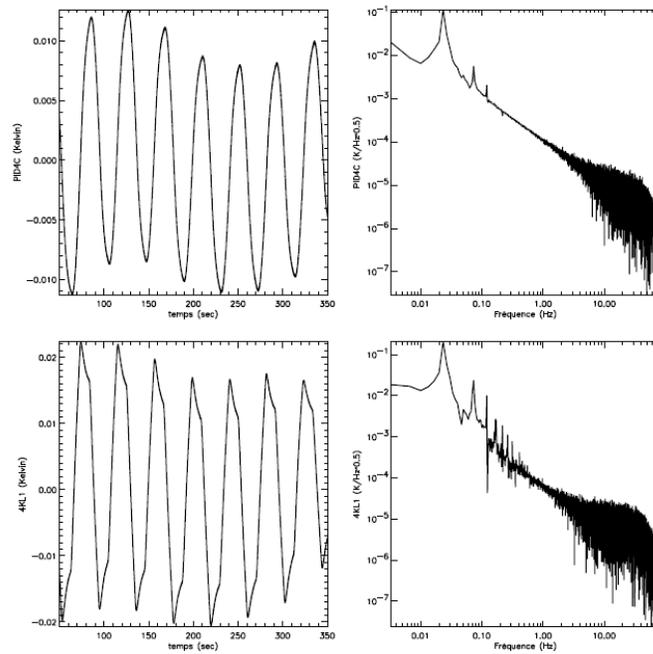


FIG. 4.11 – Analyse spectrale du résultat du stimulus en créneau de 40 secondes de période depuis le thermomètre 4KL1 jusqu'aux cornets de l'étage 4K du CQM. La dérive basse fréquence des deux thermomètres a été préalablement soustraite par ajustement d'un polynôme du second ordre.

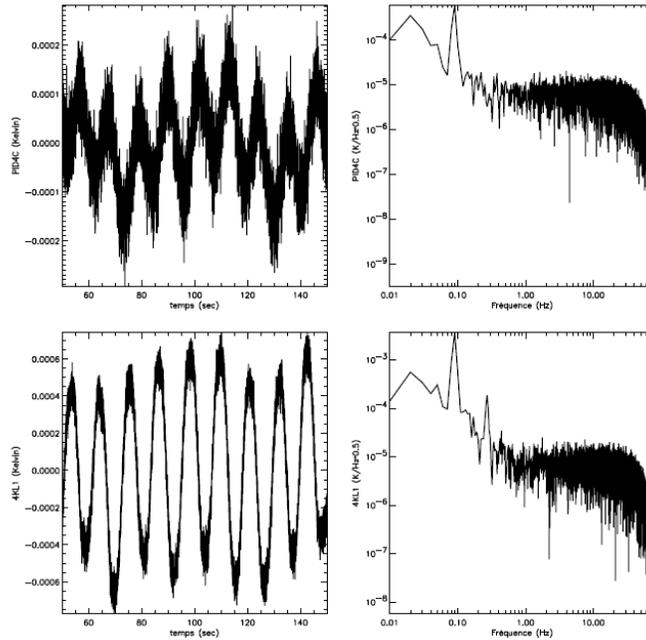


FIG. 4.12 – Analyse spectrale du résultat du stimulus en créneau de 12 secondes de période depuis le thermomètre 4KL1 jusqu'aux cornets de l'étage 4K du CQM. La dérive basse fréquence des deux thermomètres a été préalablement soustraite par ajustement d'un polynôme du second ordre.

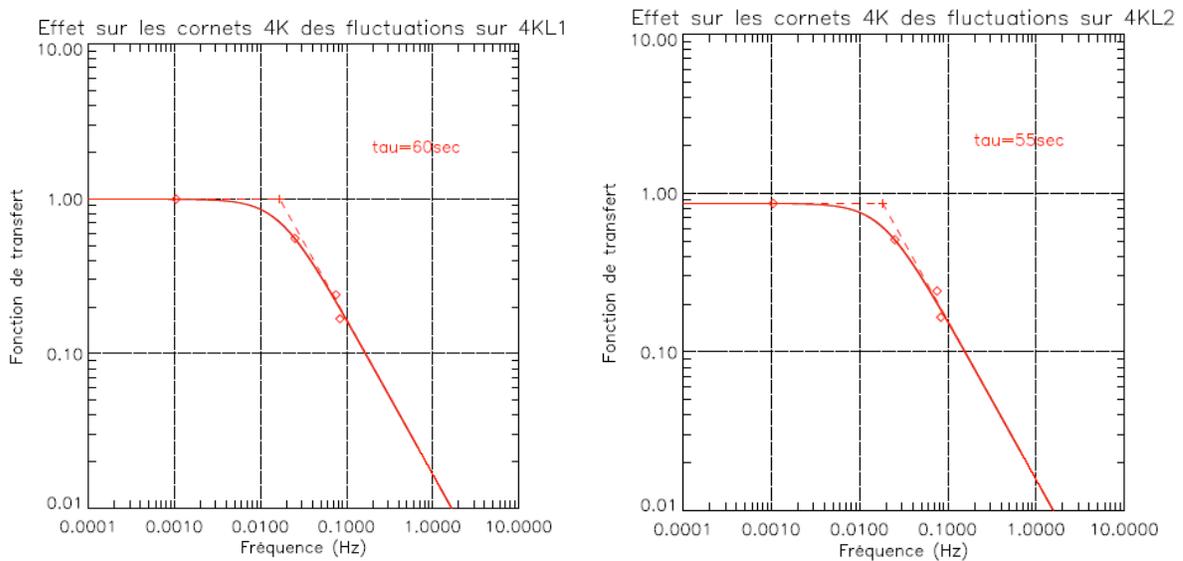


FIG. 4.13 – Fonctions de transfert mesurée sur le CQM entre les côtés et les cornets de la boîte 4K. Les points représentent les mesures. Les profils de filtre ajustés correspondent à des filtres d'ordre 1 avec des constantes de temps $\tau=60$ et 55 secondes pour les load1 et 2 respectivement.

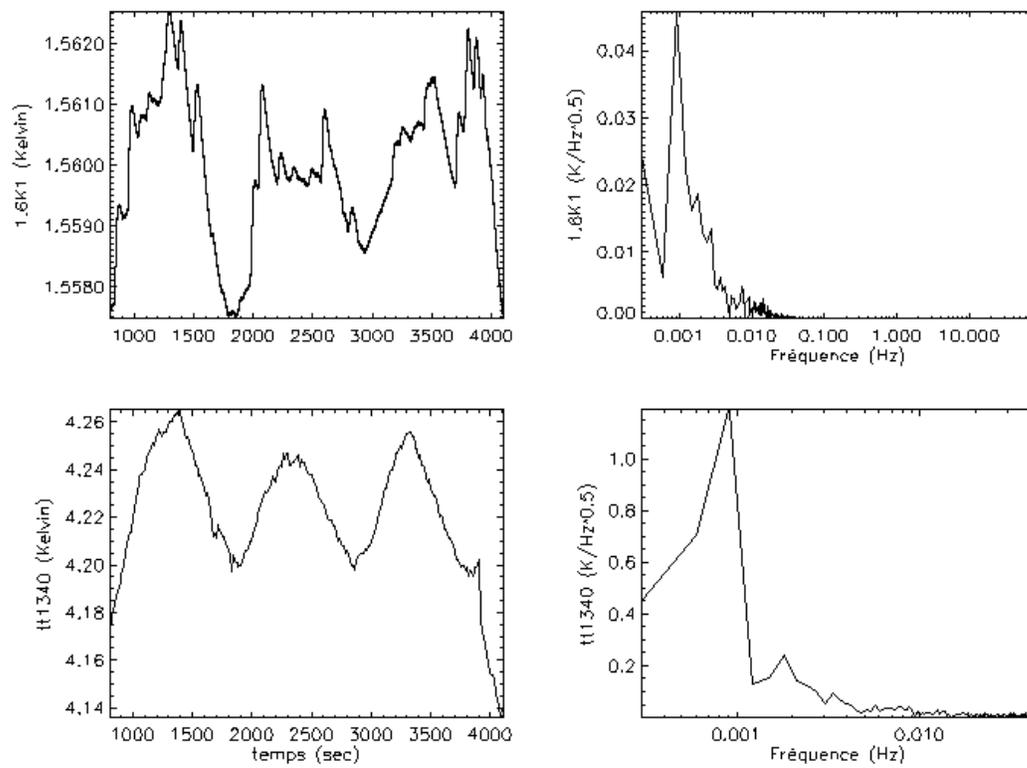


FIG. 4.14 – Analyse spectrale de l'effet du 4K sur l'étage 1.6K pour le stimulus sinusoïdale de 16 minutes de période.

4.1.2 Fonctions de transfert thermiques mesurées sur le PFM dans Saturne

Le but des mesures TSS durant les étalonnages du PFM était de compléter les mesures de fonction de transfert réalisées sur le CQM. J’ai eu systématiquement recours pour cela à des stimuli de type ”step” durant les tests PFM afin de caractériser proprement les gains statiques des fonctions de transferts entre les différents étages.

J’ai d’abord réalisé plusieurs tests TSS durant la très courte campagne de caractérisation du modèle de vol d’HFI. La réponse des cornets 4K à un step de température sur la platine 18K mesurée durant cette campagne PFM-CAR est représentée Figure 4.15. Sur cette figure, on

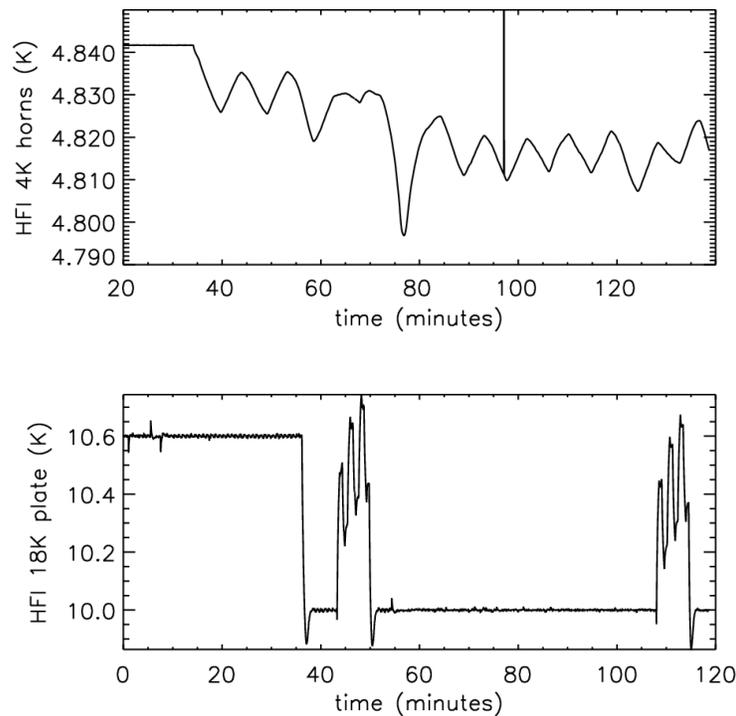


FIG. 4.15 – Test TSS durant la campagne de caractérisation.

constate que la température de la platine 18K n’est pas nominale puisqu’elle est de seulement 10 Kelvin environ. Ceci est dû au fait que le lien thermique entre la platine à 2K de Saturne et l’arrière de la boîte à 4K d’HFI était trop faible. Pour cette raison, il n’a pas été possible de chauffer la platine 18K à sa température nominale de 18K. De plus, la régulation de l’écran 20K du cryostat Saturne entraînait l’apparition d’un signal parasite de 10 minutes de période sur l’étage à 4K d’HFI quand celui-ci n’est pas régulé durant cette campagne PFM-CAR.

Après ces tests TSS, le cryostat Saturne a été modifié entre les runs PFM-CAR et PFM-CAL afin d’augmenter le lien thermique entre l’étage à 4K d’HFI et la platine 18K et afin de réduire les fluctuations induites sur l’étage 4K par l’écran 20K. Finalement, les fluctuations parasites de dix minutes de périodes ont pu être réduites grâce à un meilleur ajustement des paramètres de la régulation associée. Pour des raisons techniques, le lien entre l’étage 4K et la platine 18K n’a pu être augmenté suffisamment pour que l’étage 18K soit chauffé au-delà de 12

Kelvin durant la campagne PFM-CAL.

Enfin, un lien thermique plus important que ce qui est attendu sur le satellite existe entre l'étage 4K et la platine 18K d'HFI quand ce dernier est installé dans Saturne. J'ai pu établir que le gain statique de la fonction de transfert entre ces deux étages est de 17% dans Saturne. Ce lien plus important est lié à un court-circuit thermique entre ces étages, via la platine 2K de Saturne. Pour cette raison seules les fonctions de transfert mesurées à l'intérieur de la boîte 4K dans Saturne sont représentatives de ce qui est attendu en vol pour le comportement thermique d'HFI. Seules ces dernières ont donc été mesurées précisément durant les test TSS du PFM.

Le résultat de ces différentes mesures de fonction de transfert que j'ai réalisées sur le PFM dans Saturne sont présentées ci-dessous.

Fonction de transfert entre l'arrière et les cornets de la boîte 4K

Deux stimuli ont pu être réalisés pour caractériser l'amortissement passif de la boîte à 4K du PFM : un step et une sinusoïde de 667 secondes de période (Figure 4.16). Grâce à ces deux

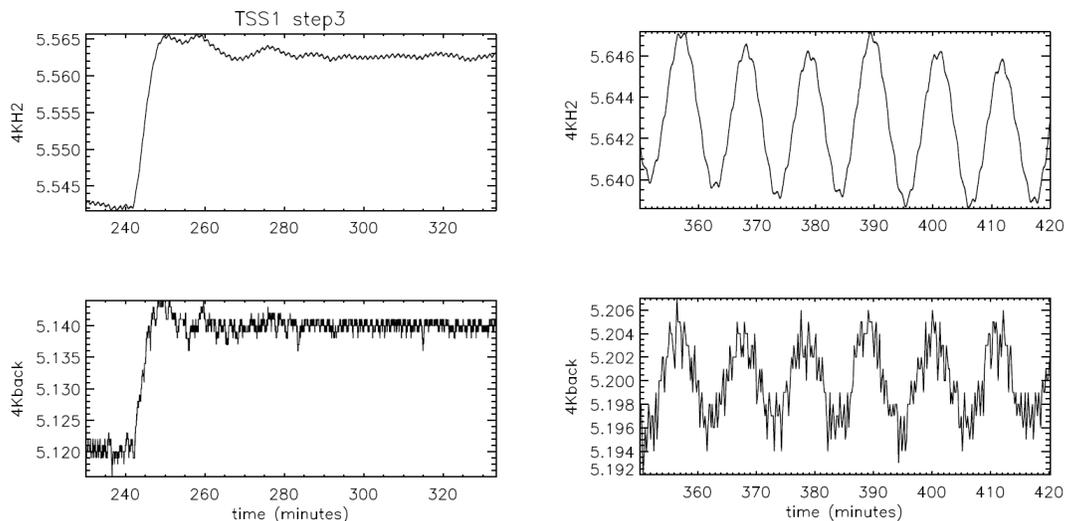


FIG. 4.16 – Gauche : Réponse des cornets à 4K du PFM à un stimulus de type marche. Droite : Réponse des cornets à 4K à un stimulus périodique de type sinusoïde à l'arrière de la boîte 4K.

expériences, j'ai pu vérifier que le gain statique était égal à 1 sur le PFM comme pour le CQM. Afin de tester la capacité d'amortissement du système PID de l'étage 4K un second stimulus de type marche a été réalisé avec la régulation PID allumée (Figure 4.17). Sur la Figure 4.17, on constate que l'effet induit sur les cornets au niveau du thermomètre 4KH2 est indiscernable. L'amplitude de la marche est de 0.02K alors que le bruit sur le thermomètre 4KH2 est de 10^{-4} K environ. L'atténuation avec PID depuis l'arrière jusqu'aux cornet de l'étage 4K pour cette marche est donc meilleure que : $\frac{10^{-4}}{2 \cdot 10^{-2}} = 5 \cdot 10^{-3}$.

Fonction de transfert entre l'arrière de la boîte 4K et les filtres à 1.6K

Comme pour l'étage 4K, deux stimulus ont pu être réalisés pour caractériser l'amortissement passif entre la boîte à 4K et l'étage 1.6K du PFM : un step et une sinusoïde de 667 secondes

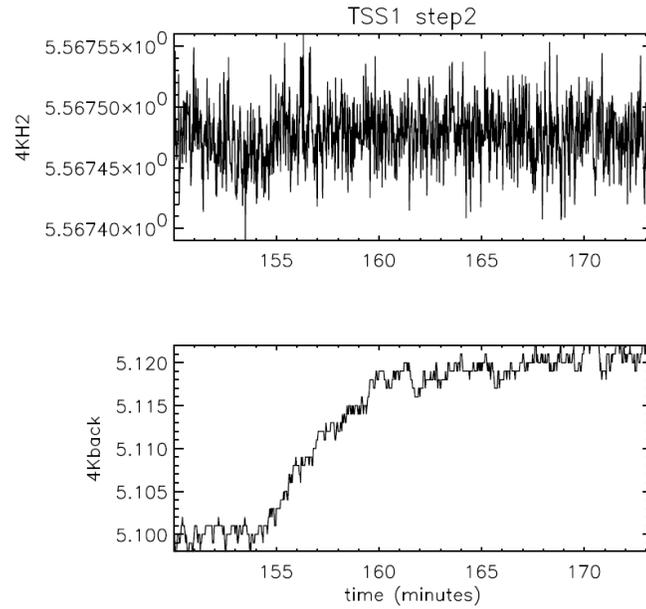


FIG. 4.17 – Test des capacités d'amortissement du PID 4K d'HFI.

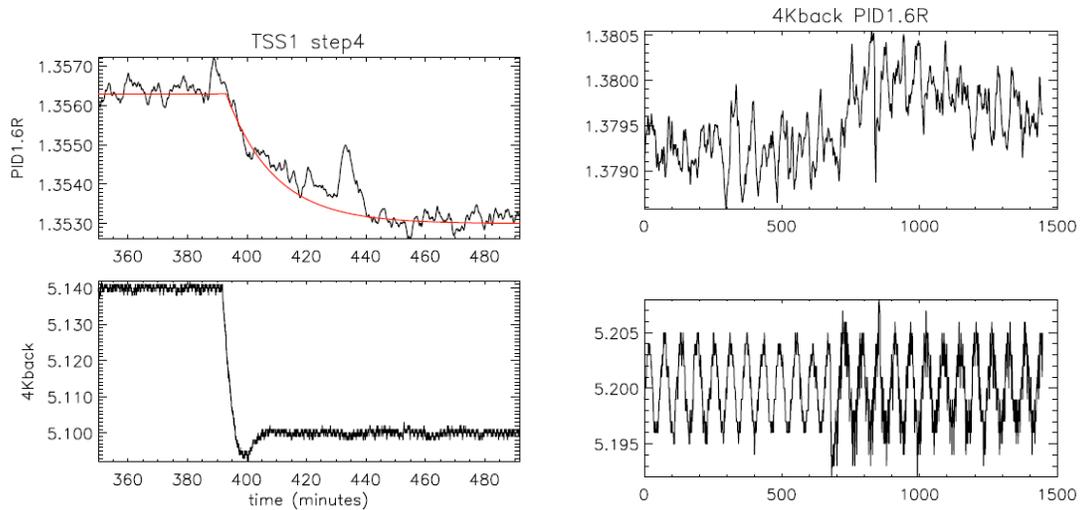


FIG. 4.18 – Gauche : Réponse des filtres 1.6K du PFM à un stimulus de type marche et ajustement en rouge par la réponse d'un filtre d'ordre 1 de gain 8.25% et de fréquence de coupe 1/700Hz. Droite : Réponse des filtres 1.6K à un stimulus périodique de type sinusoïde à l'arrière de la boîte 4K.

de période (Figure 4.18). L'ajustement de la réponse d'un filtre d'ordre 1 aux données du step a permis de déterminer le gain statique et la constante de temps associée à ce système (Figure 4.18). La sinusoïde n'a pas permis d'extraire de point supplémentaire car l'effet induit sur le 1.6K n'était pas assez net comme pour le CQM. La capacité d'amortissement du système

PID de l'étage 1.6K a ensuite été testée avec un stimulus de type marche comme pour l'étage 4K (Figure 4.19). L'amplitude de la marche est de 0.02K alors que le bruit sur le thermomètre

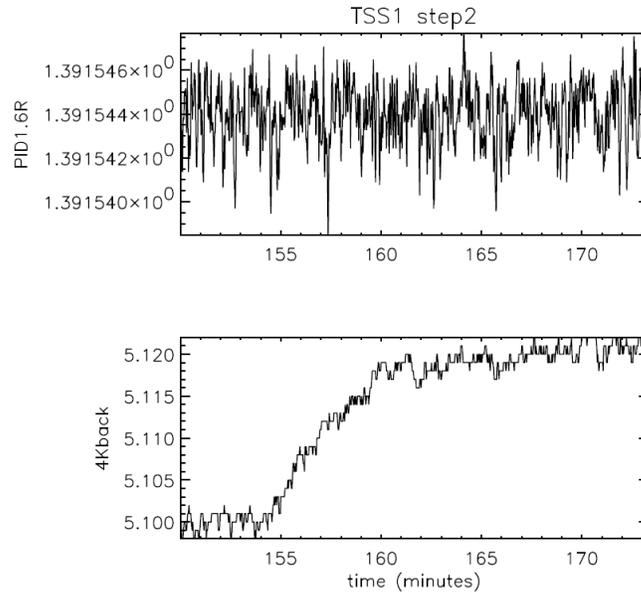


FIG. 4.19 – Test des capacités d'amortissement du PID 1.6K d'HFI.

PID1.6R est de $4 \cdot 10^{-6}$ K environ. L'atténuation avec PID entre l'arrière de la boîte 4K et les filtres à 1.6K pour cette marche est donc meilleure que : $\frac{4 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 10^{-2}} = 2 \cdot 10^{-4}$.

Fonction de transfert entre l'arrière de la boîte 4K et la platine dilution

Deux stimulus ont également pu être réalisés pour caractériser l'amortissement passif entre la boîte à 4K et l'étage PID1 du PFM : un step et une sinusoïde de 667 secondes de période (Figure 4.20) : L'ajustement de la réponse d'un filtre d'ordre 1 aux données du step (Figure 4.20) a permis de déterminer que le gain statique est de 1%. La sinusoïde a permis d'obtenir un point de mesure à $1/667$ Hz. On trouve une valeur de 1%. Enfin, la capacité d'amortissement du système PID de l'étage dilution a également été testée avec un stimulus de type marche (Figure 4.21). L'amplitude de la marche est de 0.02K alors que le bruit sur le thermomètre PID1R est de $4 \cdot 10^{-7}$ K environ. L'atténuation avec PID entre l'arrière de la boîte 4K et l'étage PID1 pour cette marche est donc meilleure que : $\frac{4 \cdot 10^{-7}}{2 \cdot 10^{-2}} = 2 \cdot 10^{-5}$.

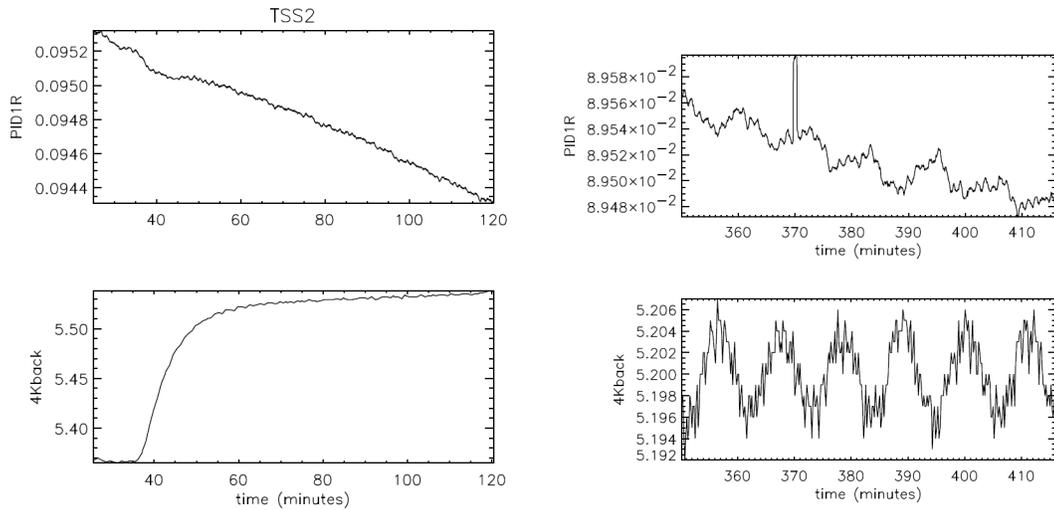


FIG. 4.20 – Gauche : Réponse de la platine dilution du PFM à un stimulus de type marche. Droite : Réponse de la platine dilution à un stimulus périodique de type sinusoïde à l'arrière de la boîte 4K.

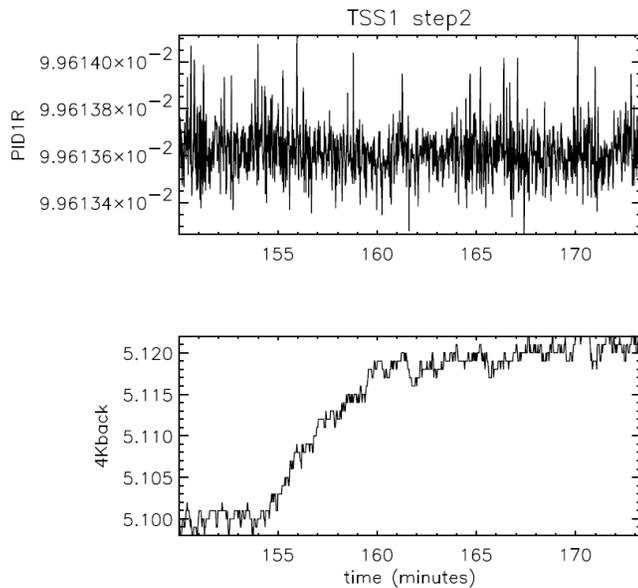


FIG. 4.21 – Test des capacités d'amortissement du PID1 d'HFI.

4.1.3 Résumé des fonctions de transfert thermiques obtenues pour HFI avec les tests TSS

Les valeurs des fonctions de transfert mesurées et déduites pour HFI avec les tests TSS sont résumées dans les Tableaux 4.4 et 4.5.

Fonction de transfert	4K back →4K horns	4KL1 →4K horns	4KL2 →4K horns	4K back →1.6K filters	4K back → PID1
Valeur à 1/960Hz	1	1	1	-	-
Valeur à 1/666Hz	1	1	1	-	0.001
Valeur à 1/40Hz	-	0.55	0.55	-	-
Valeur à 3/40Hz	-	0.24	0.24	-	-
Valeur à 1/12Hz	-	0.1675	0.1675	-	-
Amortissement avec PID à basse fréquences	5.10^{-3}	-	-	2.10^{-4}	2.10^{-5}

TAB. 4.4 – Valeurs des fonctions de transfert mesurées sur HFI. Les tirets représentent les fréquences pour lesquels les mesures TSS ne sont pas exploitables.

Fonction de transfert	4K back →4K horns	4KL1 →4K horns	4KL2 →4K horns	4K back →1.6K filters	4K back → PID1
Valeur à 1/940Hz	1	1	1	0.0682	0.001
Valeur à 1/666Hz	1	1	1	0.0586361	0.001
Gain statique	1	1	1	0.0825	0.001
Fréquence de coude (Hz)	1/100	1/60	1/60	1/700	-

TAB. 4.5 – Valeurs et caractéristiques des fonctions de transfert déduites sur HFI.

4.2 Les tests systèmes au CSL sur le satellite CQM

Lors des tests du modèle cryogénique de qualification de Planck au Centre Spatial de Liège, plusieurs tests m'ont permis de caractériser le comportement thermique d'HFI sur le satellite. Malgré un temps de test limité, j'ai ainsi pu mesurer pour la première fois les fonctions de transfert thermique entre le Sorption Cooler et les étages cryogéniques d'HFI. Ces tests au CSL ont également permis de caractériser l'effet de l'étage 4K sur le signal des bolomètres, en particulier les décalages en temps existants entre le signal des thermomètres à 4 K et les bolomètres.

4.2.1 Description du test au CSL

Lors du test CSL, le CQM d'HFI a été intégré sur le modèle cryogénique de qualification du Satellite. Seul le support d'LFI était présent. Les modèles CQM de la dilution et du réfrigérateur à 4 K d'HFI ont également été intégrés sur le satellite et interfacés avec le CQM HFI. Enfin, un simulateur du Sorption Cooler, désigné sous le sigle PACE pour "Pipe Assembly Cold End", était également installé sur le satellite. Ce système PACE est constitué des mêmes éléments que le SC, à l'exception des compresseurs à adsorption. A la place de ces compresseurs, le PACE était alimenté en hydrogène haute pression par des bouteilles de gaz, dont le débit était régulé. L'ensemble du satellite a ensuite été intégré dans une chambre à vide du CSL (Figure 4.22).

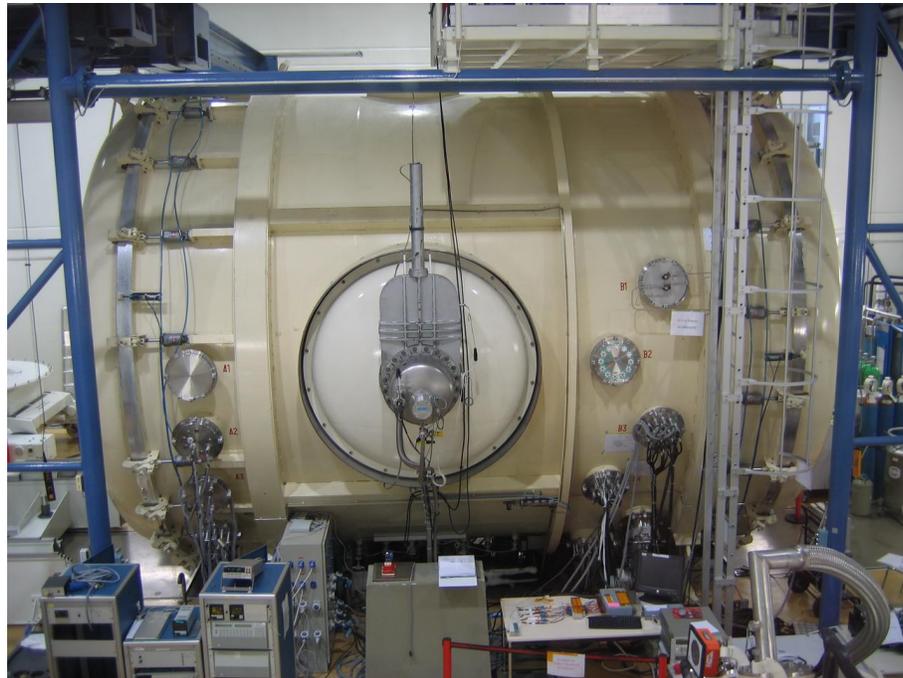


FIG. 4.22 – Photographie de la chambre à vide du CSL contenant le CQM Planck en septembre 2005.

Afin de simuler l'environnement spatial, le satellite a été entouré par un écran refroidi à 20 K, placé entre le satellite et les parois de la cuve (Figure 4.23).

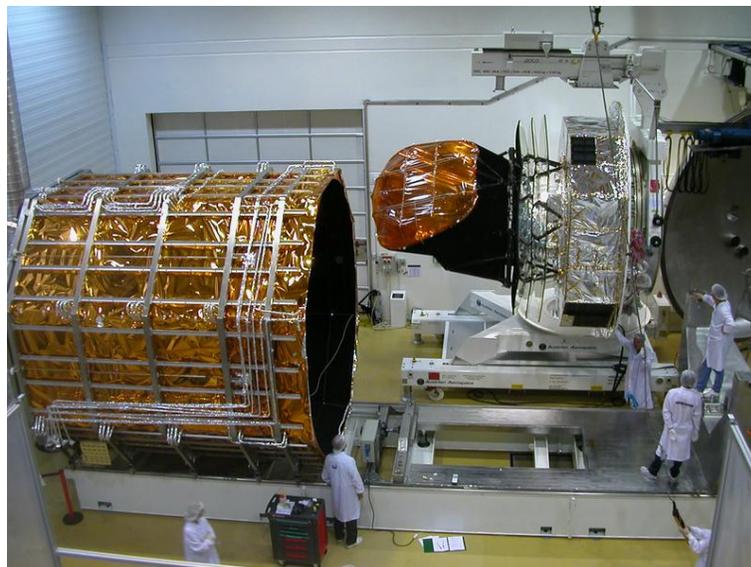
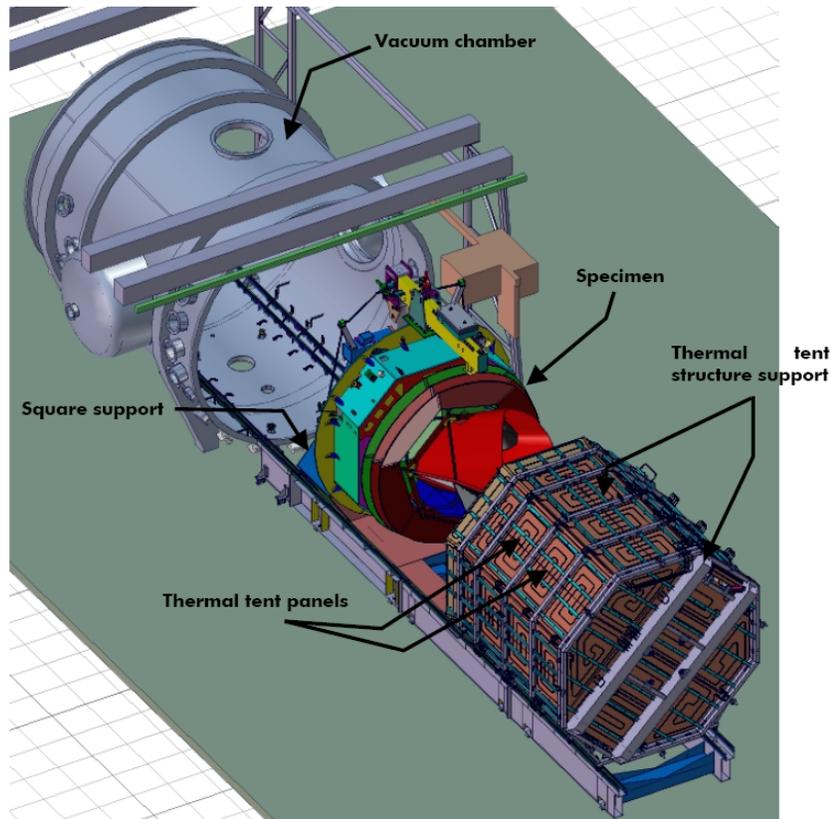


FIG. 4.23 – Haut : Schéma d'intégration du CQM et de son écran à 20 K dans la chambre à vide cryostat du CSL. Bas : Le modèle cryogénique de qualification de Planck, à côté de l'écran à 20 K, avant leur intégration dans la chambre à vide au CSL.

Durant le test CSL il a été possible de maintenir les bolomètres autour d'une température moyenne de 112 mK pendant trois jours du 27 au 29 septembre 2005. La température la

plus froide mesurée sur la tête froide du réfrigérateur à 4 K était quant à elle de 5.08 K. Cette température était trop élevée, par rapport à ce qui était attendu. Après avoir soupçonné les conditions de pression lors du remplissage à chaud en Hélium gazeux du réfrigérateur, l'origine de cette température trop élevée a finalement été identifiée. Il s'agissait d'un problème d'inversion de tuyaux dans l'échangeur de chaleur du réfrigérateur 4K. Les gaz ne pouvant pas circuler dans le sens nominal la température était finalement supérieure aux 4.7 K attendus.

4.2.2 Effet de l'étage à 4K sur les bolomètres

A partir des mesures du test EFF à CSL sur le CQM (Figure 4.24), il est possible de quantifier l'effet de l'étage à 4 K sur le signal des bolomètres d'HFI. A partir de cette mesure

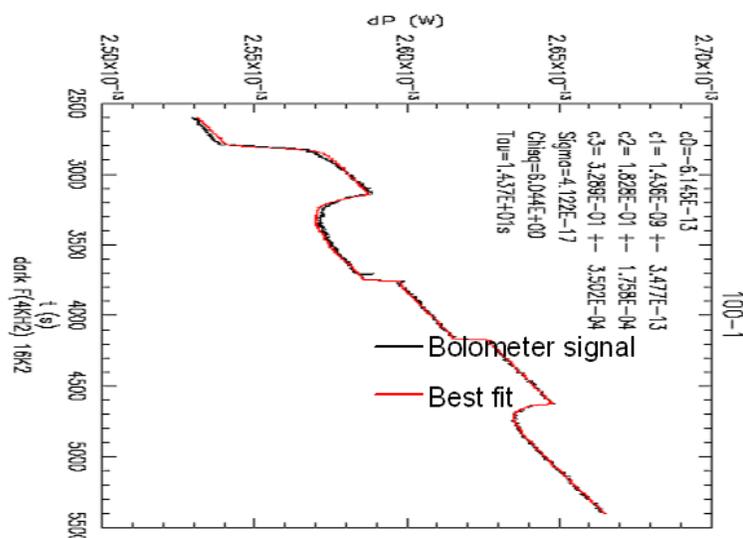


FIG. 4.24 – Réponse en Watt du bolomètre 100-1 à un échelon de température sur les cornets à 4 K suivi de deux échelons de température successifs sur les filtres 1.6K durant la mesure EFF sur le CQM à CSL (extrait de [33]). La courbe en noir représente les mesures alors que la courbe en rouge est le résultat d'une somme de corrélations linéaires avec le signal du thermomètre 1.6K2, du bolomètre aveugle et le signal du thermomètre 4KH1 filtré par un filtre du premier ordre avec une constante de temps d'une dizaine de secondes.

EFF-4K, il a été établi par Michel Piat que la réponse des bolomètres à 100 et 143 GHz aux fluctuations de l'étage 4 K peut être modélisée par un filtre du premier ordre avec une constante de temps d'une dizaine de secondes environ (Figure 4.25). Une hypothèse probable pour expliquer ce retard est que les cornets et les filtres à 4K du système de cornets dos-à-dos mettent un temps important à se thermaliser. Ce temps est alors proportionnel à la taille des filtres qui est maximale pour les voies à 100 et 143 GHz. Le rayonnement résultant de l'émission de ces filtres est ensuite détecté sur les bolomètres avec le décalage induit par le temps de thermalisation nécessaire, qui est estimé ici à une dizaine de secondes.

Un tel effet n'a pas été mesuré avec les échelons à 1.6 K. Cela est lié au fait que le temps de thermalisation de ces filtres est plus rapide que pour l'étage à 4 K car la diffusion thermique est

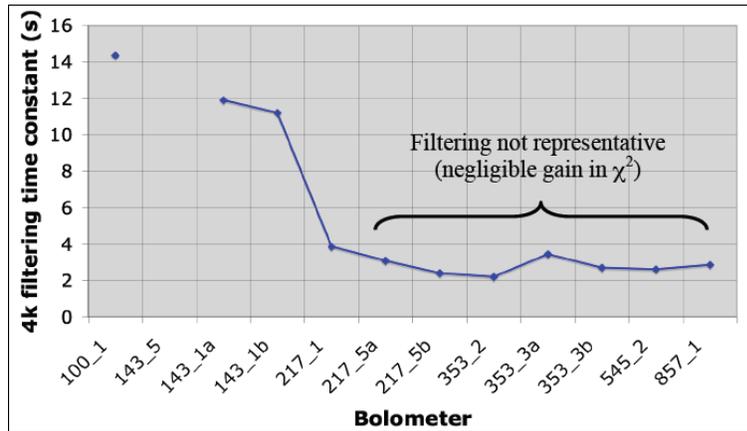


FIG. 4.25 – Constantes de temps entre les fluctuations des cornets à 4K et le signal des bolomètres déduites de la mesure EFF-4K sur le CQM à CSL (extrait de [33]).

plus rapide à 1.6 K qu'à 5 K d'une part et parce que la surface à thermaliser pour les cornets dos-à-dos est plus grande que pour les filtres d'autre part.

De même, le décalage entre la température de la cible à 2 K et les bolomètres est négligeable durant la mesure d'efficacité dans cette séquence EFF.

4.2.3 Mesure des fonctions de transfert thermiques sur le satellite CQM

Le test CSL du CQM a permis de mesurer, pour la première fois, les fonctions de transfert entre la tête froide du SC et les étages cryogénique d'HFI. Cette mesure est importante car elle est nécessaire pour quantifier l'impact final des fluctuations du SC sur le signal des bolomètres d'HFI. Afin de mesurer les fonctions de transfert décrites ci-dessus, divers stimuli ont été générés sur les têtes froides du PACE (LVHX1 et LVHX2). Ces stimuli ont pu être générés en modulant la pression en sortie des bouteilles d'hydrogène alimentant le PACE. Différentes séquences de modulation de la pression d'hydrogène ont permis de générer des fluctuations périodiques sur LVHX1 and LVHX2 à différentes fréquences et avec différentes amplitudes. Les différents thermomètres utilisés sur le CQM pour mesurer ces fonctions de transfert sont présentés dans le tableau 4.6 et la Figure 4.26.

Mesures PACE1 passif

Une première mesure a consisté à effectuer un stimulus de type marche sur les têtes froides LVHX1 et LVHX2 simultanément (Figure 4.27). Puisqu'aucune régulation TSA n'est appliquée sur LVHX2, l'amplitude de la marche sur LVHX1 et LVHX2 est la même. Une heure après ce premier stimulus, un second échelon de température a été généré sur le support d'LFI seulement (sonde Di842). Ce support et LVHX2 varient alors en phase sur cette Figure 4.27. On remarque ainsi, avec ce second échelon, que les fluctuations de température au niveau LVHX2 vont avoir un effet sur l'étage à 4 K d'HFI. Cet effet est lié à la conduction thermique entre cette tête froide et les cornets à 4 K, via le support d'LFI. L'étage à 4 K d'HFI étant fixé sur ce support,

Thermomètre	Localisation
PID4C, PID4N	Cornets à 4K
4KL2	Côté de la boîte 4K
4KL1	Côté de la boîte 4K
Cernox_4K	Arrière de la boîte 4K
tt03	Tête froide du refroidisseur 4K
Di842	Support d'LFI
Cernox_18K	Platine 18K d'HFI
tt04	Pré-refroidissement du refroidisseur 4K
LVHX1	Tête froide HFI du Sorption Cooler
LVHX2	Tête froide LFI du Sorption Cooler

TAB. 4.6 – Localisation des thermomètres utilisés sur le CQM lors du test CSL.

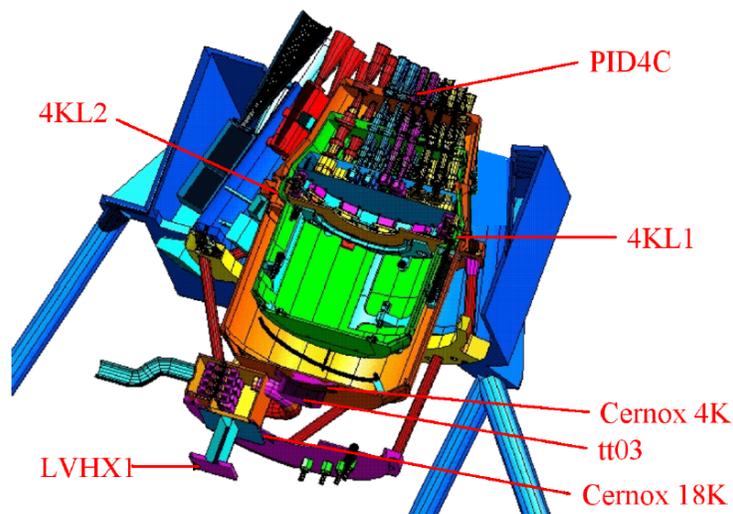


FIG. 4.26 – Localisation des thermomètres utilisés sur le CQM lors du test CSL.

un lien thermique est ainsi établi entre LVHX2 et HFI via les poutres en carbone d'interface. La sonde Di842, placée sur le support d'LFI et la sonde Cernox_18K, placée sur la platine 18 K d'HFI, nous permettent de remarquer également que la propagation des fluctuations du SC se fait plus rapidement sur la platine 18K d'HFI. Par conséquent, la constante de temps entre LVHX2 et les cornets 4K est beaucoup plus grande que pour LVHX1. A partir du premier échelon, le gain statique de la fonction de transfert entre les deux têtes froides du SC et les cornets à 4K sans régulation TSA de LVHX2 peut être déduit. On trouve ici un gain de 0.053.

Après les stimuli en échelon, un stimulus sinusoïdal de période 100 secondes a été généré. Sur la Figure 4.28, on remarque que deux effets affectent alors l'étage 4K. Un signal de même période apparaît également, presque parfaitement en phase avec LVHX1, tandis qu'un effet de type échelon se superpose. Ce second effet est lié à une dérive de température du support de LVHX2 qui induit une dérive du support d'LFI durant cette mesure. Comme lors du test précédent, l'ensemble de l'étage 4K est alors affecté par cette dérive de température d'LFI. Après avoir attendu la fin de la dérive j'ai pu extraire la valeur de la fonction de transfert

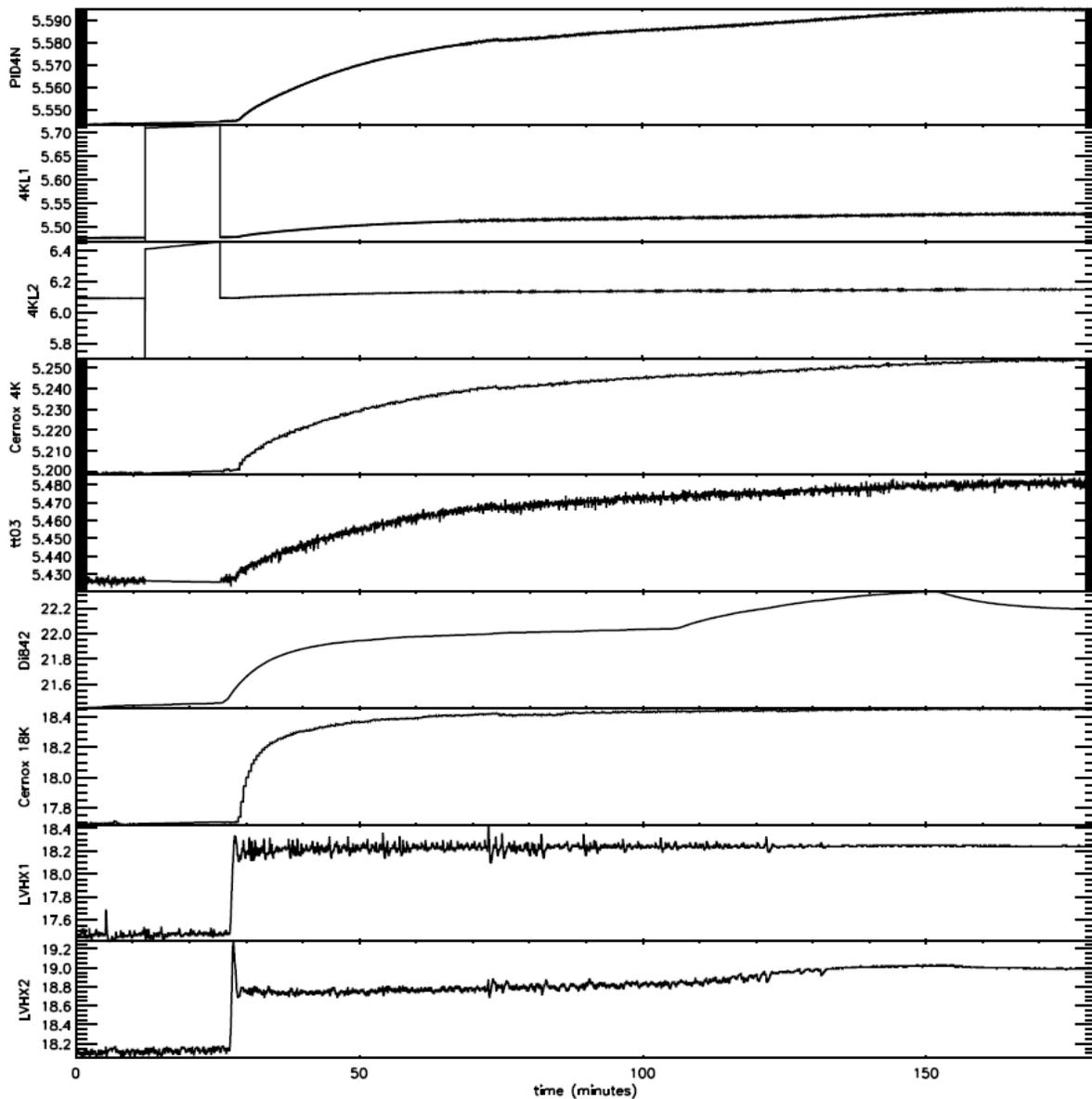


FIG. 4.27 – Réponse des étages cryogéniques d’HFI à un stimulus de type marche sur la tête froide du PACE. Les données HFI (PID_{4N}, 4KL1, 4KL2, tt03, Cernox_4K et Cernox_18K) ne sont pas disponibles durant 15 secondes environ au début de ce test à cause d’une absence momentanée de télémétrie sur la chaîne de mesure.

passive à la fréquence 1/100 Hz.

Un troisième test avec un stimulus de type créneau et de période 667 secondes sur le PACE a été réalisé. Sur la Figure 4.29, on distingue également tous les effets précédemment décrits. Un effet supplémentaire apparaît : alors que la sonde Di842 dérive à cause d’une nouvelle dérive moyenne de LVHX2, la température de l’étage 4K décroît au début. Cela est dû au refroidissement de cet étage, après que le PID 4K ait été allumé pour chauffer l’étage à 4K lors du test de régulation précédent. Le PID 4K est ensuite à nouveau allumé à la fin de cette

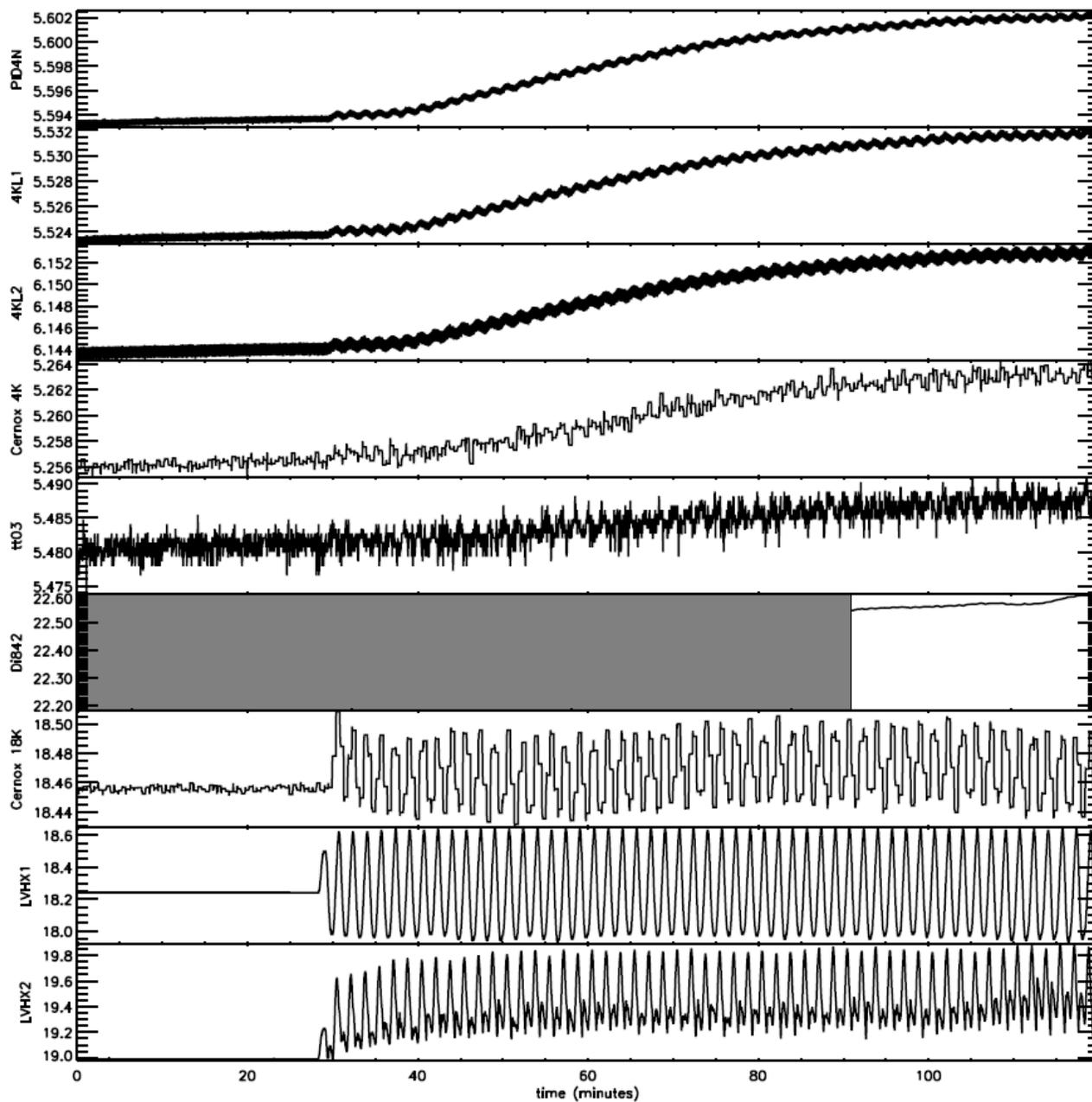


FIG. 4.28 – *Mesure PACE passive avec un stimulus de 100 secondes de période (la zone en gris sur le signal de la sonde Di842 correspond à une absence momentanée de données pour ce capteur).*

mesure afin de faire une mesure de fonction de transfert avec PID. L'étage à 4K se réchauffe alors instantanément (Figure 4.29). La valeur de la fonction de transfert passive à la fréquence $1/667$ Hz est finalement déduite de ce troisième test.

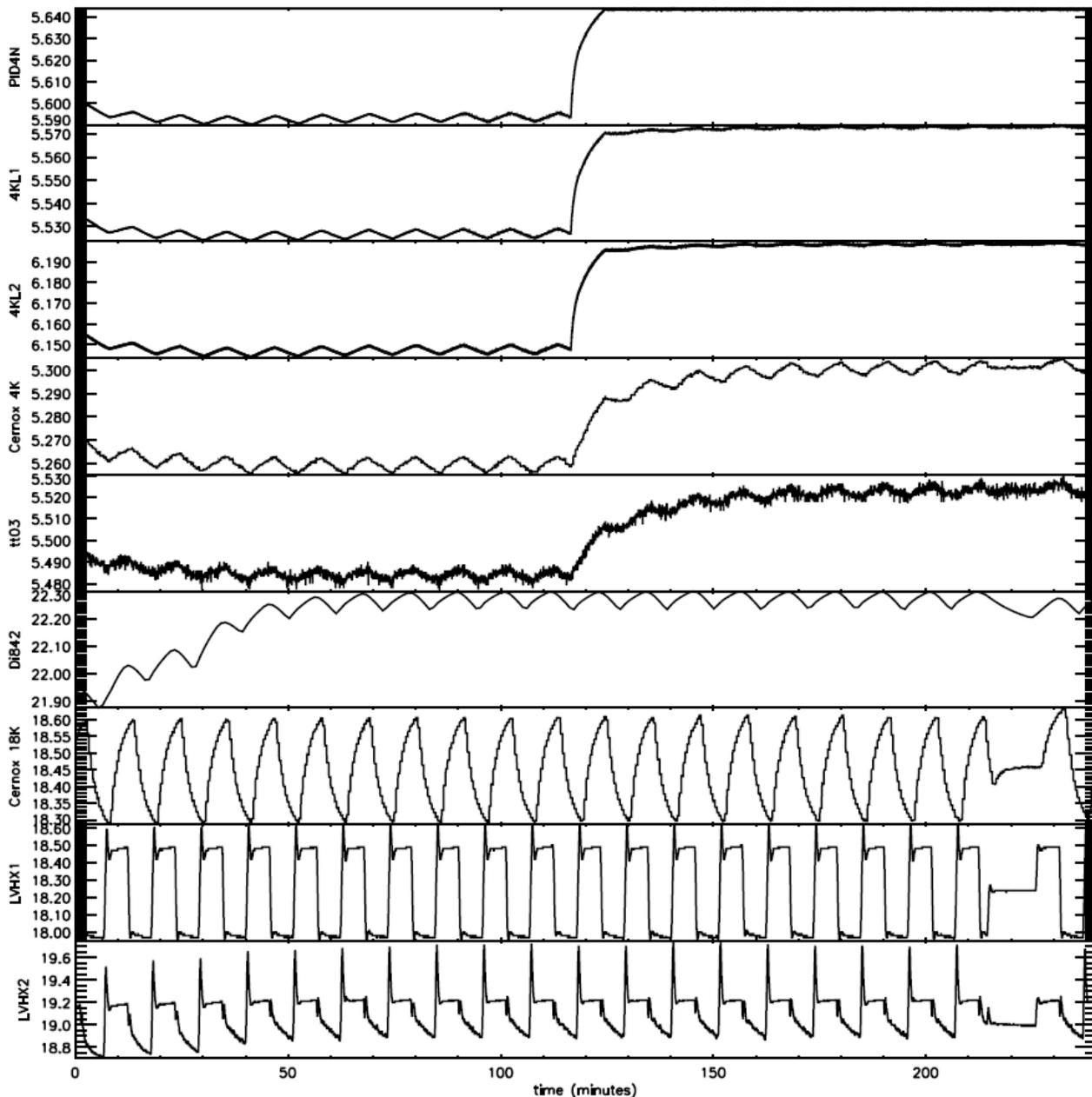


FIG. 4.29 – *Mesure PACE passive avec un stimulus de 667 secondes de période.*

Mesures PACE1 actif

La Figure 4.30 montre l'effet induit sur l'étage 4K par les têtes froides du PACE pour une fluctuation de période 667 secondes et une amplitude de 0.8 K. Après avoir tracé le spectre des fluctuations induites sur l'étage 4K, on remarque que le pic des fluctuations induites sur le spectre empêche de respecter la spécification de stabilité pour cet étage 4K. Une régulation des fluctuations induites par le PACE est alors nécessaire pour tenir la spécification. Afin de mesurer l'efficacité de la régulation PID de l'étage 4K pour l'amortissement des fluctuations intrinsèques

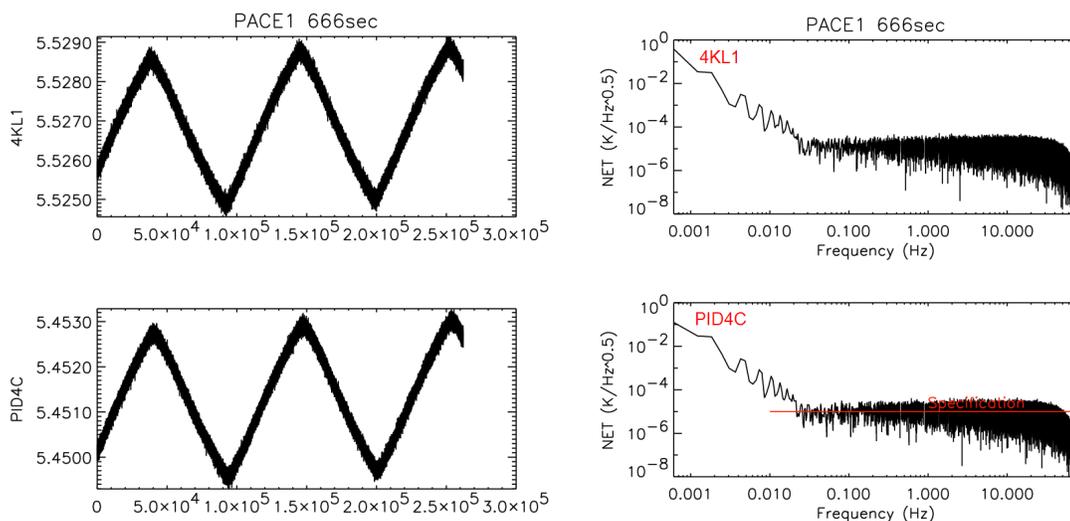


FIG. 4.30 – Gauche : Effet induit sur l'étage 4K du CQM par les têtes froides du PACE pour une fluctuation de période 667 secondes et une amplitude de 0.8 K. Droite : NET des signaux des thermomètres PID4C et 4KL1.

du Sorption Cooler (le PACE), des mesures de fluctuations du PACE avec régulation de l'étage 4K ont été réalisées. Trois fréquences différentes ont été générées pour les fluctuations du SC : 1/4000, 1/667 et 1/100 Hz. L'amplitude des fluctuations sur LVHX1 et LVHX2 est de 0.75 K environ pour les trois périodes.

La régulation des fluctuations de 100 secondes de période est présentée Figure 4.31. On

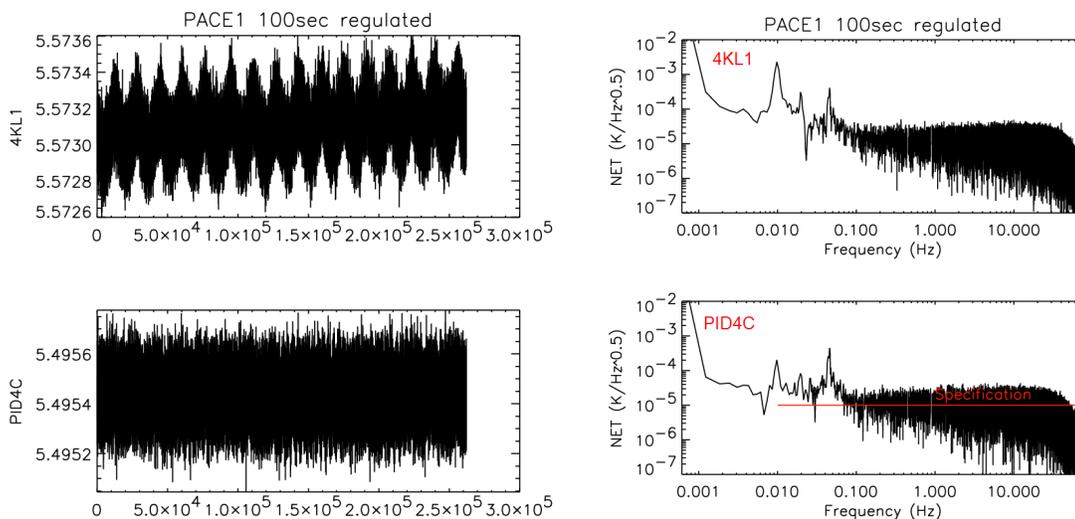


FIG. 4.31 – Test de régulation des fluctuations induites par le PACE sur l'étage 4K du CQM pour des fluctuations de 100 secondes de période. Gauche : Signal des thermomètres 4KL1 et PID4C. Droite : Spectre des thermomètres 4KL1 et PID4C.

constate l'apparition d'un "pic de régulation" à la fréquence de 0.05 Hz qui est en dehors de la spécification pour la stabilité des cornets à 4 K. Nous verrons par la suite que ce pic résulte de l'effet de la régulation PID. Nous verrons également que la fréquence de ce pic dépend des paramètres de la régulation. L'amplitude des fluctuations résiduelles sur le thermomètre 4KL1 à 1/100 Hz est de $3 \cdot 10^{-4}$ K pour une densité spectrale d'amplitude de $2 \cdot 10^{-3}$ K/ \sqrt{Hz} . L'amplitude des fluctuations résiduelles sur le thermomètre PID4C à 0.01 Hz est de $2 \cdot 10^{-4}$ K/ \sqrt{Hz} . L'amplitude résiduelle des fluctuations sur le PID4C peut alors être déduite du bruit. On a : $\Delta T_{PID4C} = \frac{2 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 10^{-3}} \cdot 3 \cdot 10^{-4} = 3 \cdot 10^{-5}$ K

La valeur de la fonction de transfert entre les têtes froides du SC et les cornets à 4 K est donc pour ce test : $FDT_{PID4KON}(0.01 \text{ Hz}) = \frac{3 \cdot 10^{-5}}{0.7} = 4.28 \cdot 10^{-5}$.

La régulation des fluctuations de 667 secondes de période est présentée Figure 4.32. Un

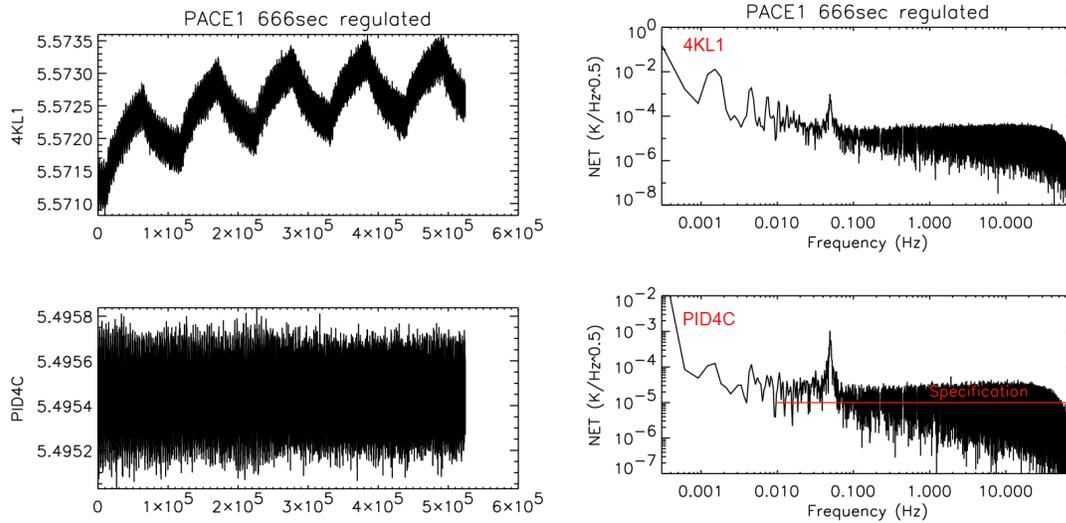


FIG. 4.32 – Test de régulation des fluctuations induites par le PACE sur l'étage 4K du CQM pour des fluctuations de 667 secondes de période. Gauche : Signal des thermomètres 4KL1 et PID4C. Droite : Spectre des thermomètres 4KL1 et PID4C.

"pic de régulation" à la fréquence de 0.05 Hz apparaît à nouveau avec un niveau hors de spécification. Ce pic apparaît à la même fréquence que pour les fluctuations de 100 secondes de période car les paramètres de régulation PID sont les mêmes dans les deux tests PACE actifs ci-dessus. L'amplitude des fluctuations résiduelles sur le thermomètre 4KL1 à 1/667 Hz est de 0.001 K pour une densité spectrale d'amplitude de 10^{-2} K/ \sqrt{Hz} . L'amplitude des fluctuations résiduelles sur le spectre du thermomètre PID4C à 1/667 Hz est de 10^{-4} K/ \sqrt{Hz} . L'amplitude résiduelle des fluctuations sur le PID4C peut alors être déduite du bruit. On a : $\Delta T_{PID4C} = \frac{10^{-4}}{10^{-2}} \cdot 0.001 = 10^{-6}$ K.

La valeur de la fonction de transfert entre les têtes froides du SC et les cornets à 4K est donc pour ce test : $FDT_{PID4KON}(1/667 \text{ Hz}) = \frac{10^{-6}}{0.7} = 1.43 \cdot 10^{-6}$.

La régulation des fluctuations de 4000 secondes de période est présentée Figure 4.33. Les fluctuations à 4000 secondes sont parfaitement amorties. Je n'ai pas pu extraire de valeur pour le pic basse fréquence ici. C'est pourquoi, je n'ai pas déduit de valeur de fonction de transfert pour ce test avec des fluctuations de 4000 secondes de période. Les points de la fonction de

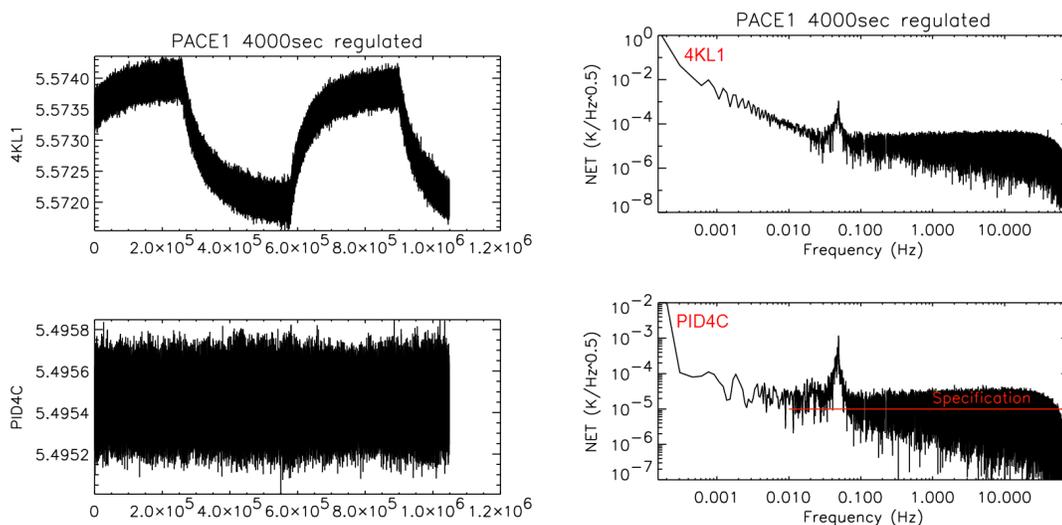


FIG. 4.33 – Test de régulation des fluctuations induites par le PACE sur l'étage 4K du CQM pour des fluctuations de 4000 secondes de période. Gauche : Signal des thermomètres 4KL1 et PID4C. Droite : Spectre des thermomètres 4KL1 et PID4C.

transfert avec PID entre le SC et les cornets à 4 K déduits sont résumés dans les tableaux 4.7 et 4.8.

Fréquence (Hz)	1/667	0.01
Fonction de transfert	$1.43 \cdot 10^{-6}$	$4.28 \cdot 10^{-5}$

TAB. 4.7 – Points de la fonction de transfert avec régulation PID de l'étage à 4 K entre le SC et les cornets dos-à-dos, mesurés sur le CQM à CSL.

Fréquence (Hz)	1/667	0.01	0.05	0.07
Fonction de transfert	0.00211147	0.121563	100	1

TAB. 4.8 – Points de la fonction de transfert avec régulation PID de l'étage à 4 K entre l'arrière de la boîte et les cornets dos-à-dos, mesurés sur le CQM à CSL.

La régulation obtenue ici est très forte à basse fréquence. Cette grande efficacité basse fréquence entraîne en contre-partie, l'apparition d'un pic de régulation d'amplitude importante à haute fréquence. Les valeurs des points de la fonction de transfert associée à la régulation PID dépendent fortement des paramètres choisis pour celle-ci (Figure 4.34). De même, la fréquence et l'amplitude du pic de régulation sont fixés par ces paramètres PID.

Puisque la fonction de transfert vaut 1 dans la partie haute fréquence (tableau 4.8), l'amplitude du pic de régulation sera nécessairement plus grande que la valeur du bruit blanc haute fréquence sur le thermomètre. Le niveau du pic de la régulation testée ici est 100 fois plus grand que le niveau de bruit blanc sur le thermomètre. Ce n'est pas acceptable puisque le

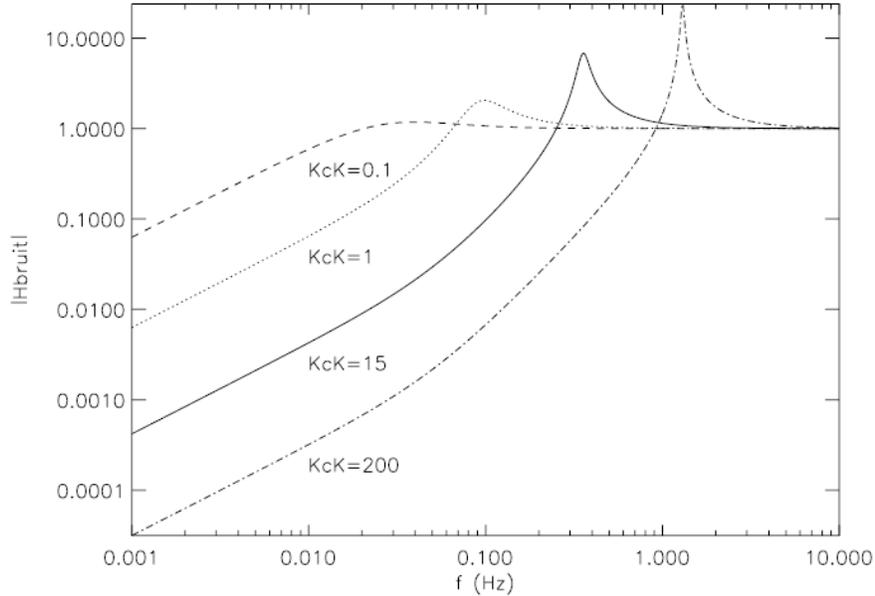


FIG. 4.34 – Fonction de transfert d’une régulation PID (extrait de [82]). Pour des paramètres I et D fixés, l’amplitude du pic de régulation dépend de la valeur du gain P (noté ici KcK). Puisque la fonction de transfert vaut 1 dans la partie haute fréquence, l’amplitude du pic de régulation sera nécessairement plus grande que la valeur du bruit blanc haute fréquence sur le thermomètre.

bruit blanc sur le thermomètre est égal à la spécification de stabilité de température entre 0.01 et 100 Hz pour cet étage ($10^{-5} \text{ K}/\sqrt{\text{Hz}}$). Finalement, la configuration PID testée ici ne sera donc pas celle qui sera retenue pour les opérations sur le satellite avec le Sorption Cooler. Un compromis haute fréquence/basse fréquence devra être trouvé. Il faudra diminuer l’amplitude et la fréquence du pic de régulation en diminuant notamment le gain P de l’algorithme PID. L’idéal serait d’avoir une fréquence du pic de régulation en dessous de 0.01 Hz ou, à défaut, en dessous de la fréquence de spin du satellite.

Fonction de transfert entre le Sorption Cooler et les cornets de la boîte 4K

A partir des trois mesures PACE de transfert passif décrites précédemment, la fonction de transfert entre les deux têtes froides du SC et les cornets à 4K sans régulation TSA de LVHX2 est finalement déduite. Après ajustement par un modèle de filtre d’ordre 1 (Figure 4.35), une constante de temps de 6000 secondes est finalement associée à l’effet caractérisé ici.

Fonction de transfert entre le Sorption Cooler et les côtés de la boîte 4K

Les fonctions de transfert entre les deux têtes froides du SC et les côtés de la boîte 4K sans régulation TSA de LVHX2 sont tracées Figure 4.36 à partir des résultats des mesures PACE de transfert passif.

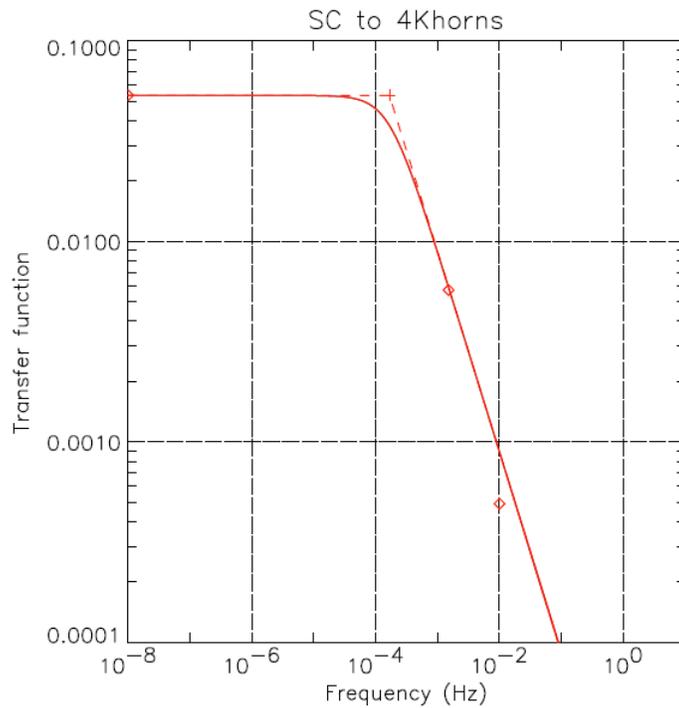


FIG. 4.35 – Fonction de transfert entre les têtes froides du Sorption Cooler et les cornets de la boîte à 4 K ($Gain=0.053$, $f_c=1/6000$ Hz).

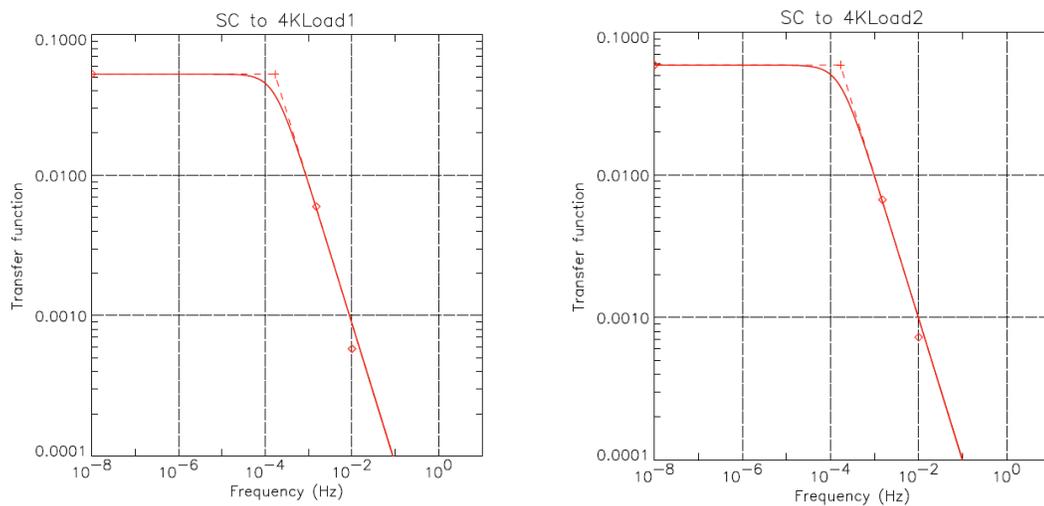


FIG. 4.36 – Gauche : Fonction de transfert entre les têtes froides du Sorption Cooler et le thermomètre 4KL1 ($Gain=0.053$, $f_c=1/6000$ Hz). Right : Fonction de transfert entre les têtes froides du Sorption Cooler et le thermomètre 4KL2 ($Gain=0.0590$, $f_c=1/6000$ Hz).

Fluctuations induites séparément par LVHX2 et LVHX1

A partir des échelons de température sur le support d'LFI, il est possible d'établir quelle partie des fluctuations est due à LVHX1 et quelle partie provient de LVHX2. Nous avons ainsi pu établir que la contribution de LVHX2 au gain statique de la fonction de transfert de la Figure 4.35 est trois fois plus petite que celle de LVHX1. Pour les points à 1/667 et 1/100 Hz, nous n'avons pas eu le temps d'effectuer des mesures aux mêmes fréquences avec des stimulus sinusoïdaux sur LVHX2 seulement. Nous avons donc supposé que le rapport d'un quart entre les fluctuations de LVHX2 et de LVHX1 est le même à toutes les fréquences. Nous avons donc divisé par quatre les points à 1.5 mHz et 0.01 Hz de la Figure 4.35 pour pouvoir déduire ceux de la contribution de LVHX2 sur la Figure 4.37.

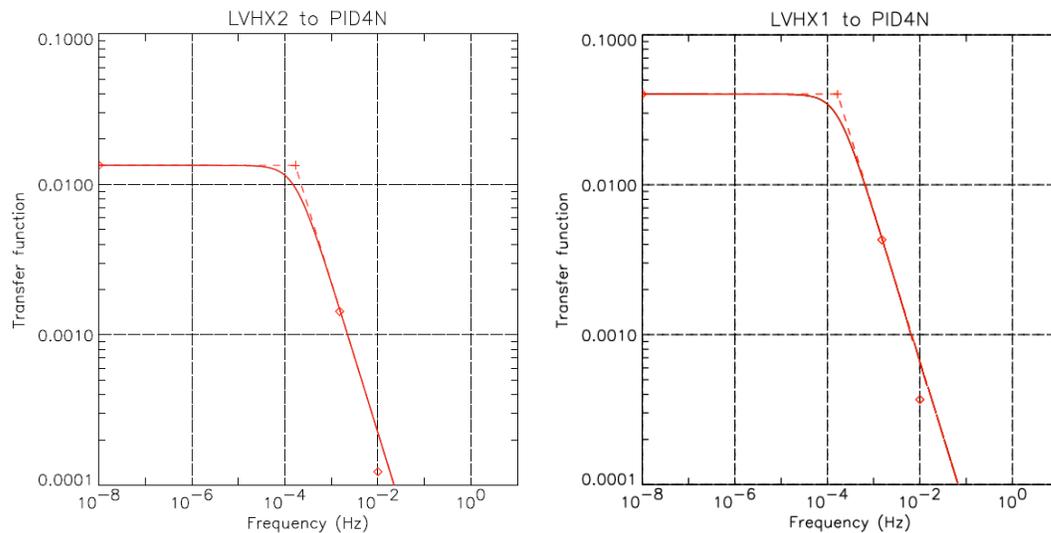


FIG. 4.37 – Gauche : Fonction de transfert associée à l'effet de la tête froide LVHX2 sur les cornets à 4K d'HFI sur le CQM lors du test CSL (Gain=0.013, $f_c=1/6000$ Hz). Droite : Fonction de transfert associée à l'effet de la tête froide LVHX1 sur les cornets à 4K d'HFI sur le CQM lors du test CSL (Gain=0.040, $f_c=1/6000$ Hz).

De même, nous avons multiplié par 0.75 les points à 1.5 mHz et 0.01 Hz de la Figure 4.35 pour pouvoir déduire ceux de la contribution de LVHX1 seul sur la Figure 4.37. Par ailleurs, en vol, la régulation TSA des fluctuations de LVHX2 devrait réduire d'un facteur 5 les fluctuations de cette tête froide en passant de 0.5 K à 0.1 K. Avec une telle atténuation des fluctuations de LVHX2, l'effet résiduel de cette tête froide sur l'étage à 4 K ne représentera plus que 5% ($1/4/5=0.05$) des fluctuations induites par le SC sur cet étage.

4.3 Tests du système de contrôle thermique actif d'HFI

4.3.1 Tests de stabilisation des étages 0.1K par régulation PID

Régulation des étages 0.1K du CQM dans Saturne

Durant la campagne d'étalonnage du CQM, la température la plus basse atteinte sur la platine bolomètre a été de 120 mK, à cause d'une fuite d'hélium dans le circuit de remplissage de la platine à 2 K de Saturne ainsi qu'un excès d'hélium 4 dans l'hélium 3 (8%). Les étalonnages du CQM ont donc été réalisés à cette température non nominale pour les bolomètres. La campagne d'étalonnage a duré 4 jours, du 21 au 24 Novembre 2004. Afin de mesurer des températures supérieures à 120 mK, les thermomètres à 0.1 K ont dû être utilisés dans une gamme d'étalonnage non-nominale (courbe d'étalonnage T2). Les courants de polarisation des thermomètres à 0.1 K étaient par contre trop élevés, d'où une sensibilité réduite à $70 \text{ nK}/\sqrt{\text{Hz}}$ pour ces thermomètres, alors que la spécification de stabilité de l'étage 0.1 K est de $20 \text{ nK}/\sqrt{\text{Hz}}$ (cette spécification de $20 \text{ nK}/\sqrt{\text{Hz}}$ ne s'applique qu'à la platine bolomètres).

Les étages à 4 K et 1.6 K ont été régulés pendant quasiment toute cette période. La régulation des étages à 0.1 K a été testée pendant une très courte période, le 23 novembre. Les régulations PID1 et PID2 ont ainsi été allumées simultanément pendant 30 minutes seulement. Il s'agit uniquement d'un test fonctionnel durant lequel la régulation n'a pas été menée jusqu'à son terme, c'est-à-dire la stabilisation complète de l'étage.

Finalement, la meilleure stabilité de température a été atteinte quand la température de l'étage était à sa valeur la plus basse, le 22 Novembre vers 2h00 AM (heure QLA) (Figure 4.38).

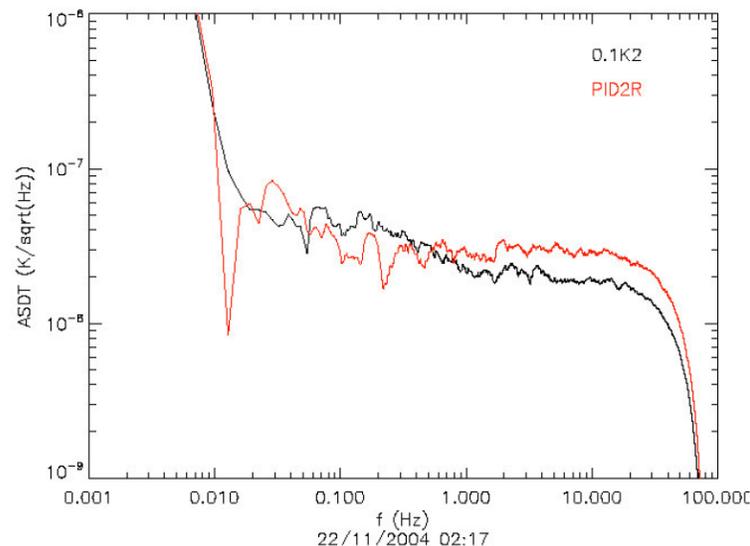


FIG. 4.38 – Meilleure stabilité de température atteinte pour la platine bolomètre durant les étalonnages du CQM dans Saturne (densité spectrale d'amplitude des thermomètres 0.1K2 et PID2R superposés extrait de [83]). Cette stabilité a été atteinte ici sans régulation des PID1 et PID2.

Régulation des étages 0.1K pendant la campagne PFM-CAR

La régulation des étages à 0.1 K du PFM a été testée une première fois pendant quelques heures durant la campagne de caractérisation du modèle de vol (Figure 4.39). Durant ce test, les deux régulations à 0.1 K (PID1 and PID2) ont été allumées simultanément.

J'ai tracé sur la Figure 4.39 le spectre des thermomètres à 0.1 K durant la période la plus stable de ce test, après quelques heures de stabilisation. La stabilité de température atteinte ici durant une demi-heure sur la platine bolomètre est aussi bonne que la spécification.

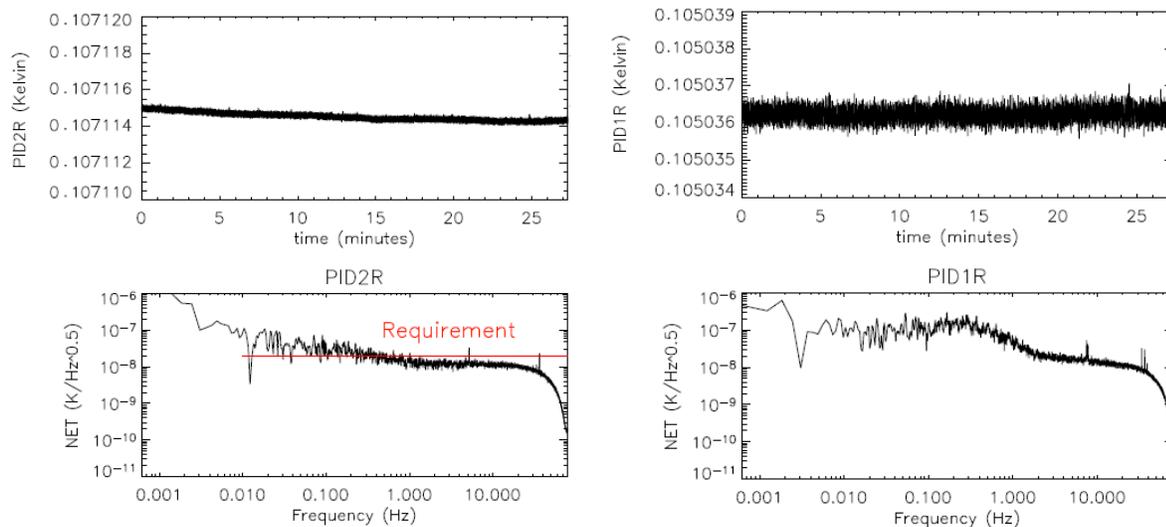


FIG. 4.39 – Stabilité de l'étage 0.1K d'HFI durant le test de régulation du 25/03/06.

Après ce premier test concluant pour les étages à 0.1 K, il a fallu attendre la campagne PFM-CAL pour tester la régulation des étages 0.1K sur plusieurs jours.

Régulation des étages 0.1K pendant la campagne PFM-CAL

La régulation de l'étage dilution est restée allumée pendant plusieurs jours durant les étalonnages du PFM. Le PID2 a, quant à lui, été allumé seulement par périodes. Le signal et le spectre de température des thermomètres des deux étages à 0.1 K pendant le meilleur test de régulation conjointe des deux platines à 0.1 K du PFM sont présentés Figures 4.40 et 4.41.

Un pic de régulation apparaît à 0.3Hz sur le thermomètre de régulation PID2N. La mesure présentée ici dure sept heures. Durant ces sept heures de mesure, aucune action n'a été effectuée sur la cuve Saturne ou sur l'instrument afin de ne pas perturber ce dernier (en particulier, le remplissage habituel du cryostat en Hélium a été différé). Malgré ces précautions, la température de la platine dilution ne s'est pas complètement stabilisée et dérive durant les sept heures, à cause de l'inertie thermique générée par les perturbations précédentes. On peut alors remarquer l'effet de la dérive basse fréquence sur le spectre des thermomètres PID2R, 0.1K1 et 0.1K2 qui présente une remontée en $1/f$ aux basses fréquences, liée à cette dérive.

Un autre test de stabilisation de la platine dilution est présenté Figure 4.42. Durant ce test, seule la régulation de la platine dilution a été allumée. On remarque tout d'abord que

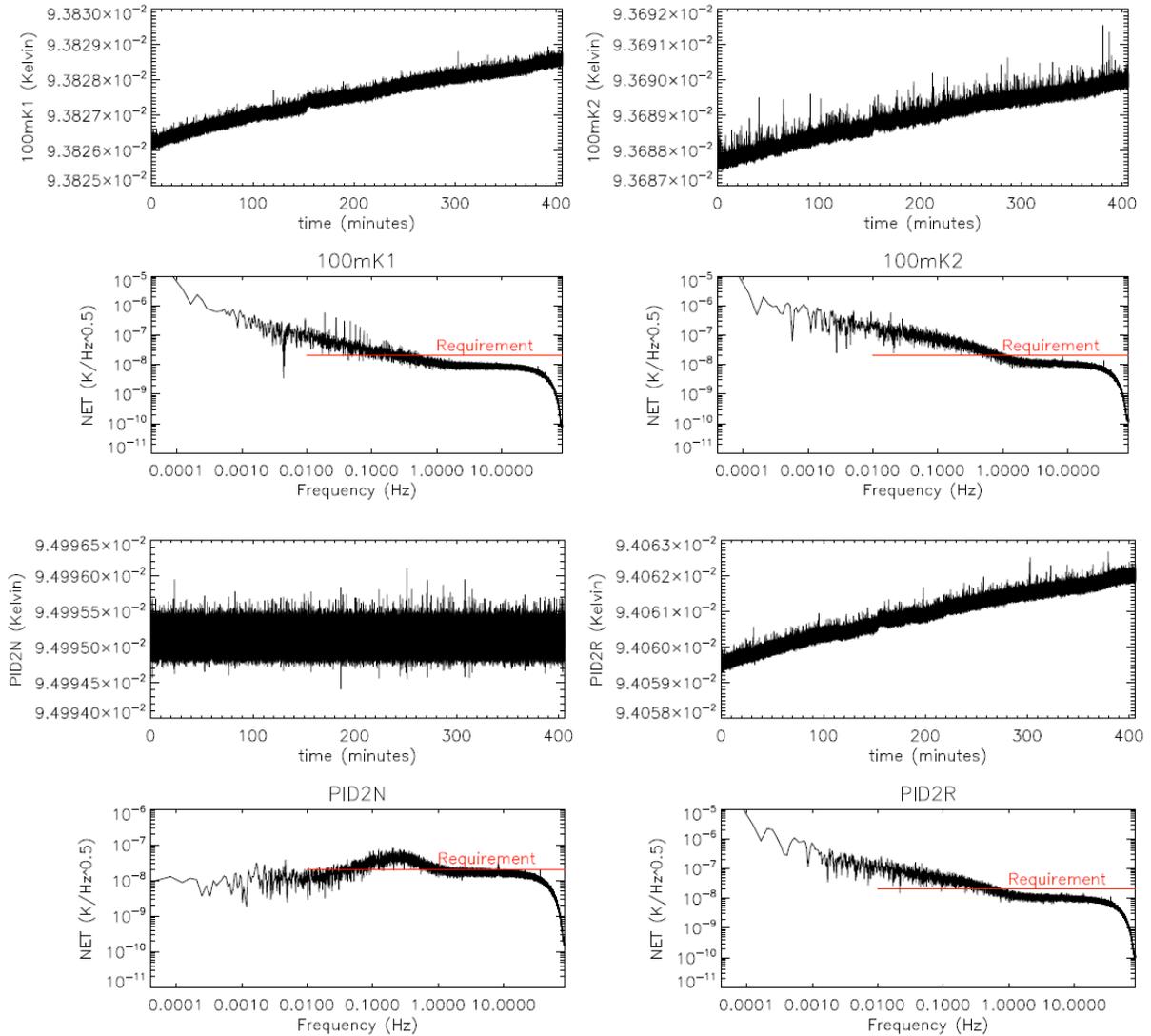


FIG. 4.40 – Stabilités de température de la platine bolomètre avec régulations PID1 & PID2 simultanément.

la stabilité de température sur la platine bolomètre est aussi bonne que pour le test précédent avec régulation PID1 et PID2 simultanément. On remarque ensuite que l'origine de la dérive basse fréquence de la température de la platine bolomètre est liée à un échauffement périodique de cette dernière. Sur le signal des thermomètres de la Figure 4.42, on remarque en effet que la platine bolomètre s'échauffe toutes les sept heures environ. La source de ces échauffements a finalement été identifiée. Il s'agit d'échauffements d'origine microphonique générées lors des remplissages de Saturne en Hélium liquide programmés à des heures régulières deux à trois fois par jour. On peut, par ailleurs, envisager que sans les remplissages du cryostat Saturne, la température de la platine bolomètre se serait stabilisée au bout d'une ou deux dizaines d'heures dans cette configuration. La spécification de $20 \text{ nK}/\sqrt{\text{Hz}}$ aurait alors été complètement respectée entre 0.01 et 100 Hz. Enfin les résultats de ces tests de stabilisation des étages 0.1K

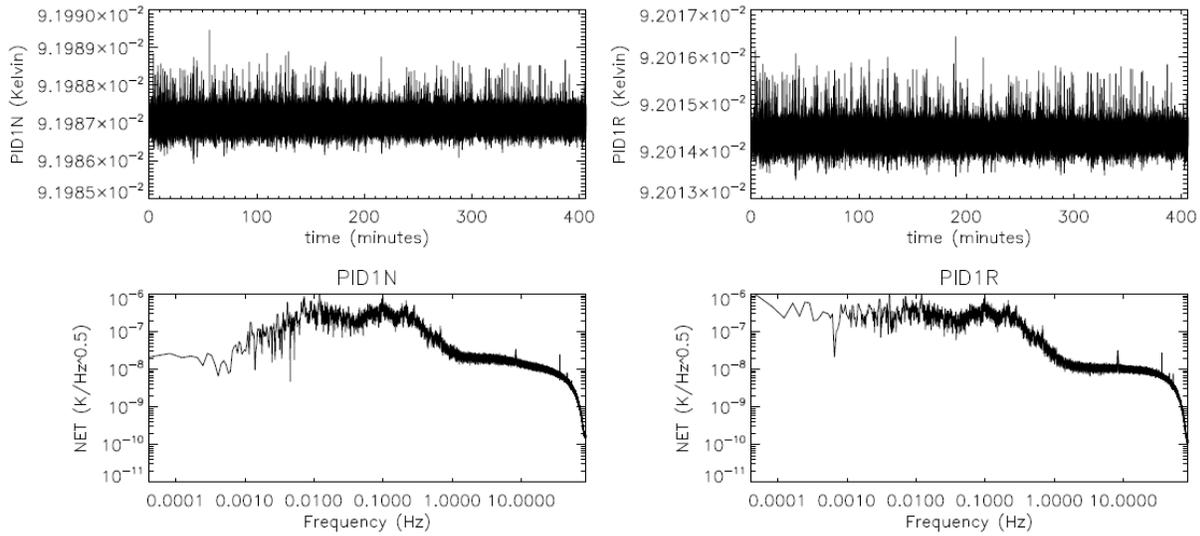


FIG. 4.41 – Stabilités de température de la platine dilution avec régulations PID1 & PID2 simultanément.

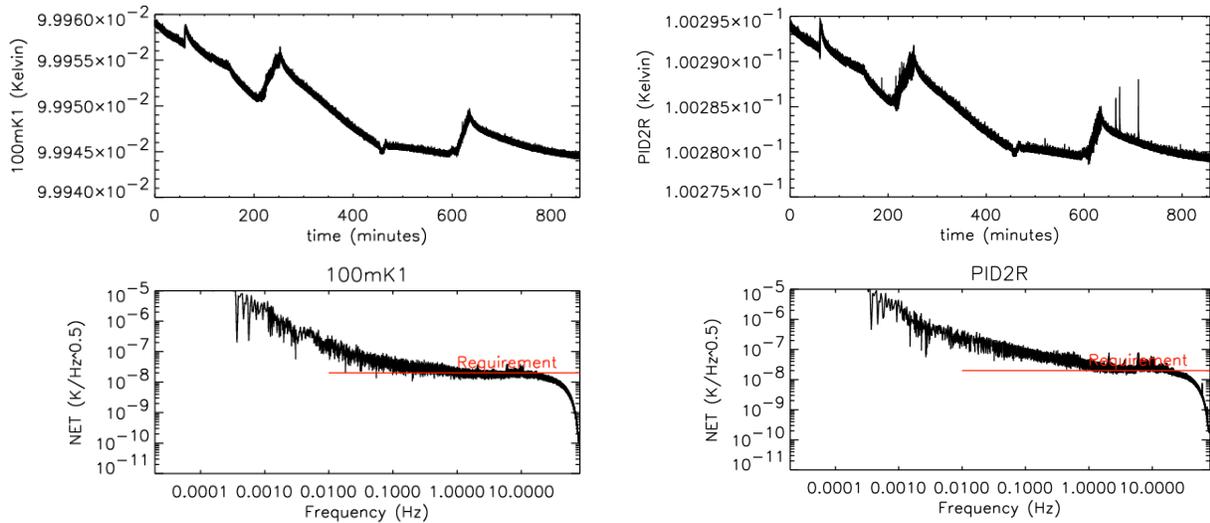


FIG. 4.42 – Stabilité de température de la platine bolomètre avec régulation du PID1 seulement.

posent la question de l'utilité de la régulation PID2 pour les opérations en vol d'HFI. Il semble que cette régulation PID2 ne soit pas utile ici grâce au filtrage passif de l'HoY des fluctuations haute fréquence résiduelles en provenance de l'étage dilution.

4.3.2 Tests de régulation de l'étage 1.6K

Régulation de l'étage 1.6K sur le CQM dans Saturne

La régulation de l'étage 1.6K sur le CQM dans Saturne est présentée Figure 4.43. La stabilité

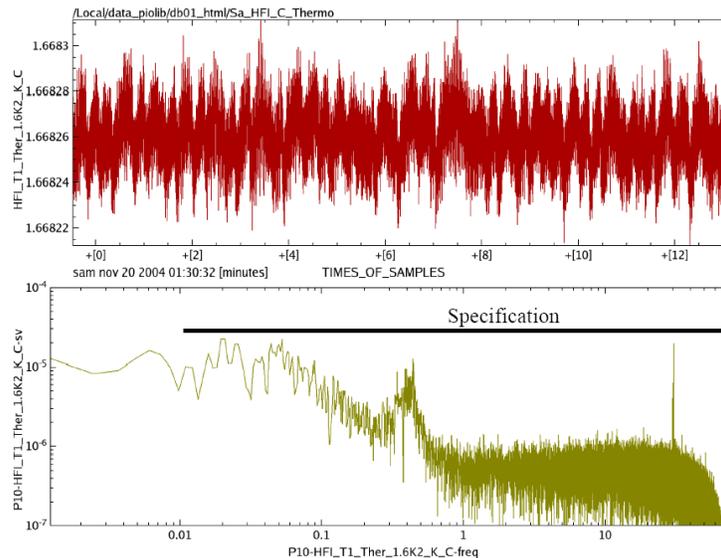


FIG. 4.43 – Signal et spectre du thermomètre PID1.6R pendant la campagne CQM (extrait de [83]).

de température atteinte est environ 30 fois meilleure que la spécification de $28 \mu\text{K}/\sqrt{\text{Hz}}$ pour cet étage. Le pic de régulation se situe à la fréquence de 0.4 Hz avec une amplitude de $10 \mu\text{K}/\sqrt{\text{Hz}}$.

Régulation de l'étage 1.6K durant les campagnes de test du PFM dans Saturne

Durant les campagnes de test du modèle de vol d'HFI dans Saturne (PFM-CAR et PFM-CAL), la stabilité de température de l'étage à 1.6 K était également excellente comme le montre le spectre de densité spectrale d'amplitude sur la Figure 4.44. La stabilité de température atteinte est également 30 fois meilleure que la spécification de $28 \mu\text{K}/\sqrt{\text{Hz}}$ pour l'étage à 1.6 K du PFM, quand il est régulé. Le pic de régulation se situe cette fois à la fréquence de 0.1 Hz avec une amplitude de $2 \mu\text{K}/\sqrt{\text{Hz}}$ environ. Le pic observé ici autour de 0.002 Hz correspond à l'effet induit par les fluctuations de 10 minutes de période de l'écran à 20 K du cryostat Saturne, qui se diffuse ensuite à tous les étages cryogéniques d'HFI par conduction thermique.

4.3.3 Tests de régulation de l'étage 4K

Régulation de l'étage 4K sur le CQM dans Saturne

Sur le spectre de la Figure 4.45, un pic lié à la régulation de l'étage à 4 K et centré autour de 0.15 Hz apparaît. L'amplitude du pic est 50 fois plus élevée que la spécification de stabilité

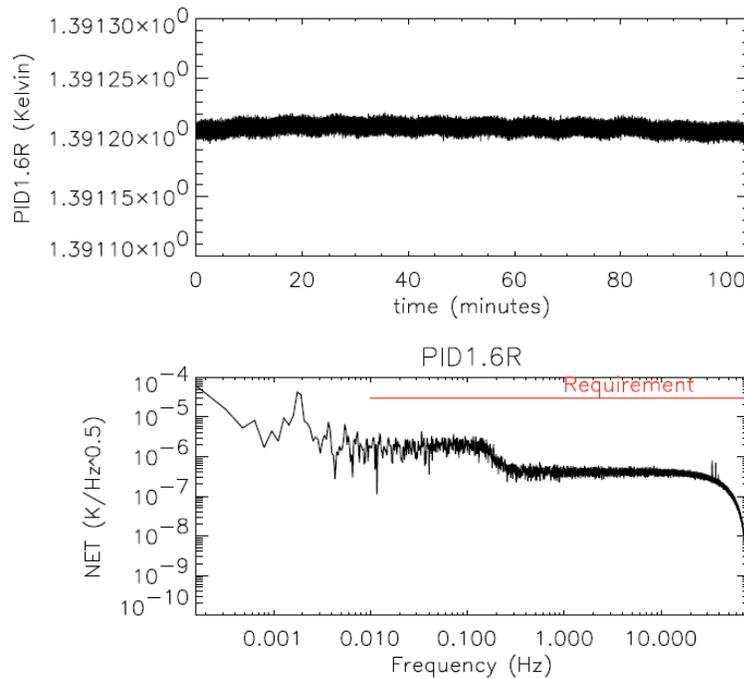


FIG. 4.44 – Signal et spectre du thermomètre PID1.6R durant la campagne de caractérisation du PFM dans Saturne. Le pic autour de 0.002 Hz correspond à l'effet induit par les fluctuations de 10 minutes de période observées sur l'écran à 20 K du cryostat Saturne durant les opérations d'HFI. Le plateau à haute fréquence correspond au bruit blanc du thermomètre.

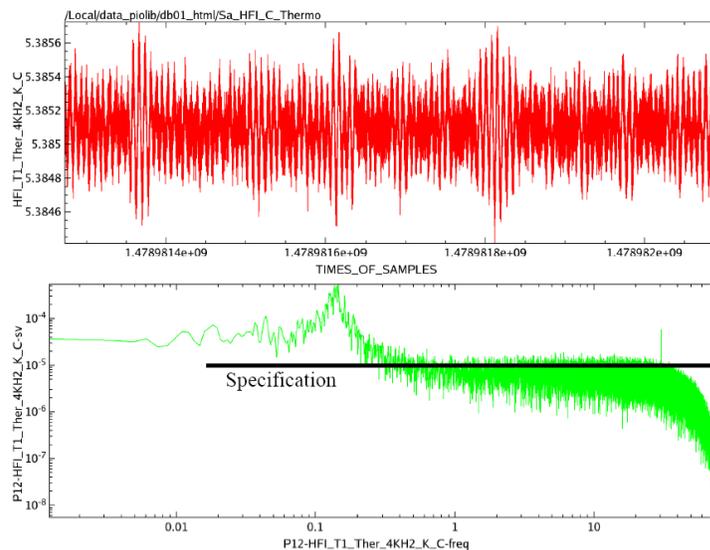


FIG. 4.45 – Signal et spectre du thermomètre PID4R pendant la campagne CQM (extrait de [83]).

de température de $10 \mu\text{K}/\sqrt{\text{Hz}}$ pour cet étage. Le pic de régulation de l'étage à 4 K est hors spécification car le bruit du thermomètre entre 0.1 et 80 Hz vaut $10 \mu\text{K}/\sqrt{\text{Hz}}$, soit exactement la spécification de stabilité de température de l'étage. Comme on sait que la valeur du pic d'une régulation PID est nécessairement plus grand que la valeur du bruit du thermomètre de régulation (Figure 4.34), il est alors logique que le pic de régulation soit ici hors spécification.

Régulation de l'étage 4K durant la campagne de caractérisation du PFM dans Saturne

Le signal du thermomètre PID4R durant la régulation de l'étage 4K au cours de la campagne de caractérisation du PFM dans Saturne est présenté Figure 4.46. Le bruit sur les thermomètres

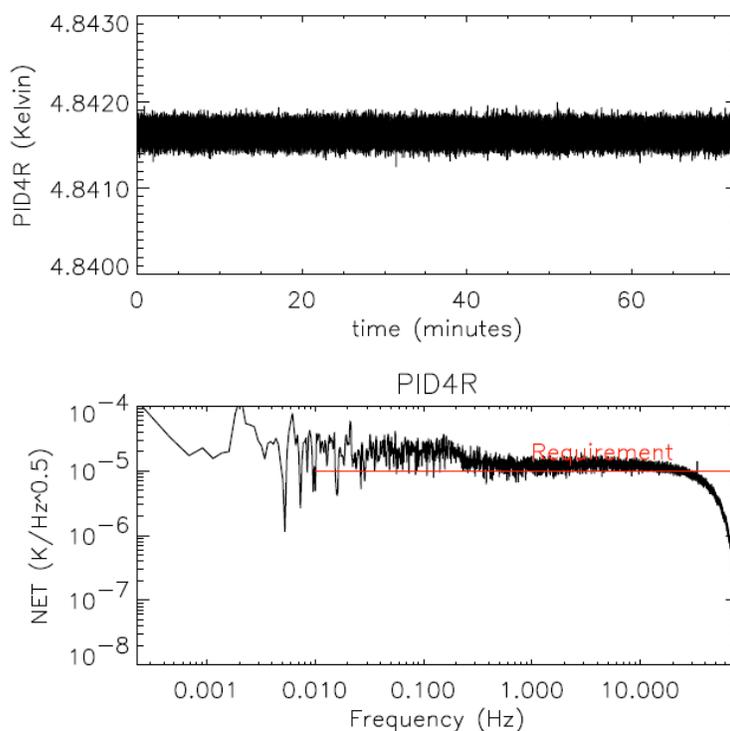


FIG. 4.46 – Signal et spectre du thermomètre $PID4R$ durant la campagne de caractérisation du PFM dans Saturne. Le pic autour de 0.002 Hz correspond à l'effet induit par les fluctuations de 10 minutes de période observées sur l'écran à 20 K du cryostat Saturne durant les opérations d'HFI.

à 4 K du modèle de vol est également trop élevé. C'est pourquoi le pic de régulation ici à la fréquence de 0.15 Hz, est légèrement hors spécification avec une amplitude de $20 \mu\text{K}/\sqrt{\text{Hz}}$.

Régulation de l'étage 4K durant la campagne d'étalonnage du PFM dans Saturne

Le signal du thermomètre $PID4R$ durant la régulation de l'étage 4K au cours de la campagne d'étalonnage du PFM dans Saturne, est présentée Figure 4.47. En comparant les spectres du thermomètre $PID4R$ sur les Figures 4.46 et 4.47, on constate que plus la température moyenne

de l'étage 4K est grande, plus le bruit sur le thermomètre est grand, car le courant dans le thermomètre est alors plus important, afin de pouvoir mesurer une température plus chaude. Le niveau du pic de régulation PID dépendant du niveau de bruit blanc sur le thermomètre de régulation, on peut donc conclure que l'amplitude du pic de régulation sur l'étage 4K d'HFI sera proportionnelle à la température de cet étage. Une température basse de cet étage est donc à préconiser en vol. Une température de 4.7 K est actuellement prédite par les modèles du RAL.

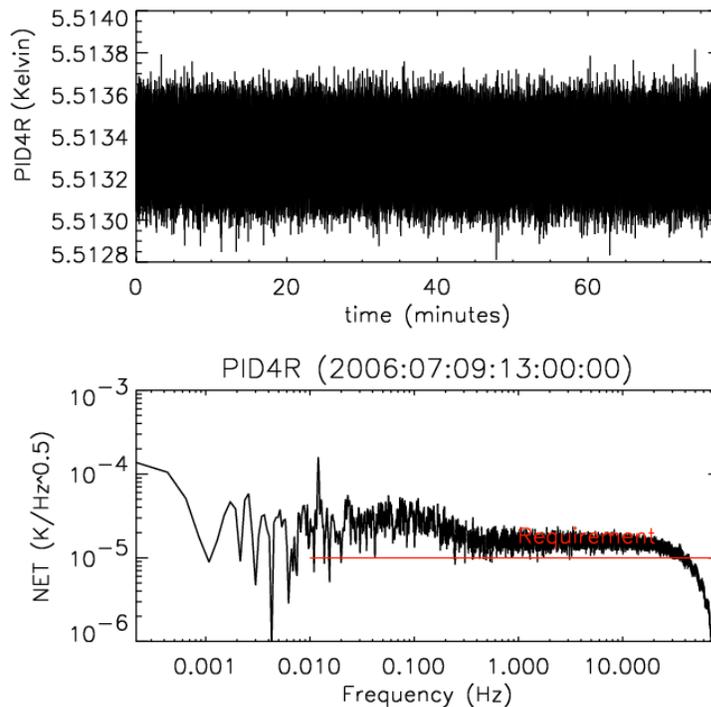


FIG. 4.47 – Signal et spectre du thermomètre PID4R durant la campagne d'étalonnage du PFM dans Saturne. Le pic autour de 0.015 Hz correspond à l'effet induit par la régulation de la platine 18 K d'HFI qui a été réglée afin d'atténuer les fluctuations de 10 minutes de période induites par l'écran à 20 K du cryostat Saturne durant les opérations d'HFI.

4.4 Conclusion et bilan sur les effets thermiques

Les différents chemins thermiques possibles entre les étages cryogéniques de Planck-HFI sont résumés sur la Figure 4.48. Les différents effets induits, leur amplitude et leur niveau

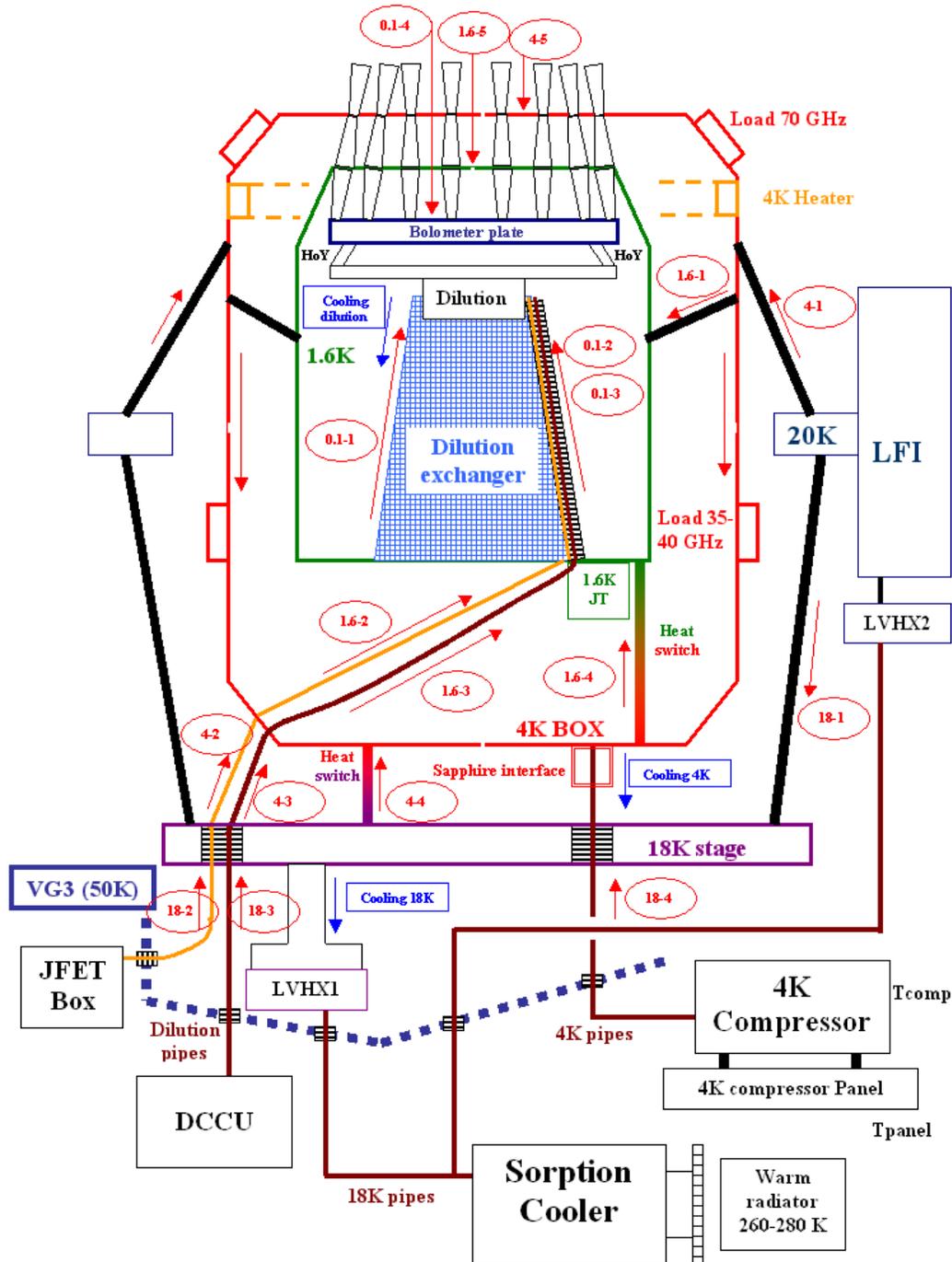


FIG. 4.48 – Les différents chemins thermiques possibles entre les étages cryogéniques de Planck-HFI (extrait de [92]).

d'atténuation attendu sont résumés dans cette section.

4.4.1 Emission thermique du SVM

La stabilité de température du module de service (SVM) de Planck attendue en vol est très bonne. La principale raison de cette stabilité est le choix d'une orbite avec un angle d'éclairement solaire constant durant toute la mission. Avec cette configuration, les fluctuations du Sorption Cooler constituent la principale source de fluctuations sur le SVM. Malgré cet effet intrinsèque, les résultats des modèles thermiques des ingénieurs d'Alcatel Alenia Space pour la stabilité de température des éléments du satellite sont excellents (tableau 4.9).

<i>PPLM thermal stability</i>		Computed max amplitude at 1/60 Hz (μK)	Requirements (μK)
Primary Reflector	Circular central part	0.2 ¹	1
	Moon illuminated part	1.3 ¹	15
	Circular outer part	1.1 ¹	3
Secondary Reflector		< < 0.1	1
Baffle		30 ¹	100
Shield 3 (internal)		4.7	100
Shield 3 (external)		1.3	13

¹ includes fluctuations due to Moon illumination, SVM and Sorption Cooler perturbations

TAB. 4.9 – *Stabilité de température du SVM et des miroirs du télescope : comparaison des prédictions du modèle et des spécifications imposées par LFI (extrait de [31]).*

Les fluctuations de la lumière parasite émise par le SVM et vue par les détecteurs dans les lobes lointains de l'optique devraient donc avoir un effet négligeable pour HFI.

4.4.2 Emission thermique du télescope

Avec une valeur maximale estimée à 1%, l'émissivité attendue pour le télescope est faible. De plus, d'après le tableau 4.9, la stabilité de température des miroirs du télescope est excellente puisqu'elle est meilleur que les $69 \mu\text{K}/\sqrt{Hz}$ spécifiés par HFI. Les fluctuations de lumière parasite émise par les miroirs du télescope devraient donc avoir une amplitude et un effet négligeable.

4.4.3 Effets thermiques sur l'étage à 4 K

Les sources possibles de fluctuations de cet étage ont pour origine les fluctuations intrinsèques des système cryogéniques embarqués : Le Sorption Cooler et le réfrigérateur 4K.

Les fluctuations intrinsèques du réfrigérateur 4K induisent quelques fluctuations résiduelles à des fréquences inférieures à f_{spin} .

Les fluctuations de la tête froide LVHX1 du Sorption Cooler induisent des fluctuations de la puissance de refroidissement du réfrigérateur 4K liées à la modulation de la température du pré-refroidissement de l'Hélium dans ce réfrigérateur 4K. Il s'agit d'un effet dit "d'origine thermodynamique". Le modèle du RAL prédit que la température de la tête froide du refroidisseur 4K est influencée par les fluctuations de la température de pré-refroidissement avec un gain de 7 mK/K. Cet effet thermodynamique et son amplitude ont été vérifiés sur le CQM à CSL [33]. Les fluctuations du SC induisent également des fluctuations du 4K par conduction entre les deux étages via les tuyaux du refroidisseur 4K et de la dilution. D'autres fluctuations générées par LVHX2 se superposent également aux fluctuations induites par LVHX1 dans la boîte à 4 K. Ces dernières fluctuations sont induites par conduction via les barres de carbone d'interface entre l'étage à 4 K d'HFI et le support d'LFI.

Pour quantifier l'effet de ces refroidisseurs actifs sur l'étage à 4 K, il est possible d'utiliser le spectre des fluctuations de ces refroidisseurs et la fonction de transfert présentée précédemment (Figure 4.49).

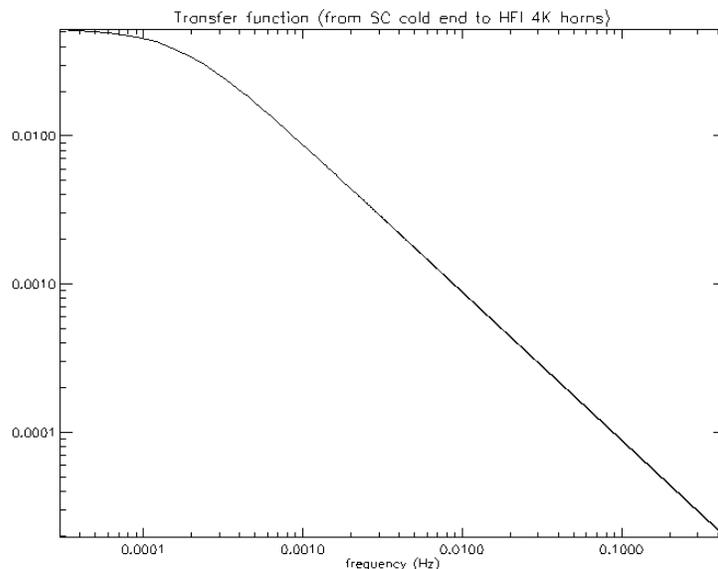


FIG. 4.49 – *Fonction de transfert utilisée pour quantifier l'effet des réfrigérateur actifs sur les cornets à 4K d'HFI.*

Après avoir multiplié les spectres des fluctuations de température sur les tête froides des deux réfrigérateurs actifs par les fonctions de transfert correspondantes, on obtient alors les résultats montrés sur les Figures 4.50 et 4.51 pour les deux configurations possibles du Sorption Cooler.

L'amortissement passif des fluctuations au dessus de f_{spin} permet de tenir la spécification de $10 \mu\text{K}/\sqrt{\text{Hz}}$.

Afin de réduire les fluctuations de température résiduelles en dessous de f_{spin} , il faut utiliser la régulation PID de l'étage. Cependant, l'utilisation de cette régulation entraîne l'apparition d'un pic de régulation au dessus de $10 \mu\text{K}/\sqrt{\text{Hz}}$. L'amplitude et la fréquence de ce pic sont fixées par les paramètres PID de la régulation. L'amplitude de ce pic de régulation pour HFI

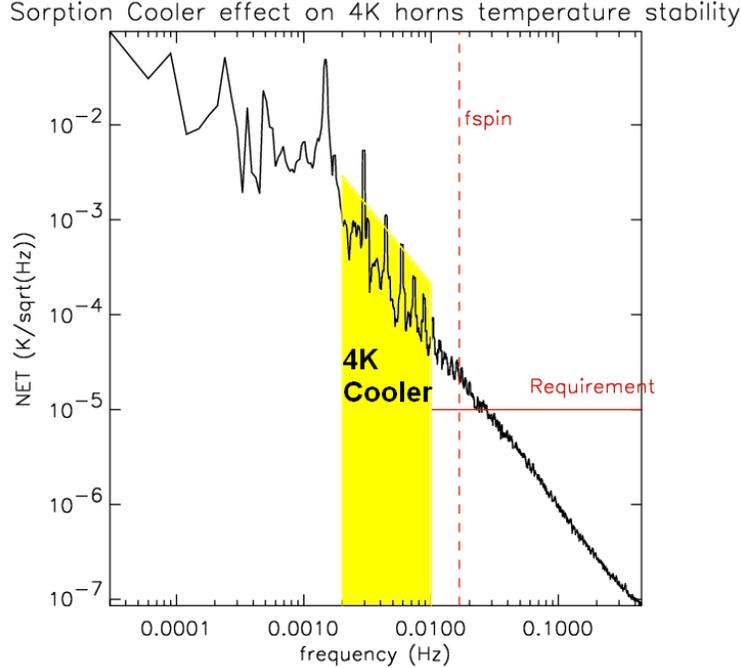


FIG. 4.50 – *Effet du Sorption cooler sur les cornets à 4 K (cas 667 secondes). La zone en jaune représente le domaine de fréquence dans lequel l'effet des fluctuations intrinsèques du réfrigérateur à 4 K peuvent dominer celles du SC.*

est nécessairement supérieure à la spécification car le bruit sur le thermomètre 4K utilisé pour cet régulation est de l'ordre de $10 \mu\text{K}/\sqrt{\text{Hz}}$.

Un bon compromis pour l'optimisation de la régulation de l'étage à 4 K serait de trouver des paramètres PID qui permettent de placer le pic de régulation en dessous de f_{spin} sur le spectre des fluctuations de température de l'étage à 4 K.

Enfin, l'effet résiduel des fluctuations de l'étage à 4 K sur le signal des bolomètres à 100 et 143 GHz sera décalé d'une dizaine de secondes par rapport au signal des thermomètres, à cause du temps de thermalisation de la puissance optique du 4K dans les filtres à 1.6 K.

4.4.4 Effets thermiques sur l'étage à 0.1 K

Les fluctuations de température du Sorption Cooler affectent la température de l'étage à dilution à travers le pré-refroidissement des gaz dans les tuyaux de la dilution. Une fois la régulation PID de l'étage à 4K allumée, les fluctuations de cet étage sont dominées par les fluctuations intrinsèques de la dilution.

Le filtrage passif à travers les supports en Holmium Yttrium placés entre la tête froide de la dilution et la platine bolomètre, permet d'atténuer efficacement les fluctuations de périodes inférieures à quelques minutes. La régulation PID de l'étage permet de corriger les dérives basse fréquence pour pouvoir tenir la spécification de stabilité pour cet étage. Les tests de régulation de l'étage à 0.1 K réalisés durant la campagne d'étalonnage du modèle de vol, semblent indiquer que l'utilisation du PID1 seul soit la configuration qui permette d'obtenir la meilleure stabilité

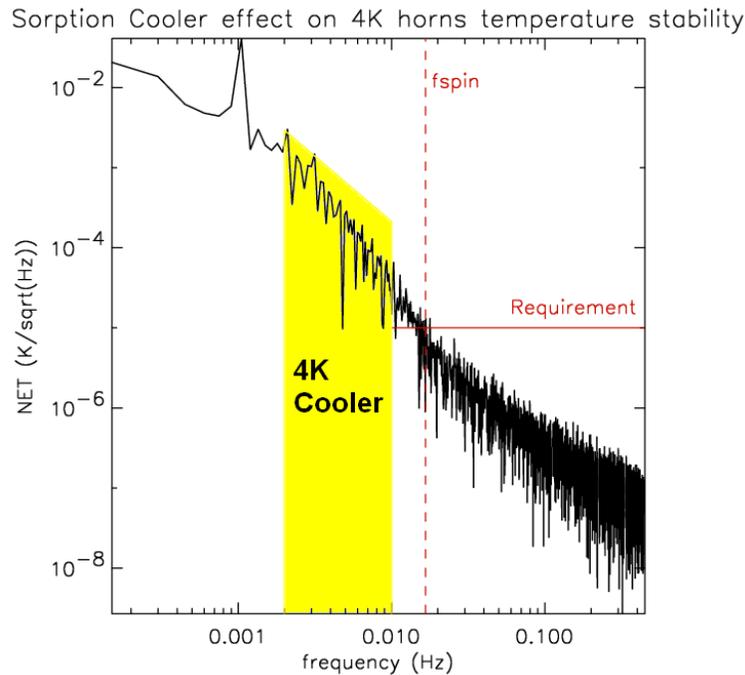


FIG. 4.51 – *Effet du Sorption cooler sur les cornets à 4 K (cas 940 secondes). La zone en jaune représente le domaine de fréquence dans lequel l'effet des fluctuations intrinsèques du réfrigérateur à 4 K peuvent dominer celles du SC.*

de la platine bolomètre en vol. Cependant, la stabilisation de la température de la platine bolomètre n'a pas été réalisée complètement durant les tests au sol du PFM, à cause des échauffements d'origine microphonique sur la platine bolomètre. Durant les opérations en vol, ces perturbations liées au cryostat Saturne n'existeront plus et la température de la platine bolomètre devrait se stabiliser suffisamment pour tenir la spécification, quelques heures après l'allumage de la régulation PID1. Enfin, l'effet thermique attendu lors de l'impact des rayons cosmiques sur la platine bolomètre en vol devrait rester négligeable [109].

4.4.5 Effets thermiques sur l'étage à 1.6 K

Les fluctuations de l'étage à 1.6 K sont complètement contrôlées par celles de la dilution. Ainsi, quand l'étage à 4 K n'est pas régulé, l'étage à 1.6 K fluctue suivant la période des fluctuations du Sorption Cooler avec un certain déphasage. Les fluctuations intrinsèques de la dilution induisent également des fluctuations de même période sur l'étage à 1.6 K. Quand l'étage à 4 K est régulé, les fluctuations induites par les fluctuations propres de la dilution sont la seule source de fluctuation de l'étage 1.6K.

L'utilisation de la régulation PID de l'étage 1.6K permet d'atténuer ces fluctuations pour les ramener à un niveau inférieur à la spécification.

4.4.6 Possibles fluctuations de température attendues en vol pour Planck et HFI

Les prédictions des fluctuations de température résiduelles pour les étages cryogéniques de Planck et d’HFI sont résumées dans les tableaux 4.10 et 4.11 pour deux périodes possibles du cycle du Sorption Cooler.

Élément de la chaîne cryogénique	ΔT (PID OFF)	Fréquence (PID OFF)	ΔT (PID ON)	Fréquence (PID ON)
Radiateur froid du Sorption Cooler (WR)	5.84 K pic à pic	1/5/667 Hz	-	-
3 ^{eme} V-groove	1.3 μ K pic à pic	1/60 Hz	-	-
Miroir primaire du télescope (M1)	1.3 μ K pic à pic	1/60 Hz	-	-
Miroir secondaire du télescope (M2)	0.1 μ K pic à pic	1/60 Hz	-	-
Tête froide LVHX1 du Sorption Cooler	0.5 K pic à pic	1/667 Hz	-	-
Tête froide LVHX2 du Sorption Cooler	0.6 K pic à pic	1/667 Hz	0.1K pic à pic	1/667 Hz
Tête froide du refroidisseur 4K	0.0031 K pic à pic	1/667 Hz	TBD	1/667 Hz
Cornets à 4K	0.0031 K pic à pic	1/667 Hz	TBD	TBD
Filtres à 1.6K	$1.8 \cdot 10^{-4}$ K pic à pic	1/667 Hz	TBD	TBD
Tête froide de la dilution (PID1)	$2.45 \cdot 10^{-5}$ K pic à pic	1/667 Hz	TBD	TBD
Platine bolomètres (PID2)	TBD	1/667 Hz	TBD	TBD

TAB. 4.10 – Amplitudes et fréquences des fluctuations de température résiduelles attendues en vol pour différents éléments de Planck-HFI et pour un SC avec une période de 667 secondes. Les valeurs sont données ici pour les différentes configurations possibles des étages, c’est à dire avec ou sans régulation PID.

La prédiction des fluctuations sur la platine bolomètre nécessite l’utilisation d’un modèle du transfert thermique entre les deux étages via l’HoY de façon à calculer les fluctuations au niveau du PID2 à partir de celle du PID1. Un tel modèle est en cours de développement au sein du groupe de travail sur les effets thermiques dans le Core-Team HFI. C’est pourquoi, les prédictions de fluctuations résiduelles sur la platine bolomètre n’ont pas été complétées dans les deux tableaux ci-dessus.

La prédiction des fluctuations des étages à 4 K, 1.6 K et 0.1 K lorsque les régulations sont allumées, nécessite l’utilisation d’un modèle des chaînes de régulation de ces étages. Un tel modèle est également en cours de développement au sein du groupe de travail sur les effets thermiques du Core-Team HFI (voir chapitre 6 de cette thèse). Une fois ces simulations terminées, elles pourront être utilisées pour trouver les paramètres PID permettant d’avoir des fonctions de transfert avec PID optimales pour ces étages. Les prédictions de fluctuations résiduelles associées à ces régulations pourront alors être complétées dans les deux tableaux ci-dessus.

Enfin, les fluctuations induites sur les étages à 4 K et 0.1 K d’HFI par les fluctuations du SC avec une période de 667 secondes possèdent une amplitude plus faible que pour la configuration de 940 secondes de période quand les régulations PID des étages de l’instrument ne sont pas allumées. Même si l’amplitude des fluctuations sur le SC avec une période de 940 secondes est plus faible qu’avec la période de 667 secondes, l’amortissement passif de la chaîne cryogénique

Élément de la chaîne cryogénique	ΔT (PID OFF)	Fréquence (PID OFF)	ΔT (PID ON)	Fréquence (PID ON)
Radiateur froid du Sorption Cooler (WR)	5.18 K pic à pic	1/5/940 Hz	-	-
3 ^{eme} V-groove	1.3 μ K pic à pic	1/60 Hz	-	-
Miroir primaire du télescope (M1)	1.3 μ K pic à pic	1/60 Hz	-	-
Miroir secondaire du télescope (M2)	0.1 μ K pic à pic	1/60 Hz	-	-
Tête froide LVHX1 du Sorption Cooler	0.42 K pic à pic	1/940 Hz	-	-
Tête froide LVHX2 du Sorption Cooler	0.56 K pic à pic	1/940 Hz	0.1K pic à pic	1/940 Hz
Tête froide du refroidisseur 4K	0.0037 K pic à pic	1/940 Hz	TBD	1/940 Hz
Cornets à 4K	0.0037 K pic à pic	1/940 Hz	TBD	TBD
Filtres à 1.6K	2.54 10^{-4} K pic à pic	1/940 Hz	TBD	TBD
Tête froide de la dilution (PID1)	3.29 10^{-5} K pic à pic	1/940 Hz	TBD	TBD
Platine bolomètres (PID2)	TBD	1/940 Hz	TBD	TBD

TAB. 4.11 – Amplitudes et fréquences des fluctuations de température résiduelles attendues en vol pour différents éléments de Planck-HFI et pour un SC avec une période de 940 seconde. Les valeurs sont données ici pour les différentes configurations possibles des étages, c'est à dire avec ou sans régulation PID.

est lui plus faible à 1/940 Hz. Ce dernier point explique pourquoi la configuration avec 667 secondes de période est plus favorable en terme d'amplitude résiduelle de fluctuation.

Chapitre 5

La diaphonie électronique

« Aucun de nous en agissant seul ne peut atteindre le succès. »

Nelson Mandela

J’ai pu coordonner plusieurs tests pendant la Phase-D (Intégration et tests) du projet Planck afin de quantifier le niveau de la diaphonie ou “cross-talk” sur l’électronique de lecture d’HFI. Au cours de ces tests, deux types de diaphonie électronique ont été identifiés. La diaphonie en courant et la diaphonie en tension. L’effet en tension est le plus gênant pour les observations de Planck. Après les étalonnages du PFM, les résultats des tests de diaphonie nous révèlent que l’effet en tension est faible (meilleur que les 60 décibels de la spécification associée). Compte-tenu de ce faible niveau, les résultats des mesures PFM permettent seulement de donner une limite supérieure sur le niveau de diaphonie en tension. La diaphonie en courant, même si elle est moins problématique, ne doit pas non plus être négligée. C’est pourquoi nous avons étalonné cet effet en courant sur le PFM entre les 5112 couples de voies de l’électronique.

5.1 Le modèle de diaphonie après les mesures CQM

Plusieurs mesures de diaphonie (désignées par le sigle EXT dans les procédures d’étalonnage d’HFI) ont été réalisées sur le CQM [59], [70]. Après ces tests CQM, nous avons identifiés deux sortes d’effets liés à la diaphonie électronique : la diaphonie en courant et la diaphonie en tension.

5.1.1 Le modèle de diaphonie

A partir des mesures CQM, nous avons établi un modèle de diaphonie qui reproduit les données CQM. Dans ce modèle, lorsque deux canaux voisins (i et j) de l’électronique sont polarisés respectivement par les courants I_i et I_j , nous avons l’équation suivante pour la tension V_j aux bornes du canal j de l’électronique :

$$V_j = R_j(I_j + C_{i/j}^I I_i) + C_{i/j}^V V_i \quad (5.1)$$

où V_i est la tension aux bornes du canal i de l'électronique et R_j l'impédance du bolomètre b_j lue par le canal j de l'électronique. Celle-ci s'écrit :

$$R_j = f(I_j + C_{i/j}^I I_i, T_{0j}, P_j + \sum_{k \neq j} C_{k/j}^{Opt} P_k) \quad (5.2)$$

où $C_{i/j}^I$ est le coefficient de diaphonie caractérisant l'effet en courant du canal électronique i vers le canal j . $C_{i/j}^V$ est le coefficient de diaphonie caractérisant l'effet en tension du canal électronique i vers le canal j . T_{0j} est la température du bain cryogénique du bolomètre b_j . P_j et P_k sont les puissances optiques incidentes sur les bolomètres b_j et b_k respectivement. $C_{i/j}^{Opt}$ est le coefficient de diaphonie optique associé à la fuite optique éventuelle depuis le canal photométrique i vers le canal photométrique j .

Au premier ordre, l'effet de diaphonie en courant ajoute simplement un offset constant sur les canaux de l'électronique. L'effet de diaphonie en tension est plus gênant pour HFI car il engendre des signaux parasites variables. Ce dernier doit donc être parfaitement quantifié afin de vérifier qu'il reste négligeable pour les observations.

5.1.2 Les hypothèses du modèle de diaphonie

Source de diaphonie

Des tests sous-systèmes sur les boîtiers JFET [72], PAU et REU ont permis d'identifier que les effets de diaphonie apparaissent au niveau de la tresse des fils électriques dans la boîte JFET. Ces tests ont démontré que le niveau de diaphonie dans l'ensemble PAU/REU [59] est négligeable par rapport à celui mesuré sur la boîte JFET (tableau 5.1).

Signe des coefficients de diaphonie

Durant les mesures CQM, nous avons identifié que lorsque l'on change le courant dans un canal de l'électronique, un léger changement de tension positif ou négatif est observé sur les voies voisines. Dans notre modèle décrit par l'équation 5.1, ce changement de tension est la somme des deux effets de diaphonie (courant et tension). Toute la difficulté de l'analyse des mesures de diaphonie électronique consiste alors à quantifier l'amplitude et le signe des coefficients associés respectivement à ces deux effets. Par défaut, on suppose que le signe des coefficients de diaphonie électronique en tension et en courant peuvent être positifs ou négatifs. On suppose alors que les signes des coefficients dépendent de la façon dont les fils des canaux électroniques sont entremêlés dans la boîte JFET.

Linéarité

Dans le modèle de diaphonie, les effets de diaphonie en courant et en tension sont caractérisés par des coefficients constants ce qui suppose que ces effets sont linéaires.

Test Conditions	f test = 110Hz			Rbol= 10MEG			Amp[mVrms]= 100		
	CH_0			CH_1			CH_2		
	Min	Measured [dB]	Max	Min	Measured [dB]	Max	Min	Measured [dB]	Max
CH_0	NA		NA	60	84		60	79	
CH_1	60	83		NA		NA	60	93	
CH_2	60	79		60	91		NA		NA
CH_3	60	95		60	83		60	89	
CH_4	60	96		60	101		60	86	
CH_5	60	102		60	90		60	105	

CROSS-TALK MATRIX									
Test Conditions	f test = 110Hz			Rbol= 10MEG			Amp[mVrms]= 100		
	CH_3			CH_4			CH_5		
	Min	Measured [dB]	Max	Min	Measured [dB]	Max	Min	Measured [dB]	Max
CH_0	60	97		60	95		60	101	
CH_1	60	83		60	104		60	90	
CH_2	60	90		60	85		60	105	
CH_3	NA		NA	60	85		60	99	
CH_4	60	84		NA		NA	60	90	
CH_5	60	99		60	89		NA		NA

TAB. 5.1 – Résultats des mesures de diaphonie sur la ceinture 0 de la boîte JFET PFM (extrait de [72]).

Variation avec la température

Durant l'analyse des mesures de diaphonie, on suppose que les coefficients varient de façon négligeable avec la température durant les mesures. Pour pouvoir vérifier cette hypothèse, il faut réaliser plusieurs séries de mesures à différentes températures et vérifier que l'on retrouve les mêmes coefficients.

5.2 Mesures de diaphonie électronique sur le PFM

5.2.1 Mesures sur les bolomètres aveugles

Principe de mesure

Les mesures sur les bolomètres aveugles (EXT_Dark) réalisées durant la campagne de calibration PFM consistaient à illuminer le plan focal d'HFI avec un signal optique modulé afin de détecter un éventuel signal parasite sur les bolomètres aveugles (Dark1 and Dark2) disposés dans le FPU.

Mesures EXT_Dark1 avec la source optique modulée CSM

Pour le test EXT_Dark1 présenté ici, une source modulée CSM disposée au centre du miroir du dispositif de test optique de Saturne est utilisée. Aucun courant n'est envoyé sur les 72 voies de l'électronique sauf pour celles des trois ceintures thermomètres, d'un bolomètre aveugle et son bolomètre voisin sur la ceinture. Le test EXT_Dark1 a été réalisé le 28/06/06 et commencé à 13h19 (heure QLA). Deux tests ont eu lieu successivement. Le premier sur le couple de canaux 14/15 pendant une heure et le second sur les canaux 74/75 durant une heure également. Ces

deux couples de voies ont été choisis parce que les voies 14 et 74 sont celles qui sont voisines des deux bolomètres aveugles dans la boîte JFET. Or les plus forts niveaux de diaphonie sont mesurés entre deux voies voisines. Pour ce premier test, la source CSM était modulée à 2.5 Hz et la température de la platine bolomètre était de 98 mK environ.

Le signal optique modulé à 2.5 Hz et ses harmoniques sont clairement visibles sur les Figures 5.1 et 5.2. Aucun pic n'est visible à 2.5 Hz sur le spectre d'amplitude du signal des bolomètres

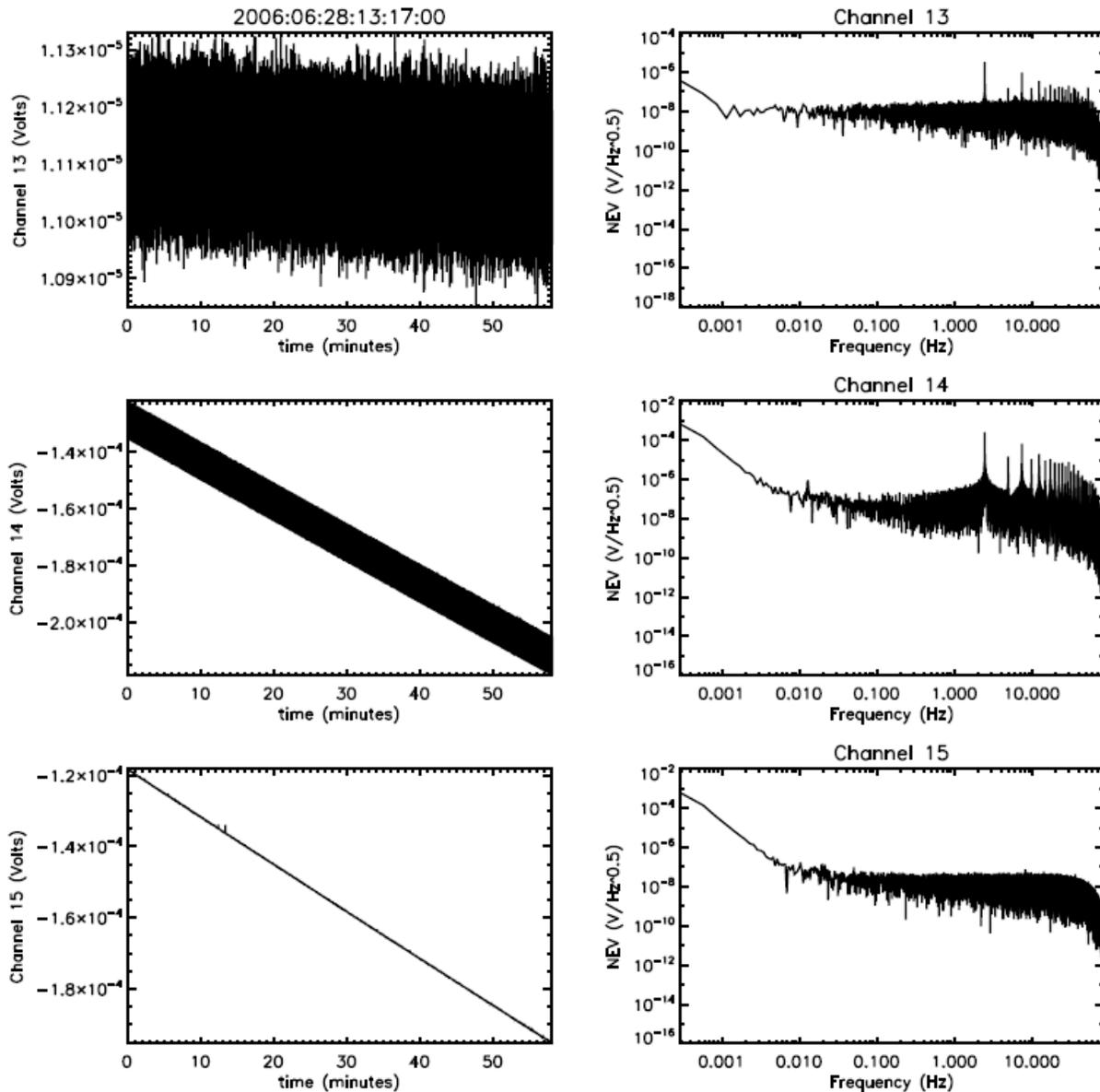


FIG. 5.1 – Mesure *EXT_Dark1* sur la ceinture 1. Les courbes à gauche représentent les mesures sur les voies 13, 14 et 15. A droite, les spectres associés au signal de chaque mesure est également représenté.

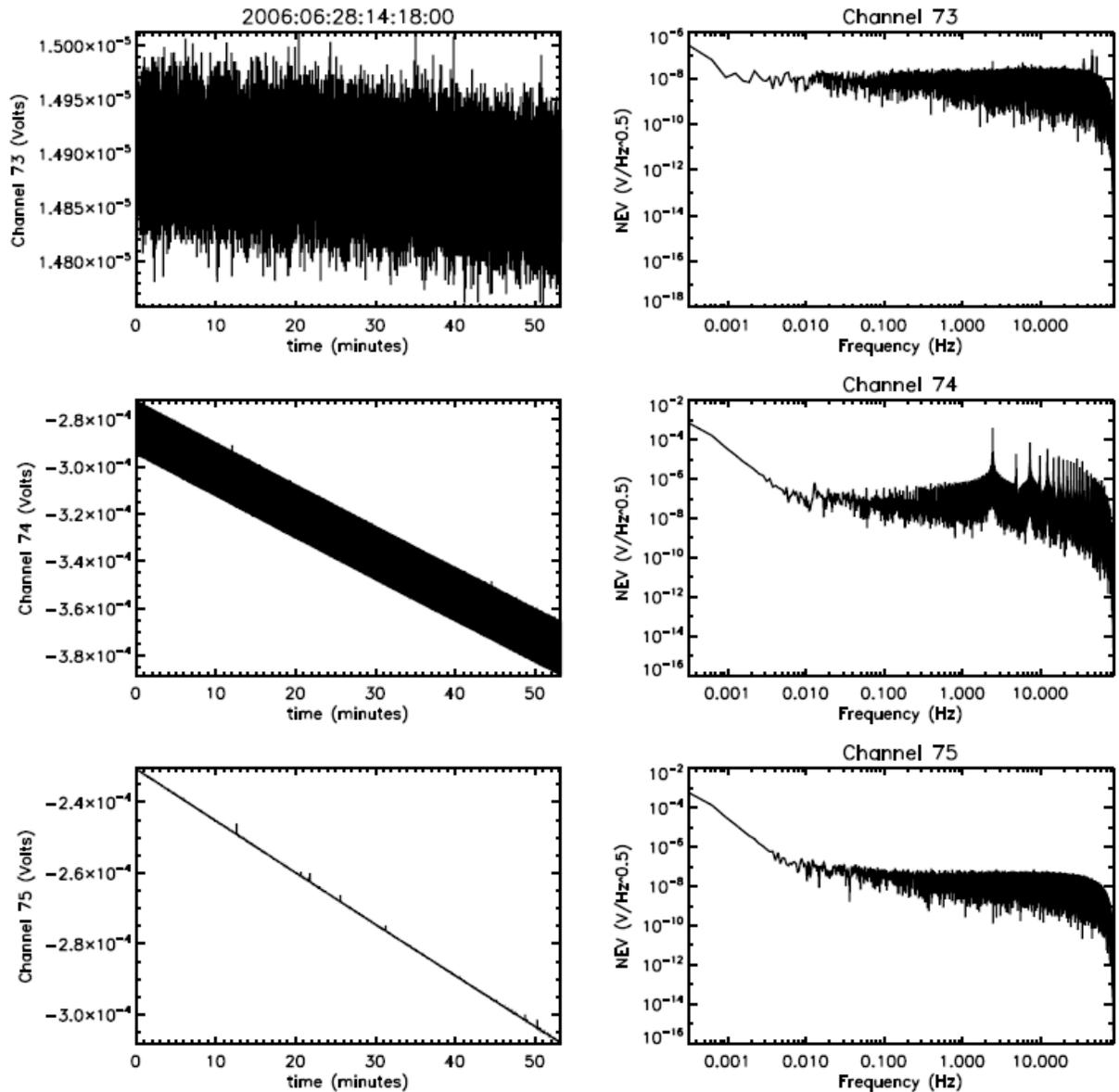


FIG. 5.2 – Mesure *EXT_Dark1* sur la ceinture 7. Les courbes à gauche représentent les mesures sur les voies 13, 14 et 15. A droite, les spectres associés au signal de chaque mesure est également représenté.

aveugles (canaux 15 et 75). Cette absence de pic sur ces capteurs aveugles nous indique que les effets de diaphonie en tension entre les bolomètres aveugles et leurs bolomètres voisins n'ont pas été détectés durant ce premier test. Des pics peuvent être distingués sur les spectres d'amplitude des canaux 15 et 75. Ces pics se situent à des fréquences différentes de celles des harmoniques du signal de CSM détecté sur les voies 14 et 74. Après avoir vérifié que ces pics situés au-dessus de 8 Hz sont également présents sur le spectre du signal des bolomètres 15 et 75 quand la source CSM est éteinte, j'ai pu conclure qu'ils sont d'origine microphonique et qu'il ne s'agit donc pas

de diaphonie. On retrouve également ces pics de microphonie sur les six thermomètres à 0.1 K d'HFI durant la mesure EXT_Dark1.

Pour s'assurer que la diaphonie en tension éventuelle entre les voies 14 et 15 vérifie bien la spécification de 60 dB, j'ai superposé au signal de la voie 14 celui de la voie 15 divisé par 1000. Le résultat de cette somme, présenté sur la Figure 5.3, montre que si la diaphonie en tension était égal à 60 dB son effet serait clairement visible sur la voie 15. Ce n'est pas le cas

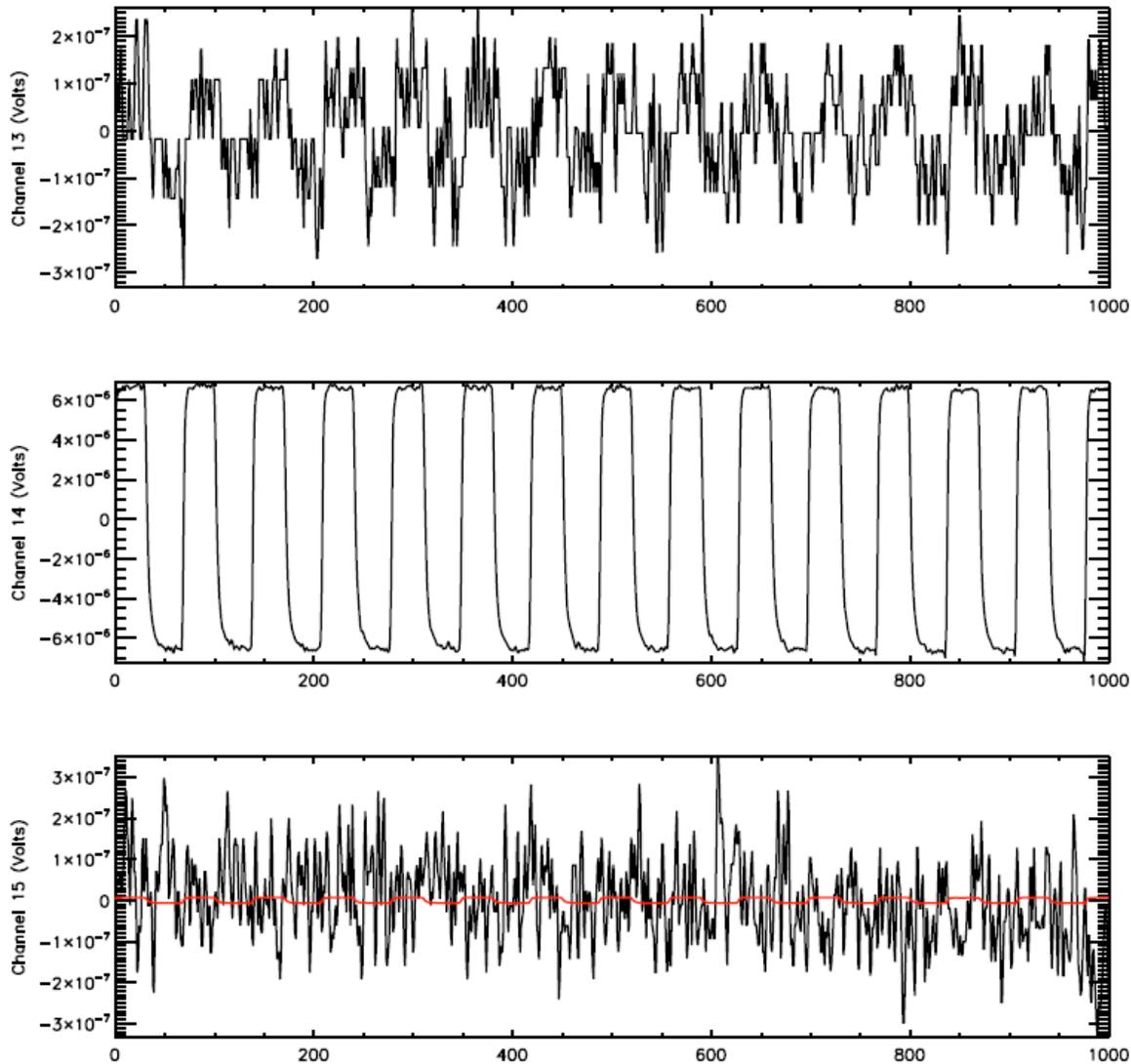


FIG. 5.3 – Zoom sur les mesures EXT_Dark1 sur la ceinture 1. La moyenne du signal sur chaque voie a été soustraite préalablement. Le signal en rouge superposé au signal de la voie 15 représente le signal de la voie 14 divisé par 1000.

ici dans ces mesures EXT_Dark1. On peut donc conclure que la valeur du coefficient $C_{14/15}^V$ est supérieure à 60 dB.

De plus, afin de vérifier la validité de notre méthode d'analyse spectrale pour la détection de la diaphonie en tension, j'ai ajouté au signal mesuré sur la voie 15 durant ce premier test le signal de la voie 14 divisé par 1000 (Figure 5.4).

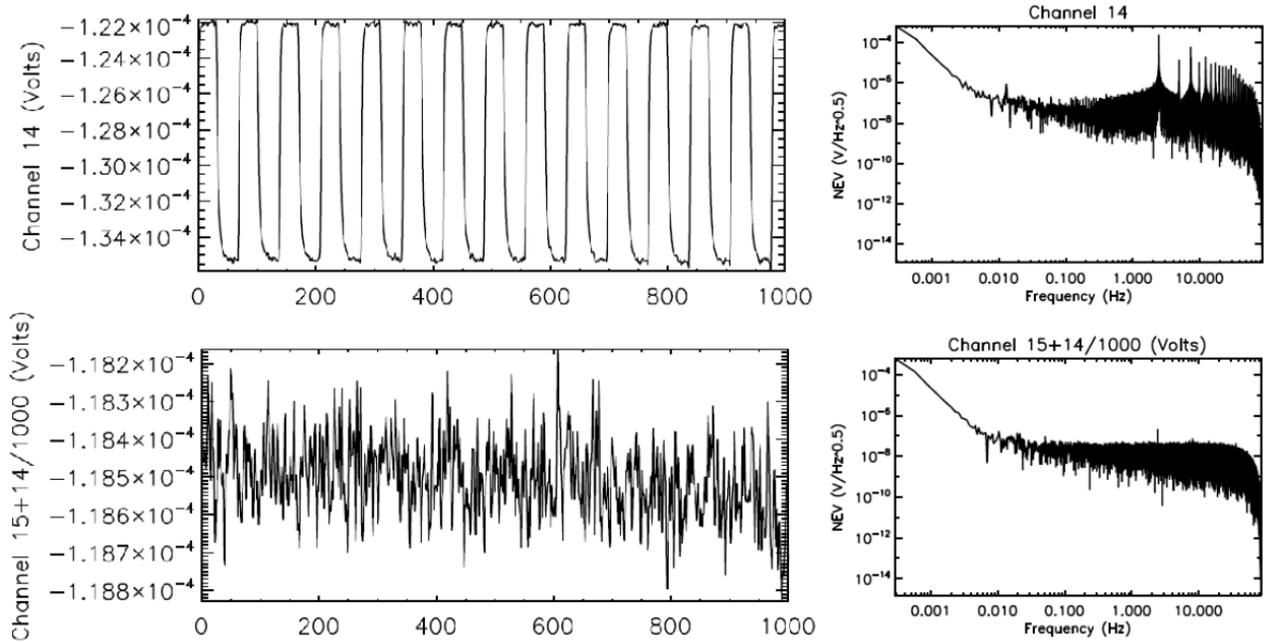


FIG. 5.4 – Test de détection de la diaphonie en tension sur un bolomètre aveugle par la méthode d'analyse spectrale.

Le spectre de la somme a ensuite été tracé (Figure 5.4). Un pic à la fréquence 2.5 Hz apparaît alors sur le spectre de cette somme. J'ai ainsi pu conclure que si une diaphonie en tension de 60 dB existait, je l'aurais détecté par analyse spectrale. Puisque ce n'est pas le cas dans les données EXT_Dark1 (Figure 5.1), nous pouvons donc conclure à nouveau que la valeur de $C_{14/15}^V$ est supérieure à 60 dB.

Enfin, une limite haute sur la valeur de $C_{15/14}^V$ peut être déduite de la mesure de la ceinture 1 durant le test EXT_Dark1. Puisque la valeur du bruit de mesure à 2.5 Hz vaut $20 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ et que la valeur du pic de CSM sur le canal 14 est de $2 \cdot 10^{-4} \text{ V}/\sqrt{\text{Hz}}$, on peut en déduire que : $C_{14/15}^V < \frac{2 \cdot 10^{-8}}{2 \cdot 10^{-4}} = 10^{-4}$

En décibels, on a alors : $C_{14/15}^V > 80 \text{ dB}$. Ce résultat est également compatible avec la valeur de 85 dB mesurée pour ce coefficient sur la boîte JFET [72].

Pour la mesure sur la ceinture 7, on a : $C_{74/75}^V < \frac{2 \cdot 10^{-8}}{4 \cdot 10^{-4}} = 5 \cdot 10^{-5}$

Soit : $C_{14/15}^V > 90 \text{ dB}$. Ce résultat n'est pas tout à fait compatible avec la valeur de 84 dB mesurée pour ce coefficient sur la boîte JFET [72].

Par ailleurs, sur les Figures 5.1 et 5.2, un pic à la fréquence de 2.5 Hz apparaît sur les canaux 13 et 73 alors que ces deux canaux ne sont pas polarisés durant ce test. Une hypothèse pour

expliquer ce signal est la présence d'un effet de diaphonie en courant sur les canaux 13 et 73. Puisque le REU est configuré pour n'envoyer aucun courant dans ces deux canaux, l'apparition d'un faible courant parasite dans ces mêmes canaux permet d'expliquer pourquoi les bolomètres réagissent alors à un signal optique modulé. Le même phénomène apparaît sur plusieurs canaux bolométriques voisins, durant ce test avec les canaux 14 et 15 polarisés. Sur la Figure 5.5, représentant le spectre du signal des bolomètres des ceintures 1, 2 et 3, on s'aperçoit que les canaux 05, 13, 23 et 24 présentent un pic à 2.5 Hz caractéristique de ce phénomène. Des pics de

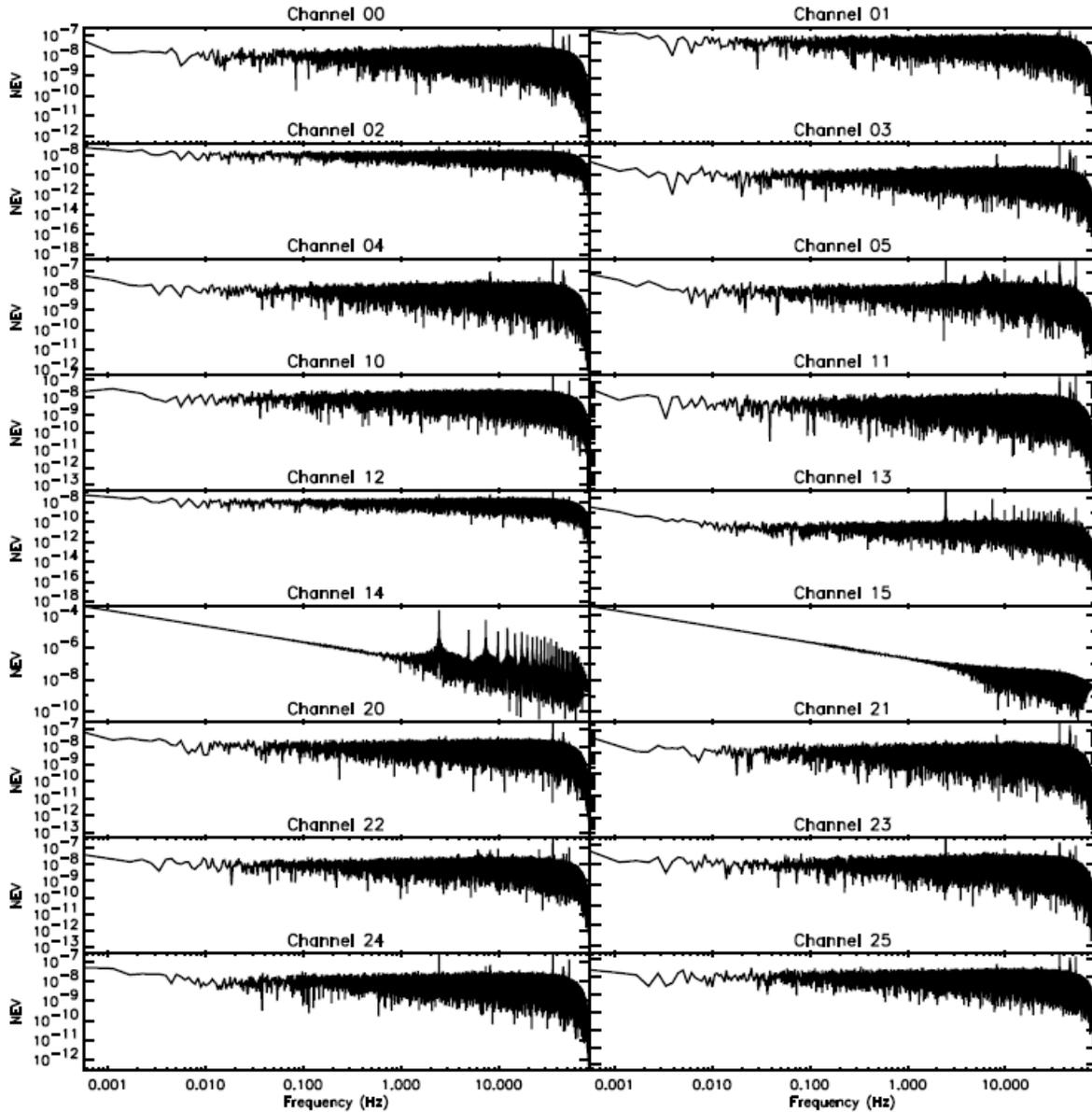


FIG. 5.5 – *Mesure EXT_Dark1 sur la ceinture 1. Les canaux 05, 13, 23 et 24 présentent un pic de diaphonie à 2.5 Hz.*

plus petites amplitudes peuvent être distingués sur d'autres voies que ces quatre dernières si

l'on se focalise autour de la fréquence de 2.5 Hz pour les voies de ces trois ceintures. Ce dernier résultat montre bien qu'il existe un effet de diaphonie en courant plus ou moins important entre tous les canaux de la boîte JFET.

Mesures EXT_Dark3 avec la source optique modulée CSM

Afin d'essayer de détecter un effet de diaphonie en tension, j'ai réalisé une autre mesure avec la source CSM sur une durée de mesure plus longue que pour le test EXT_Dark1 (Figure 5.6).

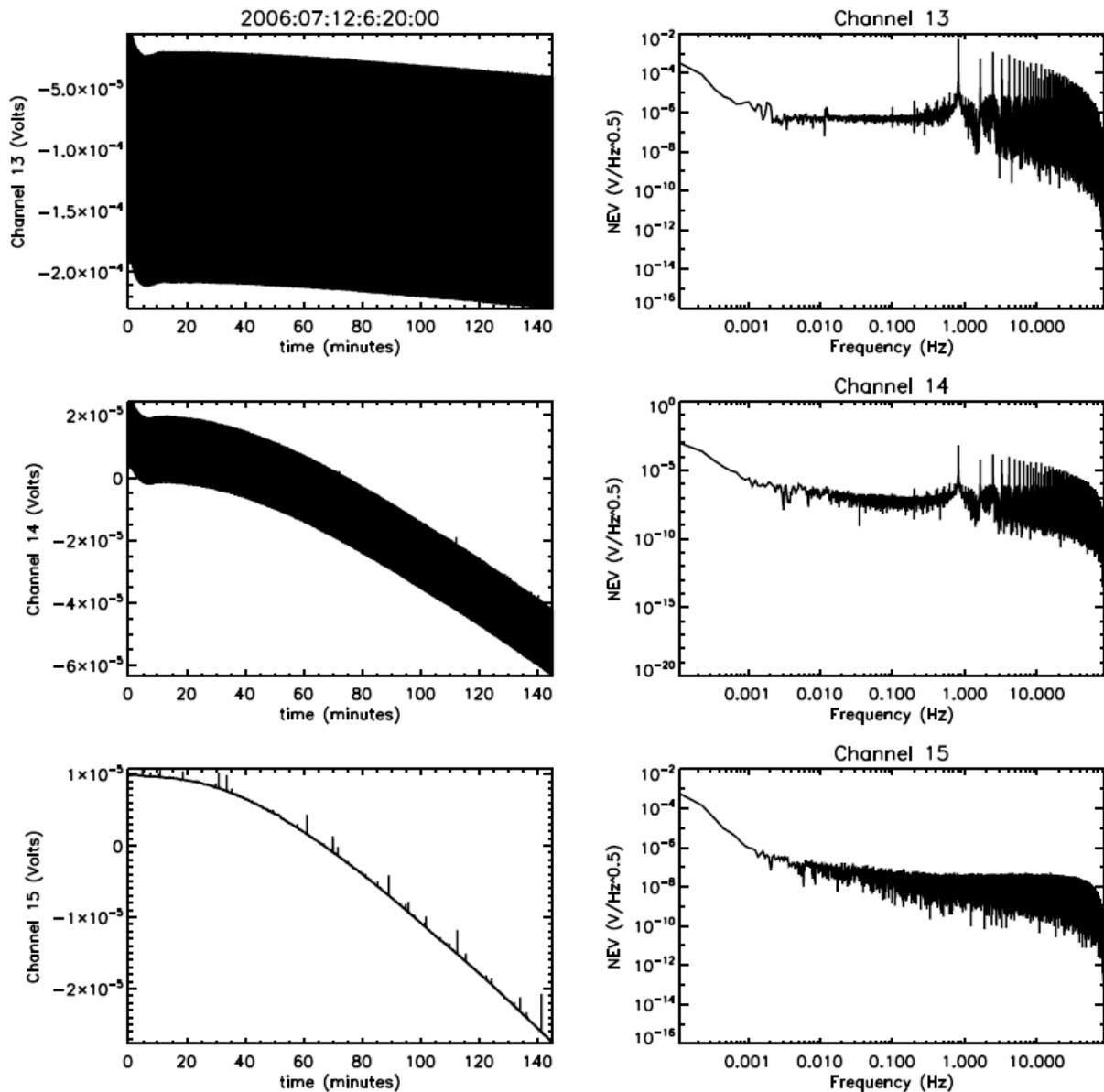


FIG. 5.6 – *Mesure EXT_Dark3 sur la ceinture 1.*

J'ai ainsi réalisé le test EXT_Dark3 le 12/07/06 à 6h20 AM (QLA time). J'ai arrêté le test à 9h10 quand le remplissage du cryostat Saturne a commencé. Dans ce test, j'ai polarisé tous les bolomètres des ceintures 1 et 7 d'HFI. Aucun courant n'a été envoyé sur les autres voies bolométriques durant le test. En revanche la procédure de diaphonie avec des stimulus en courant a été lancée en parallèle sur les trois dernières ceintures d'HFI (9, 10 et 11). Dans ce test, chacune des voies de ces ceintures a été polarisée successivement. Compte tenu de l'éloignement de ces trois ceintures avec les ceintures 1 et 7 étudiées, nous avons admis ici que la mesure de diaphonie sur ces trois dernières voies ne parasitait pas le test sur les bolomètres aveugles.

La Figure 5.6 montre le résultat de ce test EXT_Dark3 sur la ceinture 1. Aucun pic de diaphonie ne peut être distingué sur le spectre du signal du bolomètre aveugle de la voie 15. Le même résultat a été observé sur le bolomètre aveugle de la voie 75.

La précision de l'estimation de la limite haute sur l'effet de diaphonie en tension dépend ici de la précision de mesure du niveau de bruit blanc sur les bolomètres. Aussi, afin de vérifier l'effet des glitches mesurés par les bolomètres sur l'amplitude du spectre associé, les signaux de bolomètres 15 et 75 ont été déglitchés (Figure 5.7).

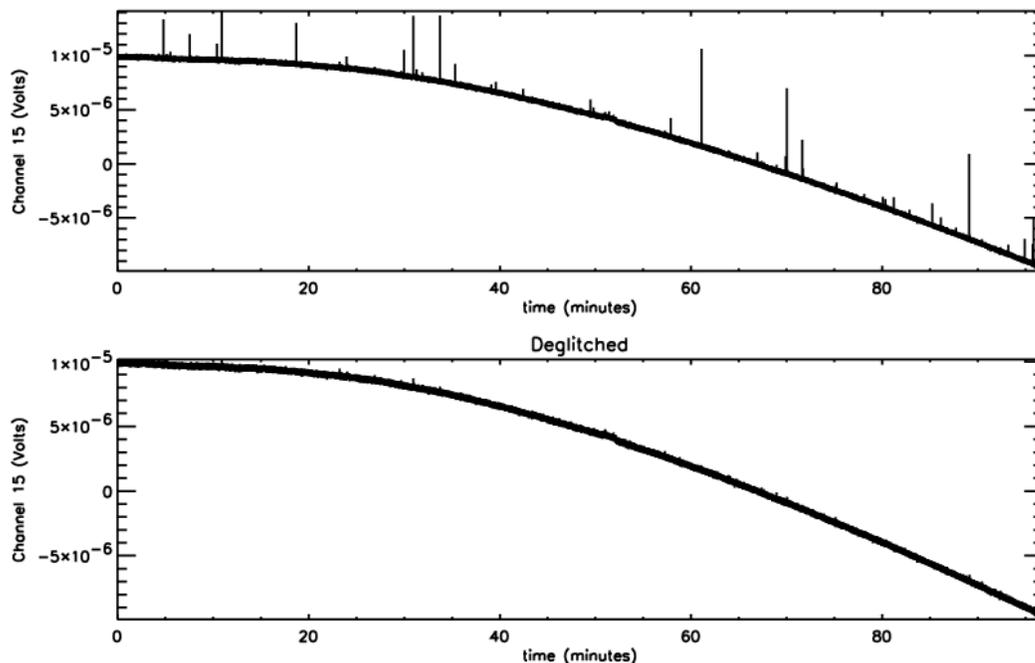


FIG. 5.7 – Mesure EXT_Dark3 sur la ceinture 1 avant (haut) et après (bas) déglitchage des données du canal 15.

Le spectre d'amplitude du signal du bolomètre 15 avec et sans glitches est représenté Figure 5.8. Le spectre du bolomètre 75 est lui représenté Figure 5.9.

82 glitches ont été retirés de la mesure sur le canal 15 et 51 pour la mesure sur le canal 75. Finalement, nous pouvons conclure que l'erreur induite par les glitches sur l'amplitude des spectres de puissance des bolomètres aveugles est négligeable dans ce test EXT_Dark3. Le niveau de bruit blanc sur les bolomètres 15 et 75 au dessus de 1Hz est similaire et vaut environ $20 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$

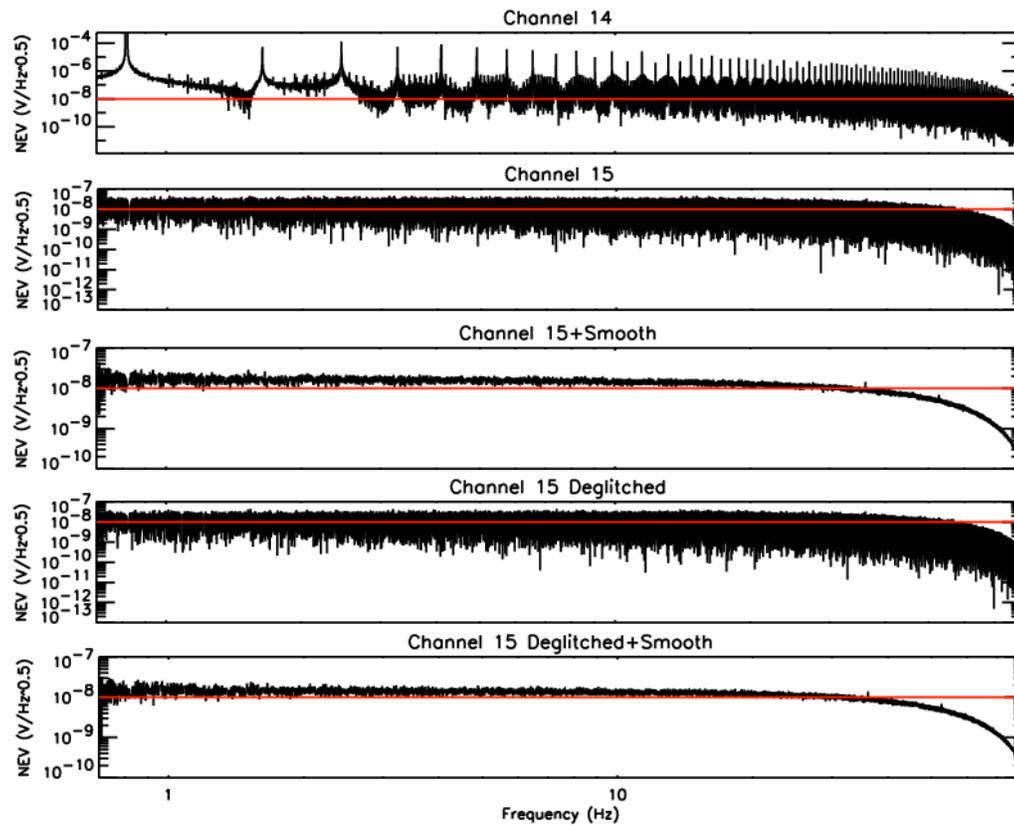


FIG. 5.8 – Spectre des canaux 14 et 15 avant et après déglitchage du signal de la voie 15. Les spectres sont représentés entre 0.7 et 80Hz avec ou sans lissage des données de la voie 15. Les lignes rouge correspondent à un niveau de bruit de $10 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$.

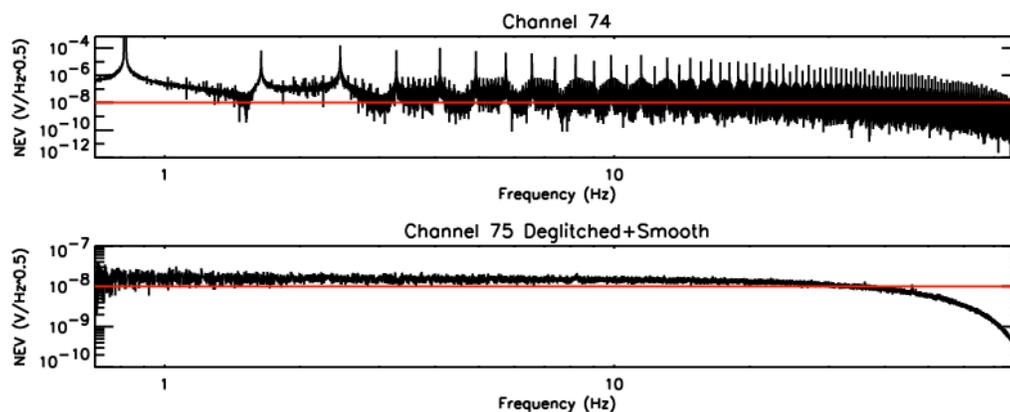


FIG. 5.9 – Spectre des canaux 74 et 75 après déglitchage du signal de la voie 75. Les spectres sont représentés entre 0.7 et 80Hz avec lissage des données pour la voie 75. Les lignes rouges correspondent à un niveau de bruit de $10 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$.

La valeur du pic sur le spectre du canal 14 est de $0.000543920 \text{ V}/\sqrt{\text{Hz}}$.

La valeur du pic sur le spectre du canal 74 est de $0.000687374 \text{ V}/\sqrt{\text{Hz}}$.

Il est difficile de mettre une limite haute sur la valeur du coefficient de diaphonie en tension entre les voies de la ceinture 1 et le bolomètre aveugle ici car toutes les voies de la ceinture étaient polarisées simultanément. Il en est de même pour la ceinture 7. Puisque le signe de la diaphonie est supposé parfois positif, parfois négatif, la somme des effets de diaphonie en tension des cinq autres voies de la ceinture sur le bolomètre aveugle peut être proche de zéro dans ce test EXT_Dark3. Aussi, ce n'est pas parce qu'il n'y a pas de pic de diaphonie sur les bolomètres aveugles qu'il n'y a pas d'effet de diaphonie en tension sur ces derniers durant les mesures EXT_Dark3. Finalement, pour pouvoir détecter de la diaphonie en tension, il faudrait refaire le test EXT_Dark1 sur une plus longue durée. Celui-ci n'avait duré qu'une heure car nous avons estimé que c'était la durée nécessaire pour vérifier le niveau de diaphonie était inférieur à la spécification de 60 dB, ce que nous avons bien vérifié.

5.2.2 Mesures avec des stimulus en courant

Principe de mesure

A partir de l'équation 5.1 nous avons, quand seul le canal 1 est polarisé :

$$V_1 = R_1 I_1 \quad (5.3)$$

$$V_2 = R_2 C_{12}^I I_1 + C_{12}^V V_1 \quad (5.4)$$

Si on a deux mesures avec deux valeurs de courant sur le canal 1, on obtient alors le système ci-dessous :

$$V_2(1) = R_2(1) C_{12}^I I_1(1) + C_{12}^V V_1(1) \quad (5.5)$$

$$V_2(2) = R_2(2) C_{12}^I I_1(2) + C_{12}^V V_1(2) \quad (5.6)$$

A partir de ce système, si l'on connaît les valeurs exactes de I_1 , R_1 et R_2 pour chaque mesure, on peut alors déduire directement la valeur des deux coefficients inconnus : C_{12}^V et C_{12}^I .

Les solutions du système s'écrivent alors :

$$C_{12}^I = \frac{V_1(1)V_2(2) - V_1(2)V_2(1)}{V_1(1)R_2(2)I_1(2) - V_1(2)R_2(1)I_1(1)} \quad (5.7)$$

$$C_{12}^V = \frac{V_2(1)}{V_1(1)} - \frac{R_2(1)I_1(1)}{V_1(1)} \left(\frac{V_1(1)V_2(2) - V_1(2)V_2(1)}{V_1(1)R_2(2)I_1(2) - V_1(2)R_2(1)I_1(1)} \right) \quad (5.8)$$

Mesures sur les voies bolométriques

Pour pouvoir maintenir les régulations de température d'HFI durant les mesures EXT, les canaux 91, 92, 93 et 95 sont restés polarisés pour les mesures EXT sur les voies bolométriques. Afin de mesurer les deux coefficients de diaphonie entre chaque couple de voies bolométriques de l'électroniques d'HFI, nous avons effectué pour chaque canal HFI, trois mesures avec trois valeurs de courant croissantes. Pour chaque mesure d'une durée de 60 secondes seul un canal a été polarisé alors qu'aucun courant n'a été envoyé dans les 67 autres canaux. Si on note V_1 la

tension aux bornes de la voie polarisée, on obtient les systèmes suivants déduits de l'équation 5.1 pour la tension V_2 qui représente ici la tension des 67 voies non polarisées :

$$V_1(1) = R_1(1)I_1(1) \quad (5.9)$$

$$V_2(1) = R_2(1)C_{12}^I I_1(1) + C_{12}^V V_1(1) \quad (5.10)$$

$$V_1(2) = R_1(2)I_1(2) \quad (5.11)$$

$$V_2(2) = R_2(2)C_{12}^I I_1(2) + C_{12}^V V_1(2) \quad (5.12)$$

$$V_1(3) = R_1(3)I_1(3) \quad (5.13)$$

$$V_2(3) = R_2(3)C_{12}^I I_1(3) + C_{12}^V V_1(3) \quad (5.14)$$

On connaît $I_1(1)$, $I_1(2)$ et $I_1(3)$ précisément grâce aux étalonnages de la chaîne électronique de lecture. Puisque les courants de diaphonie sont très faibles, on a :

$$R_2(1) = R_2(2) = R_2(3) = R_2 \quad (5.15)$$

Afin de vérifier cette hypothèse, nous avons mesuré R_2 au début et à la fin de chaque série de mesure sur chaque ceinture en envoyant un courant très faible ($I_b=5$ ADU) suivi d'une autobalance sur les 68 voies de l'électronique testées ici. Le détail des séquences de la procédure est présenté sur la Figure 5.10. Chaque canal électronique a été polarisé avec trois valeurs de courant croissantes : $I_b=400$, 800 et 4095 ADU. Chaque polarisation a été suivie d'une autobalance afin d'avoir une chaîne électronique dans un mode de fonctionnement nominal. Les mesures EXT sur les voies bolométriques ont été réalisées le 1er Juillet 2006 à partir de 14h10 (heure QLA). A partir de deux mesures sur une même voie avec deux valeurs de courant différentes, le système avec les deux équations 5.5 et 5.6 peut être résolu dans un premier temps une fois que la valeur de R_2 a été déduite des mesures bas-courant spécifiques. Le système de trois équations associé aux trois mesures sur chaque voie peut également se résoudre directement puisque sous forme matricielle, le système s'écrit :

$$\begin{pmatrix} V_2(1) \\ V_2(2) \\ V_2(3) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_2 I_1(1) \\ R_2 I_1(2) \\ R_2 I_1(3) \end{pmatrix} C_{12}^I + C_{12}^V \begin{pmatrix} V_1(1) \\ V_1(2) \\ V_1(3) \end{pmatrix} \quad (5.16)$$

$$\begin{pmatrix} V_2(1) \\ V_2(2) \\ V_2(3) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_2 I_1(1) & V_1(1) \\ R_2 I_1(2) & V_1(2) \\ R_2 I_1(3) & V_1(3) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_{12}^I \\ C_{12}^V \end{pmatrix} \quad (5.17)$$

$$B = AC \quad (5.18)$$

Après avoir écrit sous la forme simplifiée (équation 5.18) le système décrit par l'équation 5.17, la solution est alors donnée par :

$$C = {}^t AB({}^t AA)^{-1} \quad (5.19)$$

Le signal en volt des voies de la ceinture 9 durant les mesures de diaphonie en courant sur la voie 94 est représenté Figure 5.11. On remarque que des signaux de diaphonie électronique

```

tps_meas=60 seconds
Ib(n)= Ibias values= [400, 800, 4095]

Sequences:
Save

Start loop: belt x=0 to 8

All channel except 91 92 93 95:    Channel_Setup: Ib = 5; Vb = 0; T = 0; Gamp = 1
All channel except 91 92 93 95:    Autobalance all
Measure for 5 sec ;Impedances measurement

All channel except 91 92 93 95:    Channel_Setup: Ib = 0; Vb = 0; T = 0; Gamp = 1
Measure for tps_meas ;Reference level measurement

Start loop: channel xy
Start loop n=1 to 3
Channel xy:                        Channel_setup: Ib = Ib(n)
Channel xy:                        Autobalance (individual for xy channel)
Measure for tps_meas
Next n

Channel xy:                        Channel_setup: Ib = Vb = T = 0; Gamp = 1

Next xy

Next x

Load
    
```

FIG. 5.10 – Séquence de calibration EXT en courant pour les voies bolométriques du modèle de vol d’HFI.

peuvent être distingués sur les voies 90, 92, 93 et 95. L’amplitude des signaux de diaphonie dépend de l’éloignement des canaux affectés par rapport à la voie 94. L’effet de diaphonie est positif pour les voies 90 et 92 alors qu’il est négatif pour les voies 93 et 95 voisines de la voies 94.

La tension en Volt aux bornes de la voie 94 semble déphasée par rapport aux signaux de diaphonie des autres voies. Cet effet est lié au fait que les données HK (“House Keeping”) c’est à dire la télémétrie contenant les valeurs des paramètres Ib, Vb, et Tb utilisés pour le réglage du REU, n’est transmise que toutes les 70 secondes environ, car elle est multiplexée sur les 72 voies de l’électronique. La base de donnée utilise ensuite ces données HK pour reconstruire la tension totale sur la voie 94. La tension reconstruite dans la base de donnée change alors à chaque nouvelle valeurs de HK transmise. La tension totale reconstruite automatiquement dans la base de donnée juste après un changement de courant est donc fausse la plupart du temps pour cette raison. Afin de remédier à cela, il faut reconstruire chaque tension en récupérant les valeurs des HK dans la base de données tout en recalant les variations des données HK et des signaux en Volt des bolomètres. Durant l’analyse de ces mesures, il ne faut pas oublier également de soustraire l’offset en tension présent sur chaque canal de la chaîne électronique de

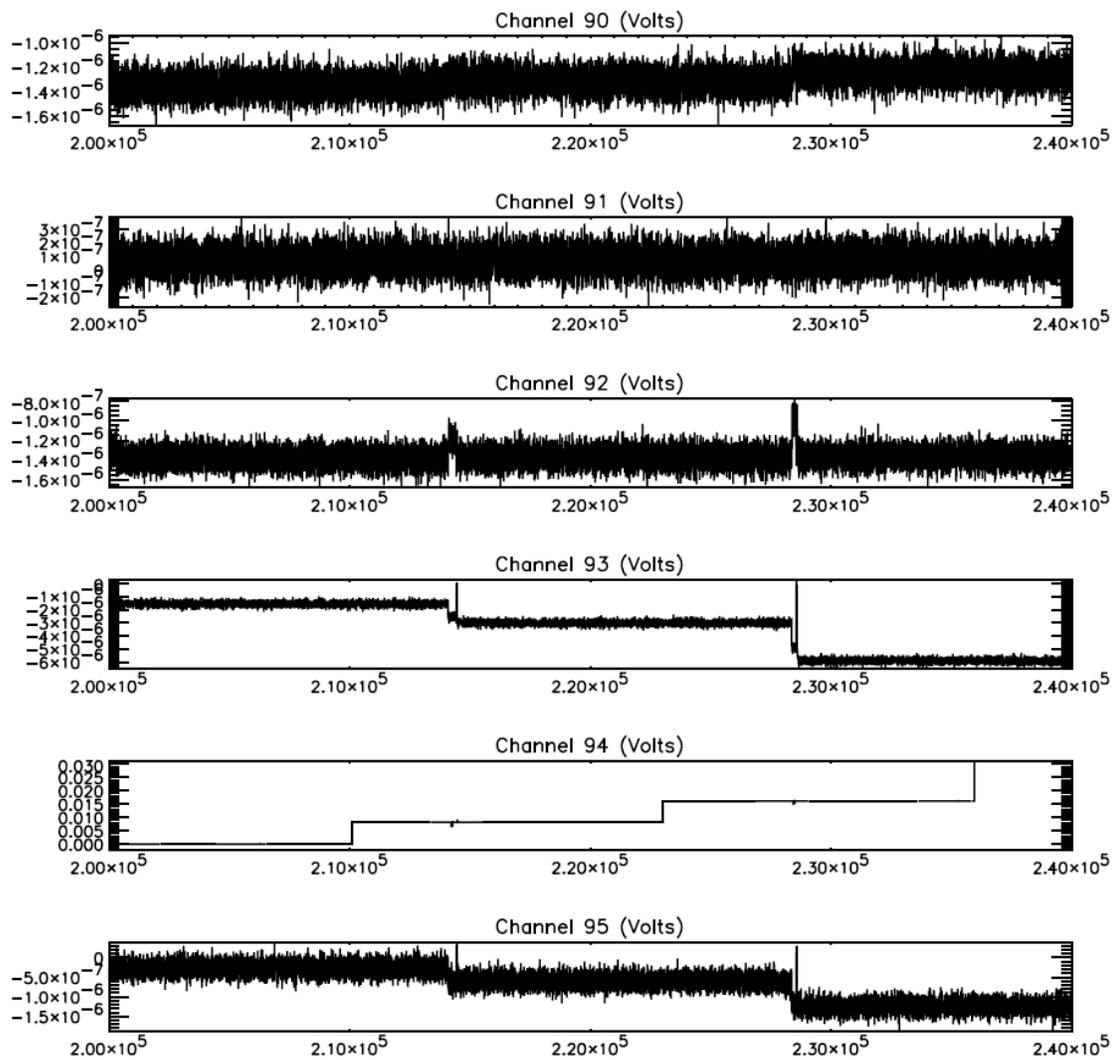


FIG. 5.11 – Tension en Volt en fonction du numéro d'échantillon de mesure pour les canaux électroniques de la ceinture 9 reconstruit dans la base de donnée d'étalonnage d'HFI durant les mesures de diaphonie en courant sur la voie 94. Des signaux de diaphonie électronique peuvent être distingués sur les voies 90, 92, 93 et 95. L'amplitude des signaux de diaphonie dépend de l'éloignement des canaux affectés par rapport à la voie 94. L'effet de diaphonie est positif pour les voies 90 et 92 alors qu'il est négatif pour les voies 93 et 95 voisines de la voies 94.

mesure avant de résoudre le système d'équation à deux inconnues qui permet de déduire C_{12}^V et C_{12}^I pour chaque couple de voies.

Mesures sur les voies thermométriques

Une séquence de diaphonie dédiée aux thermomètres a été réalisée le 12 Juillet 2006 à partir de 6h57AM (heure QLA). Nous avons lancé la même procédure que pour les voies bolométriques sur les voies des ceintures 9,10 et 11 de l'électronique. Les trois valeurs de courant retenues

étaient $I_b=200, 400$ et 800 ADU. Le temps de mesure sur chaque voie était de 80 secondes afin de contourner la difficulté liée au multiplexage des HK rencontrée pour les mesures bolométriques.

5.2.3 Comparaison avec les résultats des mesures de diaphonie optique sur le PFM

Les résultats des tests de diaphonie optique (OXT) effectués sur le PFM [79] sont également intéressants pour l'étude de la diaphonie électronique. Dans ces tests, certains bolomètres d'HFI ont été illuminés par un signal optique modulé grâce à un dispositif de sources optiques mobiles qui permettent d'illuminer individuellement certains cornets d'HFI. Ce dispositif permet donc d'illuminer sélectivement certains bolomètres. Le but initial de ce test est alors de voir si un signal modulé parasite apparaît sur les bolomètres voisins de celui qui est éclairé. L'observation d'un tel signal indiquerait la présence de fuites optiques qui sont, soit internes à HFI, soit internes au dispositif de test. Les premiers résultats de ces tests confirment plutôt la seconde hypothèse. Il ne me paraît pas possible de conclure, avec ces tests, sur le niveau réel de diaphonie optique à l'intérieur de l'instrument. Il faudra certainement attendre les mesures en vol d'HFI pour savoir si il y a un effet de diaphonie optique négligeable ou pas.

En revanche, les mesures OXT apportent des réponses importantes pour l'étude de la diaphonie électronique. Durant les mesures OXT, les bolomètres aveugles, la résistance de $10\text{ M}\Omega$ et les thermomètres d'HFI étaient polarisés. Les spectres d'amplitude des mesures de ces capteurs ont donc été tracés afin de vérifier si un signal de diaphonie était détecté. Si un tel pic apparaît sur ces capteurs "aveugles" durant les mesures OXT, alors la source de ce pic sera forcément la diaphonie en tension. Durant les mesures OXT aucun pic de ce type n'a été observé. Aucun effet de diaphonie en tension n'a donc été détecté durant les mesures OXT.

5.3 Conclusion

Les résultats obtenus avec les tests PFM-CAL que j'ai coordonné sur les bolomètres aveugles d'HFI permettent d'obtenir une limite supérieure sur la valeur de la diaphonie en tension. Cette valeur est de 80 dB entre les canaux 14 et 15 quand seuls ces deux canaux sont polarisés (résultats EXT_Dark1). Nous avons le même ordre de grandeur entre les canaux 74 et 75 dans des conditions de test identiques. Nous pouvons donc conclure que l'effet en tension, si il existe, est un effet faible et qu'il n'a pas encore été observé sur les mesures PFM avec les capteurs aveugles. La hauteur limite sur la valeur de la diaphonie en tension pour les deux couples de voies ci-dessus est par ailleurs meilleure que la spécification de 60 dB puisqu'elle se situe au dessus de 80 dB.

J'ai également démontré durant cette thèse qu'il existait un effet en courant qui est maximum entre les canaux voisins de la boîte JFET.

Les mesures de diaphonie avec les stimuli en courant ont été analysées par Ludovic Montier. Les résultats trouvés pour la diaphonie en tension entre les couples des voies 14/15 et 74/75 ne sont pas cohérents avec les résultats trouvés sur les bolomètres aveugles avec la source CSM. Une hypothèse pour expliquer ce résultat est que le modèle de diaphonie que nous avons utilisés dans notre analyse est incomplet. En particulier, des effets d'offset de courant manquent peut-être dans ce modèle. Pour pouvoir mesurer la diaphonie en tension entre toutes les voies de la chaîne

électronique, il faudra donc désormais attendre les mesures en vol sur les sources ponctuelles les plus brillantes. Ces mesures en vol permettront de mesurer directement le produit de la diaphonie optique et de la diaphonie en tension entre chaque canaux photométrique d'HFI.

Troisième partie

Simulation et correction des effets systématiques

Chapitre 6

Simulation de la chaîne de régulation PID de l'étage à 4 K d'HFI

J'ai démontré durant les étalonnages au sol d'HFI que la régulation PID introduit un pic de régulation dont l'amplitude est fonction du bruit sur le thermomètre de régulation et des paramètres PID de la régulation. Afin de prédire l'amplitude et la fréquence de ce pic de régulation, j'ai développé une simulation de la chaîne PID de l'étage à 4 K d'HFI, réalisée avec le logiciel SIMULINK. Ce modèle a été réalisé à l'occasion du stage au CESR de Mathieu Maisonneuve que j'ai co-encadré [64]. Cette simulation a également été réalisée en collaboration avec Michel Piat l'un des concepteurs des chaînes de régulation PID d'HFI.

6.1 Description de la chaîne de régulation PID à simuler

La chaîne de régulation à modéliser pour l'étage à 4 K d'HFI est représentée sur la Figure 6.1. Les fluctuations de température parasites sont introduites à l'arrière de la boîte à 4K au niveau du thermomètre CERNOX 4K. Les fluctuations sont ensuite transmises au niveau du cornet à 4 K et du thermomètre PID4N par diffusion thermique. Cette diffusion thermique peut être modélisée par une fonction de transfert de type filtre d'ordre 1 comme proposé sur la Figure 6.1. La température lue sur le thermomètre PID4N est ensuite convertie en Volt afin de simuler le signal lu par le REU. Cette conversion peut se faire grâce aux coefficients des polynômes ajustés sur les mesures d'étalonnage des thermomètres. Après la compensation du signal fixée par le paramètre V_b , la tension du thermomètre compensée est ensuite numérisée par le REU. Une valeur en ADU proche de 0 est alors obtenue en sortie du REU. Cette valeur est ensuite comparée à la valeur de la consigne par l'algorithme PID programmé dans le REU. A partir de cette différence et de la somme des différences des itérations précédentes en entrée de l'algorithme PID, celui-ci calcule une consigne de puissance de chauffage en ADU commandant le courant injecté dans une ceinture chauffante placée autour de la boîte à 4 K. Plus la consigne est forte, plus la puissance de chauffage sur la résistance chauffante est grande. L'objectif de la régulation PID est alors de moduler la puissance de chauffage sur la ceinture chauffante afin d'annuler les fluctuations issues de la CERNOX 4K.

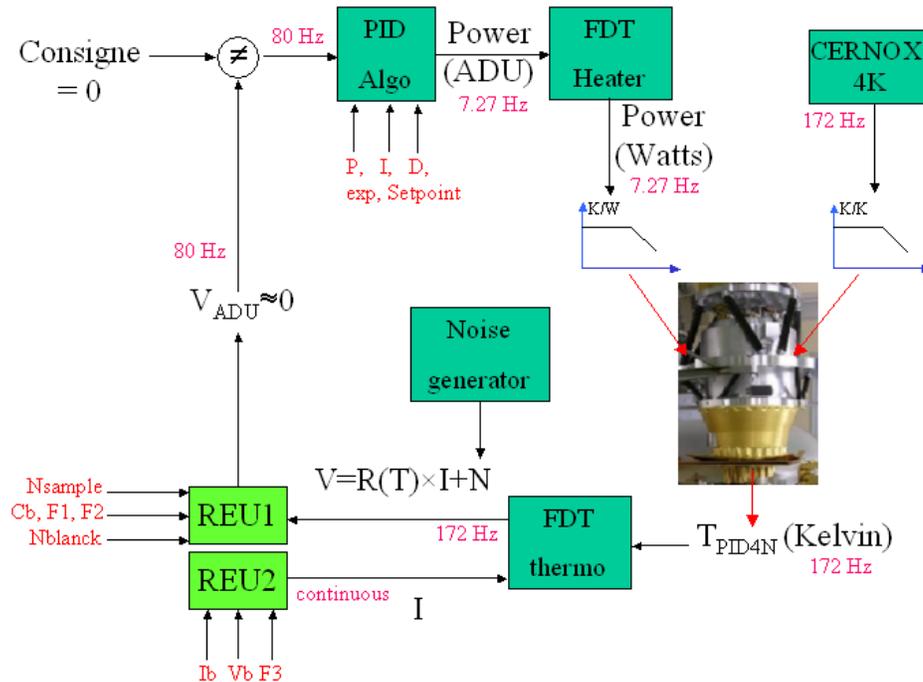


FIG. 6.1 – Schéma fonctionnel de la chaîne de régulation PID à simuler.

6.2 Description du modèle SIMULINK de la chaîne de régulation

La simulation de la chaîne de régulation PID de l'étage à 4 K a été réalisée avec le logiciel SIMULINK. Nous avons utilisé ce logiciel car il permet entre autres de programmer facilement les fonctions de transfert du modèle thermique de la simulation. Le diagramme du modèle SIMULINK est représenté Figure 6.2. Ce modèle est constitué de plusieurs modules. Le rôle de chacun de ces modules est détaillé ci-dessous.

6.2.1 Le bloc “Sum Température”

Ce bloc va nous permettre de réaliser la somme des contributions en température du système. En effet, nous avons d'un côté les fluctuations, dues principalement au Sorption Cooler (dans le modèle de vol), et de l'autre, les fluctuations de la ceinture chauffante qui doivent atténuer les premières. Ce bloc contient le modèle thermique utilisé (Figure 6.3). Dans ce modèle, on suppose que la ceinture chauffante est confondue avec la localisation des thermomètres 4KL1 et 4KL2. La fonction de transfert mesurée sur HFI, entre l'arrière de la boîte à 4 K et les côtés de celle-ci, est d'abord utilisée pour simuler les fluctuations parasites induites au niveau de la ceinture chauffante. Les fluctuations de chauffage au niveau de la ceinture sont ensuite sommées ici aux fluctuations induites par l'arrière de la boîte à 4 K. Cette somme est ensuite transférée au niveau des cornets à 4 K par la fonction de transfert mesurée sur le PFM entre les côtés et

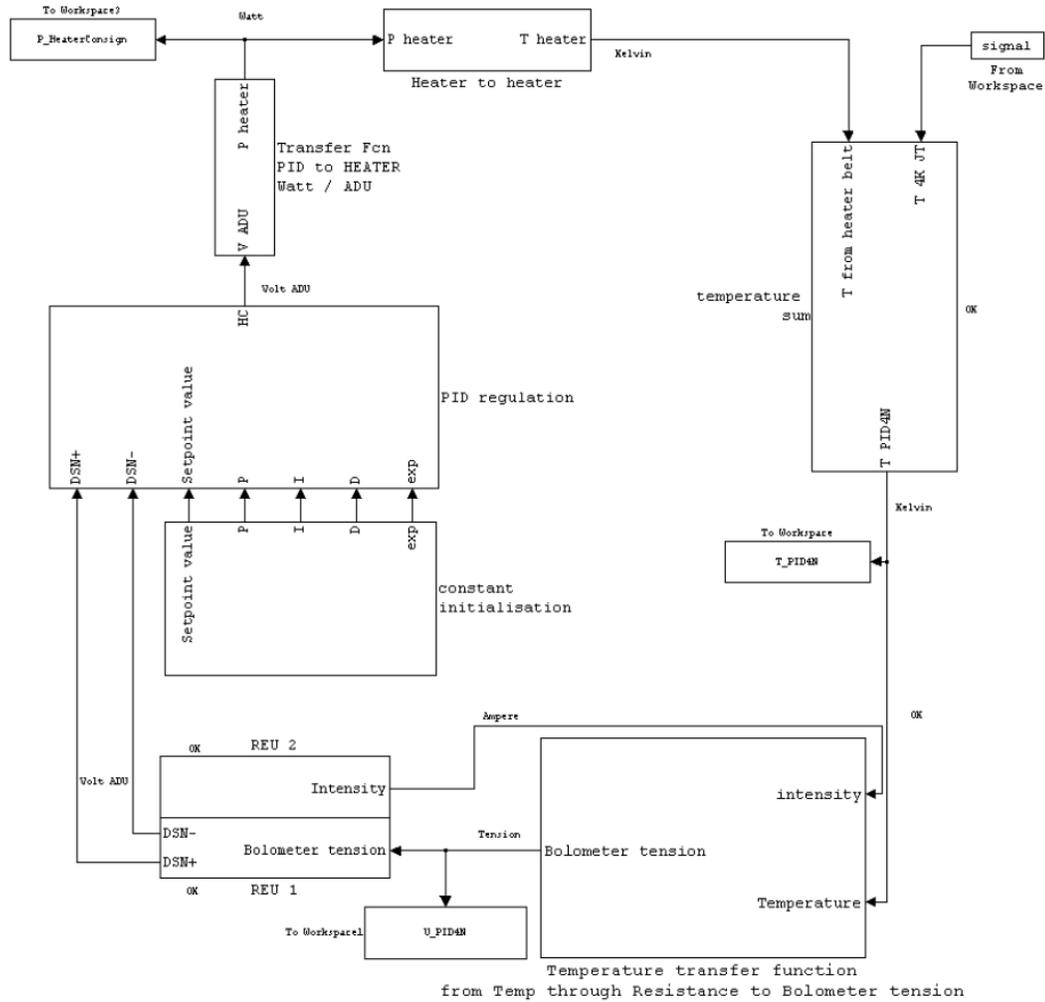


FIG. 6.2 – Modèle SIMULINK de la chaîne de régulation PID de l’étage 4K.

les cornets de la boîte 4K.

6.2.2 Le bloc “Température transfer function”

Ce bloc nous permet de simuler le capteur de température en injectant dans ce bloc la température et un courant bien précis, de telle façon que la température soit transformée dans un premier temps en résistance, puis en tension avec la traversée du courant dans une résistance variable avec la température. La résistance peut être alors modélisée par la formule suivante :

$$R = a_1 \exp\left(\frac{a_0}{T}\right)^{\frac{1}{a_2}} \quad (6.1)$$

avec les coefficients a_0 , a_1 , a_2 des courbes d’étalonnage des thermomètres d’HFI. Une fois que l’on a la résistance R , on applique simplement la loi d’Ohm : $U = R.I$. On obtient alors, la tension aux bornes du thermomètre qui dépend de la température.

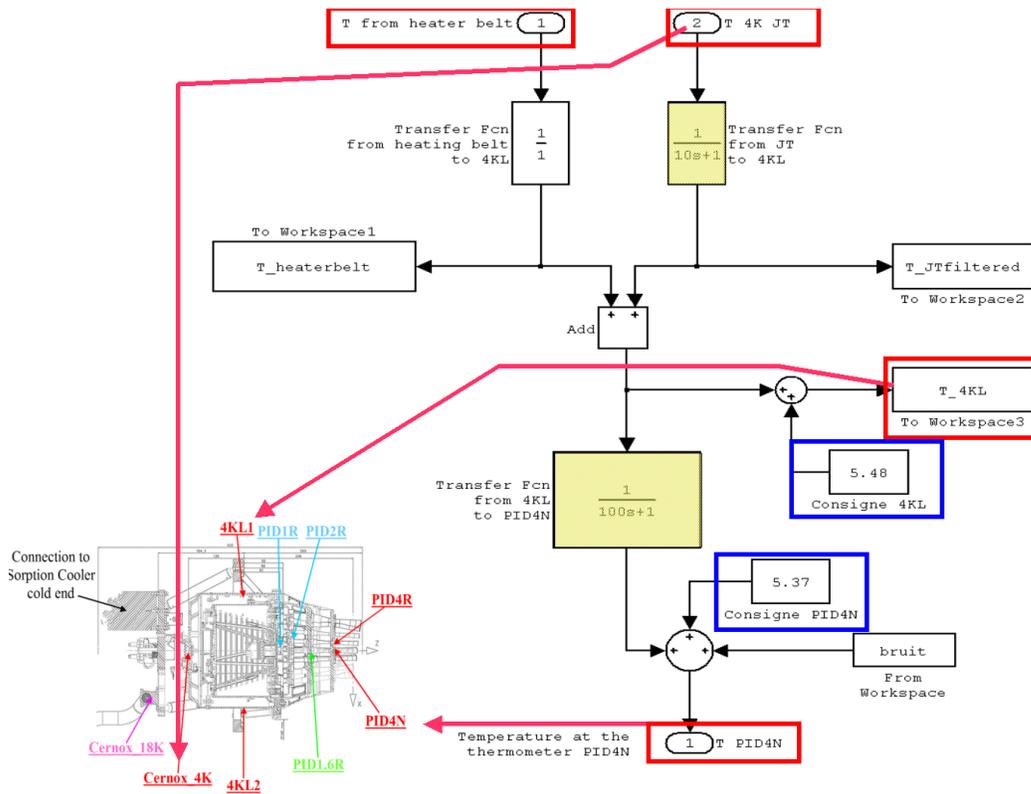


FIG. 6.3 – Modèle thermique utilisé dans la simulation SIMULINK de la chaîne de régulation PID de l'étage 4K.

6.2.3 Les blocs REU (1&2)

Le bloc REU 2 est le bloc qui permet de générer l'intensité fournie à la résistance afin de mesurer une tension aux bornes du thermomètre. Dans notre cas, nous avons considéré une intensité constante, alors que dans le cas réel, nous avons une intensité en forme de créneau aux bornes du bolomètre. La consigne de l'intensité est donnée en digit, et est convertie en intensité par la formule d'étalonnage du REU suivante :

$$I_{bias} = \frac{C_{bias} F_3 I_b}{2} \quad (6.2)$$

avec $C_{bias} = 27.02$ pF

Le bloc REU 1 simule la partie du REU qui permet de convertir notre signal analogique, ici une tension en entrée, en ADU. Nous avons donc, dans notre cas, une entrée : la tension provenant du thermomètre, et deux sorties : DSN+ et DSN-. Ces deux sorties sont principalement dues au fait que la tension de sortie du thermomètre est en créneau, et DSN+ et DSN- représentent la somme des points acquis sur chaque demi période de modulation de la tension du thermomètre. Comme ici nous n'avons qu'une tension continue, il n'était pas nécessaire d'effectuer le calcul de DSN+ et de DSN-. Mais afin de réaliser une simulation très proche de la régulation en température de Planck HFI, il est préférable de conserver cette double sortie.

6.2.4 Le bloc “PID regulation”

Ce bloc est le cœur de la simulation de la régulation en température de HFI. Nous avons ici repris l’algorithme développé en C sur le REU qui a été par la suite interfacé avec SIMULINK. Nous constatons que ce bloc régulation PID est constitué de 2 blocs. L’un est simplement l’initialisation des commandes PID alors que l’autre est l’algorithme en lui même. La régulation est triguée à une fréquence de 80 Hz et chaque nouvelle consigne de chauffage sort à une fréquence de 7.27 Hz. Ceci est dû à la prise en compte du temps de diffusion de la chaleur dans le système (environ 3 périodes à 80 Hz), et d’une certaine rigueur numérique qui nécessite de sommer sur 8 périodes de 80 Hz et de moyennner cette somme. A chaque Trig, il prend en entrée DSN+ et DSN-, et soustrait DSN- à DSN+ afin d’avoir un écart moyen entre la température lue sur le thermomètre et la consigne. Chaque écart est d’abord déglitché. Ensuite, en exécutant l’algorithme suivant, nous calculons la nouvelle consigne de chauffage afin de réguler le système :

$$\begin{aligned}
 HC_n &= HC_{n-1} + P \exp(P_{n-1} - P_n) + I \exp(setpoint - P_n) + D \exp(2P_{n-1} - P_{n-2} - P_n) \\
 &\quad \text{if } HC_n < 0 \text{ then } HC_n = 0 \\
 &\quad \text{if } HC_n \geq 4096 \times 4096 \text{ then } HC_n = 4096 \times 4096 - 1
 \end{aligned}$$

HC est la consigne de chauffe (Heater Consign en anglais).

P est le coefficient proportionnel

I est le coefficient intégrateur

D est le coefficient dérivateur

P_n est les differents écarts moyens calculés précédemment

$setpoint$ est la consigne

6.2.5 Le bloc de transfert entre la consigne de chauffage en ADU et la température de la ceinture chauffante

En sortie du bloc PID, nous trouvons donc la consigne de chauffage en ADU, qu’il faut maintenant convertir en chaleur puis en contribution thermique, sous forme de fluctuations de température. Nous avons donc dans un premier temps le bloc “Transfer function PID to Heater (Watt/ADU)” où le signal en ADU est converti, grâce à un CNA (convertisseur numérique analogique) 24 bits en une tension analogique. Cette tension va par la suite permettre d’activer la ceinture chauffante et de calculer la puissance Joule dégagée par le système.

La consigne en ADU est ensuite convertie en puissance de chauffage par la formule suivante :

$$P_{chauffage} = \frac{\left(\frac{7V_{ADU} R_{heater}}{2^{24} \sum R} \right)^2}{R_{heater}} \quad (6.3)$$

Nous allons ensuite convertir cette puissance en une température, tout ceci en utilisant la conductance du matériau de la ceinture chauffante. Cette dernière est égale à : 22.4 K/W.

6.3 Résultats de la modélisation

6.3.1 Mesures de référence

La série de mesures présentée sur la Figure 6.4 a été réalisée sur le PFM dans le cryostat Saturne.

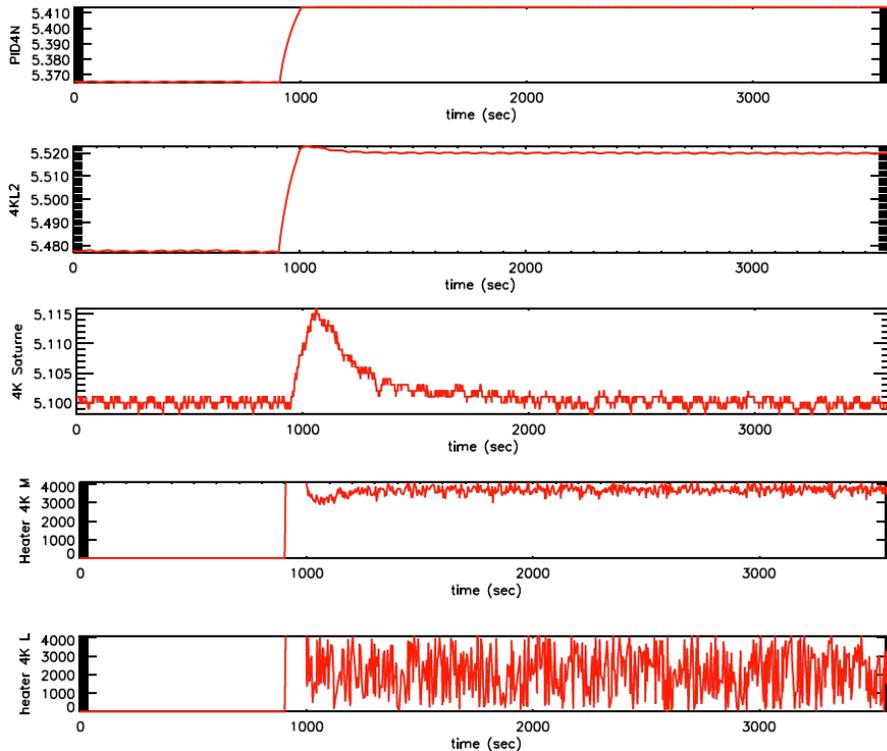


FIG. 6.4 – Mesures de référence réalisées sur le PFM et utilisées pour tester la simulation SIMULINK de la chaîne de régulation PID de l'étage 4K.

Elle correspond à une phase d'allumage de la régulation de l'étage 4K. Cette série de mesures a été utilisée comme mesure de référence pour tester la simulation SIMULINK de la chaîne de régulation PID de l'étage 4K. Le but étant d'essayer de reproduire la même série temporelle avec la simulation. En particulier, en utilisant les mêmes paramètres pour la régulation PID et les mêmes réglages, nous avons voulu démontrer dans un premier temps qu'il était possible d'obtenir la même stabilité de température après l'allumage de la régulation.

6.3.2 Génération du bruit dans la simulation

Afin d'ajouter le même bruit blanc que la mesure sur le thermomètre PID4N de la simulation, nous avons généré un vecteur de bruit à partir des mesures comme illustré sur la Figure 6.5. Le signal smoothé du thermomètre PID4N a été soustrait à ce dernier afin de ne garder qu'un vecteur essentiellement constitué de bruit. Ce vecteur de bruit est ensuite ajouté au signal du thermomètre dans la simulation pour simuler le bruit du thermomètre.

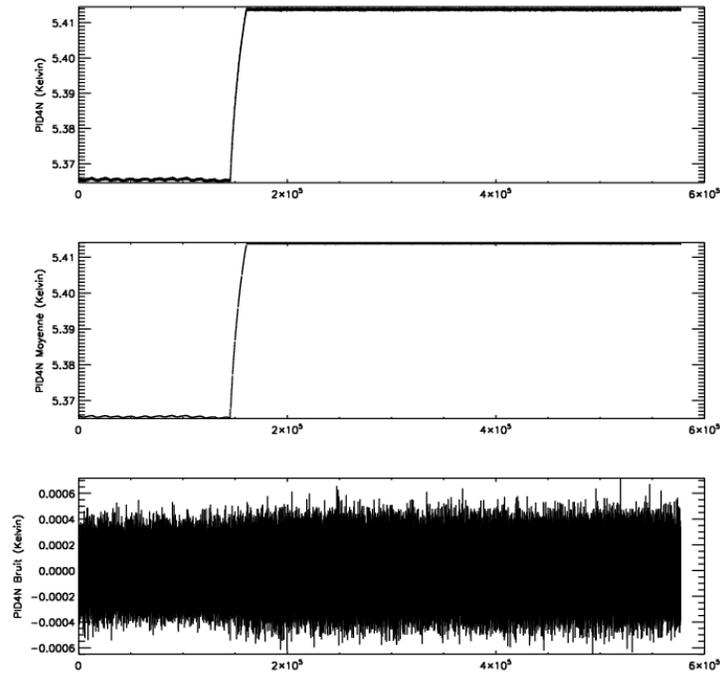


FIG. 6.5 – Génération du vecteur de bruit sur le thermomètre PID_{4N} dans la simulation. Le signal smoothé du thermomètre PID_{4N} (milieu) a été soustrait à ce dernier (haut) afin de ne garder qu'un vecteur essentiellement constitué de bruit (bas). Ce vecteur de bruit est ensuite ajouté au signal du thermomètre dans la simulation pour simuler le bruit du thermomètre.

6.3.3 Modèle bruité

Le résultat du test du modèle avec le vecteur de bruit est présenté sur la Figure 6.6. Le signal de la mesure de référence sur le thermomètre PID_{4N} est également tracé sur cette figure pour comparaison. Le signal du thermomètre CERNOX 4K durant la mesure de référence a été utilisé comme signal de perturbation en entrée de la simulation. La valeur du paramètre V_b a été changé en phase avec la mesure de référence sur la simulation. Les paramètres PID programmés dans la simulation ont également été les mêmes que ceux programmés sur la mesure de référence dans Saturne. Les valeurs sont les suivantes :

$$\begin{aligned} \text{setpoint} &= 0 \\ P &= 200 \\ I &= 10 \\ D &= 0 \\ \text{exp} &= 10000 \end{aligned}$$

On voit sur cette Figure 6.6 que le comportement de l'étage 4K lors de l'allumage de la régulation est bien reproduit par la simulation. Afin d'affiner notre analyse, le résultat obtenu avant et après régulation est tracé sur la Figure 6.7. Le signal et le spectre de la mesure de référence sur le thermomètre PID_{4N} sont également tracés sur cette figure pour comparaison. On remarque tout d'abord que le niveau de bruit blanc est le même sur la simulation et

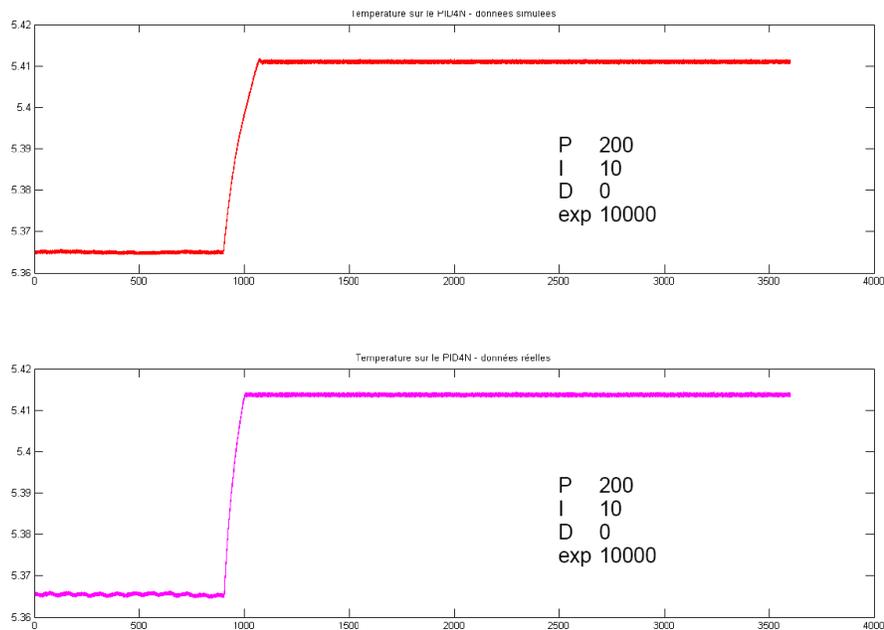


FIG. 6.6 – Résultat de la simulation SIMULINK de la chaîne de régulation PID de l'étage à 4 K.

sur la mesure de référence. Par contre, la forme du bruit n'est pas blanc vers 0.1 Hz sur la simulation contrairement à la mesure. Cette différence est induite par les lissages du vecteur PID4N lors de la génération du vecteur de bruit. Cette différence n'a pas l'air gênante pour notre simulation puisque le comportement de la régulation en particulier à basse fréquence reproduit parfaitement les mesures. L'amortissement du pic vers 0.01 Hz est le même. On constate ainsi que l'amortissement des fluctuations parasites autour de 0.01 Hz sur l'étage 4K sont amorties d'un facteur 10 grâce à la régulation de l'étage. De plus, sur notre simulation un pic de régulation caractéristique de l'effet d'une régulation PID apparaît à 0.04 Hz. Ce pic se devine marginalement dans le spectre de la mesure de référence.

6.3.4 Modèle non bruité

Afin de quantifier le bruit sur la régulation PID, nous avons lancé la même simulation que précédemment mais sans ajouter de vecteur de bruit. Le résultat était meilleur c'est-à-dire que l'amplitude du pic de régulation était plus faible dans la simulation non-bruité. Ce résultat montre donc bien que le niveau de bruit blanc sur le thermomètre limite la régulation. Ce résultat avait déjà été établi au quatrième chapitre de cette thèse lors de l'analyse des tests de régulation d'HFI.

Après avoir obtenu ce premier résultat sur la régulation non bruité, nous avons testé différents paramètres PID afin d'estimer de combien la régulation peut être améliorée sans bruit sur les thermomètres. Le meilleur réglage obtenu est présenté sur la Figure 6.8. Dans ce meilleur test, les paramètres PID étaient les suivants :

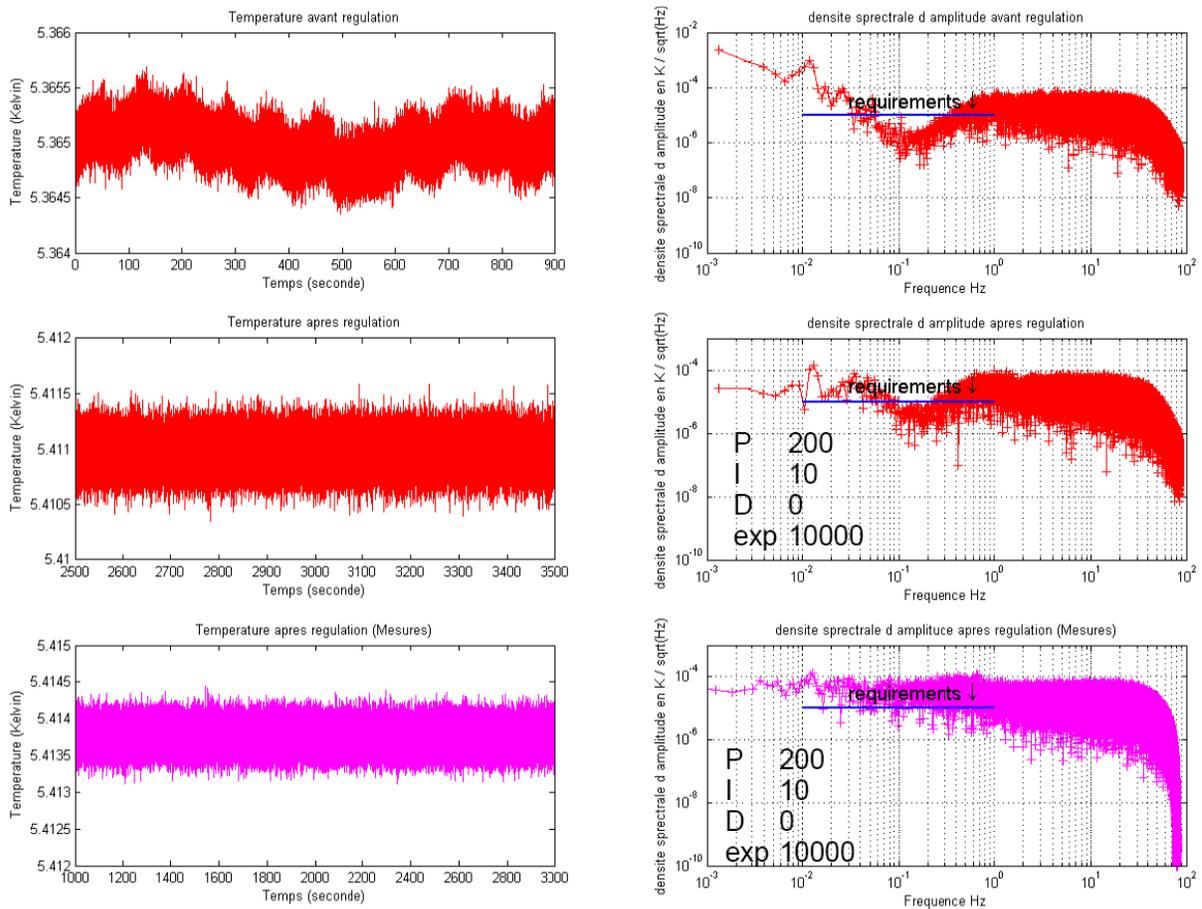


FIG. 6.7 – Résultat de la simulation SIMULINK de la chaîne de régulation PID de l'étage à 4 K.

```

setpoint=0
P=300
I=60
D=0
exp=10000

```

On constate que l'on a un gain de 100 sur les fluctuations parasites vers 0.1 Hz. On a donc amélioré d'un facteur 10 la capacité d'amortissement de la régulation. En contrepartie, le pic de régulation apparaît à 0.1 Hz cette fois, mais son amplitude est du niveau du bruit blanc du thermomètre quand celui-ci est bruité (Figure 6.8).

6.3.5 Simulation des fluctuations des côtés de la boîte à 4 K

Afin de vérifier si notre modèle prédit aussi bien les fluctuations des côtés de la boîte à 4 K que celles des cornets, nous avons tracé le signal et le spectre des fluctuations prédites au niveau des thermomètre 4KL comparés aux mesures des thermomètres 4KL1 et 4KL2 (Figure 6.9). On constate que la simulation ne reproduit pas vraiment les données. Cela est lié au fait

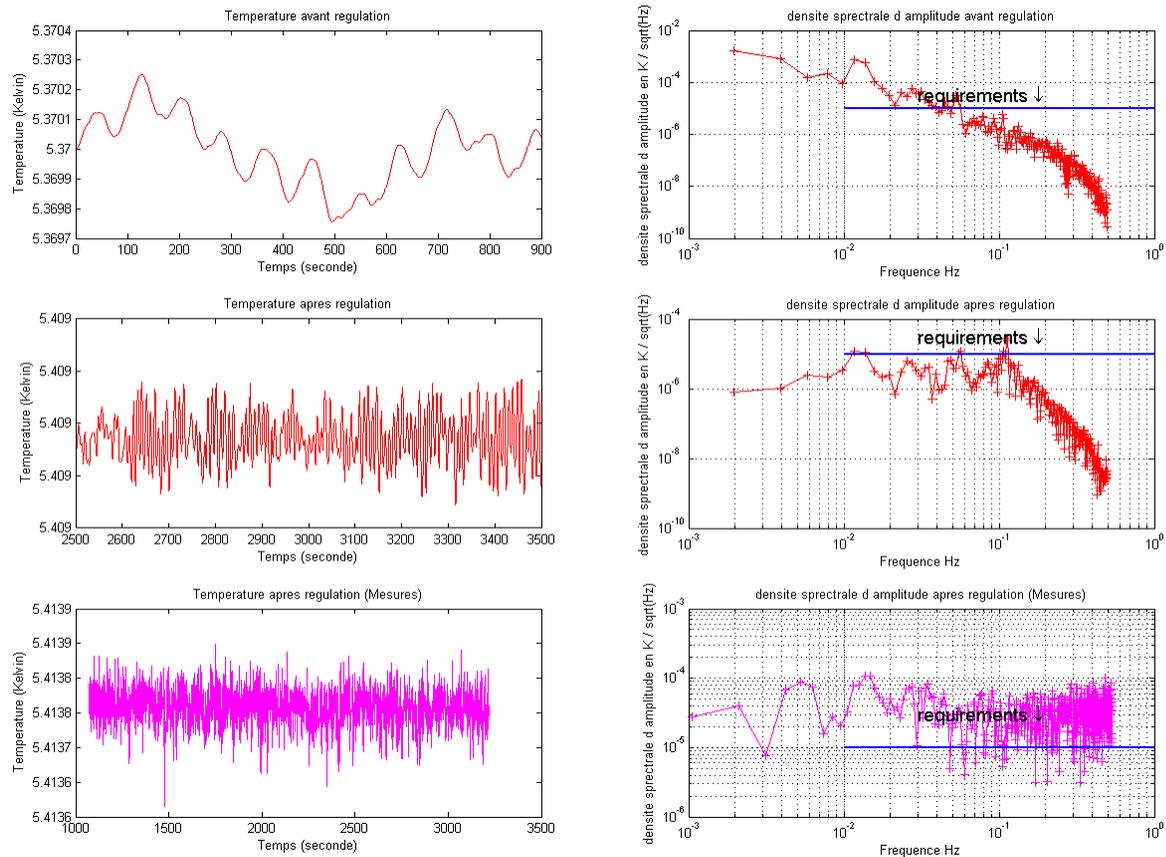


FIG. 6.8 – Résultat de la simulation SIMULINK de la chaîne de régulation PID de l'étage à 4 K sans bruit sur le thermomètre PID_{4N}.

que le modèle thermique est trop simplifié au niveau des côtés de la boîte à 4 K. Ce modèle ne peut donc pas être utilisé en l'état pour prédire les fluctuations au niveau des côtés de la boîte 4K et en particulier, il ne peut pas être utilisé pour l'instant pour prédire les fluctuations des "Loads" d'LFI.

6.4 Conclusion

Nous avons réalisé une modélisation de la chaîne de régulation thermique de l'étage 4K de PLANCK-HFI qui est très proche des résultats obtenus lors de tests de régulations réelles. Ce modèle développé avec le logiciel SIMULINK permet de prédire les variations de température au niveau de cornets de la boîte à 4K d'HFI pour n'importe quel type de fluctuations en entrée de la boîte à 4 K et pour n'importe quelles valeurs des paramètres PID de l'algorithme de régulation.

La modélisation thermique dans cette simulation repose sur l'utilisation de fonctions de transfert de type filtres du premier ordre. L'utilisation de tels filtres pour des modélisations thermiques dynamiques simplifiées dans HFI est ainsi validée par ce modèle. Ces fonctions de

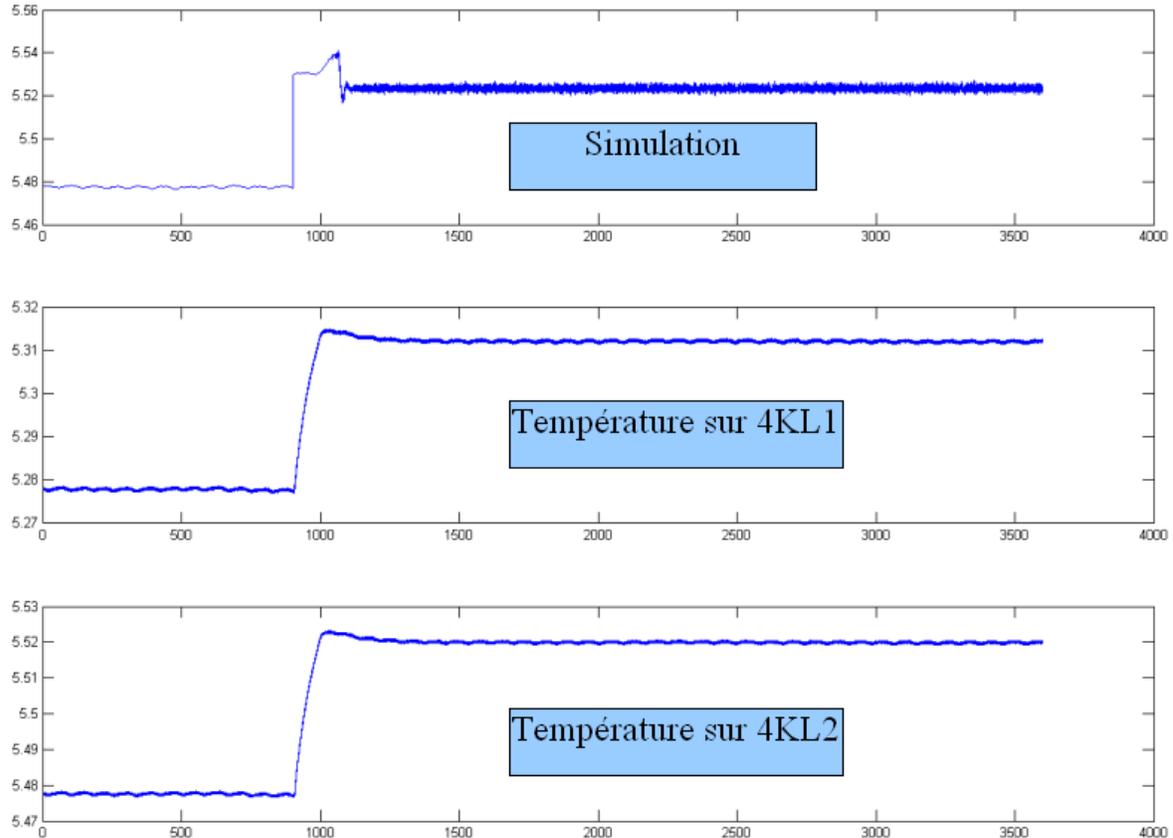


FIG. 6.9 – Résultat de la simulation SIMULINK pour les côtés de la boîte à 4 K comparé aux mesures des thermomètres 4KL1 et 4KL2.

transfert fonctionnent correctement ici car elles représentent des phénomènes thermiques ayant bien un comportement de filtre du premier ordre. Les valeurs des gains et des fréquences de coude ont par ailleurs été ajustées sur les mesures réalisées sur le PFM. Ce dernier point est crucial pour que la précision de prédiction de cette simulation soit bonne. C'est pourquoi ces paramètres du modèle doivent encore être optimisés ainsi que d'autres paramètres, telles que la forme du bruit sur le thermomètre ou encore les fonctions de transfert de l'électronique, pour avoir une simulation encore meilleure.

Après ajustement de ces paramètres, cette simulation va désormais permettre de tester différents paramètres PID afin de trouver les meilleurs réglages pour les opérations en vol de l'instrument. Cette méthode, relativement simple, pourrait être celle retenue, compte tenu de la difficulté à trouver une méthode d'optimisation analytique des paramètres PID. Pour que cette approche fonctionne, le modèle thermique de la simulation devra être ajusté afin de représenter au mieux le comportement en vol (effet du Sorption Cooler et de l'étage à 18K principalement). Au final, la fonction de transfert entre les étages cryogéniques d'HFI pour une configuration active de l'étage 4K donnée pourra être calculée avec ce modèle via la simulation de différentes excitations sinusoïdales en entrée de la boîte à 4K.

Par ailleurs, ce modèle SIMULINK pourra servir de base pour développer des modèles des

trois autres chaînes de régulation d'HFI (PID1.6K, PID1 et PID2), puisque l'algorithme PID utilisé pour ces trois autres chaînes de régulation est le même que pour l'étage à 4 K. Les modèles thermiques et les paramètres du modèle du REU et des thermomètres devront seulement être adaptés pour ces trois autres chaînes de régulation.

Enfin, ces modèles pourront être utilisés pour déterminer les paramètres PID des quatre chaînes de régulation d'HFI qui seront testées et optimisées sur le satellite lors du test au CSL de ce dernier en 2008.

Chapitre 7

Simulation et correction des effets thermiques dans Planck-HFI

Afin d'améliorer le contrôle des effets thermiques dans Planck-HFI, j'ai développé durant cette thèse différents outils de simulation de ces effets. Ce chapitre présente ces simulations et leurs résultats. A partir des données ainsi simulées, différents types de méthodes de correction pour le pré-traitement des effets thermiques peuvent être testés afin d'identifier la plus optimale pour HFI. Deux méthodes ont ainsi été testées sur des simulations thermiques : la décorrélation du signal des thermomètres et la prédiction par réseau de neurones. Les résultats de ces tests sont également présentés dans ce chapitre.

7.1 Modélisation des effets thermiques dans Planck-HFI

Après avoir participé aux différents tests thermiques de Planck-HFI (sous-systèmes et systèmes) et grâce aux résultats des tests au sol des modèles de vol des réfrigérateurs actifs de Planck, j'ai pu commencer à développer des simulations globales des effets thermiques attendus en vol sur Planck-HFI. Ces simulations ont été amorcées au début de ma thèse dans le cadre du projet transverse (Instrument/DPC) TIPS pour "Thermal Induced Parasite Signals".

7.1.1 Les différents modèles nécessaires

Afin de prédire le comportement thermique d'HFI, plusieurs modèles sont nécessaires : un modèle des sources d'effets thermiques, un modèle thermique statique, un modèle thermique dynamique, un modèle photométrique et un modèle de bolomètres.

Les différents sous-modèles ci-dessous doivent donc être développés :

Modèle des sources

Ce modèle doit en principe inclure les effets suivants :

- Fluctuations du Sorption Cooler
- Fluctuations du réfrigérateur 4K
- Fluctuations de la dilution 0.1K
- Fluctuations de température du Télescope

- Fluctuations de température du SVM
- Effet thermique des particules cosmiques sur la platine bolomètre
- Effer radiatif sur la platine bolomètre des sources astrophysique

Modèle thermique statique d’HFI et du télescope

Un modèle statique de l’ensemble de la chaîne cryogénique est nécessaire pour prédire la température moyenne de chaque source d’effet thermique.

Modèle thermique dynamique

Ce modèle doit inclure :

- Effet entre LVHX1, LVHX2 et l’arrière de la boîte 4K
- Effet entre LVHX1, LVHX2 et les côtés de la boîte 4K (utile pour LFI principalement)
- Effet entre LVHX2 et les côtés de la boîte 4K
- Effet entre les côtés de la boîte 4K et les cornets dos-à-dos
- Effet entre l’arrière de la boîte 4K et les filtres 1.6K
- Effet entre l’arrière de la boîte 4K et la tête froide de la dilution
- Effet entre la tête froide de la dilution et la platine bolomètre (fonction de transfert de l’HoY)
- Fonction de transfert sur la boîte 4K au niveau des cornets, des côtés et de l’arrière de la boîte avec régulation PID.
- Fonction de transfert sur les filtres 1.6K avec regulation PID de l’étage 1.6K
- Fonction de transfert sur la tête froide de la dilution avec régulation PID de la platine dilution

Modèle photométrique et modèle des bolomètres

Un modèle photométrique et un modèle de bolomètre sont également nécessaires pour quantifier les effets thermiques sur le signal des bolomètres d’HFI. 36 jeux de paramètres photométriques (emissivités, angles solides et bandes spectrales) pour chaque canal d’HFI et 52 jeux de paramètres bolométriques (conductance thermique, capacité calorifiques, ...) sont alors nécessaires pour passer des fluctuations de température en Kelvin au signal en Volt pour chaque bolomètre d’HFI.

7.1.2 Essais de modélisation thermique d’HFI

Pour modéliser le comportement dynamique d’un système thermique, j’ai testé trois méthodes : le calcul par éléments finis avec un logiciel dédié (IDEAS, CASTEM, ...), la programmation numérique de l’équation de la chaleur [53] et le filtrage par fonction de transferts.

Modélisation par des fonctions de transfert des filtres du premier ordre

J’ai testé le filtrage numérique par fonction de transfert du premier ordre sur quelques mesures thermiques réalisées durant les étalonnages au sol du PFM (Figure 7.1). J’ai ainsi pu constater

que le comportement des systèmes thermiques étudiés n'est pas tout à fait celui d'un filtre du premier ordre mais qu'il s'approxime relativement bien par ce type de filtre.

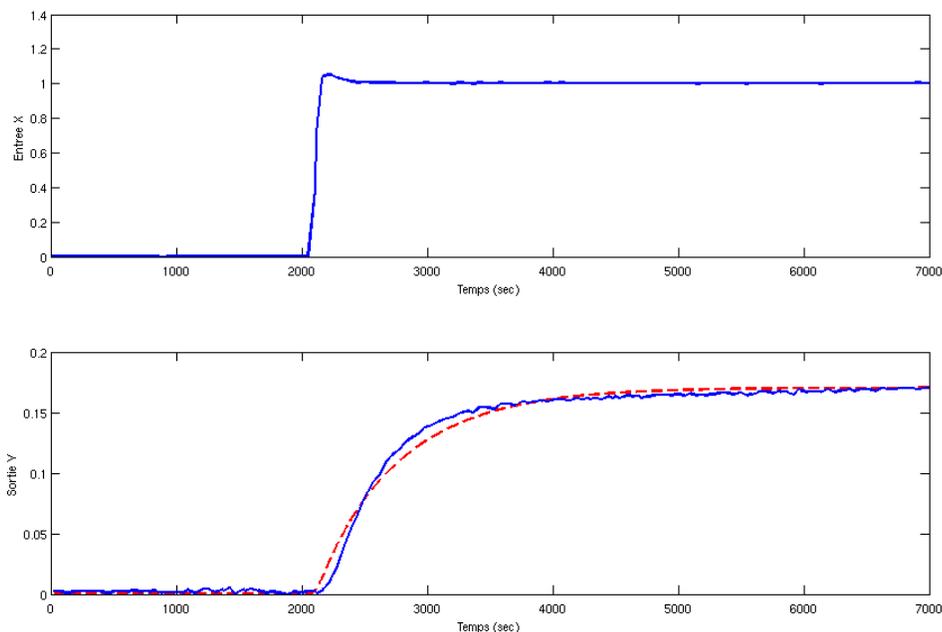


FIG. 7.1 – Mesures (en bleu) de la réponse de l'étage à 4 K du PFM (figure du bas) à un échelon thermique sur l'étage 18K (figure du haut) dans le cryostat Saturne. Le signal en rouge correspond au filtrage du signal d'entrée par un filtre du premier ordre dont le gain et la fréquence de coude ont été choisis pour ajuster au mieux le signal de sortie du système (Filtrage réalisé avec le logiciel SIMULINK). Le comportement du système thermique étudié ici n'est pas tout à fait celui d'un filtre du premier ordre mais on voit qu'il s'approxime assez bien par ce type de filtre.

J'ai ainsi pu conclure que l'utilisation des filtres du premier ordre permet donc de modéliser facilement (avec un temps de calcul minimal) le comportement thermique des systèmes présentant un comportement similaire.

La modélisation thermique par éléments finis

Au cours du projet TIPS, j'ai collaboré avec les ingénieurs du bureau d'étude de l'IAS pour développer un modèle thermique "fin" de l'étage à 4K d'HFI (Figure 7.2) qui peut être ajusté sur les résultats d'étalonnage d'HFI. On parle ici de modèle fin car l'espacement entre les éléments de la platine 4K a été minimisé afin de modéliser d'éventuels effets de diffusion thermique rapides (moins d'une seconde) entre les cornets dos-à-dos (Figure 7.2). Dans cette modélisation par éléments finis, il faut faire attention à la puissance de calcul nécessaire qui peut être très importante car plus le maillage choisi est fin plus la fréquence de calcul de la température des noeuds du maillage doit être grande [97]. Il ne faut donc pas choisir un maillage trop fin. Les résultats d'équilibre statique thermique obtenus avec ce modèle sont présentés Figure 7.3.

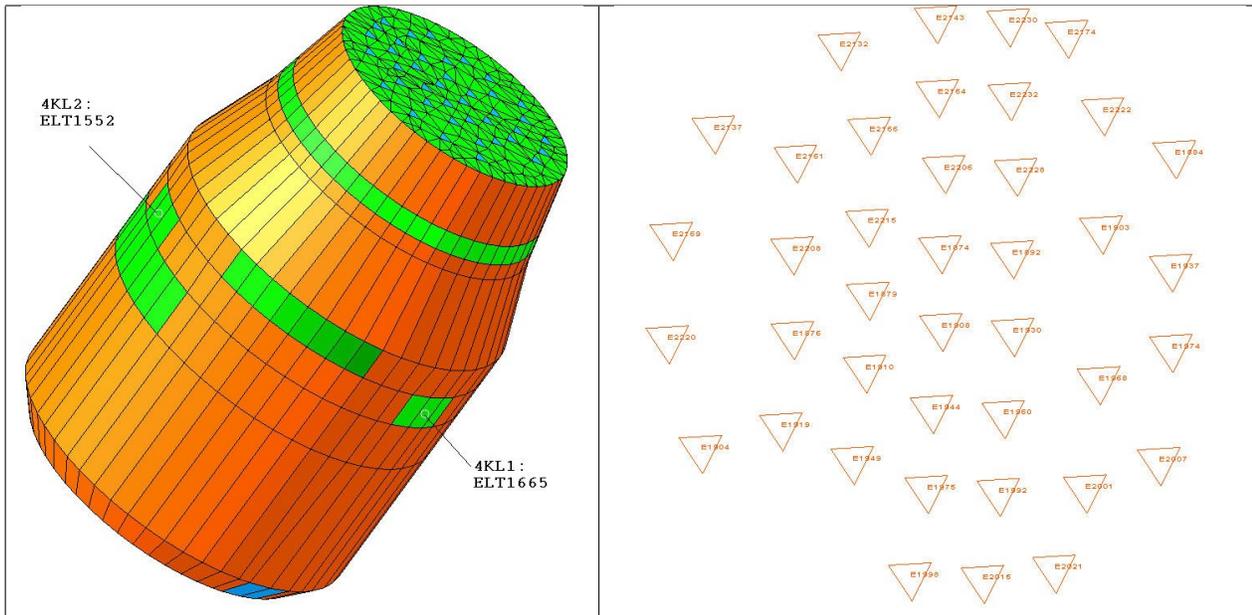


FIG. 7.2 – Gauche : Modèle thermique IDEAS de la boîte à 4K d’HFI. Droite : Désignation et localisation des éléments du maillage IDEAS associés aux 36 cornets dos-à-dos sur la platine 4K.

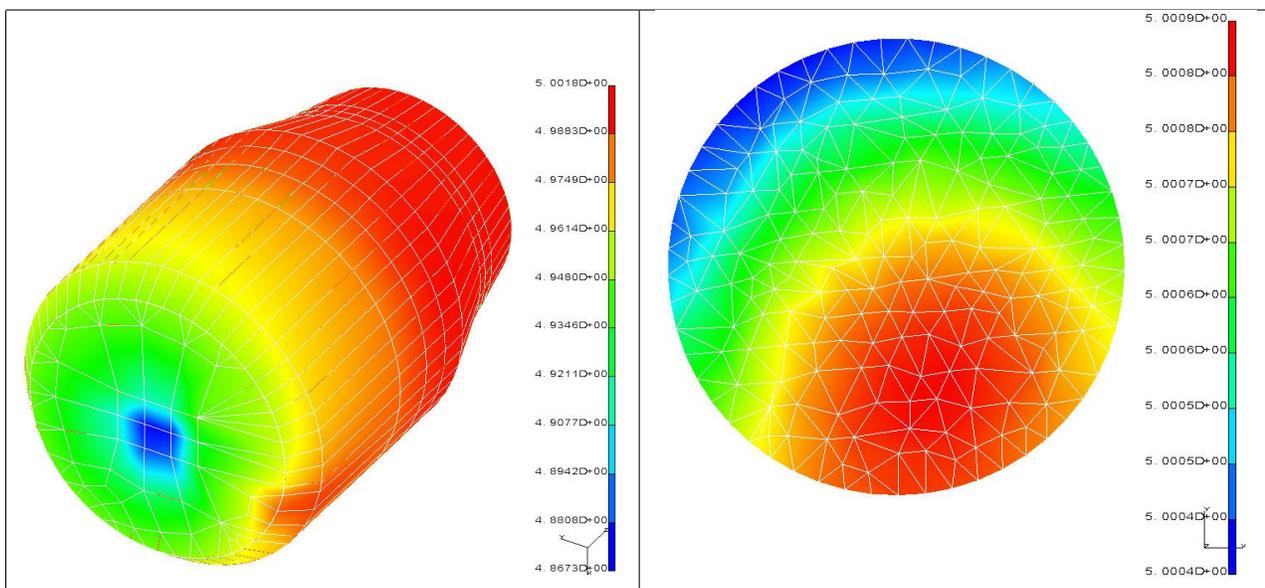


FIG. 7.3 – Gauche : Résultat en statique du modèle thermique IDEAS de la boîte 4K. Droite : Résultat en statique du modèle thermique IDEAS pour la platine 4K.

Des fluctuations représentatives de l’effet induit par le Sorption Cooler ont ensuite été générées à l’arrière de la boîte 4K (Figure 7.4). Pour cela, les fluctuations du SC mesurées au JPL sur le modèle de vol de ce réfrigérateur ont été multipliées par un gain de 0.007. On sait aujourd’hui que ce gain a été sous-estimé puisqu’il vaut environ 0.043 si l’on suppose que la

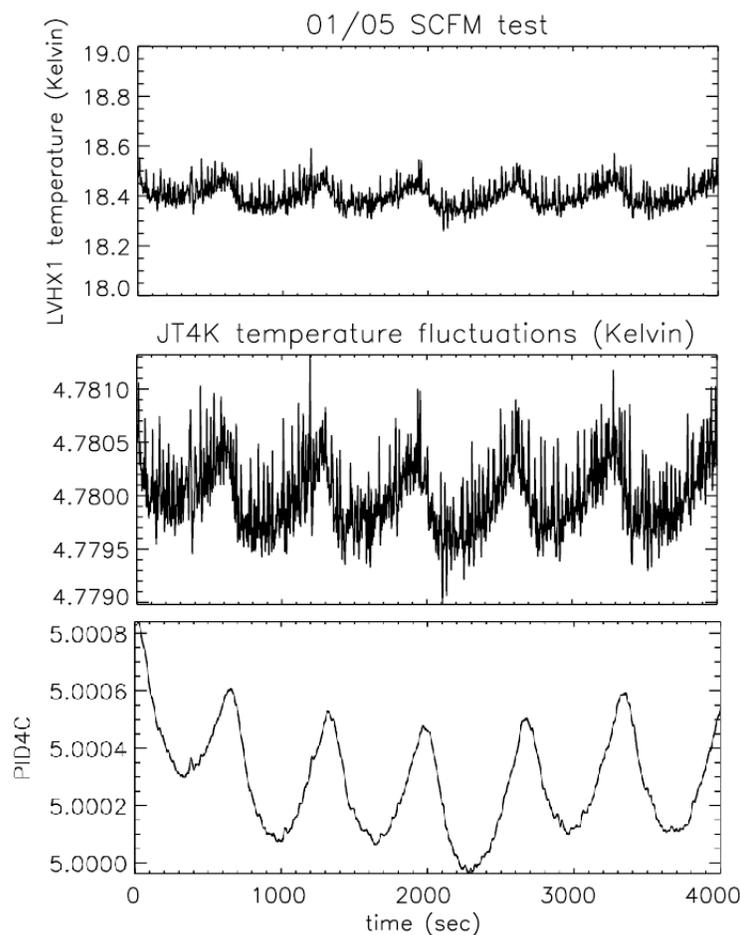


FIG. 7.4 – *Haut* : Fluctuations de température LVHX1 mesurées sur le modèle de vol du Sorption Cooler au JPL. *Milieu* : Fluctuations injectées à l’arrière de la boîte 4K dans le modèle IDEAS de TIPS. *Bas* : Vecteur température pour le thermomètre PID4C, calculé par le modèle IDEAS de l’étage 4K.

régulation TSA est allumée sur LVHX2. Le modèle thermique IDEAS permet ensuite de simuler les fluctuations induites sur chaque cornet à 4 K, puisqu’un élément du maillage thermique est associé à chaque cornet. Les fluctuations simulées ainsi sur un cornet de la platine 4K par le modèle sont représentées Figure 7.4.

Comparaison avec le signal du CMB

Les fluctuations de température en Kelvin sur les 36 cornets à 4K sont ensuite converties en Volts sur le détecteur pour 5 bolomètres d’HFI grâce à un module développé dans l’environnement ProC (Figure 7.5) du DPC et désigné sous le nom *tips_photom*. Ce module *tips_photom* convertit d’abord en Watt sur les détecteurs les fluctuations de température simulées par le modèle IDEAS pour les 5 cornets correspondants aux 5 bolomètres étudiés. Un modèle photométrique est programmé pour cela dans le module. La réponse des bolomètres est supposée constante, c’est à dire que les Watts sont ensuite convertis en Volt en multipliant par un simple

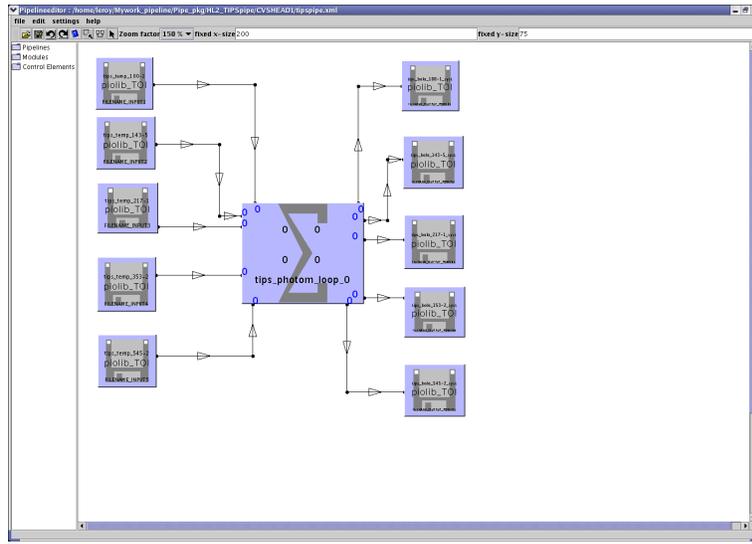


FIG. 7.5 – Le module DPC TIPS interfacé avec le logiciel ProC du DPC Planck.

gain en Volt/Watt le signal sur chaque bolomètre. Les 5 signaux en Volt de la Figure 7.6 sont alors obtenus. Enfin, ces signaux d’effet systématique en Volt sont additionnés au signal en Volt

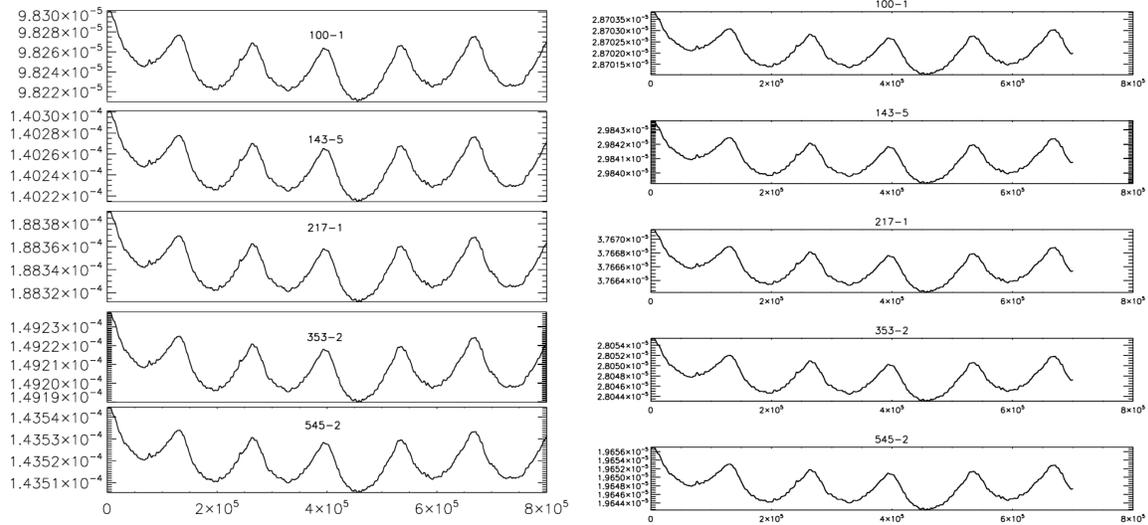


FIG. 7.6 – Les 5 TOIs de sortie du module `tips_photom` en Volt sont représentées ici à gauche en fonction du numéro d’échantillon simulé. A droite, le rapport entre les TOIs de sortie de `tips_photom` et les vecteurs de température issus du modèle IDEAS ont été tracés afin d’illustrer la relation non linéaire existant entre la fluctuation de température des cornets à 4K et les effets induits sur les bolomètres, qui ont été simulés avec le module `tips_photom`.

correspondant aux fluctuations du CMB simulées par le niveau S du DPC (Figure 7.7). Ces dernières simulations ont été produites par le groupe LESCONS du DPC spécialement pour TIPS.

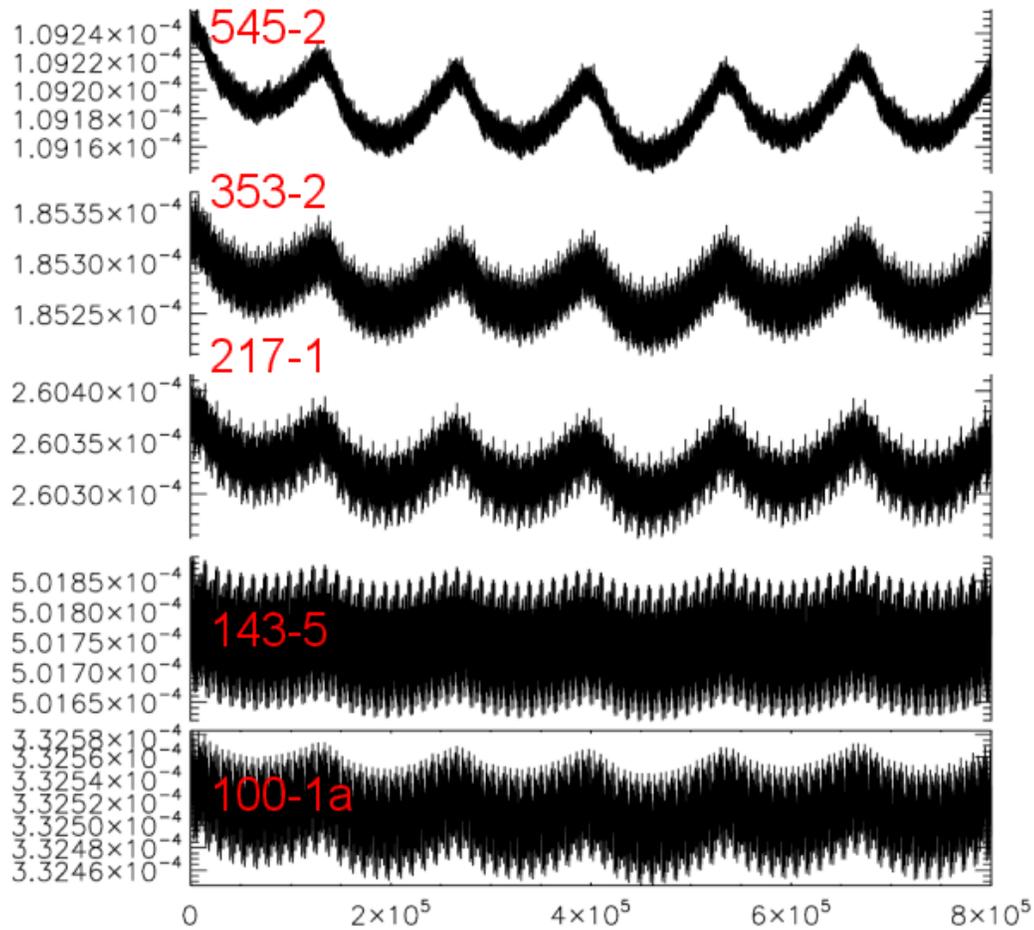


FIG. 7.7 – Résultat des simulations TIPS : Effet thermique de l'étage à 4 K superposé au signal des fluctuations du CMB pour 5 bolomètres d'HFI entre 100 et 545 GHz pour une durée de 4000 secondes avec des données échantillonnées à 200 Hz.

7.2 Correction par décorrélation du signal des thermomètres

7.2.1 Test sur les simulations TIPS

Le décorrélateur du niveau 2 du DPC HFI effectue une régression linéaire entre plusieurs signaux corrélés pour déterminer les coefficients de corrélation. Cette régression est basée sur un algorithme de régression linéaire multiple dans lequel les variables indépendantes peuvent être linéairement dépendantes (routine `g02dac` de la librairie NAG). Dans le cadre du projet TIPS, ce décorrélateur a été testé sur les résultats du modèle IDEAS de l'effet induit par l'étage 4K en 2005 par l'équipe du LPSC Grenoble [93] qui travaille dans le DPC sur les modules de pré-traitement des données d'HFI.

Compte-tenu de la faible amplitude des effets thermiques du 4K simulés dans TIPS, le décorrélateur n'a pu être utilisé directement sur la somme de toutes les composantes du signal Astrophysique au cours de ce test. Le décorrélateur a donc été testé pour séparer seulement la somme du signal des fluctuations du CMB et du signal thermique du 4K. Suite à ce test, la collaboration TIPS a donc pu identifier qu'en particulier, le signal de la Voie Lactée devra avoir été préalablement soustrait des données grâce aux prédictions d'un modèle pour pouvoir appliquer le décorrélateur.

Après avoir moyenné l'effet sur les PBRs, il est apparu que l'effet était encore plus faible et qu'il n'était pas nécessaire de le soustraire pour le niveau de fluctuation du 4K simulé dans cette première version de TIPS. De nouvelles simulations, sur plusieurs cercles, sont désormais nécessaires pour pouvoir confirmer ce résultat. Des simulations du signal induit par le pic de régulation PID de l'étage 4K doivent également être entrepris pour pouvoir conclure si l'effet résiduel de l'étage à 4 K, avec ou sans régulation PID, est négligeable ou pas.

Durant ces tests, nous avons également identifié que la non-linéarité induite par l'émission de corps noir de l'étage à 4K (Figure 7.6) peut être gênante pour l'application du décorrélateur DPC puisque celui-ci suppose que la corrélation de l'effet thermique avec la température des thermomètres est complètement linéaire. De nouvelles simulations avec un modèle photométrique et un modèle de bolomètres sont nécessaires afin de quantifier précisément le niveau de la non-linéarité existant entre la température des thermomètres et le signal en Watt sur le détecteur.

Enfin un décalage en temps doit être introduit pour pouvoir tenir compte des décalages d'une dizaine de secondes identifiés sur le CQM à CSL pour les bolomètres à 100 et 143 GHz [33]. Un décorrélateur incluant l'estimation d'un décalage en temps est en cours de développement dans le DPC. Il devra donc être testé sur ces futures simulations.

7.2.2 Test sur les mesures CSL-CQM

Un second test de fluctuations du PACE a été réalisé sur le CQM à CSL. Durant ce test, les bolomètres étaient refroidis à 0.1 Kelvins par la dilution du CQM. L'effet des fluctuations périodiques du Sorption Cooler sur le signal des bolomètres d'HFI peut donc être visualisé directement sur ces données (Figure 7.8). Par ailleurs, puisque les thermomètres des étages 0.1K et 4K étaient polarisés durant ce test il est possible d'utiliser leur signal pour décorréler

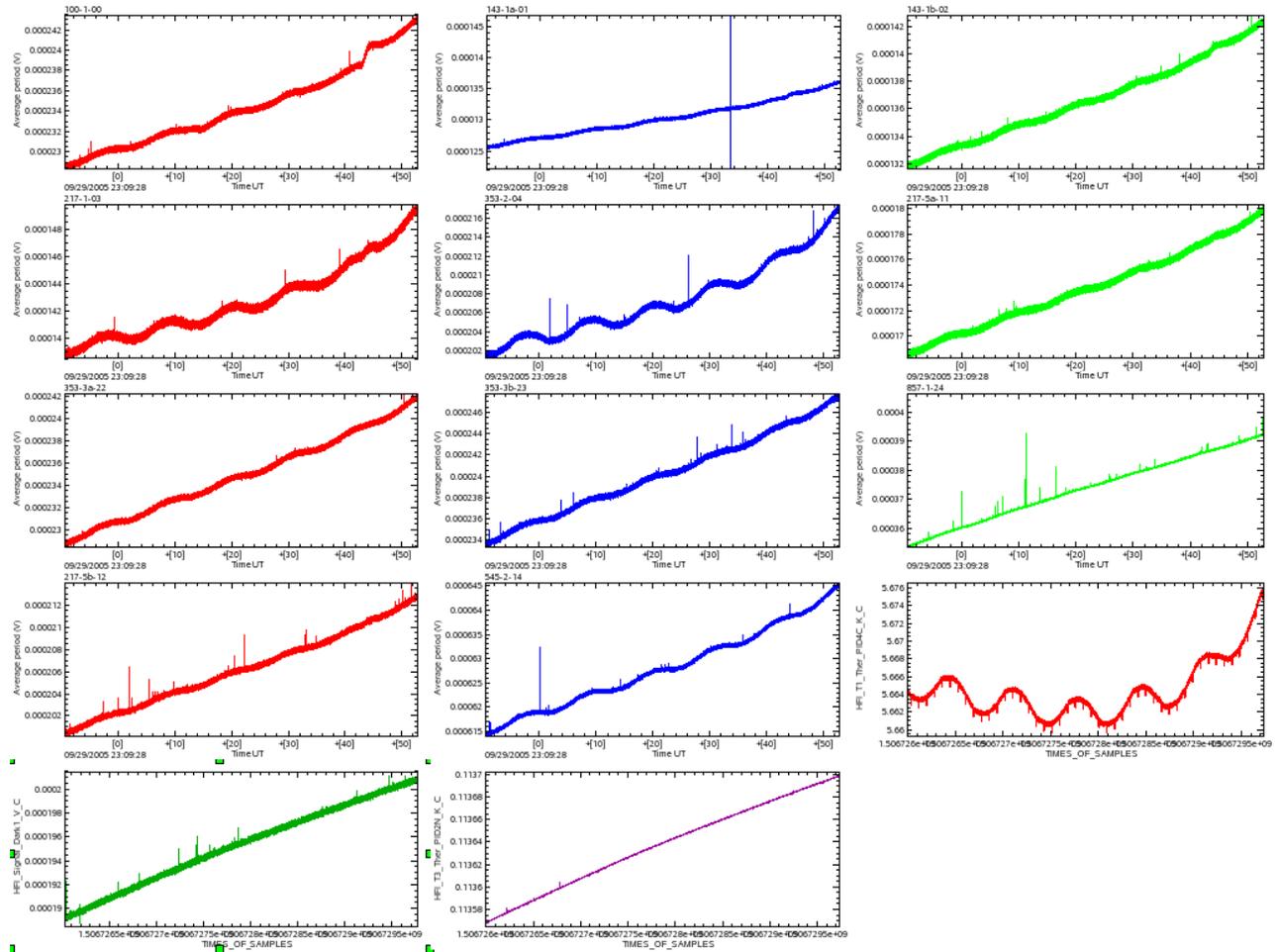


FIG. 7.8 – Effet des fluctuations de température du PACE sur le signal des bolomètres du CQM durant le test CSL et signaux des thermomètres PID4C et PID2N correspondants.

l'effet de ces étages sur le signal des bolomètres. J'ai donc effectué un test de correction par décorrélation simple sur ces données en collaboration avec Juan Macias-Pérez et Damien Girard.

La Figure 7.9 représente les signaux du bolomètre 143-1b, du thermomètre 4K (PID4C) et du thermomètre 0.1K (PID2N) utilisés pour tester la correction par régression linéaire des effets du 4K et du 0.1K. Un décalage en temps de 2211 échantillons soit 13.92 secondes a d'abord été identifié sur ce jeu de données. Ce résultat confirme donc celui obtenu avec les mesures EFF à CSL sur le CQM et décrit au chapitre 4 de cette thèse. Ces deux résultats sont bien équivalents car l'effet d'un filtrage avec une constante de temps pour un stimulus sinusoïdal en entrée équivaut à un déphasage du signal sinusoïdal de sortie par une valeur de déphasage égale à la constante de temps du filtre. Après ajustement des coefficients de corrélation avec les thermomètres des étages 4 K et 0.1 K avec un décalage en temps de 13.92 secondes pour le 4K, les contributions de ces étages sont soustraites du signal des bolomètres (Figure 7.9). Le coefficient de corrélation linéaire avec le thermomètre PID2N vaut 0.0687. Le coefficient de corrélation linéaire avec le thermomètre PID4C vaut quant à lui $8.86 \cdot 10^{-5}$.

Le spectre du résidu après correction est tracé Figure 7.11. On constate que le spectre

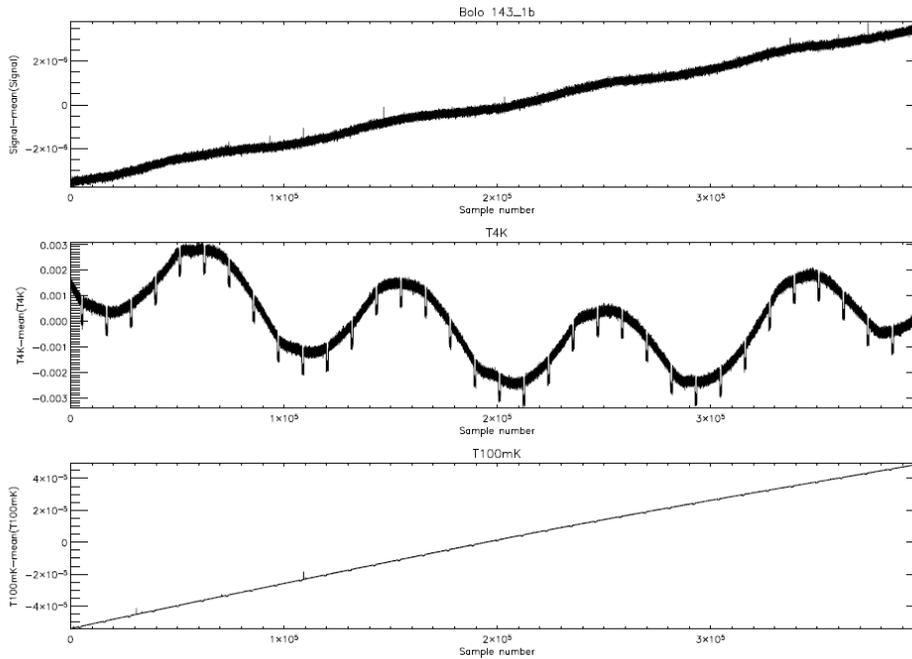


FIG. 7.9 – Signaux du bolomètre 143-1b, du thermomètre 4K (PID4C) et du thermomètre 0.1K (PID2N) utilisés pour tester la correction par regression linéaire des effet du 4K et du 0.1K. La moyenne des trois vecteurs a été soustraite préalablement.

du résidu est plat de 0.02 Hz à 80 Hz après correction des dérives thermiques du 4K et du 0.1K. La dérive en $1/f$ en dessous de 1 Hz sur les mesures non corrigées a disparu après la correction par corrélation linéaire. En revanche un signal parasite est visible autour de 0.01Hz. Ce signal correspond au signal parasite de 70 secondes de périodes et présent sur le signal des thermomètres 4K et 0.1K. Ce signal parasite visible sur la Figure 7.9 est du à un problème de saturation du REU durant ces tests CQM. Après avoir ajusté les mesures des themrmomètres 4K et 0.1K par des modèle polynomiaux et après avoir soustrait la corrélation de ces modèles polynomiaux sans signal parasite de 70 secondes, j'ai pu constater que le pic parasite disparaît du spectre du résidu de la décorrélation.

Finalement, les résultats de ces premiers tests de corrélation simple sur les mesures au sol d'HFI à CSL sont donc déjà satisfaisants pour le prétraitement des données d'HFI.

7.3 Modélisation par réseau de neurones des effets thermiques dans Planck : Discussion et tests

Depuis une vingtaine d'années, les modèles connexionnistes de réseaux de neurones artificiels ont fait la preuve de leur efficacité en ce qui concerne la résolution de problèmes aussi complexes que la classification, l'optimisation, la reconnaissance de formes ou de signaux, la traduction automatique ou encore le développement de systèmes experts et d'aide à la décision. Les réseaux de neurones constituent parfois la seule méthode efficace pour modéliser des phénomènes com-

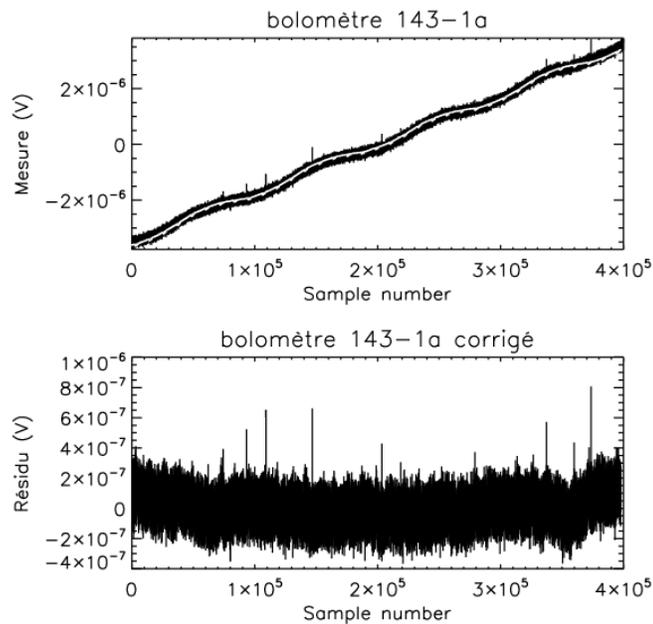


FIG. 7.10 – Haut : Modèle des effets thermiques soustrait (en blanc), superposé au signal du bolomètre 143-1b. Bas : Signal résiduel du bolomètre après correction des effets thermiques du 4K et du 0.1K.

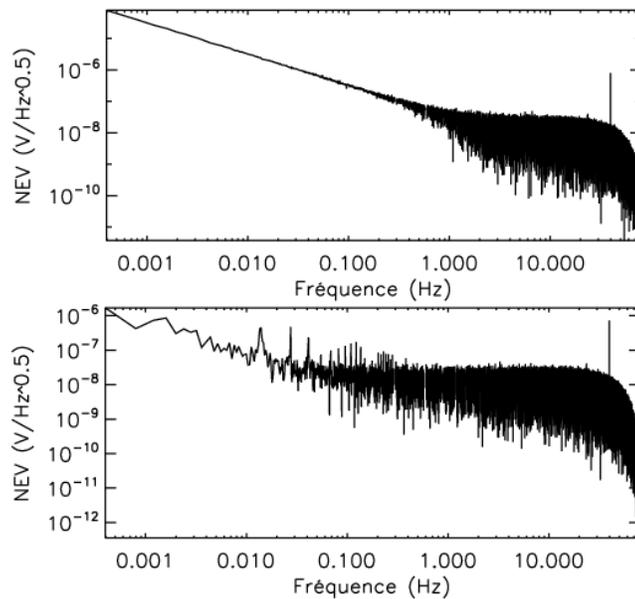


FIG. 7.11 – Haut : Spectre du signal du bolomètre 143-1b avant correction. Bas : Spectre du signal résiduel du bolomètre après correction des effets thermiques du 4K et du 0.1K. Le pic à 40 Hz visible sur les deux bolomètres est lié à la micro-phonie induite par le réfrigérateur à 4 K du CQM.

plexes qui ne peuvent pas être décrits analytiquement ni résolu de façon simple numériquement. Les réseaux de neurones peuvent s’avérer très utiles pour le traitement des données astrophysiques et l’instrumentation spatiale en général. Ils permettent d’effectuer notamment du filtrage d’information, de la compression de données, de la classification automatique de spectres et d’images ou encore de la modélisation de réponse instrumentale. Utilisé conjointement avec des méthodes d’analyse plus classiques, les réseaux de neurones s’avèrent donc des outils puissants pour l’exploitation du signal astrophysique.

7.3.1 Identification des entrées des réseaux associés aux effets à prédire par apprentissage supervisé

Un réseau de neurones artificiel est un réseau fortement connecté de processeurs élémentaires ou ” neurones ” fonctionnant en parallèle. Chaque neurone calcule une sortie unique sur la base des informations qu’il reçoit. Les connections entre neurones sont appelées synapses. Un réseau calcule au final une ou plusieurs grandeurs en fonction de différents grandeurs fournies en entrée. Pour prédire par exemple un effet thermique avec ces réseaux, il faut au préalable identifier les paramètres variables (entrées) qui influencent la grandeur à prédire (sortie). Dans le cas d’un effet thermique en Volt sur un bolomètre d’HFI, il faudra apprendre au réseau tous les effets possibles induits sur ce signal en Volt à prédire. Il faudra alors constituer ce que l’on appelle une ”base d’apprentissage” contenant différents exemples d’effets sur le signal des bolomètres induits par différentes sources (fluctuations de température de tous les étages induites par le satellite, les réfrigérateurs actifs, ...). Cette base d’apprentissage est ensuite utilisée pour réaliser un apprentissage supervisé au réseau de neurones pour lui apprendre à prédire les effets thermiques. Rapidement, le nombre d’entrées peut devenir très important et c’est pourquoi il faut faire attention à la sélection des entrées pour ne retenir que les plus pertinentes et oublier celles dont l’effet est négligeable. Un travail d’identification et de quantification des effets est alors ici absolument nécessaire avant de prédire des effets systématiques par réseau de neurones.

7.3.2 Résultats des réseaux sur la diffusion thermique sur l’étage 4K d’HFI

Le but du test présenté ici est de prédire la température de n’importe quel cornet de la platine à 4 K d’HFI en fonction de la mesure de température de l’un des quatre thermomètres disponible sur cette platine (Figure 7.12).

Les résultats d’un modèle thermique des fluctuations induites par le SC sur la platine 4K ont été utilisés pour servir de base d’apprentissage à un réseau de neurones de type perceptron multicouches. Nous avons utilisé le logiciel SNNS (Stuttgart Neural Network Simulator) afin de simuler des perceptrons multicouches avec un certain nombre d’entrées, une sortie et une couche cachée avec un nombre N de neurones cachés. Pour chaque modèle thermique, une base d’apprentissage normalisée contenant environ 720000 exemples de comportement thermique a été créé. Les fluctuations du modèle thermique sont générées de façon aléatoire. Il est ainsi possible de générer une base de test pour chaque modèle thermique en effectuant une deuxième réalisation aléatoire d’un même modèle. Cette base de test est composée d’environ 720000 exemples. L’apprentissage du réseau s’est faite avec l’algorithme de rétropropagation du gradient standard de SNNS. Notre stratégie pour chaque modèle thermique a donc consisté

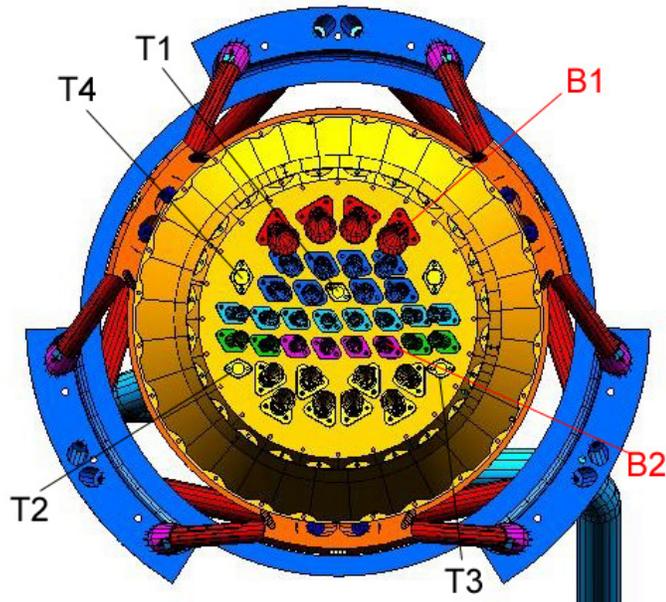


FIG. 7.12 – Localisation des bolomètres (B1 et B2) dont la température doit être prédite par un réseau de neurones à partir des thermomètres (T1 à T4).

à apprendre au réseau à prédire la température correspondant à un cornet dos à dos à partir des mesures de température effectuées sur la platine 4K. Une fois cet apprentissage terminé nous avons testé la capacité de prédiction du réseau à partir de la base de test correspondante. Avec ce réseau j'ai pu prédire ainsi la température des cornet dos à dos avec une précision de 1% (Figures 7.13 et 7.14).

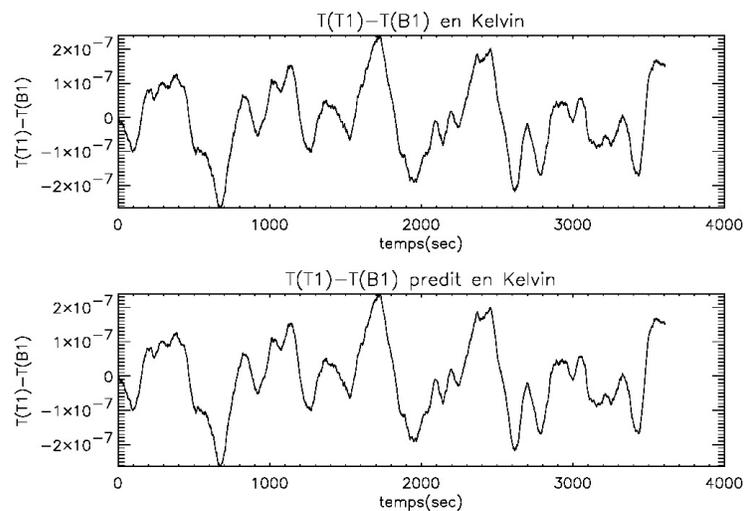


FIG. 7.13 – Haut : Résultat du modèle. Bas : Résultat du réseau de neurones. Les différences entre la prédiction et le modèle utilisé pour l'apprentissage du réseau n'est pas visible.

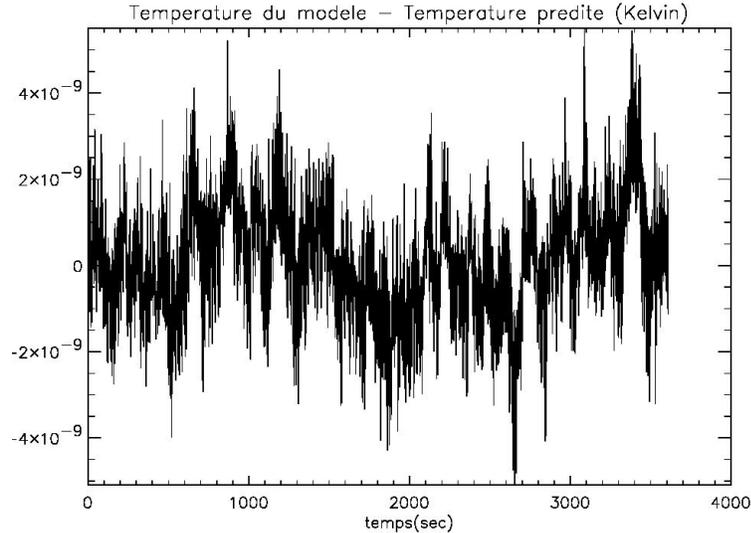


FIG. 7.14 – Différence entre la prédiction du réseau de neurones et le modèle utilisé pour l'apprentissage.

Ce premier test a donc permis de démontrer que les perceptrons permettent de prédire des écarts de température entre cornets et thermomètres liés à des fluctuations de température rapides de moins d'une seconde entre ces cornets.

7.4 Conclusion

Compte-tenu des résultats des tests de simulation thermique présentés ici, la modélisation thermique par fonction de transfert semble être suffisante pour tester les méthodes de correction des effets systématiques d'origine thermique dans Planck-HFI. Leur facilité de mise en oeuvre devrait entraîner la généralisation de leur utilisation pour les simulations dans le DPC HFI. Il faudra au préalable vérifier que les caractéristiques des fonctions de transfert utilisées pour ces simulations ont bien été ajustées sur les résultats des tests thermiques d'HFI, ainsi que sur les différents modèles thermiques utilisés dans Planck pour les effets qui n'auront pas été mesurés au sol.

Après avoir moyenné l'effet du 4K simulé dans la première version de TIPS sur les PBRs, il est apparu que l'effet résiduel était faible et qu'il n'était peut être pas nécessaire de le soustraire. De nouvelles simulations sur les PBRs des effets thermiques basse fréquence sans régulation PID du 4K sont désormais nécessaires pour confirmer ce résultat. Des simulations du signal induit par le pic de régulation PID de l'étage 4K doivent également être entrepris pour pouvoir conclure si l'effet résiduel de l'étage à 4 K avec ou sans régulation PID est négligeable ou pas.

Les premiers tests de correction linéaire du signal des bolomètres avec celui des thermomètres à 4 K et 0.1 K sur les données CQM-CSL sont satisfaisants. Ces efforts de test sur les mesures au sol d'HFI vont se poursuivre dans la suite avec les tests sur les données PFM-CAL, toujours en collaboration avec les scientifiques du DPC au sein du groupe "Thermal effects" du

”Core-Team” HFI (le Core-Team est le forum de discussion et d’échange d’information entre les scientifiques en charge de l’instrument et les scientifiques préparant l’analyse des données d’HFI). En particulier, la non linéarité entre les fluctuations de température de l’étage à 4 K et l’effet du pic de régulation du 4K sur les bolomètres pourrait être quantifiée à partir de ces données. Après avoir vérifié que la non linéarité entre le signal des thermomètres à 4 K et des bolomètres n’est pas trop importante, le décorrélateur par régression linéaire du DPC pourra éventuellement être retenu pour l’analyse des données d’HFI. Les effets de non-linéarité introduits dans TIPS actuellement sont de faible amplitude. Néanmoins, les simulations TIPS devraient être poursuivies et mise à jour afin de trancher définitivement sur ce point. Parmi les mises à jour possibles de TIPS, on sait que la loi de corps noir de l’émission des cornets à 4 K introduit une petite non-linéarité. Un essai de corrélation du signal des bolomètres avec un signal de corps noir fluctuant suivant la température du 4K pourrait alors être testé dans TIPS afin répondre à cette question sur la non-linéarité des effets thermiques. Le développement de ces simulations supplémentaires n’a pas été possible durant cette thèse car j’ai dû privilégier l’aspect quantification des effets systématiques thermiques. L’analyse des données d’étalonnage pour la compréhension du comportement thermique a notamment été plus longue que prévue et prioritaire. Enfin, il faudra par ailleurs utiliser des méthodes de décorrélation avec des décalages en temps entre le signal des bolomètres et celui des thermomètres afin de tenir compte du décalage d’une dizaine de secondes observé à CSL sur les bolomètres du CQM à 100 et 143 GHz.

Des méthodes de correction par réseaux de neurones ont également été testées durant cette thèse. Les réseaux de neurones peuvent être très utiles pour prédire des phénomènes physiques non-linéaire complexes à modéliser. Pour ce qui est de la comparaison des performances des réseaux et des corrélations, celle-ci tourne à l’avantage de cette dernière, notamment parce que cette méthode par corrélation ne fait pas d’hypothèse sur l’amplitude des signaux parasites. La méthode par corrélation ajuste en effet les coefficients de corrélation sur les données quasiment en temps réel, ce qui permet d’utiliser cette méthode en vol pour le pré-traitement des données dès les premières observations. Pour pouvoir en faire de même, les réseaux de neurones doivent apprendre à prédire les effets thermiques sur des simulations. Il sera alors certainement difficile de produire des simulations représentatives des effets thermiques en vol avec une précision suffisante. Les prédictions d’un tel réseau devront alors certainement être ré-ajustées avant de les soustraire pour la correction des effets thermiques. Un étalonnage en vol dédié pourrait alors être envisagé pour ce ré-ajustement. Enfin, l’analyse des étalonnages au sol d’HFI étant désormais terminée, le comportement thermique d’HFI est beaucoup mieux compris, notamment grâce aux différentes mesures présentées précédemment au quatrième chapitre. Il est donc désormais possible d’imaginer de tester la prédiction des effets thermiques dans HFI par réseau de neurones à partir des données d’étalonnage au sol d’HFI. Il faudra alors faire attention au risque de surapprentissage et éviter de développer un réseau de neurones qui apprendrait par coeur le comportement thermique d’HFI dans le jeu de données de Saturne. La capacité de généralisation du réseau devra alors être testée grâce à une base de validation. Les prédictions de ce réseau sur les simulations thermiques de TIPS pourront alors être analysées afin de démontrer la possibilité ou non de prédire les effets thermiques en vol à partir des données d’étalonnages au sol.

Enfin, les premiers résultats du test de la méthode par décorrélation étant satisfaisants, cette méthode est retenue actuellement pour la correction des effets thermiques dans le DPC HFI.

Chapitre 8

Etude des effets systématiques pour la conception de l'expérience PILOT

Le projet PILOT (Polarized Instrument for Long-wavelength Observations of the Tenuous Interstellar medium) est une expérience ballon de mesure de la polarisation du milieu interstellaire dans les longueurs d'onde micro-onde. Pour réaliser cette mesure, PILOT est équipé de détecteurs de type matrice de bolomètres couplés à un système d'analyse de la polarisation du rayonnement mesuré. L'étude de la polarisation du milieu interstellaire dans le domaine sub-millimétrique est très importante pour la mise au point d'expériences futures de mesure de la polarisation du CMB. L'émission polarisée des poussières constitue en effet un avant-plan majeur et difficile à soustraire pour l'analyse de la polarisation du CMB. Les observations de PILOT seront alors complémentaires des observations de Planck-HFI pour l'étude de l'émission polarisée des poussières (Figure 1.9) dans la perspective des futures expériences CMB polarisées. Par ailleurs, la mesure de la polarisation nécessite la mise au point d'instruments ayant une sensibilité accrue par rapport à la génération d'instrument de type Planck. Accroître la sensibilité implique également un niveau de contrôle des effets systématiques encore plus exigeant pour les expériences PILOT ou CMB polarisées. Ce chapitre est donc consacré aux études préliminaires auxquelles j'ai participé pour le contrôle des effets systématiques durant les Phases A et B (Etude de faisabilité et Définition préliminaire) du projet PILOT.

8.1 Description de l'expérience PILOT

8.1.1 Objectifs scientifiques

Le projet PILOT a pour but l'observation de la polarisation du ciel dans le domaine des ondes submillimétriques. PILOT observera dans deux bandes photométriques à 240 et 550 μm avec une résolution de 3.5' dans les deux bandes. Deux modes d'observation seront possibles : un mode "relevé du plan galactique" et un mode "champ profond" (Figure 8.1). Des matrices de bolomètres conçues initialement pour l'instrument PACS du télescope spatial Herschel, seront utilisées pour équiper l'instrument PILOT.

Avec ces observations, PILOT apportera des contraintes uniques sur les modèles d'émission polarisée des poussières du milieu interstellaire. Par ailleurs, il réalisera deux "premières" importantes pour la conception des futures expériences de mesure de la polarisation du CMB.

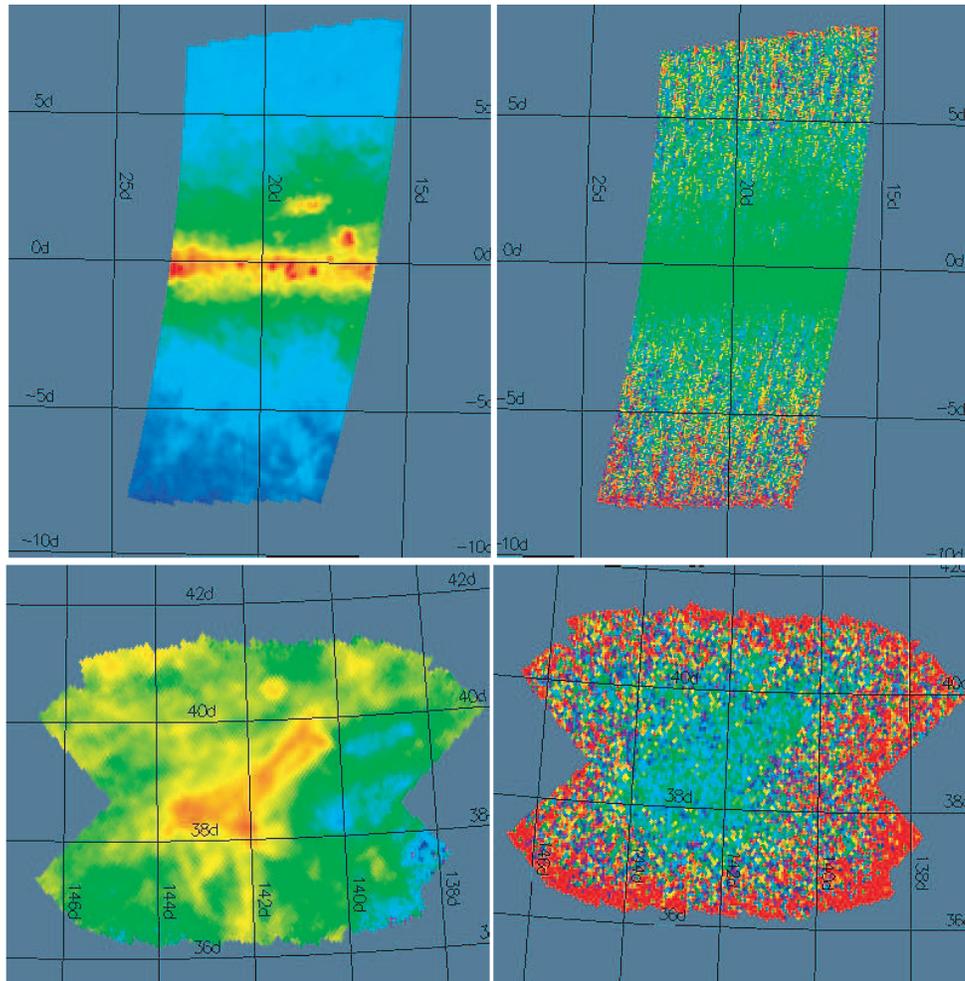


FIG. 8.1 – En haut à gauche : Simulation de la carte d'intensité mesurée par la bande à $240\ \mu\text{m}$ de PILOT en mode "plan galactique". En haut à droite : Simulation de la carte de pourcentage de polarisation mesurée par la bande à $240\ \mu\text{m}$ de PILOT en mode "plan galactique". En bas à gauche : Simulation de la carte d'intensité mesurée par la bande à $240\ \mu\text{m}$ de PILOT en mode "champ profond" sur un cirrus. En bas à droite : Simulation de la carte de pourcentage de polarisation mesurée par la bande à $240\ \mu\text{m}$ de PILOT en mode "champ profond" sur un cirrus.

PILOT sera tout d'abord la première expérience à utiliser un système de mesure de la polarisation couplé à des matrices de bolomètres multiplexées et de grand format. L'utilisation de ces matrices est fondamentale pour accroître la sensibilité des observations futures du CMB en augmentant le nombre de mesures indépendantes, ce qui équivaut à augmenter la durée d'observation. D'un point de vue instrumental, PILOT constitue donc un précurseur des futurs instruments de type CMB-pol. Ensuite, l'émission polarisée des poussières galactiques constitue l'avant-plan astrophysique majeur gênant l'extraction du signal polarisé du CMB. PILOT contribue donc à accroître la connaissance de la communauté scientifique sur cette composante polarisée. En contraignant d'avantage le niveau de l'émission polarisée des poussières,

PILOT permettra de définir jusqu'à quel niveau leur émission doit être mesurée pour séparer la polarisation du CMB dans les futures observations de CMB-pol.

8.1.2 Le projet

PILOT est un projet financé par le CNES. La mise au point de la plateforme est sous la responsabilité de l'équipe ballon du CNES. Le CESR est l'institut PI de la charge pointée développée en collaboration avec l'IAS, le CEA, l'Université de Rome et l'Université de Cardiff. Le premier vol de PILOT est prévu fin 2010 à Kiruna en Suède.

8.1.3 La plateforme

Le ballon emporte une plateforme standard CNES. Une charge pointée comprenant un télescope associé à un photomètre est fixé sur cette plateforme (Figure 8.2).

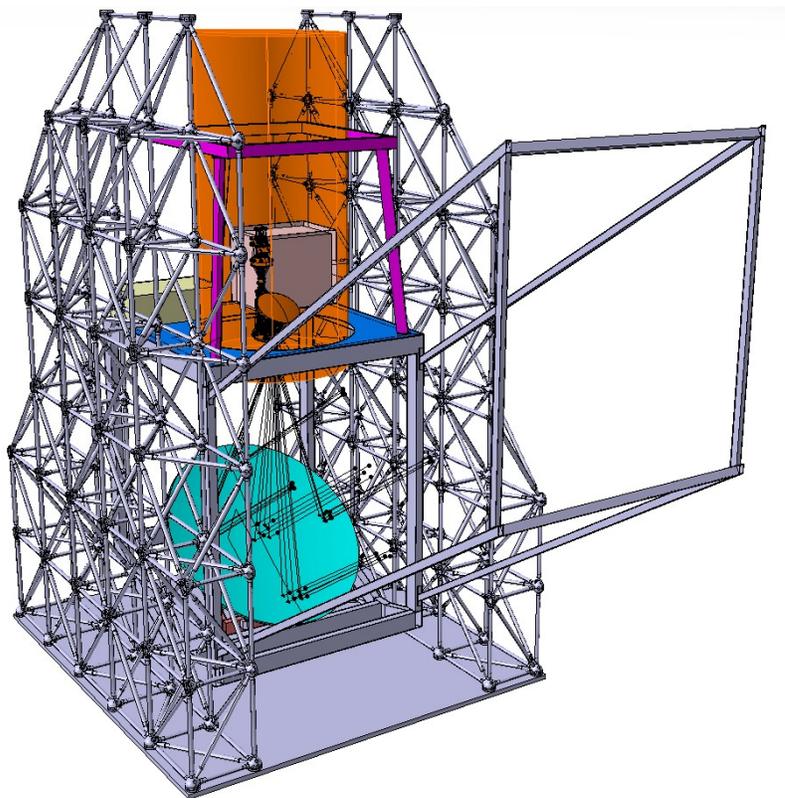


FIG. 8.2 – La plateforme embarquant la charge pointée de PILOT. Le miroir est représenté en vert et le photomètre en rouge.

8.1.4 La charge pointée

La charge pointée (Figure 8.3) est constituée d'un télescope de type Grégorien hors-axe comme Archeops et Planck.

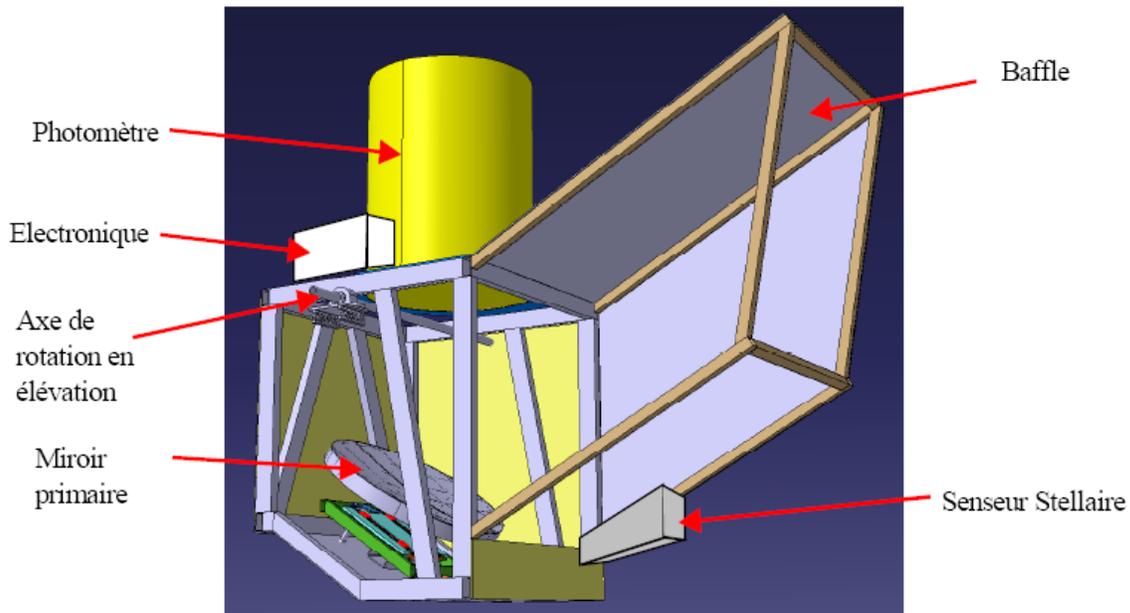


FIG. 8.3 – *La charge pointée de PILOT.*

Un photomètre constitué d'un cryostat contenant les détecteurs, les éléments froids de l'optique et les systèmes d'analyse de la polarisation est fixé sur cette charge pointée (Figure 8.4). Le système d'analyse de la polarisation est constitué d'un polariseur et d'une lame demi-onde (Figure 8.4). Cette lame demi-onde est ensuite mise en rotation par un moteur afin d'obtenir plusieurs directions d'analyse. Chaque matrice est constituée de 1024 pixels répartis sur 32 colonnes et 32 lignes refroidis à 0.3 K par un réfrigérateur à He^3 développé à l'IAS. Des filtres placés devant les détecteurs permettent de séparer les matrices en deux voies photométriques centrées sur $240 \mu\text{m}$ (bande SW) et $550 \mu\text{m}$ (bande LW). Sur chacune des deux matrices, chaque moitié de matrice est alors constituée d'un canal photométrique de 512 pixels à $240 \mu\text{m}$ et $550 \mu\text{m}$. Le champ de vue instantané de chaque voie photométrique de chaque matrice est de $46' \times 23'$.

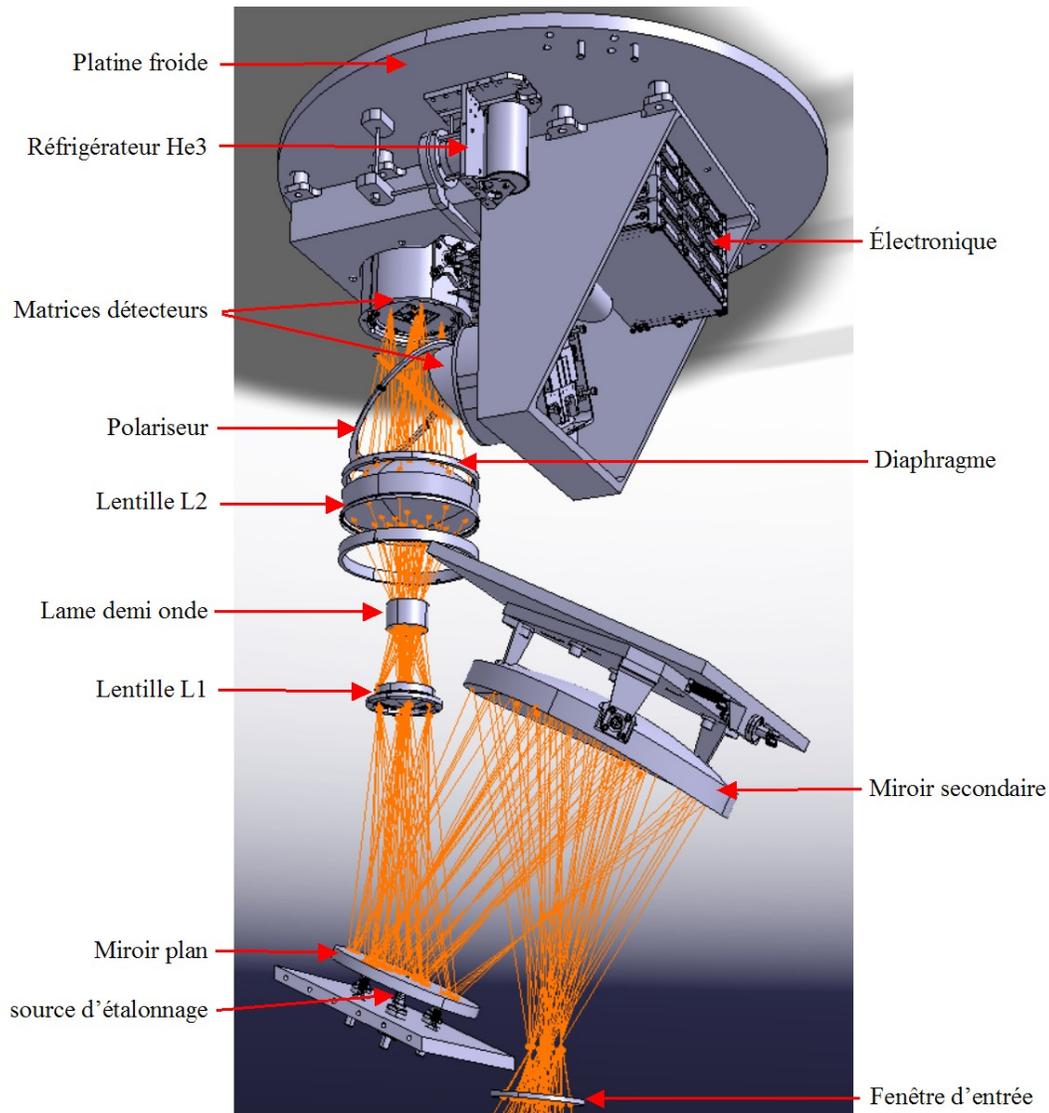


FIG. 8.4 – Dessin 3D de l'intérieur du cryostat du photomètre et concept optique de PILOT.

8.2 Le modèle photométrique de PILOT

J'ai développé en IDL, un modèle photométrique qui utilise les profils de filtre mesurés à Cardiff pour déterminer les efficacités optiques dans chaque bande d'HFI. Ce modèle calcule ensuite, pour chaque bande PILOT, la puissance totale, issue de l'émission thermique de l'instrument, et incidente sur chaque pixel de la matrice dans le plan focal de l'instrument.

Cette puissance est obtenue à partir de la formule 8.1 ci-dessous :

$$P = \int_0^{\infty} \left[\sum_{i=1}^N Tr_i(\nu) \epsilon_i B_{\nu}(T_i, \nu) S_{pix} \Omega_i \right] d\nu \quad (8.1)$$

où $Tr_i(\nu)$ est la transmission optique à la fréquence ν entre l'élément photométrique i et le pixel de la matrice, ϵ_i est l'émissivité de l'élément i , $B_{\nu}(T_i, \nu)$ est la brillance de corps noir à

la fréquence ν pour la température T_i de l'élément i , S_{pix} est la surface du pixel, Ω_i est l'angle solide sous lequel l'éclairement de l'élément photométrique i illumine le pixel.

8.2.1 Les éléments du modèle photométrique

Miroir primaire (M1)

L'émissivité de M1 est supposée égale à 2% pour les deux bandes PILOT. En vérité, l'émissivité varie avec la longueur d'onde [14] mais on suppose ici qu'elle est au maximum de 2% pour les deux bandes.

Fenêtre d'entrée du cryostat

On suppose que la transmission de la fenêtre est de 98%. Son émissivité maximale est supposée égale à 2%. Cette émissivité dépend de l'épaisseur et du matériau dont elle est constituée. La conception de cette pièce doit donc être optimisée pour minimiser cette émissivité.

Lame demi-onde

La transmission de la lame est supposée égale à 95%.

Lentilles

Afin de pouvoir disposer un Lyot-stop qui fixe la pupille de sortie du système optique juste après la lame demi-onde, des lentilles sont utilisées avant et après la lame demi-onde dans le schéma optique. La transmission de chaque lentille est égale à 0.95. On suppose que leur émissivité est de 3% pour chacune.

Filtres

Plusieurs séries de filtres sont utilisées pour définir les bandes photométriques de PILOT. Les filtres thermiques possèdent une faible épaisseur. Leur émissivité est supposée égale à 2% pour la bande à 240 μm . L'épaisseur des filtres bloquants est proportionnelle à la fréquence de coupure désirée pour chaque bande. On suppose que leur émissivité est égale à 3%.

Liste des éléments photométriques de PILOT

Les éléments du modèle photométrique sont numérotés de 1 à N. Chaque bande PILOT est constituée de 15 éléments listés dans le tableau 8.1. Les éléments 1 à 12 sont communs aux deux bandes PILOT. Les éléments 13 à 15 sont différents et spécifiques à chaque bande. Les fréquences de coupure de ces derniers éléments fixent les largeurs de bande finale de PILOT.

8.2.2 Bandes spectrales

Les profils spectraux finaux des bandes PILOT est le résultat du produit des transmissions des différents filtres (Figure 8.5).

i	Description	Température (K)	Emissivité	Transmission
1	M1	240	0.02	-
2	Window	273	0.02	0.98
3	Thermal Filter 77K_1	77	0.02	0.95
4	Blocking Filter 77K_2	77	0.03	0.95
5	Thermal Filter 77K_3	77	0.02	0.95
6	M2	2	0.02	-
7	M3	2	0.02	-
8	Lens1	2	0.03	0.95
9	Blocking Filter 2K	2	0.03	0.95
10	Wave-Plate	2	0.03	0.95
11	Lens2	2	0.03	0.95
12	Polariser	2	0.03	0.5
13	Filter 0.3K_1	2	0.03	0.85
14	Filter 0.3K_2	2	0.03	0.95
15	Filter 0.3K_3	2	0.03	0.95

TAB. 8.1 – Températures, émissivités et transmissions des éléments photométriques de PILOT. Les propriétés des éléments 13 à 15 sont différents pour les deux bandes. Ici ces éléments sont supposés identiques dans cette première itération du modèle photométrique.

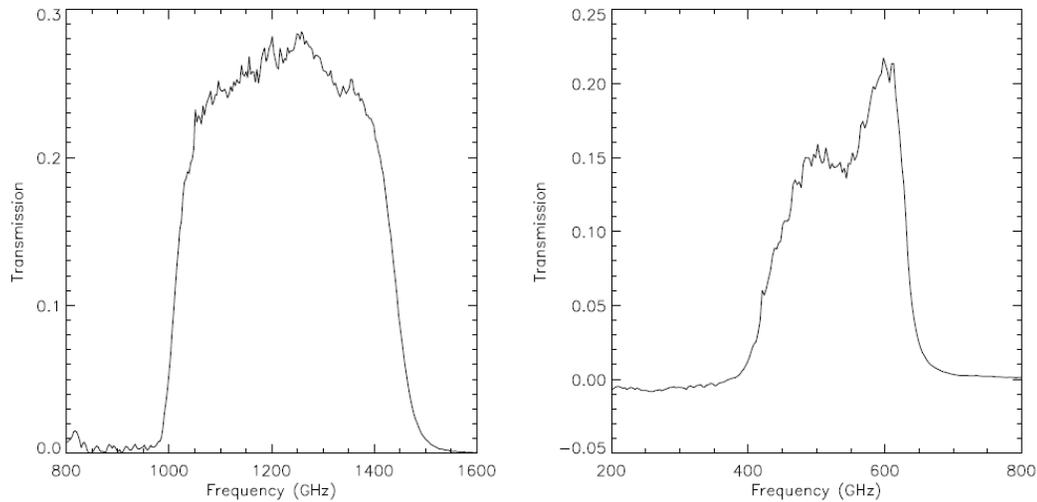


FIG. 8.5 – Profils spectraux possibles pour les bandes d’observation PILOT (Simulation C. Leroy, 2005). Gauche : Bande SW. Droite : Bande LW.

Les fréquences centrales choisies pour les deux bandes PILOT sont $240 \mu\text{m}$ et $550 \mu\text{m}$. Les largeurs des deux bandes sont approximativement égale à $0.36 \times 1250 = 450$ GHz et $0.36 \times 545 = 196$ GHz respectivement pour les bandes courtes et longues longueur d’onde. Les efficacités optique moyennes valent respectivement 0.25 et 0.2 pour les deux bandes.

8.2.3 Etendue de faisceau

Le concept optique de PILOT permet de travailler à la limite de diffraction pour les deux bandes à $550\ \mu\text{m}$ et $240\ \mu\text{m}$. On sait que l'étendue de faisceau $S_{pix}\Omega_i$ se conserve dans un instrument fonctionnant à la limite de diffraction. Aussi, si l'on arrive à calculer le produit $S_{pix}\Omega_i$ pour la pupille d'entrée, alors ce produit est le même pour tous les éléments situés entre la pupille d'entrée et la pupille de sortie. La pupille de sortie du système optique de PILOT est constituée par le Lyot Stop situé sur la lame demi-onde. Il définit la surface utile éclairée pour chaque élément photométrique. Le diamètre de la surface éclairée du miroir primaire, c'est-à-dire la pupille d'entrée, est de $730\ \text{mm}$.

La surface d'un pixel S_{pix} se déduit directement de la taille des pixels qui vaut $750\ \mu\text{m}$ de côté pour les matrices PILOT (Figure 8.6). On trouve $S_{pix}=5.625.10^{-7}\text{m}^2$. On suppose ici que le facteur de remplissage géométrique est proche de 1 aux longueurs d'onde PILOT, même si la surface des absorbeurs est plus petite que la taille des pixels.

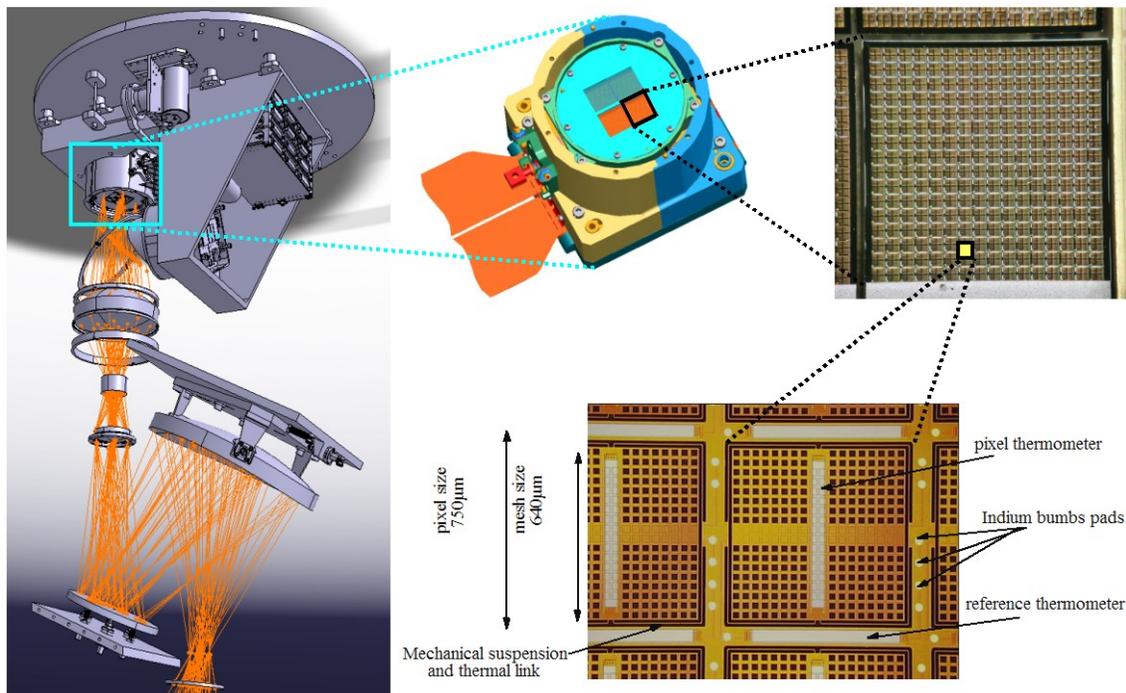


FIG. 8.6 – Photographie des matrices de bolomètres utilisées sur PILOT et localisation des boîtiers des matrices à l'intérieur du photomètre. Chaque pixel est constitué d'un absorbeur carré avec un maillage carré sur lequel est fixé une thermistance. Une thermistance de référence est également disposée sur le côté du pixel qui n'est pas photo-sensible. Le pas entre chaque pixel est de $750\ \mu\text{m}$. La largeur de l'absorbeur carré est de $680\ \mu\text{m}$. Chaque matrice est constituée de 1024 pixels répartis sur 36 colonnes et 36 lignes. Sur chacune des deux matrices, chaque moitié de matrice est constituée d'un canal photométrique de 512 pixels à $240\ \mu\text{m}$ et $550\ \mu\text{m}$.

La résolution de l'instrument à la limite de diffraction pour un diamètre de collecteur D_{M1}

est donnée par :

$$\theta = 1.22 \times \frac{\lambda}{D_{M1}} \quad (8.2)$$

Dans le cas de l'approximation des petits angles, l'étendue de faisceau associée à un télescope de résolution θ s'écrit alors pour un collecteur circulaire de diamètre D_{M1} :

$$S_{M1}\Omega_{M1} = \frac{\pi D_{M1}^2}{4} \pi \left(\frac{\theta}{2}\right)^2 = \frac{1.22^2 \pi^2 D_{M1}^2 \lambda^2}{4^2 D_{M1}^2} = \frac{1.22^2 \pi^2 \lambda^2}{4^2} = 0.91812 \lambda^2 \quad (8.3)$$

Pour en déduire ensuite l'étendue de faisceau associée à un pixel carré de la matrice, il faut diviser $S_{M1}\Omega_{M1}$ par le rapport R entre la surface d'un pixel et l'intégrale de la PSF (Point Spread Function) de la tâche d'Airy dans le plan focal. Dans la suite, nous supposons que la PSF est une gaussienne de largeur à mi-hauteur égale au rayon r_{Airy} du premier anneau sombre de la tâche d'Airy résultant de la diffraction par une ouverture circulaire. L'intégrale de la PSF est alors égale au volume d'un cylindre de hauteur unité et de diamètre égal au rayon r_{Airy} .

On trouve alors :

$$R = \frac{4S_{pix}}{\pi r_{Airy}^2} \quad (8.4)$$

Si on note F_{equ} la focale équivalente du télescope, le rayon de la tâche d'Airy dans l'approximation des petits angles s'écrit alors :

$$r_{Airy} = \theta F_{equ} \quad (8.5)$$

On a donc :

$$S_{pix}\Omega_i = \frac{4S_{pix}D^2}{\pi 1.22^2 F_{equ}^2} \times 0.91812 \quad (8.6)$$

Enfin, puisque la taille des pixels des matrices est la même pour les deux bandes PILOT et parce que le système optique est commun aux deux bandes de fréquence de PILOT, l'étendue de faisceau associé à chaque pixel est la même quelque soit la longueur d'onde. Les valeurs du détail des calculs de $S_{pix}\Omega_i$ sont présentées dans le tableau 8.2.

Longueurs d'onde	240 μm	550 μm
Diamètre utile de M1	730 mm	730 mm
Focal équivalente	1891 mm	1891 mm
Résolution (en arcmin)	1.37	3.15
Largeur des pixels	750 μm	750 μm
Surface des pixels= $l_{pix} \times l_{pix}$ (in m^2)	$5.625 \cdot 10^{-7}$	$5.625 \cdot 10^{-7}$
R=Ratio pixel/beam	1.295	0.237
$S_{pix}\Omega_i = R \times 0.91812 \lambda^2$	$6.59 \cdot 10^{-8} \text{m}^2 \cdot \text{sr}$	$6.59 \cdot 10^{-8} \text{m}^2 \cdot \text{sr}$

TAB. 8.2 – *Etendue de faisceau pour les éléments optiques compris entre M1 et le Lyot Stop.*

λ	240 μm	550 μm
Primary mirror (M1) temperature	240 K	240 K
Primary mirror (M1) emissivity	0.02	0.02
Entrance window temperature	274 K	274 K
Entrance window emissivity	0.02	0.02
77K blocking filter temperature	77 K	77 K
77K blocking filter emissivity	0.03	0.03
77K thermal filter temperature	77 K	77 K
77K thermal filter emissivity	0.02	0.02
Optical efficiency	0.25	0.20
$\frac{\Delta\nu}{\nu}$	0.36	0.36
$\dot{S}_{pix}\Omega_7$	6.60E-008 m ² sr	6.60E-008 m ² sr
Power emitted by M1	15.05 pW	1.08 pW
Power emitted by the entrance window	17.47 pW	1.24 pW
Power emitted by the 77K blocking filter	5.44 pW	0.46 pW
Power emitted by the 77K thermal filter	3.62 pW	0.31 pW
Total instrumental background power	41.58 pW	3.09 pW

TAB. 8.3 – *Estimation de la puissance de fond sur chaque pixel dans chaque bande PILOT.*

8.2.4 Puissance de fond incidente sur chaque bolomètre

La puissance optique totale incidente sur un bolomètre, calculée par le modèle photométrique PILOT est présentée dans le tableau 8.3. L'essentiel de la puissance optique est liée à l'émission du miroir primaire, de la fenêtre d'entrée et des filtres à 77K. Enfin, pour les éléments photométriques situés après le Lyot Stop dans le schéma optique de PILOT, l'angle solide n'est pas donné par la formule de "la limite de diffraction". Néanmoins, puisque la température de ces éléments est faible (2 Kelvin), leur émission est négligeable. Afin de vérifier cette hypothèse, j'ai vérifié en particulier que l'émission globale d'un ensemble à 2K vue sous un angle solide égale à π reste négligeable par rapport à la puissance émise par les autres sources de puissance de fond.

8.2.5 Conclusion

La puissance de fond dans la bande à 240 μm est égale à 42 pW. Les matrices utilisées pour PILOT étaient utilisées originellement pour l'instrument PACS d'Herschel. La puissance de fond pour les pixels de PACS est de 3 pW. Avec une puissance de fond de 42 pW, la sensibilité des détecteurs de PILOT devraient être trois fois plus faible que pour PACS.

Cette valeur de puissance de fond peut alors être réduite de quatre façons différentes :

- Réduction de la largeur de la bande à 240 μm .
- Optimisation de l'épaisseur et de la localisation des filtres.
- Utilisation d'une fenêtre d'entrée de très faible épaisseur en vol.
- Utilisation d'un filtre bloqueur juste devant les matrices qui absorberaient cette puissance mais diviseraient par deux l'efficacité optique.

Pour ce dernier point, une étude est à mener afin de trouver le bon compromis entre efficacité optique et sensibilité.

8.3 Calcul de la sensibilité des observations PILOT

8.3.1 Bruit des détecteurs

Le bruit associé à chaque pixel des matrices PACS est de $2.10^{-16} \text{W}/\sqrt{\text{Hz}}$ à 20 Hz.

8.3.2 Bruit de Photon

La NEP associée au bruit de photon pour un pixel de PILOT a été calculée avec la formule suivante :

$$NEP_{\text{Photon}} = \sqrt{2h\nu \times P(\nu)} \quad \text{avec} \quad h = 6.62 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}^{-1} \quad (8.7)$$

Les valeurs de NEP pour le bruit de photon sont les suivantes pour les deux bandes PILOT :

Longueurs d'onde	240 μm	550 μm
NEP_{Photon}	$3.3 \cdot 10^{-16} \text{ W/sqrt(Hz)}$	$6 \cdot 10^{-17} \text{ W/sqrt(Hz)}$

TAB. 8.4 – Bruit de Photon pour les deux bandes PILOT.

8.3.3 Vitesse de balayage optimale

Afin d'avoir une bonne mesure de lobe, compte-tenu de la taille de faisceau (fwhm) et de la fréquence d'échantillonnage f_{samp} , la vitesse de balayage maximale est donnée par :

$$v_{\text{scan}}^{\text{max}} = \text{fwhm} \times f_{\text{samp}}/2.5. \quad (8.8)$$

Pour $f_{\text{samp}}=20$ Hz et $\text{fwhm} = 3.5'$ on trouve $v_{\text{scan}}^{\text{max}} = 28'/\text{sec}$. En pratique, la vitesse de balayage maximale le long d'un balayage sera comprise entre $10'/\text{sec}$ et $28'/\text{sec}$, selon le mode d'observation et la longueur de balayage.

8.3.4 Limite de détection

Pour obtenir un rapport signal sur bruit égal à SN , il faut que :

$$\frac{S}{N} = \frac{S \times \sqrt{2t_{\text{int}}}}{NEP_{\text{tot}}} = SN \quad (8.9)$$

Finalement, la puissance minimale ou limite de détection pour un rapport signal sur bruit SN est égale à :

$$S = \frac{SN \times NEP_{\text{tot}}}{\sqrt{2t_{\text{int}}}} \quad (8.10)$$

La sensibilité aux sources étendues dans un pixel de la carte finale peut finalement être calculé en utilisant :

$$\frac{S_{\text{pix}}}{\text{MJy/sr}} = \frac{10^{20}}{\sqrt{2}} \times \frac{SN}{Tr} \frac{NEP_{\text{tot}}}{\text{W/sqrt(Hz)}} \left(\frac{t_{\text{int}}}{\text{sec}}\right)^{-1/2} \left(\frac{S\Omega_{\text{pix}}}{\text{m}^2/\text{sr}}\right)^{-1} \left(\frac{\Delta\nu}{\text{Hz}}\right)^{-1} \quad (8.11)$$

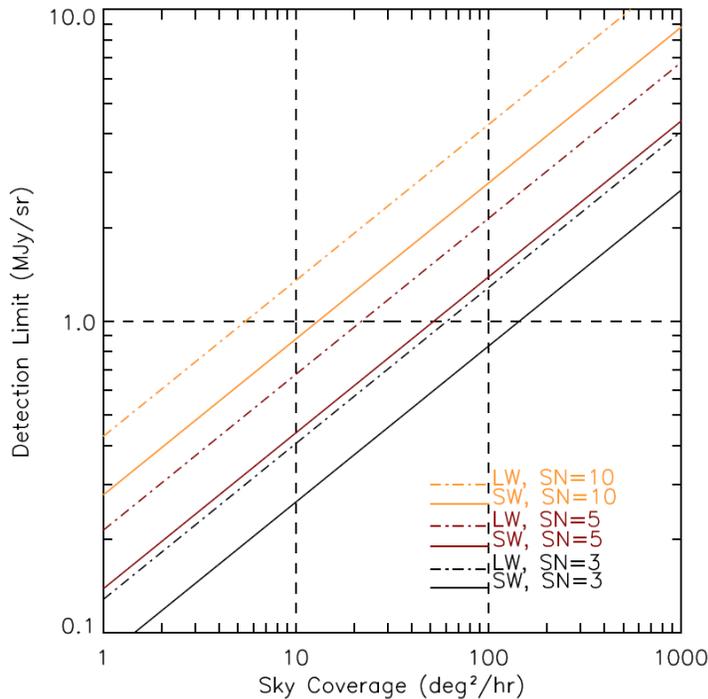


FIG. 8.7 – *Sensibilité de l'expérience PILOT en MJy/sr pour des rapports S/N de 3, 5 et 10 pour les deux bandes PILOT à 240 μm et 550 μm pour différentes couvertures du ciel.*

où SN est le rapport signal sur bruit attendu, NEP_{tot} est la NEP totale équivalente, t_{int} est le temps d'intégration par pixel de la carte finale, S est la surface de la pupille d'entrée, Δ_ν est la bande spectrale et Tr la transmission totale de l'optique. Notons que Tr doit contenir également la transmission de 50% de la grille séparatrice.

t_{int} est le temps d'intégration. Il est donné par :

$$\frac{t_{int}}{sec} = 60^2 \left(\frac{Speed}{\text{o}^2/hr} \right)^{-1} \frac{2 \times S_{array}}{\text{o}^2} \quad (8.12)$$

où S_{array} est la surface projeté sur le ciel des matrices et $Speed$ est la vitesse de balayage.

La sensibilité de PILOT aux sources étendues est montrée Figure 8.7 pour différentes vitesses de balayage sur le ciel. Ces valeurs correspondent à la sensibilité de PILOT à l'intensité totale. La sensibilité aux émissions polarisées peut être obtenue à partir de ces valeurs si un niveau de polarisation est supposé.

8.4 Etalonnage des mesures des bolomètres PILOT

Pour remonter aux trois paramètres de Stokes I, Q et U de la polarisation du ciel, il est nécessaire d'utiliser les mesures de deux bolomètres conjugués et situés sur les deux blocs de matrices orthogonales, mesurant chacune une direction de polarisation différente après la grille séparatrice dans le schéma optique de PILOT et pour au moins deux directions différentes de la lame demi-onde.

Chaque paire de bolomètres ainsi retenue pour l'analyse va alors mesurer les deux grandeurs suivantes :

$$m_1(t) = R_1(t) [I_{sky} - \cos(4\omega + 2\varphi - 2\theta)Q_{sky} - \sin(4\omega + 2\varphi - 2\theta)U_{sky}] \quad (8.13)$$

$$m_2(t) = R_2(t) [I_{sky} + \cos(4\omega + 2\varphi - 2\theta)Q_{sky} + \sin(4\omega + 2\varphi - 2\theta)U_{sky}] \quad (8.14)$$

I_{sky} , Q_{sky} et U_{sky} sont les paramètres de Stokes [11] de la polarisation pour la direction du ciel étudiée. ω est l'angle de la lame demi-onde par rapport à la direction de balayage. φ est l'angle paralactique. θ est l'angle de rotation de la polarisation dans l'instrument. Ce dernier angle est différent pour chaque bolomètre des matrices PILOT.

R_i est la réponse des bolomètres. On écrit : $R_i = A_i(t)\Omega_i$.

$A_i(t)$ est la sensibilité du détecteur en Volt/Watt. Ω_i est le couplage avec le ciel du détecteur i . La réponse $A_i(t)$ peut varier avec le temps si la température des détecteurs fluctue de façon trop importante par exemple.

On écrit : $\Omega_i = \widetilde{\Omega}_i \overline{\Omega}_i$ et $A_i(t) = \widetilde{A}_i(t) \overline{A}_i(t)$. Pour remonter aux puissances associées aux paramètres I,Q,U sur le ciel, il est donc nécessaire d'étalonner le produit $A_i\Omega_i$. Le produit $\overline{A}_i(t)\overline{\Omega}_i$ est obtenu par étalonnage photométrique à partir des observations de DIRBE et Planck. $\widetilde{\Omega}_i$ est étalonné en utilisant la redondance des observations du ciel par les pixels des matrices de PILOT. Enfin, $\widetilde{A}_i(t)$ est mesuré après chaque balayage sur le ciel avec une source interne d'étalonnage.

8.5 Dimensionnement d'une source interne de calibration

8.5.1 Description

Une source interne d'étalonnage ou ICS ("Internal Calibration Source") sera utilisée pour mesurer les variations de réponse temporelles du champ-plat de réponse des bolomètres des matrices PILOT. Cette source sera placée à l'intérieur du cryostat à un emplacement permettant d'éclairer tous les bolomètres des deux matrices. Le centre du miroir plan M3 est retenue actuellement pour accueillir l'ICS. La reproductibilité de la forme de cet éclairage sera telle qu'il sera possible de mesurer des faibles variations du champ-plat de réponse. L'ICS sera une copie de la source d'étalonnage PCAL d'Herschel-SPIRE. Elle est constituée d'une source submillimétrique modulée et chauffée électriquement. La source est placée dans une cavité intégratrice qui éclaire le plan focal à travers un tube traversant M3 en son centre. La Figure 8.8 montre une vue de la source PCAL d'Herchel-SPIRE.

L'ICS sera pilotée via quatre fils. Deux fils seront utilisés pour appliquer un courant de chauffage modulé sur la source. Les deux autres permettront de mesurer la tension aux bornes de la source qui sera ensuite récupérée dans les paquets de télémétrie. Ces données pourront éventuellement être utilisées dans la procédure d'étalonnage pour calculer la puissance dissipée dans l'ICS. Le courant sera modulé suivant une forme de signal carré de fréquence ajustable.

Les séquences d'étalonnage seront réalisées à la fin de chaque balayage sur le ciel (Figure 8.9). Afin de minimiser la durée du vol consacrée aux étalonnages, cette phase d'allumage de l'ICS devra durer moins de 10 secondes à la fin de chaque balayage.

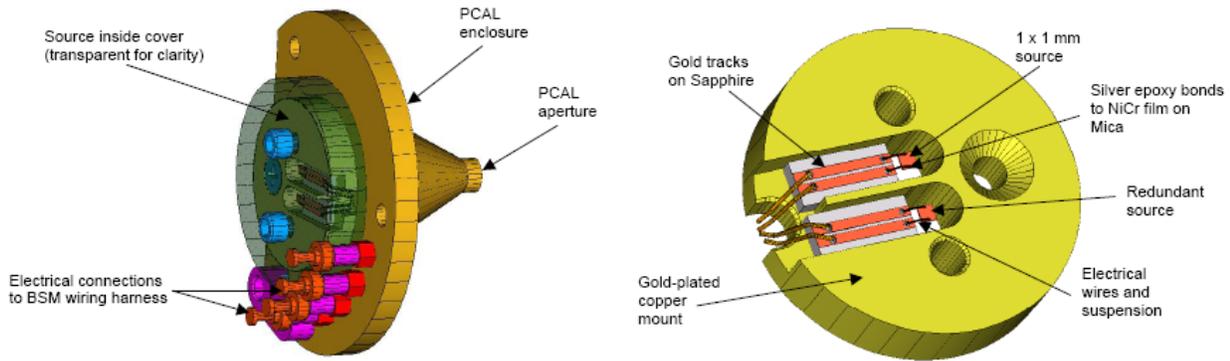


FIG. 8.8 – Vue schématique de la source de calibration PCAL d'Herchel-SPIRE.

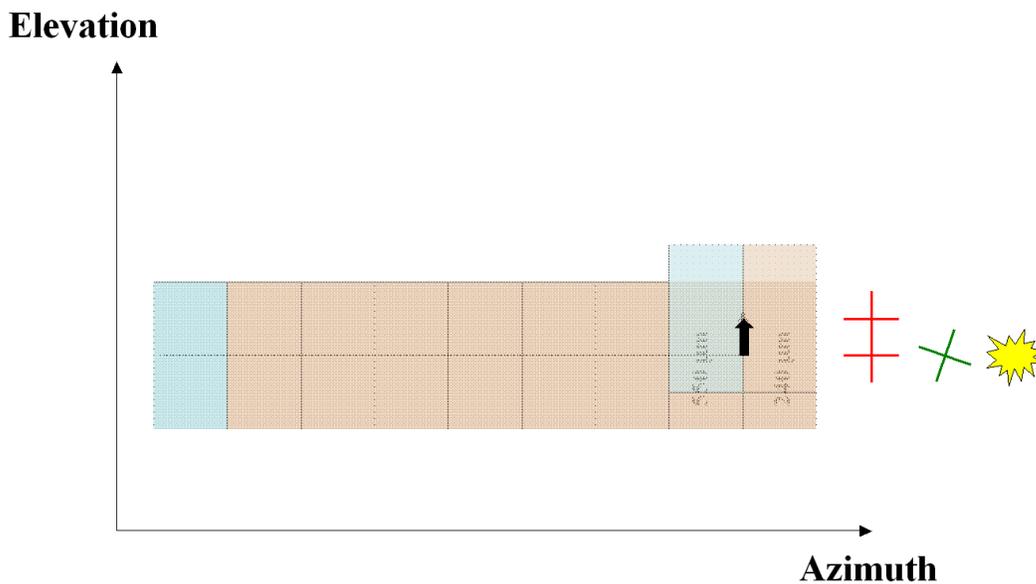


FIG. 8.9 – Schéma de la stratégie de balayage du ciel par PILOT. Chaque matrice et ses deux voies photométriques balayent dans un premier sens une direction sur le ciel avec une première orientation de la lame demi-onde (croix rouge). L'orientation de la lame demi-onde est ensuite changer pour réaliser un second balayage en sens inverse de la même direction sur le ciel (croix verte). A la fin de l'aller-retour, l'ICS est alors allumée (flash jaune). Après avoir changé l'élévation du pointage et l'orientation de la lame demi-onde, un balayage parallèle au précédent est ensuite réalisé suivi d'un autre allumage de l'ICS et ainsi de suite pour plusieurs élévations successives.

8.5.2 Spécifications de l'ICS

Comparaison avec la source PCAL d'Herschel-SPIRE

Le tableau 8.5 compare les caractéristiques de la source de calibration PCAL d'Herschel-SPIRE et l'ICS de PILOT.

Item	SPIRE Value	PILOT value
Useful wavelength	200-700 μm	240 μm – 550 μm
Base temperature	4 K	4 – 8 K
Black Body temperature	40 K	40 – 100 K
Time constant	70 ms	less than 10 ms
Source diameter	3 mm	3 mm
Illumination solid angle	2π	2π
Repeatability	RMS better than 1% over 20 operations equi-spaced over a period of 12 hours, with uniform base temperature and drive current	RMS better than 0.1% (TBC) in intensity. Both defined RMS over 30 operations equi-spaced over a period of 1 hour, with uniform base temperature and drive current. An operation is here defined as an appropriate standard sequence of On/Off excitation cycle.

TAB. 8.5 – *Caracteristiques de la source PCAL d'Herschel-SPIRE et de l'ICS.*

Calcul du signal sur bruit instantané de l'ICS

La puissance reçue par un pixel des matrices PILOT est estimée ci-dessous. On suppose pour cela que l'ICS est située au centre de M3 dans l'optique froide (Figure 8.10). On suppose

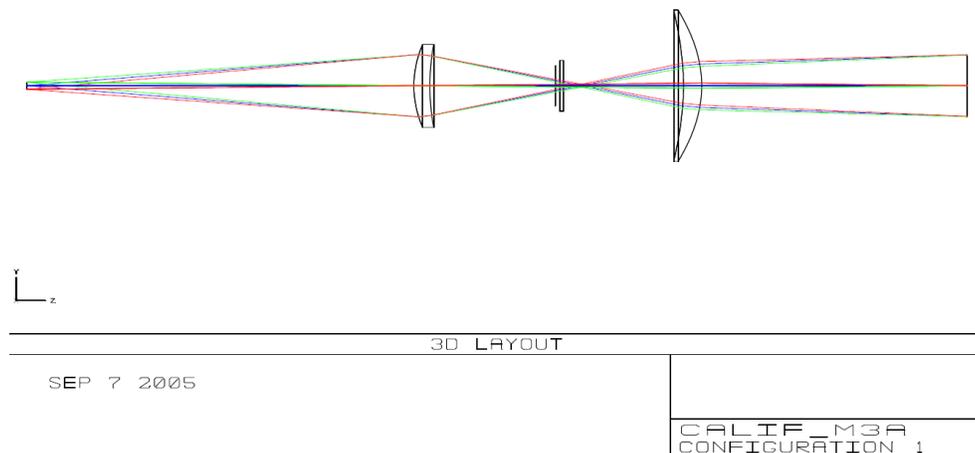


FIG. 8.10 – *Configuration optique entre M3 et le plan focal de détection. L'ouverture de l'ICS et le miroir M3 se trouvent à gauche de la figure. Le rayonnement émis par l'ICS passe ensuite à travers la lentille L1, la lame demi-onde, le Lyot-Stop et la lentille L2. La surface de la matrice de bolomètre est représentée par la surface plate à droite de la figure.*

également que l'ouverture de l'ICS éclaire uniformément la moitié de l'espace. L'angle solide

d'éclairement est donc supposé égal à :

$$\Omega_{ICS} = 2\pi. \quad (8.15)$$

La surface du corps noir de la source vaut :

$$S_{BB} = 1 \text{ mm}^2. \quad (8.16)$$

La puissance émise par l'ICS et transmise au plan focal via le système optique entre M3 et les bolomètres est donnée par :

$$P = T_r B_\nu(T) S_{BB} \Omega \Delta\nu \quad (8.17)$$

où T_r est le produit des transmissions optiques de tous les éléments photométriques entre l'ICS et les bolomètres, $\Delta\nu$ la bande spectrale équivalente des filtres entre l'ICS et les bolomètres, $B_\nu(T)$ la fonction de Planck à la température T donnée en $\text{W/sr/m}^2/\text{Hz}$ et Ω l'angle solide associé à l'émission de l'ICS vue par le plan focal.

Ω est donné par l'approximation suivante :

$$\Omega = \pi\alpha^2 = \frac{\pi\phi_1^2}{4d_1^2} = 1.437 \cdot 10^{-2} \text{ rad} \quad (8.18)$$

où $\phi_1 = 23 \text{ mm}$ est le diamètre d'éclairement de la lentille L1 par l'ICS et $d_1 = 170 \text{ mm}$ la distance entre M3 et la lentille L1.

La puissance reçue par un pixel est ensuite donnée par :

$$P_{ICS} = P \times \frac{S_{\text{pix}}}{S_{\text{fp}}} \quad (8.19)$$

où $S_{\text{pix}} = (750 \mu\text{m})^2 = 0.562 \text{ mm}^2$ est la surface du pixel et S_{fp} la surface d'éclairement du plan focal par l'ICS.

Pour un diamètre de 28 mm, la surface éclairée par l'ICS dans le plan focal est donnée par :

$$S_{\text{fp}} = \pi \times \left(\frac{28 \text{ mm}}{2} \right)^2 = 616 \text{ mm}^2 \quad (8.20)$$

Le rapport signal sur bruit S/N obtenu pour le signal de l'ICS pour un temps d'intégration d'une seconde pour chaque pixel est donné par :

$$S/N = \frac{P_{ICS}}{NEP} \quad (8.21)$$

Où NEP est la NEP totale (Décteur, Bruit de Photon et Electronique de lecture). Les valeurs de ces NEP sont de $3.86 \cdot 10^{-16} \text{ W/sqrt(Hz)}$ et $2.09 \cdot 10^{-16} \text{ W/sqrt(Hz)}$ pour les bandes SW et LW respectivement.

Avec $T_{BB} = 100 \text{ K}$, on obtient :

Pour $240 \mu\text{m}$, $T_r = 0.27$ et $\Delta\nu = 512 \text{ GHz}$ on a 0.064 pW et **S/N=165** en 1 sec.

Pour $550 \mu\text{m}$, $T_r = 0.27$ et $\Delta\nu = 180 \text{ GHz}$ on a 0.005 pW et **S/N=24** en 1 sec.

Si on utilise un cône pour concentrer le flux et si on suppose que ce dernier concentre tout le rayonnement de l'ICS sur la lentille L1, on peut avoir un rapport signal sur bruit 437 fois plus grand pour les deux bandes PILOT ($2\pi/\Omega=437$).

8.6 Conclusion

Le modèle photométrique de PILOT que j'ai développé a permis de montrer que la puissance de fond attendue à $240\ \mu\text{m}$ est de 42 PW. Avec une telle puissance de fond, la sensibilité des détecteurs de PILOT devrait être trois fois plus faible que pour PACS. Pour ce premier point, une étude reste à mener afin de trouver le bon compromis entre efficacité optique et sensibilité dans le cas de l'utilisation d'un filtre bloqueur pour réduire cette puissance de fond.

Par ailleurs, afin de corriger les effets systématiques multiplicatifs dans PILOT, une source interne d'étalonnage est utilisée. Les premiers calculs que j'ai réalisés pour le dimensionnement de cette source d'étalonnage ont permis de montrer qu'avec une température de corps noir de 100 K, le signal sur bruit à $550\ \mu\text{m}$ ne serait pas suffisant. Afin d'obtenir un signal sur bruit supérieur à 100, l'utilisation d'un cône pour concentrer le flux lumineux est alors nécessaire. L'utilisation d'un tel cône permettrait également de réduire la température de chauffage du corps noir de l'ICS afin d'éviter de trop chauffer l'intérieur du cryostat PILOT.

Enfin, j'ai également contribué à développer des simulations des observations de PILOT afin de tester les méthodes de reconstruction des cartes du ciel à partir des mesures des 2048 pixels des matrices de bolomètres (Figure 8.1). Différents types d'effets systématiques peuvent alors être ajoutés à ces simulations afin d'estimer leur impact sur les cartes I, Q, U du ciel mesurées par PILOT. J'ai ainsi commencé à ajouter à ces simulations des effets thermiques multiplicatifs ainsi que le signal généré par la source interne de calibration utilisée pour corriger ces variations de réponse des matrices PILOT. Les algorithmes d'étalonnage des variations de réponse des détecteurs pourront par la suite être testés à partir de ces simulations.

Conclusion

*« Poussière admirant la poussière
Nous poursuivons obstinément
Grain de cendre, un grain de lumière
En fuite dans le firmament. »*

Victor Hugo

Le contexte de la cosmologie observationnelle et les objectifs scientifiques de la mission Planck ont été détaillés dans le premier chapitre de cette thèse. L'instrument HFI de Planck a ensuite été présenté en détail. Son fonctionnement et ses performances ont alors été exposés. J'ai ensuite pu dresser la liste de l'ensemble des effets systématiques qui affectent les observations de Planck-HFI, en particulier les deux types d'effets que j'ai étudiés durant cette thèse : les effets thermiques et la diaphonie électronique.

Après avoir rappelé les spécifications sur le niveau de contrôle de ces deux effets systématiques, j'ai présenté les résultats obtenus sur l'identification et la quantification de ces effets durant les tests et les étalonnages au sol de l'instrument. Malgré un temps de mesure disponible très court pour chaque test réalisé à 0.1 Kelvin, j'ai pu caractériser complètement plusieurs types d'effets thermiques ainsi que le niveau de diaphonie électronique entre les voies de l'électronique de lecture d'HFI.

Concernant les effets thermiques dans HFI, j'ai démontré que le signal parasite induit par l'émission de corps noir des cornets à 4 K n'était pas négligeable si la température de ces cornets n'était pas régulée. De plus, si les paramètres de la chaîne de régulation ne sont pas correctement optimisés, les fluctuations associées au pic de régulation induit sur le spectre des thermomètres pourraient être gênantes pour les observations d'HFI. C'est pourquoi, j'ai développé durant cette thèse une simulation de la chaîne de régulation PID d'HFI qui sera utilisée pour trouver le réglage qui minimise l'effet résiduel de la régulation de l'étage à 4 K. Par ailleurs, les différentes fonctions de transfert passives mesurées durant cette thèse vont pouvoir être utilisées pour optimiser le choix du point de fonctionnement des réfrigérateurs actifs d'HFI. La période des fluctuations de température du "Sorption Cooler", en particulier, pourra être choisie en fonction de l'atténuation passive attendue sur HFI et déduite de ces fonctions de transfert.

Suite aux résultats de quantification des effets thermiques présentés dans cette thèse, j'ai été nommé coordinateur du groupe de travail sur les effets thermiques au sein du "Core-Team"

d’HFI. Le “Core-Team” est le forum de discussion et d’échange d’informations entre les scientifiques en charge de l’instrument et les scientifiques préparant l’analyse de données d’HFI. Son but est de préparer et d’organiser le pré-traitement et l’analyse des données d’HFI. Actuellement, une grande partie du travail du “Core-Team” est la préparation de la quantification et de la correction des effets systématiques. Le but du groupe de travail sur les effets thermiques du Core-Team est d’identifier et obtenir l’ensemble des mesures et des modèles des effets thermiques nécessaires pour identifier et quantifier les effets thermiques avant leur correction dans le traitement de données. Ce groupe, désigné sous le sigle CT-WG3 (Core-Team Working Group 3) participera également aux opérations en vol d’HFI. Il participera notamment à l’optimisation des points de fonctionnement de la chaîne cryogénique d’HFI afin de trouver les meilleurs compromis entre puissance de refroidissement, stabilité de température et durée de vie. Il contribuera également très largement à la mise au point des procédures de test et d’étalonnage en vol durant la CPV-phase.

Concernant la diaphonie électronique, les résultats obtenus avec les tests PFM-CAL, que j’ai coordonnés sur les bolomètres aveugles d’HFI, permettent d’obtenir une limite supérieure sur la valeur de la diaphonie en tension de 80 dB entre les canaux 14 et 15 et 90 dB entre les canaux 74 et 75. J’ai également démontré durant cette thèse qu’il existait un effet en courant qui est maximum entre les canaux voisins de la boîte JFET. Quant à la diaphonie en tension entre toutes les voies de la chaîne électronique, il faudra attendre les mesures en vol sur les sources ponctuelles les plus brillantes pour connaître leurs valeurs. Ces mesures en vol permettront de mesurer directement le produit de la diaphonie optique et de la diaphonie en tension entre chaque canaux photométriques d’HFI.

Pour pouvoir corriger les éventuelles fluctuations thermiques parasites résiduelles de l’étage à 4 K en vol, la partie du signal des bolomètres corrélée avec les mesures des thermomètres à 4 K pourra être soustraite. Après avoir vérifié que la non linéarité entre le signal des thermomètres 4K et des bolomètres est négligeable, le décorrélateur par régression linéaire du DPC que j’ai contribué à tester sur les premières mesures d’HFI pourra éventuellement être utilisé. Cependant, il faudra certainement utiliser des méthodes de correction des effets de constantes de temps entre le signal des bolomètres et celui des thermomètres 4K afin de tenir compte des constantes de temps d’une dizaine de secondes observées au CSL sur les bolomètres à 100 et 143 GHz du modèle cryogénique de qualification d’HFI.

Le prochain défi concernant l’étude du CMB est la mesure de la polarisation de ce rayonnement. En particulier la détection des modes B associés à cette polarisation qui serait une découverte majeure du XXI^{ème} siècle. La réalisation d’une telle mesure se fera certainement grâce à l’utilisation de matrices de bolomètres qui seules permettront d’obtenir une sensibilité accrue par rapport aux observations des bolomètres mono-pixels de Planck-HFI. De tels détecteurs doivent être refroidis à très basse température pour fonctionner à leur maximum de sensibilité, comme pour HFI. Avec des bolomètres encore plus sensibles, toute fluctuation de température de l’environnement thermique du détecteur générera des effets systématiques encore plus perturbants que pour les mesures d’HFI. La température la plus basse accessible par refroidissement passif dans l’espace étant de quelques Kelvins, des bolomètres ne peuvent fonctionner à des température aussi chaude. Un système cryogénique actif ainsi qu’un contrôle

accru des effets systématiques sera donc nécessaire. Pour cela, à la lumière de cette thèse, trois solutions peuvent être envisagées. On peut tout d'abord travailler au développement d'un nouveau système actif de contrôle de la température encore plus performant que les régulations PID d'HFI. De nouveaux algorithmes correcteurs autres que le PID peuvent alors être envisagés pour réaliser ces nouveaux systèmes de contrôle thermique actifs. La seconde solution est le recours à l'utilisation de sources d'étalonnage très stables embarquées sur l'instrument (comme c'est le cas pour PILOT). L'utilisation de telles sources nécessite de définir précisément la stratégie d'étalonnage de la réponse des détecteurs dans le traitement des données en même temps que la définition de la source d'étalonnage de l'instrument (pendant la phase-B), puisque la reproductibilité et la stabilité de température de la source fixe la précision finale de restitution de la réponse après traitement des données. Enfin, un système mixte actif/passif pourra également être étudié comme pour l'étage 0.1K d'HFI où l'alliance d'une régulation PID des fluctuations de température au niveau de la tête froide de la dilution avec des interfaces en HoY permettent de stabiliser la température de la platine bolomètre grâce aux propriétés d'amortissement thermique passif de cet alliage en HoY. La mise au point de tels alliages et leur utilisation peuvent donc également être envisagées avec intérêt pour la stabilisation du plan focal d'une future expérience comme B-pol.

Annexe A

Rapport d'étalonnage PFM-CAL des fonctions de transfert thermiques à l'intérieur du FPU de Planck-HFI

HFI PFM-CAL Calibration Report: Thermal transfer
functions within the FPU

Christophe Leroy, Sylvain Varesi, Jean-Loup Puget, Michel Piat & Jean-Philippe Bernard

Revision/Date: 01-04 - 2007-09-06



Abstract

The thermal transfer functions within the HFI measured during ground calibration campaign of the instrument are presented here. This thermal transfer functions have been deduced from the TSS test sequences.

Contents

1 Document Revision History	3
2 Relevant documentation	4
3 Objectives	4
4 Description of setup	4
4.1 Measurement principle	4
4.2 Sensors used	4
4.3 Data sampling frequencies	4
5 Dates of data used	5
5.1 SC1	5
5.2 TSS1	5
5.3 TSS2	5
6 Data processing method	6
7 Description of sequences	7
7.1 Transfer function: Back of the 4K box → 4K horns (Figure 4):	7
7.2 Transfer function: Back of the 4K box → 1.6K filters (Figure 5):	8
7.3 Transfer function: Back of the 4K box → 0.1K dilution plate (Figure 6):	8
8 Synthetic results	8
9 Links to detailed results	11
10 Variation with characterization	11
11 Conclusion	11
12 ANNEX TSS	12

HFI PFM-CAL: TSS

1 DOCUMENT REVISION HISTORY

1 Document Revision History

Issue	Date	Changes
01-00	2006-10-27	First version
01-01	2006-10-29	CL add SV remarks
01-02	2006-11-13	CL add JPB corrections
01-03	2006-11-14	Last version for the Planck-HFI FM review
01-04	2007-09-06	New reference version for the HFI calibration report

2 Relevant documentation

- [1] M. Piat & J.-M. Lamarre, "HFI Temperature Stability Requirements", Doc Ref: SR-PH211-990141-IAS, Apr 1999
- [2] J.-M. Lamarre & al., "Planck HFI Instrument Baseline Design Volume 2", Doc Ref: TD-PH214-100059-IAS, Dec 2004
- [3] C. Leroy, F. Lejdström & J.-L. Puget, "CQM Thermal Stages Sensibility Measurement", HFI-CQM Calibration Report, Jul 2005
- [4] C. Leroy & S. Varesi, "Planck-HFI CQM PACE fluctuations test report", HFI-CQM CSL Test Report, Feb 2006
- [5] C. Leroy & al., "Performances of the Planck-HFI cryogenic thermal control system", Space Telescopes and Instrumentation I: Optical, Infrared, and Millimeter. Edited by John C. Mather, Howard A. MacEwen, and Mattheus W. M. de Graauw. Proceedings of the SPIE, Volume 6265, pp. 626508, July 2006

3 Objectives

The objectives of the TSS (Thermal Stage Sensitivity) measurements is to measure the thermal transfer functions between HFI cryogenic stages in order to check the performances of passive thermal control.

TSS tests are fonctionnal tests. The measurements presented in this report will not be used in flight for the HFI data analysis.

4 Description of setup

4.1 Measurement principle

The regulations of the Saturne tank interfaces are used for generate various kinds of thermal stimuli in order to measure thermal transfer functions between stages. Three interfaces were used: the 18K plate, the 18K flanges and the back of the 4K box (Figure 1).

4.2 Sensors used

Three Saturne thermometers were used in order to measure the temperature of the following interfaces: The 18K plate (CRYOSTAT_MONIT_1360_TT1343_Cr_T), the 18K flange (CRYOSTAT_MONIT_1380_TT1349_Cr_T) and the 4K Saturne (CRYOSTAT_MONIT_1350_TT1340_Cr_T). All HFI sensitive thermometers were used to follow the temperature evolution of the HFI stages (4K, 1.6K and 0.1K) in response to the changes of the interfaces temperatures.

4.3 Data sampling frequencies

HFI sensitive thermometers: fs=172Hz

Saturne sensors: fs=1Hz for the TSS1 test; fs=0.1Hz for the SC1 and the TSS2 tests

HFI PFM-CAL: TSS

5 DATES OF DATA USED

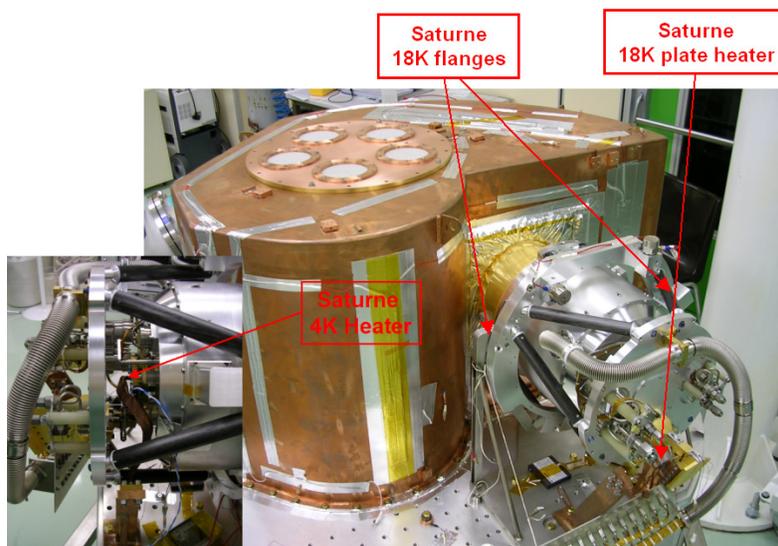


Figure 1: The 3 HFI interfaces regulated in the Saturne tank: the 18K plate, the 18K flanges and the back of the 4K box

5 Dates of data used

5.1 SC1

The first test used for thermal transfer function analysis is the one named SC1. In this test periodic stimuli of the 18K plate were generated with a 666 second period (Figure 10 in Annex). The HFI database date for the beginning of this measurement is: **2006:06:20:14:00:00**

5.2 TSS1

The second test used is the one named TSS1. In this test several temperature steps have been generated on the Saturne 4K regulation (Figure 11 in Annex). The HFI database date for the beginning of this measurement is: **2006:07:02:6:00:00**

5.3 TSS2

The last test used is the one named TSS2. In this test one thermal step have been generated on the 18K plate (Figure 12 in Annex). The HFI database date for the beginning of this measurement is: **2006:07:12:15:00:00**

6 Data processing method

We assume that the response of the HFI stages to thermal stimuli can be modelled by simple first order filters. In theory, if we measure the response of one stage to two different stimuli as input (one step and one periodic signal) then we can completely characterize the first order filter associated to that stage. The transfer function in Fourier Space can then be fit by the ideal formula of a first order filter given below:

$$FDT(f) = \frac{g}{\sqrt{1 + (\frac{f}{fc})^2}} \quad (1)$$

g is the static gain and fc is the knee frequency of the filter.

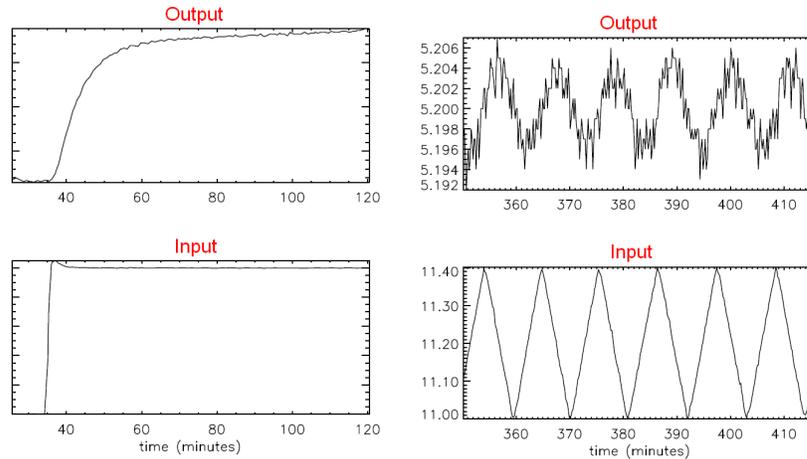


Figure 2: Response of the system (output) to a thermal step and periodic stimulus (input)

The thermal step (Figure 2) is used for the static gain determination. The ratio between the temperature elevation at the output of the system and the input stimulus give the value of the static gain.

The periodic stimulus (Figure 2) with characteristic period p gives one point of the transfer function at the frequency $f = \frac{1}{p}$. The value of this second point is directly given by the peak to peak ratio of the signal between the input and the output of the system to be characterized.

If f is high enough then the thermal transfer function of the system can be fit from the two points measured as described above (Figure 3).

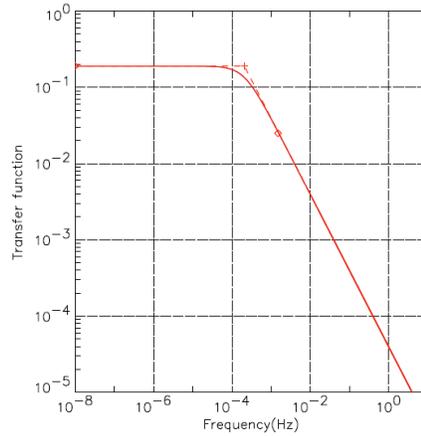


Figure 3: Fit with first order filter of the thermal transfer function between the input and the output of the thermal system

7 Description of sequences

We deduced three principal thermal transfer function from the TSS data. For each one, we have listed here the date of the sequence used.

7.1 Transfer function: Back of the 4K box → 4K horns (Figure 4):

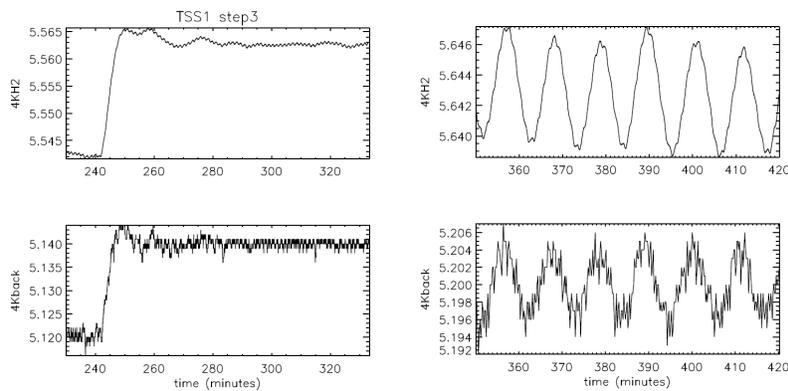


Figure 4: HFI 4K horns response to thermal step and a sinus stimulus at the back of the 4K box

Thermal step time: **2006:07:02:9:50:00 (TSS1 step3)**
 Sinus stimuli time: **2006:06:20:19:50:00**

7.2 Transfer function: Back of the 4K box \rightarrow 1.6K filters (Figure 5):

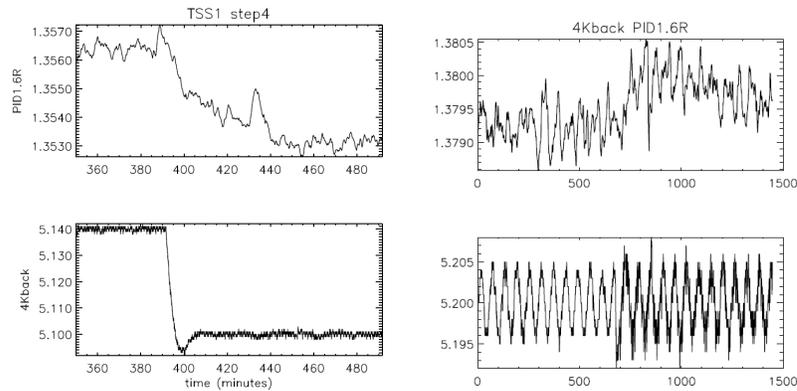


Figure 5: HFI 1.6K filters response to thermal step and a sinus stimulus at the back of the 4K box

Thermal step time: **2006:07:02:11:50:00 (TSS1 step4)**
 Sinus stimuli time: **2006:06:20:19:50:00**

7.3 Transfer function: Back of the 4K box \rightarrow 0.1K dilution plate (Figure 6):

Thermal step time: **2006:07:12:15:00:00 (TSS2)**
 Sinus stimuli time: **2006:06:20:19:50:00**

8 Synthetic results

Since the thermal link between the 18K plate and the 4K box in Saturne tank is different from the one expected on the satellite (link with the 2K plate, no 4K cooler or LFI support in Saturne), the thermal transfer function between the 18K plate and the 4K box that could be deduced from TSS data are not representative.

The transfer function inside the 4K box are representative of what is expected in flight.

The first transfer function deduced from TSS data is the one from the back of the 4 box to the 4K horns (Figure 7).

On the Figure 7 we see that the PID efficiency for damping the temperature changes on the 4K horns has also been checked during the TSS test. We see that when the 4K regulation is on then the thermal step at the back of the 4K box is efficiently damped. The two points measured during the PFM tests are located on the static part of the transfer function. The knee frequency of the transfer function cannot be deduced from only these two points. Previous measurements on the

HFI PFM-CAL: TSS

8 SYNTHETIC RESULTS

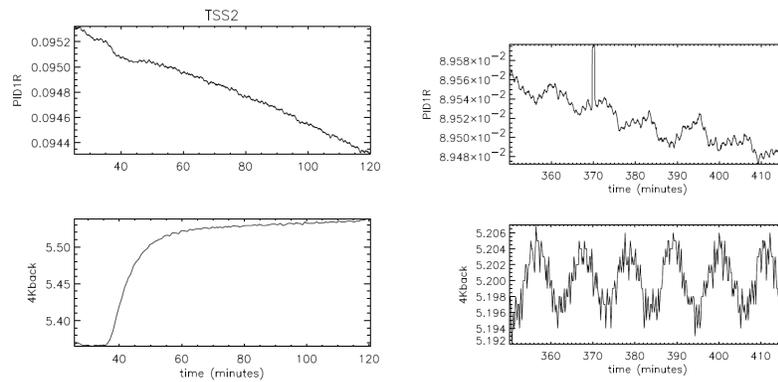


Figure 6: HFI 0.1K dilution plate response to thermal step and sinus stimulus at the back of the 4K box

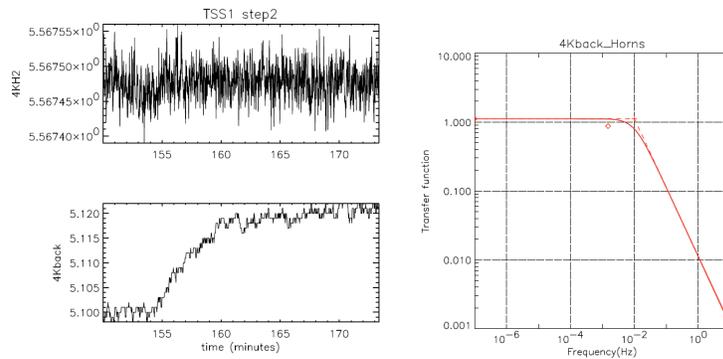


Figure 7: Left: PID4K efficiency test. Right: Fit with first order filter of the thermal transfer function between the back of the 4K box and the horns

CQM give a value of 1/100 Hz ([3] & [4]). In order to check this value, two methods can be used. The damping of the harmonics of the SC1 periodic signal can be used first in order to obtain other points at higher frequencies for the transfer function. Transfer functions can also be deduced from correlation functions between thermometers signals on the input and the output of the thermal system.

Transfer function from the back of the 4 box to the 0.1K dilution plate can also be deduced. From the thermal step on the 4K box we deduce that the static gain of the thermal transfer function from the 4K box to the dilution plate is only of 1 per 1000. This effect on the 0.1K stage is due to thermalization of the dilution pipes with the 4K stage at the back of the 4K box. The value of the knee frequency of the transfer function to the 0.1K stage have not been deduced from these TSS PFM tests because the effect is very low.

The efficiency of HFI PID1 for damping the temperature fluctuations has also been checked for the dilution plate (Figure 8). We don't see any effect of the 4K stage on the dilution plate temperature when all HFI temperature regulations are ON.

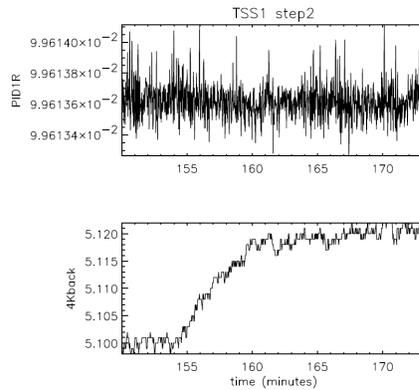


Figure 8: PID1 efficiency test

Finally, the transfer function from the back of the 4 box to the 1.6K filters has also been measured (Figure 9).

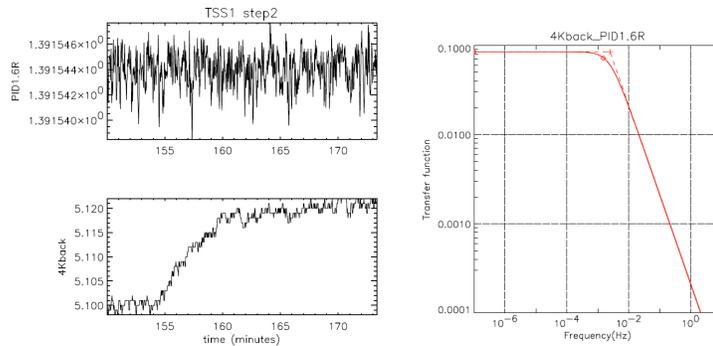


Figure 9: Left: PID1.6K efficiency test. Right: Fit with first order filter of the thermal transfer function between the back of the 4K box and the 1.6K filters

We measured a effect of the 4K stage on 1.6K filters temperature of around 8% for the static gain. This effect on the 1.6K stage is due to the fluctuations of the dilution stage originally generated by the 4K one. When HFI regulations of the PID1 and 1.6K stages are ON, the effect of the 4K stage on the 1.6K filters is completely damped.

The values of the three transfer functions deduced from TSS tests are summarized in table 1.

HFI PFM-CAL: TSS

11 CONCLUSION

Transfer function	4K back →4K horns	4K back →1.6K filters	4K back → 0.1K dilution plate
Static gain	1	0.082	0.001
Value at 1/666Hz	0.875	0.0625	0.001
Knee frequency	1/100Hz	1/500Hz	?

Table 1: Transfer functions values measured on the PFM

9 Links to detailed results

<http://www.planck.fr/exchange/PFM/TSS/>

10 Variation with characterization

No significative changes have been observed with the characterization

11 Conclusion

All the minimum tests have been performed on the PFM regarding the measurement of the thermal transfer functions within the FPU.

The results of these fonctionnal tests are satisfactory.

After CSL test of the CQM satellite [4] and thanks to the transfer functions measured on the PFM HFI cryogenic stages, we can conclude that the performances of the passive thermal control of the Sorption Cooler fluctuations should allow to reach the temperature stability requirements on the HFI stages (4K horns, 1.6K filters and 0.1K bolometers plate).

Finally transfer functions obtained with TSS data can also be used to simulate the PID active thermal control systems in order to test in-flight PID setting procedures.

12 ANNEX TSS

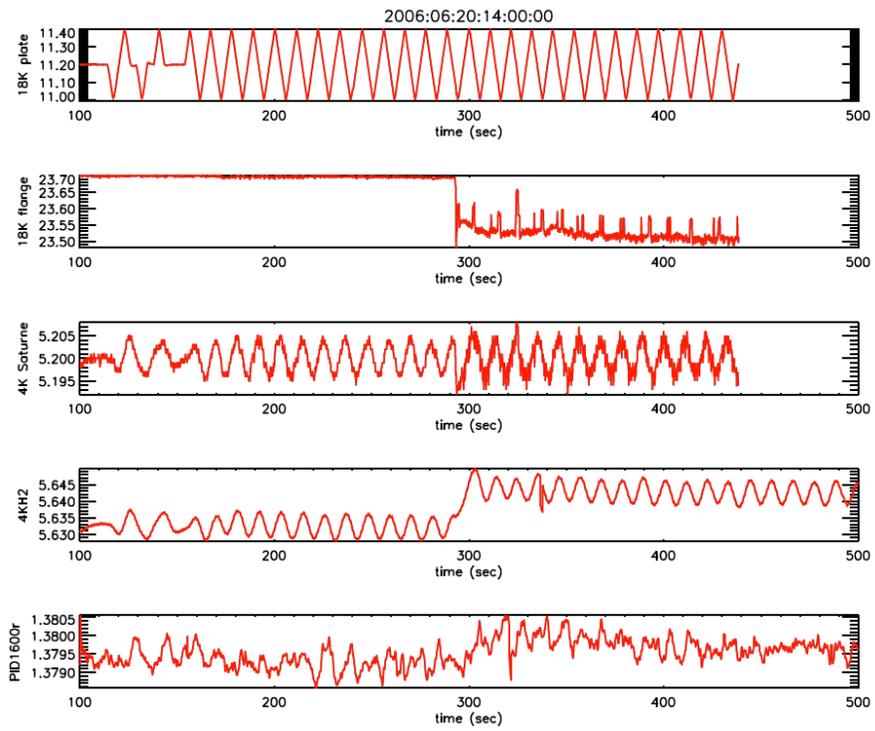


Figure 10: SC1 Data for the 3 Saturne sensors and HFI 4K and 1.6K stages

HFI PFM-CAL: TSS

12 ANNEX TSS

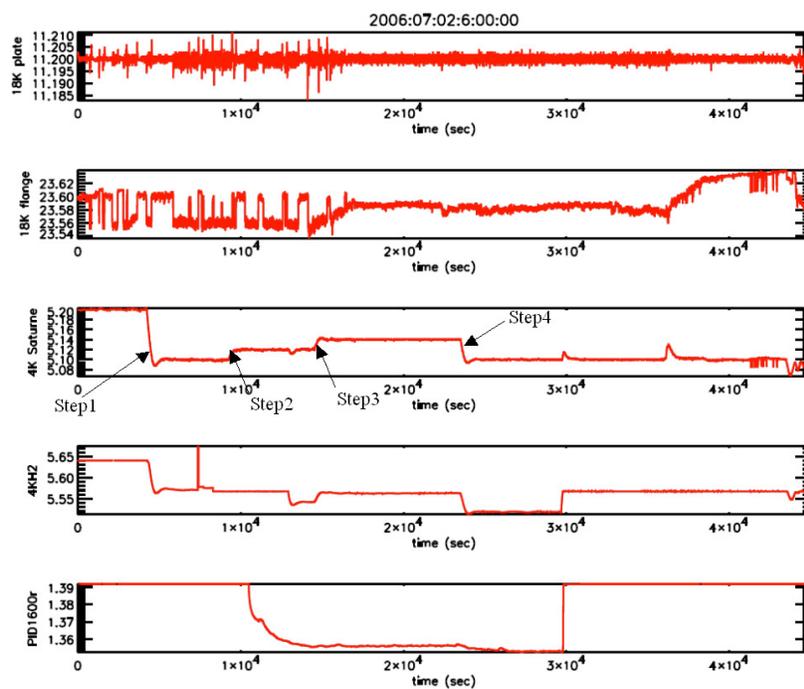


Figure 11: TSS1 Data for the 3 Saturne sensors and HFI 4K and 1.6K stages

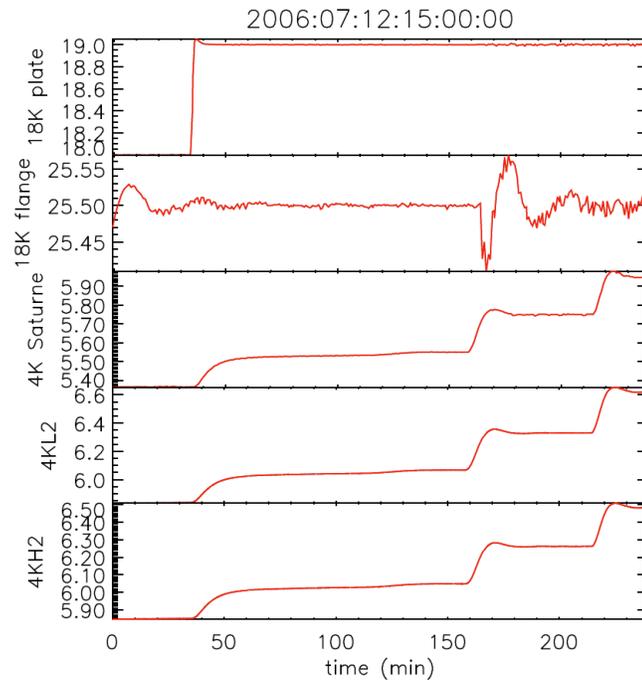


Figure 12: TSS2 Data for the 3 Saturne sensors and HFI 4K stage

Annexe B

Note sur la mesure de la polarisation par l'expérience PILOT



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

TITLE: **Polarisation measurement with the PILOT experiment**

DOC. TYPE: Technical note

PROJECT REF.: PILOT-NT-041-001-ALL

PAGE: 1 of 12

Prepared by	Jean-Philippe Bernard Christophe Leroy Nicolas Ponthieu Etienne Pointecouteau	13rd Feb, 2007
Agreed by	Marty. C.	Local Manager
Approved by	J. P. Bernard C. Marty	Prime Investigator Instrument Project Manager



Change record

Date	Description of change	Author
11th, Aug., 2005	First version	CL
08th, Feb., 2006	Added HWP and grid systematics in equations defining TOIs. Corrected for missing factor 1/2 in $toi = 1/2(I+Q\dots)$	NP
5th feb, 2007	Referenced version	C. Marty
13rd Feb, 2007	livré Baghera	C. Marty



**Polarisation measurement
with the PILOT experiment**

Document no: PILOT-NT-041-001-ALL
Date: 13rd Feb, 2007
Page: 3 of 12

Table des matières

1 Introduction : les Paramètres de Stokes	4
1.1 Définition	4
1.2 Algèbre des Paramètres de Stokes	5
1.3 Lien entre les matrices de Mueller et les matrices de Jones	6
1.4 Mesure et Détermination des Paramètres de Stokes	8
2 Génération de TOIs simulées pour PILOT	9

Résumé

Cette note a pour but de servir de référence en matière de notations et de définition des différents paramètres instrumentaux qui entrent dans les simulations de PILOT. Elle commence par la définition des paramètres de Stokes et décrit leurs propriétés principales.

1 Introduction : les Paramètres de Stockes

1.1 Définition

Le champ électrique d'une onde électromagnétique est défini par ses deux composantes E_x et E_y dans un repère (x, y) orthonormal à la direction de propagation de l'onde z :

$$\begin{aligned} E_x(t) &= A_x(t)e^{i\omega t} \\ E_y(t) &= A_y(t)e^{i(\omega t + \phi)} \end{aligned} \quad (1)$$

Déterminer la polarisation d'une onde revient donc à déterminer la valeur des paramètres A_x , A_y et ϕ à chaque instant. En pratique il est possible de mesurer uniquement les intensités $\langle |E_x|^2 \rangle$ et $\langle |E_y|^2 \rangle$ d'un rayonnement compte-tenu de la rapidité d'oscillation des ondes lumineuses fixée par ω . Les durées de moyennage associées aux intensités mesurées correspondent alors au temps d'intégration du détecteur. On définit alors les *paramètres de Stokes* I , Q et U par :

$$I = \langle |E_x|^2 \rangle + \langle |E_y|^2 \rangle = I_x + I_y \quad (2)$$

$$Q = I_x - I_y \quad (3)$$

$$U = I_x^{45} - I_y^{45} \quad (4)$$

Le paramètre U est calculé à partir des composantes du champ électrique de l'onde étudiée suivant deux axes orthogonaux orientés à 45° du repère de calcul de I et Q . Le degré de polarisation linéaire p est alors défini par :

$$p = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} \quad (5)$$

Une fois I , Q et U mesurés, il est possible de remonter à A_x^2 , B_x^2 et ϕ . I et Q fournissent A_x^2 et B_x^2 , U fournit ϕ :

$$\begin{aligned} U &= I_x^{45} - I_y^{45} \\ &= \langle \frac{1}{\sqrt{2}}(E_x + E_y)^2 \rangle - \langle \frac{1}{\sqrt{2}}(-E_x + E_y)^2 \rangle \\ &= \frac{1}{2}|A_x + A_y e^{i\phi}|^2 - \frac{1}{2}| -A_x + A_y e^{i\phi} |^2 \\ &= \frac{1}{2}|A_x + A_y \cos \phi + iA_y \sin \phi|^2 - \frac{1}{2}| -A_x + A_y \cos \phi + iA_y \sin \phi|^2 = \dots \\ U &= 2A_x A_y \cos \phi \end{aligned} \quad (6)$$

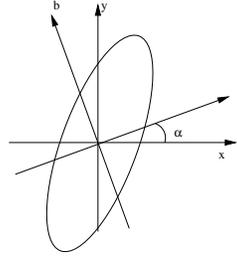


FIG. 1: Convention d'orientation relative des bases (x, y) et (a, b) dans lesquelles on cherche les paramètres de Stokes de l'ellipse de polarisation représentée.

1.2 Algèbre des Paramètres de Stokes

Avant de relier les paramètres I, Q, U aux mesures d'un détecteur polarisé dans le paragraphe suivant, nous allons tout d'abord montrer comment ils se transforment quand on change la base de référence. Nous supposons pour cela que dans la base (x, y) les paramètres de l'onde sont $(I, Q, U)_{xy}$, et que nous cherchons les paramètres $(I, Q, U)_{ab}$ dans la base (a, b) , où la direction a fait un angle α avec l'axe x (cf. Fig. 1).

L'intensité est bien évidemment conservée. Nous avons alors :

$$\begin{pmatrix} E_a \\ E_b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} \quad (7)$$

Ainsi¹ :

$$\begin{aligned} Q_{ab} &= \langle |E_a|^2 \rangle - \langle |E_b|^2 \rangle \\ &= |\cos \alpha A_x + \sin \alpha A_y e^{i\phi}|^2 - |-\sin \alpha A_x + \cos \alpha A_y e^{i\phi}|^2 \\ &= (A_x^2 - A_y^2) \cos 2\alpha + 2A_x A_y \cos \phi \sin 2\alpha \\ &= Q_{xy} \cos 2\alpha + U_{xy} \sin 2\alpha \end{aligned}$$

Le calcul est similaire pour U_{ab} en faisant le changement $\alpha \rightarrow \alpha + \pi/4$:

$$U_{ab} = -Q_{xy} \sin 2\alpha + U_{xy} \cos 2\alpha$$

Nous pouvons donc à présent donner la relation générale de transformation des paramètres de Stokes dans une base (a, b) dont l'axe a fait l'angle α par rapport à l'axe x de la base d'origine :

$$\begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \end{pmatrix}_{ab} = \begin{pmatrix} 1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cos 2\alpha & \sin 2\alpha \\ \cdot & -\sin 2\alpha & \cos 2\alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \end{pmatrix}_{xy} \quad (8)$$

$$= \mathcal{R}_\alpha \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \end{pmatrix}_{xy} \quad (9)$$

¹Nous omettons volontairement le facteur $e^{-i\omega t}$ pour ne pas alourdir les notations



La relation précédente fournit immédiatement la détermination de l'orientation de l'ellipse. En effet, dans la base propre de l'ellipse, définie par son grand et son petit axe, les paramètres de Stokes sont : $Q_{propre} = pI$ et $U_{propre} = 0$. Si l'ellipse fait l'angle ψ par rapport à notre axe x de référence, l'application de la relation (9) pour l'angle $-\psi$ conduit à :

$$Q = \cos 2\psi Q_{propre} \quad (10)$$

$$U = \sin 2\psi Q_{propre} \quad (11)$$

et donc ;

$$\psi = \frac{1}{2} \arctan \frac{U}{Q} \quad (12)$$

Remarques :

- On prendra garde dans le calcul de l'arctangente, à ne pas prendre brutalement l'arctangente mathématique, défini sur $]-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}[$, sinon l'angle ψ se retrouverait contraint dans $]-\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{4}[$. Il faudra déterminer l'angle 2ψ entre 0 et 2π , pour bien déterminer ensuite ψ qui est bien défini à π près.

1.3 Lien entre les matrices de Mueller et les matrices de Jones

Les matrices qui agissent sur les paramètres de Stokes sont connues sous le nom de matrice de Mueller, celles qui agissent sur les composantes du champ électrique sous le nom de matrices de Jones. Dans le cas de la modélisation de l'effet de l'instrument sur le rayonnement, il est parfois plus intuitif de se référer au formalisme de Jones. Il est donc important de pouvoir faire le lien entre les deux. Nous donnons ici les relations de base et quelques exemples.

Si l'on numérote les matrices de Pauli de la façon suivante (pas usuelle) :

$$\sigma_0 \equiv \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \sigma_1 \equiv \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \quad \sigma_2 \equiv \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad \sigma_3 \equiv \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix} \quad (13)$$

alors si k désigne l'indice de ligne et l'indice de colonne, la matrice de Mueller s'obtient à partir de la matrice de Jones par :

$$M_{kl} = \frac{1}{2} Tr(\sigma_k J \sigma_l J^\dagger) \quad (14)$$

où \dagger signifie transposé et conjugué. Ci-dessous quelques exemples usuels.

Remarque : Dans le cas le plus général on doit considérer un quatrième paramètre de Stokes V , qui caractérise le degré de polarisation circulaire de l'onde. Celui étant inaccessible pour des instruments bolométriques, nous ne le considérons pas ici. La matrice de Mueller est donc généralement une matrice 4×4 qui ici se réduit à une matrice 3×3 . On a donc ici besoin seulement des matrices de Pauli $\sigma_0, \sigma_1, \sigma_2$.



Rotation de la polarisation . Un instrument qui fait tourner la polarisation sans l'atténuer d'un angle α a la matrice de Jones

$$J = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \quad (15)$$

et la matrice de Mueller

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\alpha & -\sin 2\alpha \\ 0 & \sin 2\alpha & \cos 2\alpha \end{pmatrix} \quad (16)$$

C'est au signe près la relation qu'on avait trouvé en (7) et (8) puisque faire tourner la polarisation d'un angle α sans changer la base d'observation revient à faire tourner les axes de référence de $-\alpha$.

Polariseur imparfait : "Cross-polar" . Un polariseur imparfait qui transmet une composante non nulle dans sa direction orthogonale à la matrice de Jones

$$J = \begin{pmatrix} \tau_1 & 0 \\ 0 & \tau_2 \end{pmatrix} \quad (17)$$

avec $\tau_2 \ll \tau_1$ a priori. Sa matrice de Mueller est alors :

$$M = \begin{pmatrix} K & k & 0 \\ k & K & 0 \\ 0 & 0 & q \end{pmatrix} \quad (18)$$

avec $K \equiv (\tau_1^2 + \tau_2^2)/2$, $k \equiv (\tau_1^2 - \tau_2^2)/2$ et $q \equiv \tau_1\tau_2$.

Polariseur orienté et imparfait . La généralisation des deux cas précédents est suffisamment fréquente et importante pour être détaillée. Soit donc un polariseur imparfait de matrice de Mueller M_{XY} définie par (18) dans sa base propre, c'est à dire lorsque sa direction de co-polarisation est suivant l'axe X . On suppose que cet axe X est à α par rapport à l'axe x du laboratoire. Il faut donc transporter les $(I, Q, U)_{xy}(t=0)$ du vecteur incident exprimés dans le ref. du laboratoire dans la base du polariseur, appliquer le polariseur M_{XY} et revenir dans la base du laboratoire pour avoir $(I, Q, U)_{xy}(t > 0)$. D'après (9) on a donc :

$$\begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \end{pmatrix}_{xy;t>0} = \mathcal{R}_{-\alpha} M_{XY} \mathcal{R}_{\alpha} \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \end{pmatrix}_{xy;t=0} \quad (19)$$

La matrice de Mueller du polariseur imparfait, dont la direction de co-polarisation fait l'angle α avec l'axe x du laboratoire, dans la base du laboratoire est donc :

$$M = \begin{pmatrix} K & k \cos 2\alpha & k \sin 2\alpha \\ k \cos 2\alpha & K \cos^2 2\alpha + q \sin^2 2\alpha & (K - q) \cos 2\alpha \sin 2\alpha \\ k \sin 2\alpha & (K - q) \cos 2\alpha \sin 2\alpha & K \sin^2 2\alpha + q \cos^2 2\alpha \end{pmatrix} \quad (20)$$

1.4 Mesure et Détermination des Paramètres de Stokes

Supposons que la direction principale de polarisation de l'onde incidente fasse l'angle ψ avec l'axe x de notre système de référence. En vertu du paragraphe précédent, nous avons donc :

$$Q = pI \cos 2\psi \quad (21)$$

$$U = pI \sin 2\psi \quad (22)$$

Supposons à présent que nous disposons d'un détecteur polarisé qui fait l'angle α avec x . Celui-ci n'est sensible qu'à la projection du champ électrique sur sa direction passante, il mesure donc (au bruit près) :

$$\begin{aligned} m &\propto \langle E^2 \cos^2(\alpha - \psi) \rangle \\ &\propto \langle \frac{1}{2} E^2 (1 + \cos 2\alpha \cos 2\psi + \sin 2\alpha \sin 2\psi) \rangle \\ &\propto \frac{1}{2} (I + Q \cos 2\alpha + U \sin 2\alpha) \end{aligned} \quad (23)$$

Il faut donc au moins trois mesures suivant trois angles distincts pris entre 0 et π pour déterminer les 3 paramètres de Stokes pour un même point observé. Dans le cas général, un même point est observé plusieurs fois et ne constitue qu'un pixel parmi les autres d'une carte. Il faut donc étendre la formule précédente pour combiner au mieux les différentes mesures relatives à ce pixel, mais également tenir compte du bruit et des mesures voisines, des corrélations entre échantillons, des corrélations pixel à pixel, en traitant simultanément toute la carte. Si l'on dispose de n mesures, (23) se généralise en un système matriciel

$$\mathbf{M} = \mathbf{A}\mathbf{S} + \mathbf{N} \quad (24)$$

\mathbf{M} est le vecteur des n mesures m_i , \mathbf{N} le vecteur de bruit, \mathbf{S} le vecteur des paramètres de Stokes (la carte du ciel observé) et \mathbf{A} est la matrice de pointage, qui contient à la fois les coordonnées du pixel et les angles des polariseurs. Son expression analytique n'est pas très intuitive, aussi nous choisissons un cas particulier pour l'explicitier. Si $i = 1, \dots, n$ désigne les indices des pixels du ciel observé, \mathbf{S} est le vecteur :

$$(I_1 \ Q_1 \ U_1 \ I_2 \ Q_2 \ U_2 \ \dots \ I_n \ Q_n \ U_n). \quad (25)$$

Pour fixer les idées, supposons que les deux mesures m_t et m_{t_1} soient relatives aux pixels numéro 1 et 2, alors les lignes t et t_1 de \mathbf{A} sont :

$$\frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & \cos 2\alpha_t & \sin 2\alpha_t & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \cos 2\alpha_{t_1} & \sin 2\alpha_{t_1} & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix} \quad (26)$$

La détermination du vecteur de Stokes se fait en minimisant le χ^2 du système :

$$\chi^2 = (\mathbf{M} - \mathbf{A}\mathbf{S})^T \mathcal{N}^{-1} (\mathbf{M} - \mathbf{A}\mathbf{S}) \quad (27)$$

où \mathcal{N} est la matrice de covariance du bruit. La solution est donc :

$$\mathbf{S} = (\mathbf{A}^T \mathcal{N}^{-1} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathcal{N}^{-1} \mathbf{M} \quad (28)$$

et la matrice de variance du vecteur de Stokes \mathbf{S} est :

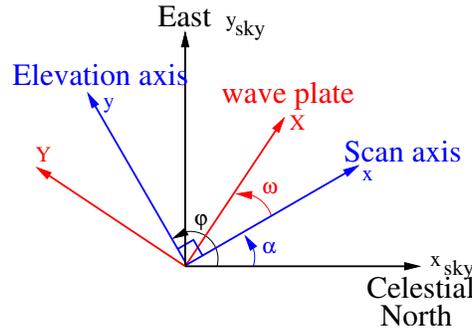


FIG. 2: Définition des angles intervenant dans la détermination des paramètres de Stokes. x et y (bleu) sont les axes de référence dans le plan focal. Par construction, la matrice 1 n'est sensible qu'à la polarisation suivant x et la matrice 2 n'est sensible qu'à la polarisation suivant y . Les paramètres de Stokes du ciel sont définis par rapport à x_{sky} et y_{sky} , x_{sky} étant orienté vers le pôle nord céleste. La direction privilégiée X de la lame biréfringente fait l'angle ω par rapport à x dans le repère du plan focal. Tous les angles sont définis en valeur algébrique et sont orientés positivement dans le sens trigonométrique défini sur la figure, conformément aux conventions en vigueur. L'angle φ est l'angle parallactique.

$$\mathcal{V} = (A^T \mathcal{N}^{-1} A)^{-1} \quad (29)$$

Nous avons donc la solution formelle de la détermination de la polarisation du rayonnement étudié.

2 Génération de TOIs simulées pour PILOT

L'objectif de cette partie est de préciser comment les TOIs sont obtenues à partir d'un ciel simulé. On commence donc par se donner un ciel dont le rayonnement est caractérisé par $(I, Q, U)_{sky}$, dans le repère défini sur la figure 2. Dans toute la suite de ce paragraphe, les indices sky, xy, XY , définiront la base dans laquelle les paramètres de Stokes. L'indice $_0$ concerne le rayonnement incident, avant son entrée dans l'instrument. Les indices sont ensuite incrémentés à chaque action d'un élément sur le vecteur de Stokes de l'onde. L'indice $_\infty$ est par convention le dernier possible, soit l'état de l'onde vu par le détecteur.

Soit X, Y un repère orthonormé, dont l'axe X correspond à l'axe principal de la lame. Celle-ci agit sur le champ électrique par sa matrice de Jones :

$$E_{out}^{\vec{}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} E_{in}^{\vec{}} \quad (30)$$

En supposant pour l'instant que le seul défaut de la lame est d'introduire de la cross-polarisation mais sans atténuation globale du signal ou d'une polarisation par rapport à l'autre, la matrice de la lame devient :

$$E_{out}^{\vec{}} = \begin{pmatrix} 1 - \epsilon_1 & \epsilon_2 \\ \epsilon_1 & -(1 - \epsilon_2) \end{pmatrix} E_{in}^{\vec{}} \quad (31)$$

Sa matrice de Mueller est donc au premier ordre (cf. ??) :

$$M_{XY} = \begin{pmatrix} 1 - (\epsilon_1 + \epsilon_2) & -\epsilon_1 + \epsilon_2 & -\epsilon_1 + \epsilon_2 \\ -\epsilon_1 + \epsilon_2 & 1 - (\epsilon_1 + \epsilon_2) & \epsilon_1 + \epsilon_2 \\ \epsilon_1 - \epsilon_2 & \epsilon_1 + \epsilon_2 & -1 + \epsilon_1 + \epsilon_2 \end{pmatrix} \quad (32)$$

Afin de déterminer quelle est la mesure enregistrée par un détecteur, il faut calculer les paramètres de Stokes dans la base (x, y) relative aux détecteurs. Par ailleurs, les miroirs M_1 et M_2 font tourner la polarisation d'un angle θ (qui dépend de la position de chaque détecteur dans le plan focal) défini dans le repère de l'instrument (x, y) , par rapport à y et orienté dans le sens trigonométrique comme sur la figure 2. L'axe principal de la lame fait l'angle ω avec l'axe x . On a donc par ordre chronologique :

- Expression de l'état de polarisation du ciel dans le ref. de l'instrument : Le vecteur de polarisation

$$\begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \end{pmatrix}_{xy_0} = \mathcal{R}_\alpha \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \end{pmatrix}_{sky_0} \quad (33)$$

- Passage par M_1 et M_2 :

$$\begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \end{pmatrix}_{xy_1} = \mathcal{R}_{-\theta} \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \end{pmatrix}_{xy_0} \quad (34)$$

- Expression du vecteur de Stokes dans la base propre de la lame :

$$\begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \end{pmatrix}_{XY_1} = \mathcal{R}_\omega \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \end{pmatrix}_{xy_1} \quad (35)$$

- Action de la lame biréfringente :

$$\begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \end{pmatrix}_{XY_2} = M_{XY} \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \end{pmatrix}_{XY_1} \quad (36)$$

- Ré-expression dans la base des détecteurs :

$$\begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \end{pmatrix}_{xy_2} = \mathcal{R}_{-\omega} \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \end{pmatrix}_{XY_2} \quad (37)$$

Donc finalement, les paramètres de Stokes incidents sur la séparatrice sont :

$$\begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \end{pmatrix}_{xy_2} = \mathcal{R}_{-\omega} M_{XY} \mathcal{R}_\omega \mathcal{R}_{-\theta} \mathcal{R}_\alpha \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \end{pmatrix}_{sky_0} \quad (38)$$

Le développement du produit matriciel général serait lourd et guère instructif. À titre indicatif et pour illustrer la dépendance angulaire, nous donnons l'expression lorsque la lame est parfaite :



**Polarisation measurement
with the PILOT experiment**

Document no: PILOT-NT-041-001-ALL
Date: 13rd Feb, 2007
Page: 11 of 12

$$M_{XY}\mathcal{R}_\omega = \begin{pmatrix} 1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & 1 & \cdot \\ \cdot & \cdot & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cos 2\omega & \sin 2\omega \\ \cdot & -\sin 2\omega & \cos 2\omega \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cos 2\omega & \sin 2\omega \\ \cdot & \sin 2\omega & -\cos 2\omega \end{pmatrix} \quad (39)$$

et

$$\begin{aligned} \mathcal{R}_{-\omega}M_{XY}\mathcal{R}_\omega &= \begin{pmatrix} 1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cos 2\omega & -\sin 2\omega \\ \cdot & \sin 2\omega & \cos 2\omega \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cos 2\omega & \sin 2\omega \\ \cdot & \sin 2\omega & -\cos 2\omega \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cos 4\omega & \sin 4\omega \\ \cdot & \sin 4\omega & -\cos 4\omega \end{pmatrix} \quad (40) \\ \mathcal{R}_{-\theta}\mathcal{R}_\alpha &= \begin{pmatrix} 1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cos 2(\alpha - \theta) & \sin 2(\alpha - \theta) \\ \cdot & -\sin 2(\alpha - \theta) & \cos 2(\alpha - \theta) \end{pmatrix} \quad (41) \end{aligned}$$

Remarquons que $\alpha = \varphi - \pi/2$, donc finalement :

$$\begin{aligned} M_{instr}^{perf} &= \begin{pmatrix} 1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cos 4\omega & \sin 4\omega \\ \cdot & \sin 4\omega & -\cos 4\omega \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & -\cos 2(\varphi - \theta) & -\sin 2(\varphi - \theta) \\ \cdot & \sin 2(\varphi - \theta) & -\cos 2(\varphi - \theta) \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 1 & -\cos(4\omega + 2\varphi - 2\theta) & -\sin(4\omega + 2\varphi - 2\theta) \\ 1 & -\sin(4\omega + 2\varphi - 2\theta) & +\cos(4\omega + 2\varphi - 2\theta) \\ 0 & & 0 \end{pmatrix} \quad (42) \end{aligned}$$

Dans le cas où $\varphi = 0$, c'est-à-dire que l'axe de lame est l'axe d'élevation qui pointe vers le zénith est aligné avec le méridien vers le Nord céleste, l'axe x de scan correspond à l'axe $-y_{sky}$ et l'axe y à l'axe x_{sky} , donc $(Q, U)_{xy} = -(Q, U)_{sky}$, ce qui justifie le signe devant les termes de M_{instr}^{perf} .

Compte tenu de la configuration des matrices et de la séparatrice, un détecteur de la matrice 1, intrinsèquement non polarisé, mesure ensuite l'**intensité** transmise par la séparatrice et la grille fixe qui lui est accolée. Il mesure donc :

$$\begin{aligned} m1 &= \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \end{pmatrix}_{xy_3} \\ &= \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot [M_g M_{s_1} \mathcal{R}_{-\omega} M_{XY} \mathcal{R}_\omega \mathcal{R}_{-\theta} \mathcal{R}_\alpha] \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \end{pmatrix}_{sky_0} \end{aligned}$$

La séparatrice est éventuellement mal alignée d'un angle ψ par rapport à x , et éventuellement imparfaite. Dans le repère de l'instrument, sa matrice de Mueller est :

$$M_{s_1} = \begin{pmatrix} K_s & & k_s \cos 2\psi & k_s \sin 2\psi \\ k_s \cos 2\psi & K_s \cos^2 2\psi + q_s \sin^2 2\psi & (K_s - q_s) \cos 2\psi \sin 2\psi & \\ k_s \sin 2\psi & (K_s - q_s) \cos 2\psi \sin 2\psi & K_s \sin^2 2\psi + q_s \cos^2 2\psi & \end{pmatrix} \quad (43)$$

La grille collée aux détecteur est elle aussi éventuellement imparfaite :



$$M_g = \begin{pmatrix} K_g & k_g & 0 \\ k_g & K_g & 0 \\ 0 & 0 & q_g \end{pmatrix} \quad (44)$$

Pour illustrer, supposons la séparatrice et la grille parfaites :

$$M_{g_1} = M_{s_1} = M_{g_1} M_{s_1} = \begin{pmatrix} 1/2 & 1/2 & 0 \\ 1/2 & 1/2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (45)$$

et donc finalement :

$$m_1(t) = \frac{1}{2} [I_{sky_0} - \cos(4\omega + 2\varphi - 2\theta)Q_{sky_0} - \sin(4\omega + 2\varphi - 2\theta)U_{sky_0}] \quad (46)$$

Le détecteur mesure ensuite l'intensité **réfléchie** par la séparatrice et transmise par la grille fixe qui lui est accolée :

$$M_{g_2} = M_{s_2} = M_{g_2} M_{s_2} = \begin{pmatrix} 1/2 & -1/2 & 0 \\ -1/2 & 1/2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (47)$$

et donc :

$$m_2(t) = \frac{1}{2} [I_{sky_0} + \cos(4\omega + 2\varphi - 2\theta)Q_{sky_0} + \sin(4\omega + 2\varphi - 2\theta)U_{sky_0}] \quad (48)$$

L'angle parallactique φ varie en fonction du temps, et l'angle de la lame ω dans le repère de l'instrument est à modifier au cours du temps d'observation de façon à multiplier les orientations sous lesquelles sont observés les différents pixels, afin de minimiser les erreurs de mesure de la polarisation.

Annexe C

Historique des températures d'HFI durant la campagne d'étalonnage PFM-CAL

ANNEXE C. HISTORIQUE DES TEMPÉRATURES D'HFI DURANT LA
CAMPAGNE D'ÉTALONNAGE PFM-CAL

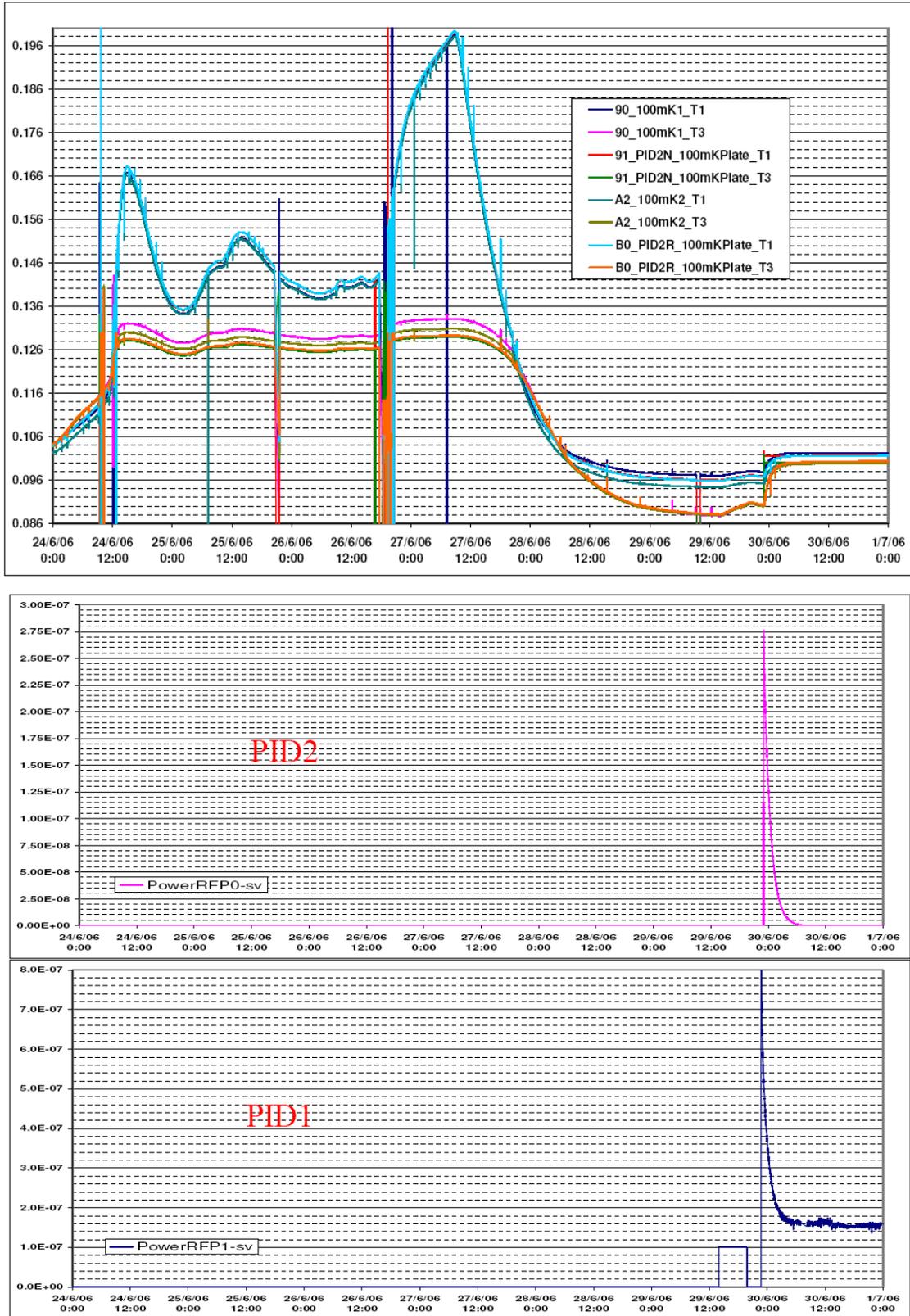


FIG. C.1 – Historique des température des thermomètres 100mK et puissances injectées par les régulations correspondantes durant la campagne d'étalonnage PFM-CAL d'HFI (semaine1)

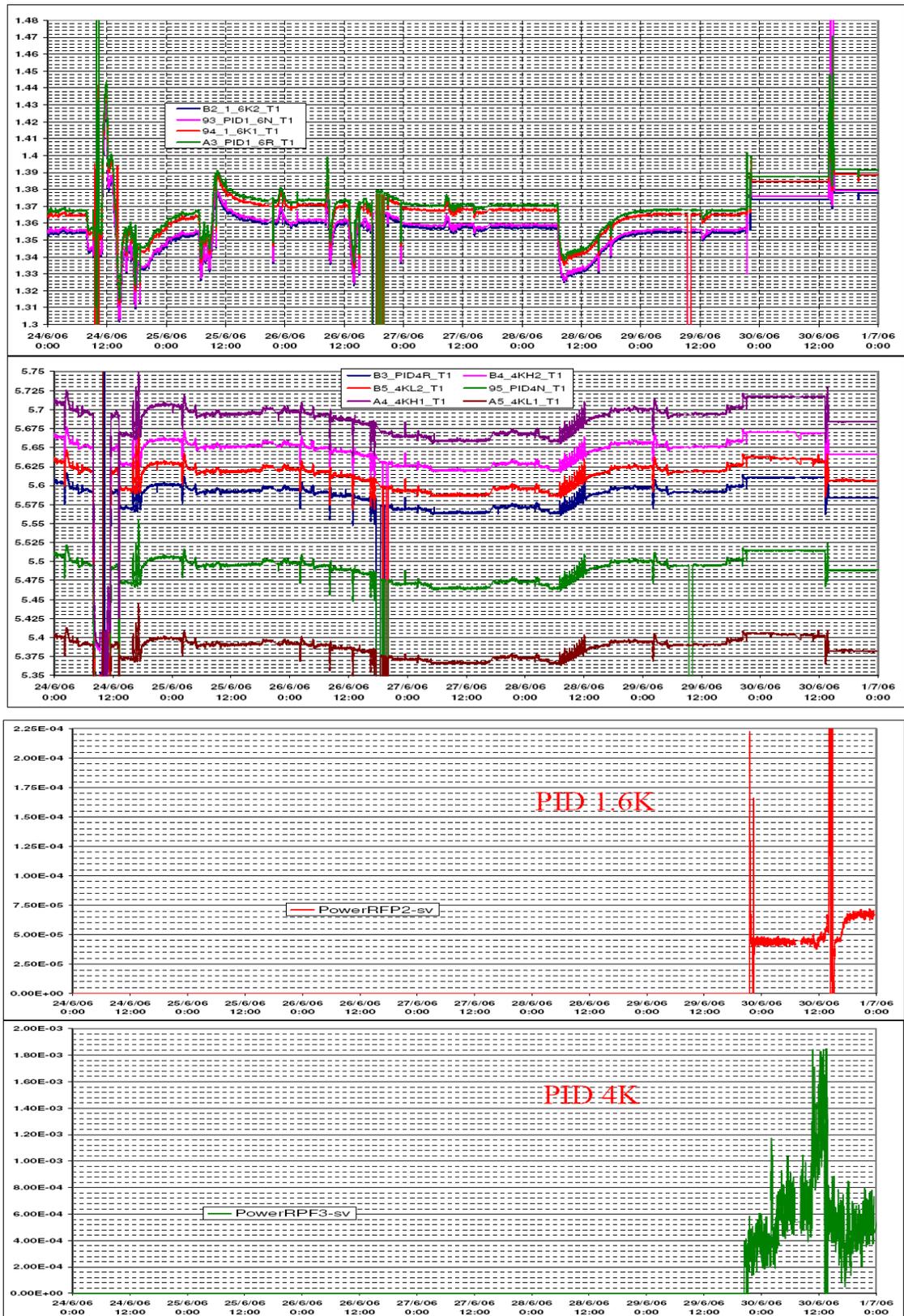


FIG. C.2 – Historique des température des thermomètres 4K, 1.6K et puissances injectées par les régulations correspondantes durant la campagne d'étalonnage PFM-CAL d'HFI (semaine1)

ANNEXE C. HISTORIQUE DES TEMPÉRATURES D'HFI DURANT LA
CAMPAGNE D'ÉTALONNAGE PFM-CAL

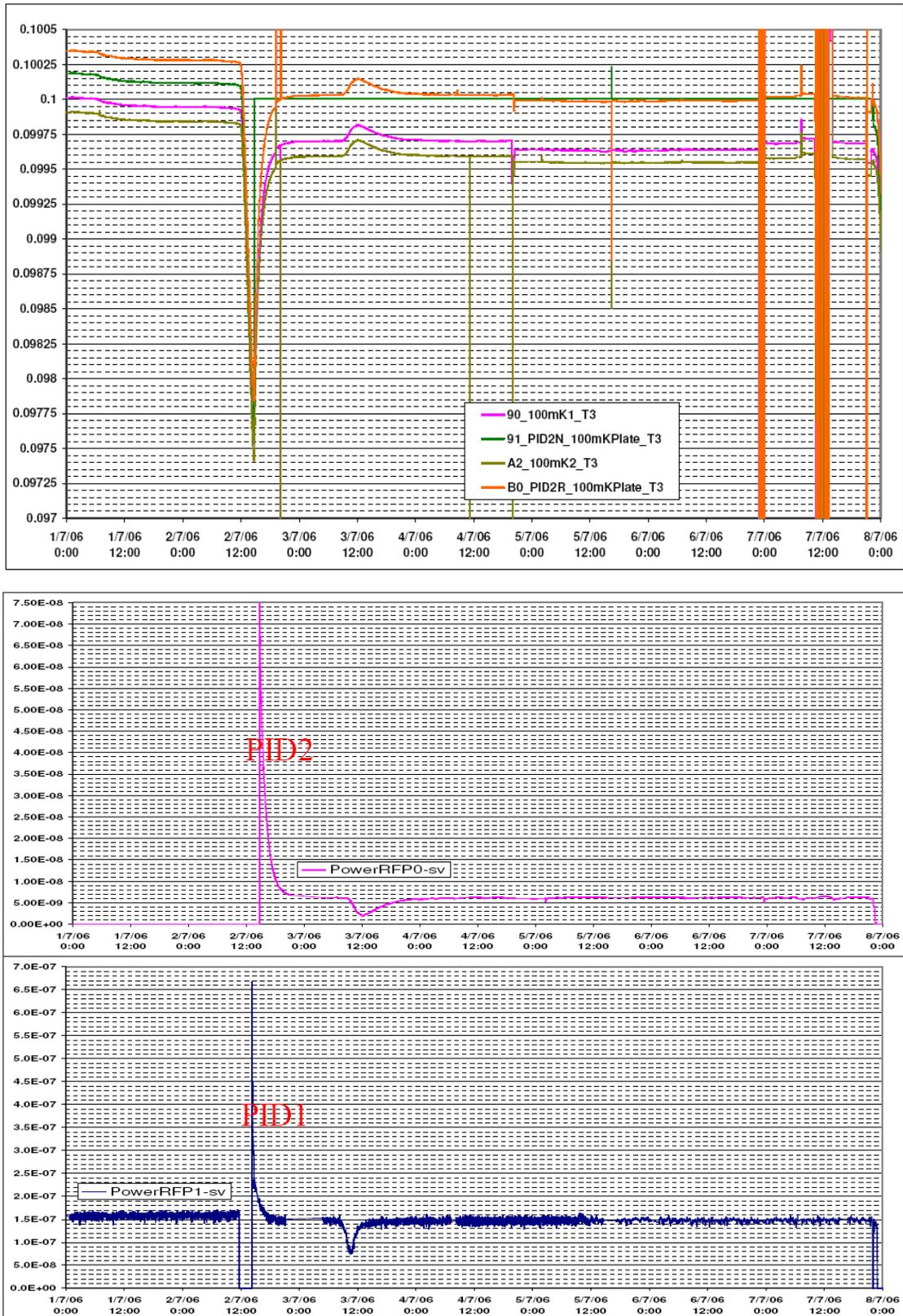


FIG. C.3 – Historique des température des thermomètres 100mK et puissances injectées par les régulations correspondantes durant la campagne d'étalonnage PFM-CAL d'HFI (semaine2)

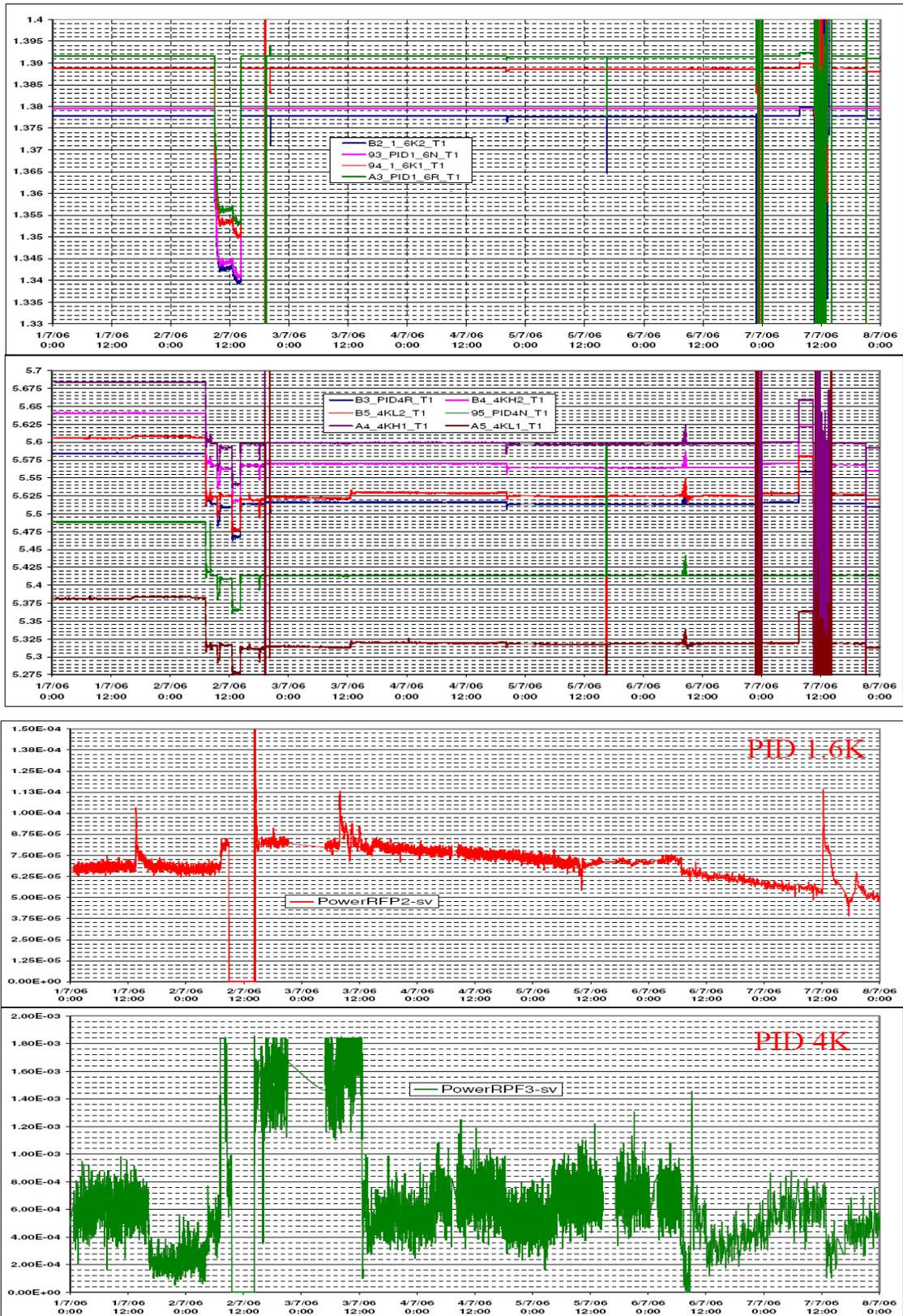


FIG. C.4 – Historique des température des thermomètres 4K, 1.6K et puissances injectées par les régulations correspondantes durant la campagne d'étalonnage PFM-CAL d'HFI (semaine2)

ANNEXE C. HISTORIQUE DES TEMPÉRATURES D'HFI DURANT LA
CAMPAGNE D'ÉTALONNAGE PFM-CAL

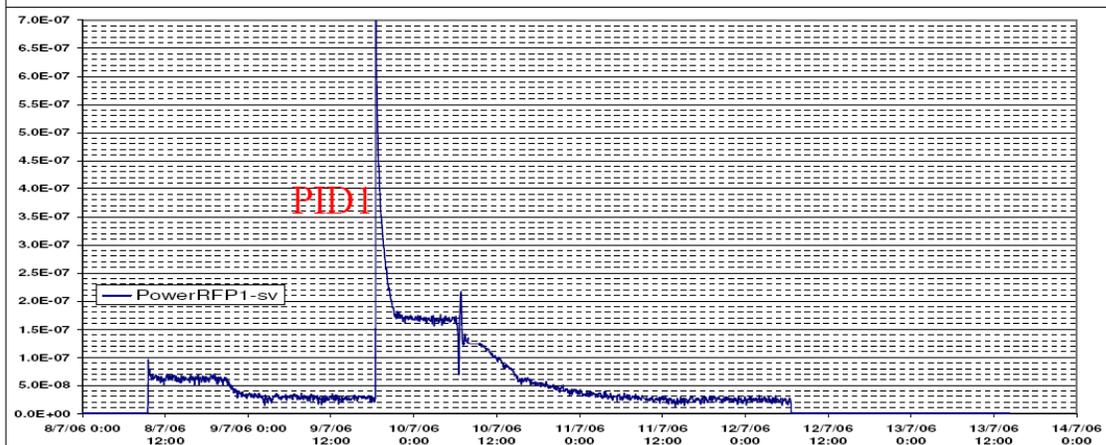
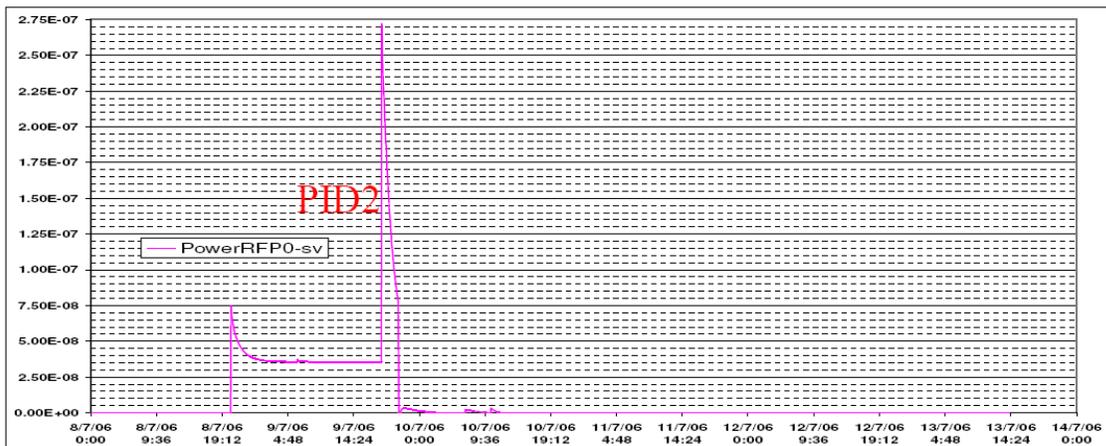
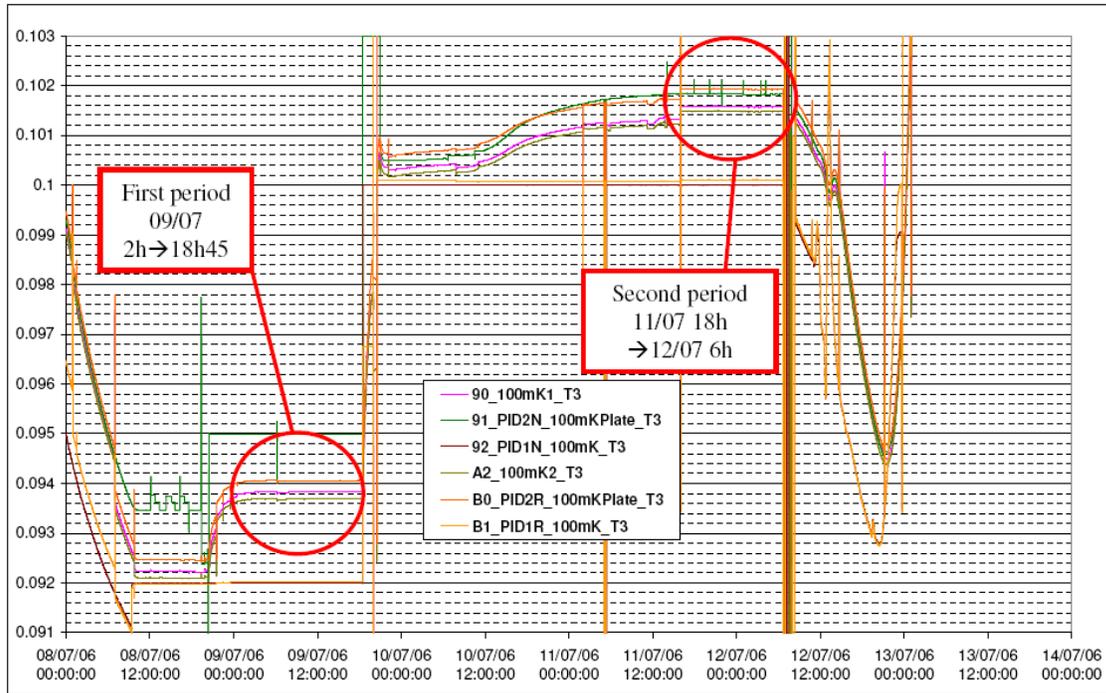


FIG. C.5 – Historique des température des thermomètres 100mK et puissances injectées par les régulations correspondantes durant la campagne d'étalonnage PFM-CAL d'HFI (semaine3)

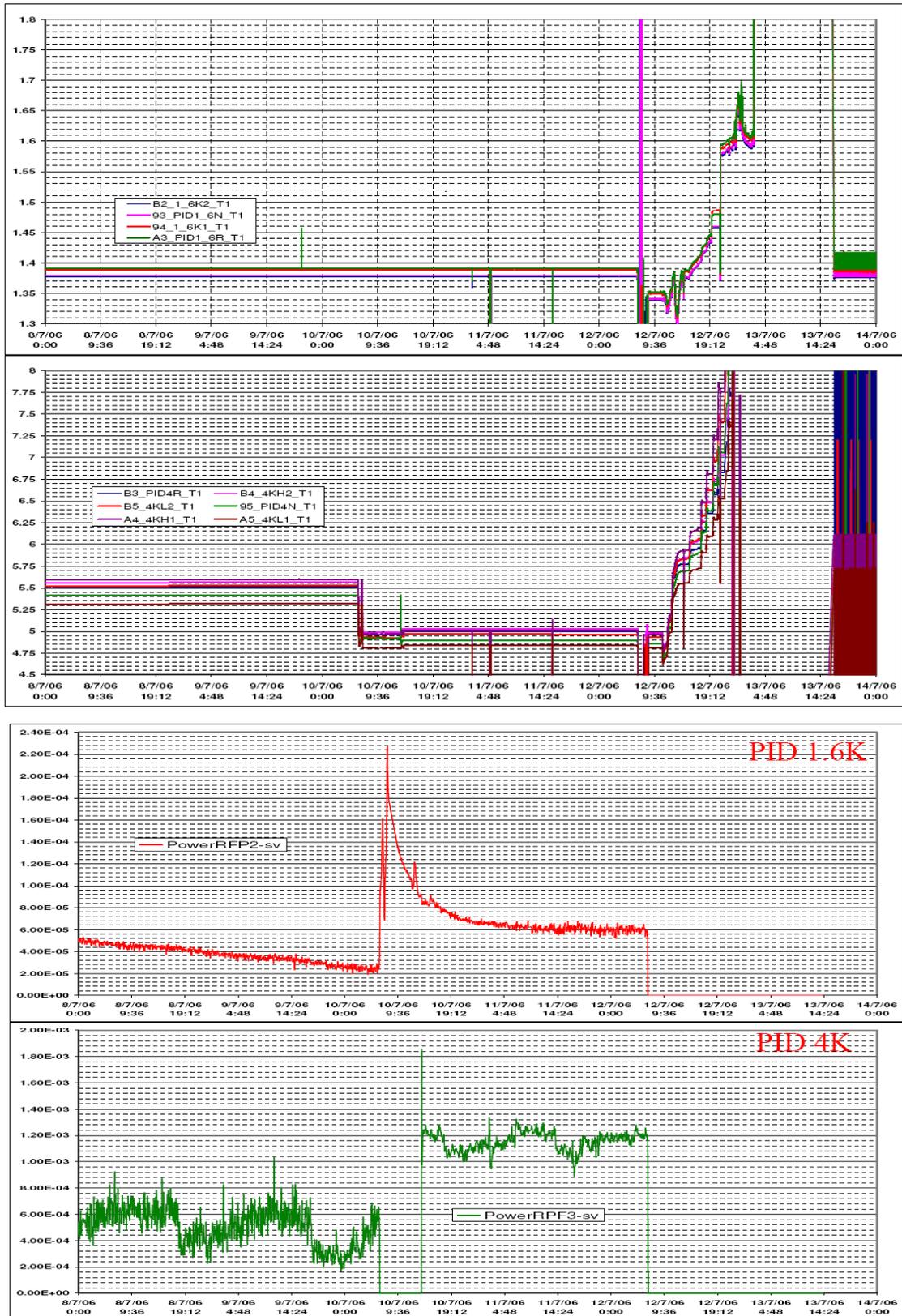


FIG. C.6 – Historique des température des thermomètres 4K, 1.6K et puissances injectées par les régulations correspondantes durant la campagne d'étalonnage PFM-CAL d'HFI (semaine3)

Annexe D

Historique des mesures TSS réalisées sur Planck-HFI

Date (format QLA)	Type de mesure	Paramètres
CQM		
2004 :11 :21 :17 :00 :00	Sinusoïde 4K back	. Période de 16 minute . Bolomètres polarisés
2004 :11 :21 :16 :05 :00	Créneau 4K back	. Période de 40 seconde . Bolomètres polarisés
2004 :11 :21 :18 :27 :00	Créneau 4K back	. Période de 12 seconde . Bolomètres polarisés
CSL-CQM		
2005 :09 :08 :10 :00 :00	PACE1 fluctuations	. Sinus de période 100 seconde et créneaux de périodes 667 et 4000 seconde . Bolomètres non polarisés
2005 :09 :11 :7 :00 :00	PACE Step	. Step de 0.8 Kelvin sur LVHX1 et LVHX2 . Bolomètres non polarisés
2005 :09 :30 :2 :00 :00	PACE2 fluctuations	. Créneaux de période 667 seconde . Bolomètres optimisés autour de 0.1K
PFM-CAL		
2006 :06 :20 :19 :50 :00	SC1 sur 18K plate	Bolomètres non polarisés
2006 :07 :02 :9 :50 :00	TSS1 step sur 4K back3	Bolomètres optimisés autour de 0.1K
2006 :07 :02 :11 :50 :00	TSS1 step4 sur 4K back	Bolomètres optimisés autour de 0.1K
2006 :07 :12 :15 :00 :00	TSS2 sur 18K plate	Bolomètres polarisés

TAB. D.1 – *Historique des mesures TSS réalisées sur Planck-HFI*

Annexe E

Liste de publications

[1] C. Leroy, A. Arondel, J.-P. Bernard & al., **”Performances of the Planck-HFI cryogenic thermal control system”**, Space Telescopes and Instrumentation I : Optical, Infrared, and Millimeter. Edited by John C. Mather, Howard A. MacEwen, and Mattheus W. M. de Graauw. Proceedings of the SPIE, Volume 6265, pp. 626508, 2006

[2] C. Leroy, J.-P. Bernard & J.-F. Trouilhet, **”Thermal Modelling with Neural Network applied to the Planck Space Mission”**, Proceedings of the IEEE XIII Workshop on Neural Networks For Signal Processing, 2003

[3] J.-P. Bernard, P. Ade, P. deBernardis, M. Giard, M. Griffin, P. Hargrave, A. Laurens, B. Leriche, C. Leroy, Y. Longval, C. Marty, S. Madden, B. Maffei, S. Masi, C. Meny, M.-A. Miville-Deschênes, J. Narbonne, L. Nati, F. Pajot, F. Piacentini, G. Pisano, E. Pointecouteau, N. Ponthieu, I. Ristorcelli, L. Rodriguez, G. Roudil, M. Salatino & G. Savini, **”PILOT : Measuring polarization in the Interstellar Medium”**, Sky Polarisation at Far-Infrared to Radio Wavelengths : The Galactic Screen before the Cosmic Microwave Background. Edited by M.-A. Miville-Deschênes and F. Boulanger, EAS Publications Series, pages 189-203, 2007

Table des figures

1.1	<i>Gauche : Photographie de Penzias et Wilson devant leur antenne radio du Bell Labs. Droite : Simulation du ciel tel que l'antenne de Penzias et Wilson l'aurait observé si il avait été possible d'effectuer un relevé complet du ciel avec celle-ci (extrait de [28]).</i>	19
1.2	<i>Gauche : Photographie de John C. Mather et George Smoot lors de la cérémonie de remise de leur prix Nobel. Droite : Première carte des anisotropies du CMB obtenue avec DMR et publiée en 1992 après deux ans d'observations. Cette carte est obtenue après soustraction du dipôle et d'un modèle d'émission galactique.</i>	20
1.3	<i>Gauche : Carte des fluctuations du CMB obtenue avec MAXIMA. Droite : Carte des fluctuations du CMB obtenue avec BOOMERANG.</i>	21
1.4	<i>Carte des fluctuations du CMB mesurées à 217 Ghz par Archeops. Cette carte est le résultat de la combinaison linéaire du signal de deux bolomètres (extrait de [61]).</i>	22
1.5	<i>Carte des fluctuations du CMB obtenue avec WMAP (extrait de [37]).</i>	22
1.6	<i>Gauche : Différentes mesures indépendantes du spectre de corps noir du CMB ajustées par un spectre de corps noir de température 2.73 K (extrait de [98]). Droite : Spectre de corps noir ajusté sur les mesures COBE-FIRAS (extrait de [67]). La température du spectre de corps noir ajustée ici sur les données FIRAS est de 2.728 Kelvin.</i>	23
1.7	<i>Cartes du ciel à 53 GHz obtenue avec l'instrument COBE-DMR. En haut : observations représentée sur un échelle de 0 à 4 K afin d'illustrer l'uniformité du CMB autour de 2.728 K. Au milieu : carte avec une échelle adaptée au dipôle, le dipôle et la Galaxie peuvent être distingués. En bas : la Galaxie et les anisotropies du CMB après soustraction du dipôle.</i>	24
1.8	<i>Les 9 bandes d'observation de Planck superposées aux spectres d'intensité associés à chaque composantes astrophysique exprimée en température de brillance (extrait de [105]). En vert, l'émission synchrotron, en bleu l'émission free-free, en rouge l'émission des poussières et en violet les fluctuations du CMB.</i>	25
1.9	<i>Spectre Infrarouge/Micro-onde de l'émission des poussières du milieu interstellaire. Les bandes d'observation de Planck-HFI et de PILOT sont superposées au spectre. Les voies polarisées sont repérées par la lettre P.</i>	26

1.10 *Spectre des fluctuations de température du CMB obtenu à partir de la carte WMAP (extrait de [37]). Les points en noir correspondent aux mesures déduites de la cartes des fluctuation du CMB. Les barres d'erreur estimées pour chaque point du spectre et déduit du bruit estimé sur les pixels des cartes WMAP sont également représentées. La courbe en rouge est le meilleur ajustement du modèle Λ CDM. Le bandeau rose correspond à l'erreur induite par la variance cosmique pour un intervalle de confiance de 1σ dans la formule d'incertitude sur les C_l [41].* 29

1.11 *Les différents type d'univers possibles en fonction des valeurs des paramètres cosmologiques Ω_m et Ω_Λ . Les contraintes des observations du CMB par BOOMERANG sont représentées en bleu. Les contraintes des observations des SNIa sont également indiquées en jaune. Un modèle d'univers plat avec $\Omega_{tot}=1$ est ici parfaitement compatible avec les observations du CMB par BOOMERANG. . . .* 31

1.12 *Contraintes apportés par les données WMAP et d'autres résultats observationnels pour les paramètres cosmologiques Ω_m et Ω_Λ (extrait de [100]). La zone en rouge correspond au contour de l'intervalle de confiance à 1σ pour les paramètres cosmologiques. La zone en rose représente l'intervalle de confiance à 2σ . Les zone avec un contour gris représentent les intervalles de confiances à 1 et 2σ déduits des données WMAP seules pour les paramètres cosmologiques.* 32

1.13 *Vue d'artiste du satellite COBE et de ses différents éléments. Les trois boîtiers DMR à 31, 53 et 90 GHz peuvent être distingués ici, ainsi que le Dewar contenant FIRAS et DIRBE.* 34

1.14 *Gauche : Photographie du cornet d'entrée de FIRAS avec la source mobile d'étalonnage de l'instrument fixé à l'entrée. Droite : Photographie de FIRAS sans cornet d'entrée et sans miroir mobile (extraits de [28]).* 35

1.15 *Principe de mesure de COBE-FIRAS (extrait de [28]).* 36

1.16 *Gauche : Photographie du récepteur DMR à 31.5GHz en cours d'assemblage. Droite : Principe de mesure de COBE-DMR (extraits de [28]).* 36

1.17 *La nacelle de l'expérience ballon Archeops. On distingue entre autre le télescope, le cryostat et le senseur stellaire.* 37

1.18 *Mesures du spectre du CMB dans l'espace des harmoniques sphériques obtenu avec Archeops et d'autre expériences (extrait de [4]). Les points rouge représentent les mesures d'Archeops avec leurs incertitudes. Les mesures Archeops présentées ici ont été obtenues en effectuant le spectre d'une carte moyenne des fluctuations du CMB déduites des deux cartes à 143 GHz et 217 GHz à haute latitude ($b > 30^\circ$). La courbe obtenue avec un modèle Λ CDM ajusté sur ces données est également tracé en noir ici.* 38

1.19 *Carte du pourcentage de polarisation sur le ciel mesurée par Archeops (extrait de [5]).* 39

1.20 *Dessin légendé de la sonde WMAP.* 40

1.21 *Gauche : Instrument focal de WMAP. Droite : Illustration du principe de mesure de la polarisation avec WMAP.* 40

1.22	<i>Spectres de la polarisation du CMB déduit des données WMAP superposé au spectre des fluctuations de température du CMB tracé ici en noir. Le spectre de corrélation TE entre les fluctuations de température et des fluctuations associées aux modes E de la polarisation du CMB est tracé en rouge. Le spectre EE des fluctuations associées aux modes E de la polarisation du CMB est tracé en vert. La limite supérieure estimée pour le niveau du spectre des modes B est tracée en bleu.</i>	41
1.23	<i>Simulation des 9 cartes du ciel observées par Planck (extrait de [105]).</i>	42
1.24	<i>Gauche : Carte des anisotropies du CMB mesurée par WMAP. Droite : Simulation de la carte des anisotropies du CMB mesurée par Planck (extrait de [105]).</i>	43
1.25	<i>Gauche : Spectres de puissances TT et EE du CMB tels qu'ils ont été mesurés par WMAP. Les barres d'erreur associées à chaque point de mesure sont représentées en bleu. Droites : Spectres TT et EE tels qu'ils devraient être mesurés par Planck avec les barres d'erreur attendues en bleu (extrait de [105]).</i>	44
1.26	<i>Vue CAO du satellite Planck et photographie de son prototype : le "Cryogenic Qualification Model" (CQM).</i>	45
1.27	<i>Localisation des instruments HFI et LFI au centre du satellite Planck.</i>	45
1.28	<i>L' instrument HFI fixé au centre du support des cornets des radiomètres du Low Frequency Instrument.</i>	46
1.29	<i>La stratégie de balayage du ciel par Planck.</i>	46
1.30	<i>Répartition en fréquence et taille de faisceau des futures expériences dédiées à l'étude de la polarisation du CMB (extrait de [50]). La surface des carrés est proportionnelle à la sensibilité associée à chaque expérience. La courbe en rose représente l'amplitude relative des émissions galactiques d'avant-plan à chaque fréquence d'observation.</i>	50
2.1	<i>Gauche : Photographie légendée du modèle de vol d'HFI. Droite : Vue en coupe de l'instrument HFI.</i>	52
2.2	<i>Vue en coupe du système cryogénique d'HFI.</i>	53
2.3	<i>Représentation schématique du Sorption Cooler.</i>	54
2.4	<i>Le module de service de Planck (SVM).</i>	54
2.5	<i>Gauche : Dessin du Sorption Cooler. Droite : Photographie des deux Sorption Cooler de Planck durant leur intégration sur les panneaux du SVM.</i>	55
2.6	<i>Représentation schématique du réfrigérateur à 4K d'HFI.</i>	57
2.7	<i>Représentation schématique d'un réfrigérateur à dilution classique (extrait de [62]).</i>	58
2.8	<i>Représentation schématique du réfrigérateur 0.1K à dilution d'HFI (extrait de [43]).</i>	59
2.9	<i>Capillaires de mélange (extrait de [62]).</i>	59
2.10	<i>Localisation des plots d'Holmium Yttrium (HoY) et des résistances chauffantes PID1 et PID2 sur les deux étages 0.1K d'HFI : platines dilution et bolomètres (extrait de [85]).</i>	60
2.11	<i>Vue en coupe de l'optique froide associée à chaque canal photométrique d'HFI. De gauche à droite : cornets dos à dos à 4K, filtre à 4K, filtres et lentille à 1.6K, filtre à 0.1K, cornet à 0.1K et bolomètre.</i>	61

2.12	<i>Transmissions spectrales mesurées sur plusieurs bolomètres (SWB et PSB) de chaque bande du modèle de vol d'HFI (extrait de [76]).</i>	62
2.13	<i>Représentation schématique d'un bolomètre (d'après J.-P. Torre).</i>	63
2.14	<i>Gauche : Photographie d'un SWB HFI. Droite : Photographie d'un PSB HFI.</i>	65
2.15	<i>Gauche : Photographie des deux absorbeurs et des deux thermistances d'un PSB de type HFI. Droite : Orientation des PSBs dans le plan focal d'HFI.</i>	65
2.16	<i>Gauche : Photographie des cornets à 4K d'HFI vus de face. Droite : Dénomination et coordonnées des 36 cornets à 4K d'HFI.</i>	66
2.17	<i>Puissances optiques incidentes pour les longueur d'onde d'observation d'HFI (entre 0.35 et 3 mm). Rouge : Puissance totale P_r. Orange : Emission thermique du télescope. Vert : Emission de l'étage à 4K. Violet : Emissions astrophysiques (CMB+Poussières). Bleu : Emission de l'étage à 1.6K. Les traits jaunes verticaux correspondent aux longueurs d'onde centrale des 6 bandes photométriques d'HFI.</i>	67
2.18	<i>Schéma électronique d'un canal de la chaîne de lecture d'HFI.</i>	70
2.19	<i>Signal aux bornes d'un bolomètres d'HFI polarisé avec un courant en créneau par le REU. Le signal est représenté ici pour une période de modulation de valeur f_{mod}.</i>	72
2.20	<i>Localisation de quelques thermomètres fins placés sur les étages cryogéniques d'HFI pour son contrôle thermique.</i>	74
2.21	<i>Gauche : Localisation des quatre thermomètres fins placés sur la platine 4K supportant les cornets d'HFI. Droite : Localisation des deux thermomètres fins situés sur les côtés de la boîte 4K.</i>	74
2.22	<i>Gauche : Localisation des deux thermomètres fins placés sur la platine 1.6K supportant les filtres 1.6K d'HFI. Droite : Localisation des deux thermomètres fins situés sur les côtés de la boîte 1.6K.</i>	75
2.23	<i>Gauche : Localisation des quatre thermomètres fins placés sur la platine bolomètre. Droite : Localisation des deux thermomètres fins placés sur la platine dilution.</i>	75
2.24	<i>Localisation des thermomètres Cernox sur HFI.</i>	76
2.25	<i>Capacité calorifique de l'Holmium en fonction de la température.</i>	76
2.26	<i>Effet de l'Holmium Yttrium pour l'amortissement des fluctuations de température de la platine dilution.</i>	77
2.27	<i>Localisation des ceintures chauffantes sur les étages 4K et 1.6K d'HFI (extrait de [54]).</i>	78
2.28	<i>Photographies des ceintures chauffantes. Gauche : Ceinture de l'étage 1.6K. Droite : Ceinture de l'étage 4K.</i>	78
3.1	<i>Stratégie de traitement des effets systématiques théorique pour un instrument d'observation.</i>	85
3.2	<i>Photographie du cryostat Saturne à l'IAS.</i>	86
3.3	<i>Photographie du dispositif de test optique d'HFI à l'intérieur du cryostat Saturne à l'IAS.</i>	88

3.4	<i>Illustration du phénomène de diaphonie électronique "en tension" sur la chaîne électronique d'HFI. L'existence d'une capacité parasite entre deux canaux entraîne l'apparition d'un signal parasite à la source ponctuelle observée sur le canal voisin.</i>	90
3.5	<i>Haut : Fluctuations intrinsèques du Sorption Cooler mesurées avec 1 point par seconde durant le test PFM1 au CSL (cas 667 secondes de période). Bas : Spectre d'amplitude associé aux fluctuations du Sorption Cooler.</i>	92
3.6	<i>Haut : Fluctuations intrinsèques du réfrigérateur à 4 K mesurées sur le CQM durant le test CSL. Bas : NET associée aux fluctuations du réfrigérateur à 4 K.</i>	93
3.7	<i>Haut : Fluctuations intrinsèques de la tête froide de la dilution mesurées sur le CQM durant le test CSL. Bas : NET associée aux fluctuations du réfrigérateur 0.1K à dilution.</i>	93
4.1	<i>Vue schématique en coupe du cryostat Saturne.</i>	100
4.2	<i>Les trois interfaces d'HFI régulées dans le cryostat Saturne.</i>	100
4.3	<i>Mesures TSS sur le CQM avec une sinusoïde de 16 minutes de période. Les températures des cornets à 4K (PID4C), du côté de la boîte 4K (4KL1), des filtres 1.6K (1.6K1), des étages 0.1K (PID1N et PID2N) et de la température du bolomètre 100-1 (100-1-00) sont représentées ici (voir la partie 2.6 pour la localisation exacte des thermomètres).</i>	102
4.4	<i>Mesures TSS sur le CQM avec un créneau de 12 secondes de période. Les températures des cornets à 4K (PID4C), du côté de la boîte 4K (4KL1), des filtres 1.6K (1.6K1), des étages 0.1K (PID1N et PID2N) et de la température du bolomètre 100-1 (100-1-00) sont représentées ici.</i>	103
4.5	<i>Mesures TSS sur le CQM avec un créneau de 40 secondes de période. Les températures des cornets à 4K (PID4C), du côté de la boîte 4K (4KL1), des filtres 1.6K (1.6K1), des étages 0.1K (PID1N et PID2N) et de la température du bolomètre 100-1 (100-1-00) sont représentées ici.</i>	104
4.6	<i>Zooms successifs sur le signal du bolomètre 353-2 pendant les mesures TSS des étalonnages du CQM.</i>	105
4.7	<i>Analyse spectrale du résultat du stimulus sinusoïdal basse fréquence entre l'arrière et les cornets de l'étage 4K du CQM. En haut à gauche, le signal du thermomètre PID4C placé sur les cornets à 4K est représenté. Le spectre du signal du thermomètre PID4C est ensuite représenté en haut à droite. Le signal du thermomètre tt1340 placé à l'arrière de la boîte à 4 K est représenté en bas à gauche. Son spectre est représenté en bas à droite.</i>	106
4.8	<i>En noir : Mesures TSS avec les créneaux de 40 secondes de période. Les carrés pour le thermomètre tt1340 représentent les points mesurés. En gris : Polynômes d'ordre 2 ajustés sur les dérivées des mesures des thermomètres PID4C et tt1340 durant ce test.</i>	107
4.9	<i>Analyse spectrale du résultat du stimulus en créneau de 40 secondes de période depuis l'arrière vers les cornets de l'étage 4K du CQM. La dérive basse fréquence des deux thermomètres a préalablement été soustraite par ajustement d'un polynôme du second ordre.</i>	107

4.10	<i>Analyse spectrale du résultat du stimulus sinusoïdal basse fréquence entre le thermomètres 4KL1 et les cornets de l'étage 4K du CQM.</i>	108
4.11	<i>Analyse spectrale du résultat du stimulus en créneau de 40 secondes de période depuis le thermomètre 4KL1 jusqu'aux cornets de l'étage 4K du CQM. La dérive basse fréquence des deux thermomètres a été préalablement soustraite par ajustement d'un polynôme du second ordre.</i>	108
4.12	<i>Analyse spectrale du résultat du stimulus en créneau de 12 secondes de période depuis le thermomètre 4KL1 jusqu'aux cornets de l'étage 4K du CQM. La dérive basse fréquence des deux thermomètres a été préalablement soustraite par ajustement d'un polynôme du second ordre.</i>	109
4.13	<i>Fonctions de transfert mesurée sur le CQM entre les côtés et les cornets de la boîte 4K. Les points représentent les mesures. Les profils de filtre ajustés correspondent à des filtres d'ordre 1 avec des constantes de temps $\tau=60$ et 55 secondes pour les load1 et 2 respectivement.</i>	109
4.14	<i>Analyse spectrale de l'effet du 4K sur l'étage 1.6K pour le stimulus sinusoïdale de 16 minutes de période.</i>	110
4.15	<i>Test TSS durant la campagne de caractérisation.</i>	111
4.16	<i>Gauche : Réponse des cornets à 4K du PFM à un stimulus de type marche. Droite : Réponse des cornets à 4K à un stimulus périodique de type sinusoïde à l'arrière de la boîte 4K.</i>	112
4.17	<i>Test des capacités d'amortissement du PID 4K d'HFI.</i>	113
4.18	<i>Gauche : Réponse des filtres 1.6K du PFM à un stimulus de type marche et ajustement en rouge par la réponse d'un filtre d'ordre 1 de gain 8.25% et de fréquence de coude 1/700Hz. Droite : Réponse des filtres 1.6K à un stimulus périodique de type sinusoïde à l'arrière de la boîte 4K.</i>	113
4.19	<i>Test des capacités d'amortissement du PID 1.6K d'HFI.</i>	114
4.20	<i>Gauche : Réponse de la platine dilution du PFM à un stimulus de type marche. Droite : Réponse de la platine dilution à un stimulus périodique de type sinusoïde à l'arrière de la boîte 4K.</i>	115
4.21	<i>Test des capacités d'amortissement du PID1 d'HFI.</i>	115
4.22	<i>Photographie de la chambre à vide du CSL contenant le CQM Planck en septembre 2005.</i>	117
4.23	<i>Haut : Schéma d'intégration du CQM et de son écran à 20 K dans la chambre à vide cryostat du CSL. Bas : Le modèle cryogénique de qualification de Planck, à côté de l'écran à 20 K, avant leur intégration dans la chambre à vide au CSL.</i>	118
4.24	<i>Réponse en Watt du bolomètre 100-1 à un échelon de température sur les cornets à 4 K suivi de deux échelons de température successifs sur les filtres 1.6K durant la mesure EFF sur le CQM à CSL (extrait de [33]). La courbe en noir représente les mesures alors que la courbe en rouge est le resultat d'une somme de correlations linéaires avec le signal du thermomètre 1.6K2, du bolomètre aveugle et le signal du thermomètre 4KH1 filtré par un filtre du premier ordre avec une constante de temps d'une dizaine de secondes.</i>	119
4.25	<i>Constantes de temps entre les fluctuations des cornets à 4K et le signal des bolomètres déduites de la mesure EFF-4K sur le CQM à CSL (extrait de [33]).</i>	120
4.26	<i>Localisation des thermomètres utilisés sur le CQM lors du test CSL.</i>	121

4.27	<i>Réponse des étages cryogéniques d’HFI à un stimulus de type marche sur la tête froide du PACE. Les données HFI (PID4N, 4KL1, 4KL2, tt03, Cernox_4K et Cernox_18K) ne sont pas disponibles durant 15 secondes environ au début de ce test à cause d’une absence momentanée de télémétrie sur la chaîne de mesure.</i>	122
4.28	<i>Mesure PACE passive avec un stimulus de 100 secondes de période (la zone en gris sur le signal de la sonde Di842 correspond à une absence momentanée de données pour ce capteur).</i>	123
4.29	<i>Mesure PACE passive avec un stimulus de 667 secondes de période.</i>	124
4.30	<i>Gauche : Effet induit sur l’étage 4K du CQM par les têtes froides du PACE pour une fluctuation de période 667 secondes et une amplitude de 0.8 K. Droite : NET des signaux des thermomètres PID4C et 4KL1.</i>	125
4.31	<i>Test de régulation des fluctuations induites par le PACE sur l’étage 4K du CQM pour des fluctuations de 100 secondes de période. Gauche : Signal des thermomètres 4KL1 et PID4C. Droite : Spectre des thermomètres 4KL1 et PID4C.</i>	125
4.32	<i>Test de régulation des fluctuations induites par le PACE sur l’étage 4K du CQM pour des fluctuations de 667 secondes de période. Gauche : Signal des thermomètres 4KL1 et PID4C. Droite : Spectre des thermomètres 4KL1 et PID4C.</i>	126
4.33	<i>Test de régulation des fluctuations induites par le PACE sur l’étage 4K du CQM pour des fluctuations de 4000 secondes de période. Gauche : Signal des thermomètres 4KL1 et PID4C. Droite : Spectre des thermomètres 4KL1 et PID4C.</i>	127
4.34	<i>Fonction de transfert d’une régulation PID (extrait de [82]). Pour des paramètres I et D fixés, l’amplitude du pic de régulation dépend de la valeur du gain P (noté ici KcK). Puisque la fonction de transfert vaut 1 dans la partie haute fréquence, l’amplitude du pic de régulation sera nécessairement plus grande que la valeur du bruit blanc haute fréquence sur le thermomètre.</i>	128
4.35	<i>Fonction de transfert entre les têtes froides du Sorption Cooler et les cornets de la boîte à 4 K (Gain=0.053, fc=1/6000 Hz).</i>	129
4.36	<i>Gauche : Fonction de transfert entre les têtes froides du Sorption Cooler et le thermomètre 4KL1 (Gain=0.053, fc=1/6000 Hz). Right : Fonction de transfert entre les têtes froides du Sorption Cooler et le thermomètre 4KL2 (Gain=0.0590, fc=1/6000 Hz).</i>	129
4.37	<i>Gauche : Fonction de transfert associée à l’effet de la tête froide LVHX2 sur les cornets à 4K d’HFI sur le CQM lors du test CSL (Gain=0.013, fc=1/6000 Hz). Droite : Fonction de transfert associée à l’effet de la tête froide LVHX1 sur les cornets à 4K d’HFI sur le CQM lors du test CSL (Gain=0.040, fc=1/6000 Hz).</i>	130
4.38	<i>Meilleure stabilité de température atteinte pour la platine bolomètre durant les étalonnages du CQM dans Saturne (densité spectrale d’amplitude des thermomètres 0.1K2 et PID2R superposés extrait de [83]). Cette stabilité a été atteinte ici sans régulation des PID1 et PID2.</i>	131
4.39	<i>Stabilité de l’étage 0.1K d’HFI durant le test de régulation du 25/03/06.</i>	132
4.40	<i>Stabilités de température de la platine bolomètre avec régulations PID1 & PID2 simultanément.</i>	133
4.41	<i>Stabilités de température de la platine dilution avec régulations PID1 & PID2 simultanément.</i>	134
4.42	<i>Stabilité de température de la platine bolomètre avec régulation du PID1 seulement.</i>	134

4.43	<i>Signal et spectre du thermomètre PID1.6R pendant la campagne CQM (extrait de [83]).</i>	135
4.44	<i>Signal et spectre du thermomètre PID1.6R durant la campagne de caractérisation du PFM dans Saturne. Le pic autour de 0.002 Hz correspond à l'effet induit par les fluctuations de 10 minutes de période observées sur l'écran à 20 K du cryostat Saturne durant les opérations d'HFI. Le plateau à haute fréquence correspond au bruit blanc du thermomètre.</i>	136
4.45	<i>Signal et spectre du thermomètre PID4R pendant la campagne CQM (extrait de [83]).</i>	136
4.46	<i>Signal et spectre du thermomètre PID4R durant la campagne de caractérisation du PFM dans Saturne. Le pic autour de 0.002 Hz correspond à l'effet induit par les fluctuations de 10 minutes de période observées sur l'écran à 20 K du cryostat Saturne durant les opérations d'HFI.</i>	137
4.47	<i>Signal et spectre du thermomètre PID4R durant la campagne d'étalonnage du PFM dans Saturne. Le pic autour de 0.015 Hz correspond à l'effet induit par la régulation de la platine 18 K d'HFI qui a été réglée afin d'atténuer les fluctuations de 10 minutes de période induites par l'écran à 20 K du cryostat Saturne durant les opérations d'HFI.</i>	138
4.48	<i>Les différents chemins thermiques possibles entre les étages cryogéniques de Planck-HFI (extrait de [92]).</i>	139
4.49	<i>Fonction de transfert utilisée pour quantifier l'effet des réfrigérateurs actifs sur les cornets à 4K d'HFI.</i>	141
4.50	<i>Effet du Sorption cooler sur les cornets à 4 K (cas 667 secondes). La zone en jaune représente le domaine de fréquence dans lequel l'effet des fluctuations intrinsèques du réfrigérateur à 4 K peuvent dominer celles du SC.</i>	142
4.51	<i>Effet du Sorption cooler sur les cornets à 4 K (cas 940 secondes). La zone en jaune représente le domaine de fréquence dans lequel l'effet des fluctuations intrinsèques du réfrigérateur à 4 K peuvent dominer celles du SC.</i>	143
5.1	<i>Mesure EXT_Dark1 sur la ceinture 1. Les courbes à gauche représentent les mesures sur les voies 13, 14 et 15. A droite, les spectres associés au signal de chaque mesure est également représenté.</i>	150
5.2	<i>Mesure EXT_Dark1 sur la ceinture 7. Les courbes à gauche représentent les mesures sur les voies 13, 14 et 15. A droite, les spectres associés au signal de chaque mesure est également représenté.</i>	151
5.3	<i>Zoom sur les mesures EXT_Dark1 sur la ceinture 1. La moyenne du signal sur chaque voie a été soustraite préalablement. Le signal en rouge superposé au signal de la voie 15 représente le signal de la voie 14 divisé par 1000.</i>	152
5.4	<i>Test de détection de la diaphonie en tension sur un bolomètre aveugle par la méthode d'analyse spectrale.</i>	153
5.5	<i>Mesure EXT_Dark1 sur la ceinture 1. Les canaux 05, 13, 23 et 24 présentent un pic de diaphonie à 2.5 Hz.</i>	154
5.6	<i>Mesure EXT_Dark3 sur la ceinture 1.</i>	155
5.7	<i>Mesure EXT_Dark3 sur la ceinture 1 avant (haut) et après (bas) déglitchage des données du canal 15.</i>	156

5.8	<i>Spectre des canaux 14 et 15 avant et après déglitchage du signal de la voie 15. Les spectres sont représentés entre 0.7 et 80Hz avec ou sans lissage des données de la voie 15. Les lignes rouge correspondent à un niveau de bruit de $10 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$.</i>	157
5.9	<i>Spectre des canaux 74 et 75 après déglitchage du signal de la voie 75. Les spectres sont représentés entre 0.7 et 80Hz avec lissage des données pour la voie 75. Les lignes rouges correspondent à un niveau de bruit de $10 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$.</i>	157
5.10	<i>Séquence de calibration EXT en courant pour les voies bolométriques du modèle de vol d'HFI.</i>	160
5.11	<i>Tension en Volt en fonction du numéro d'échantillon de mesure pour les canaux électroniques de la ceinture 9 reconstruit dans la base de donnée d'étalonnage d'HFI durant les mesures de diaphonie en courant sur la voie 94. Des signaux de diaphonie électronique peuvent être distingués sur les voies 90, 92, 93 et 95. L'amplitude des signaux de diaphonie dépend de l'éloignement des canaux affectés par rapport à la voie 94. L'effet de diaphonie est positif pour les voies 90 et 92 alors qu'il est négatif pour les voies 93 et 95 voisines de la voies 94.</i>	161
6.1	<i>Schéma fonctionnel de la chaîne de régulation PID à simuler.</i>	168
6.2	<i>Modèle SIMULINK de la chaîne de régulation PID de l'étage 4K.</i>	169
6.3	<i>Modèle thermique utilisé dans la simulation SIMULINK de la chaîne de régulation PID de l'étage 4K.</i>	170
6.4	<i>Mesures de référence réalisées sur le PFM et utilisées pour tester la simulation SIMULINK de la chaîne de régulation PID de l'étage 4K.</i>	172
6.5	<i>Génération du vecteur de bruit sur le thermomètre PID4N dans la simulation. Le signal smoothé du thermomètre PID4N (milieu) a été soustrait à ce dernier (haut) afin de ne garder qu'un vecteur essentiellement constitué de bruit (bas). Ce vecteur de bruit est ensuite ajouté au signal du thermomètre dans la simulation pour simuler le bruit du thermomètre.</i>	173
6.6	<i>Résultat de la simulation SIMULINK de la chaîne de régulation PID de l'étage à 4 K.</i>	174
6.7	<i>Résultat de la simulation SIMULINK de la chaîne de régulation PID de l'étage à 4 K.</i>	175
6.8	<i>Résultat de la simulation SIMULINK de la chaîne de régulation PID de l'étage à 4 K sans bruit sur le thermomètre PID4N.</i>	176
6.9	<i>Résultat de la simulation SIMULINK pour les côtés de la boîte à 4 K comparé aux mesures des thermomètres 4KL1 et 4KL2.</i>	177
7.1	<i>Mesures (en bleu) de la réponse de l'étage à 4 K du PFM (figure du bas) à un échelon thermique sur l'étage 18K (figure du haut) dans le cryostat Saturne. Le signal en rouge correspond au filtrage du signal d'entrée par un filtre du premier ordre dont le gain et la fréquence de coude ont été choisis pour ajuster au mieux le signal de sortie du système (Filtrage réalisé avec le logiciel SIMULINK). Le comportement du système thermique étudié ici n'est pas tout à fait celui d'un filtre du premier ordre mais on voit qu'il s'approche assez bien par ce type de filtre.</i>	181

7.2	<i>Gauche : Modèle thermique IDEAS de la boîte à 4K d'HFI. Droite : Désignation et localisation des éléments du maillage IDEAS associés aux 36 cornets dos-à-dos sur la platine 4K.</i>	182
7.3	<i>Gauche : Résultat en statique du modèle thermique IDEAS de la boîte 4K. Droite : Résultat en statique du modèle thermique IDEAS pour la platine 4K. . .</i>	182
7.4	<i>Haut : Fluctuations de température LVHX1 mesurées sur le modèle de vol du Sorption Cooler au JPL. Milieu : Fluctuations injectées à l'arrière de la boîte 4K dans le modèle IDEAS de TIPS. Bas : Vecteur température pour le thermomètre PID4C, calculé par le modèle IDEAS de l'étage 4K.</i>	183
7.5	<i>Le module DPC TIPS interfacé avec le logiciel ProC du DPC Planck.</i>	184
7.6	<i>Les 5 TOIs de sortie du module tips_photom en Volt sont représentées ici à gauche en fonction du numéro d'échantillon simulé. A droite, le rapport entre les TOIs de sortie de tips_photom et les vecteurs de température issus du modèle IDEAS ont été tracés afin d'illustrer la relation non linéaire existant entre la fluctuation de température des cornets à 4K et les effets induits sur les bolomètres, qui ont été simulés avec le module tips_photom.</i>	184
7.7	<i>Résultat des simulations TIPS : Effet thermique de l'étage à 4 K superposé au signal des fluctuations du CMB pour 5 bolomètres d'HFI entre 100 et 545 GHz pour une durée de 4000 secondes avec des données échantillonnées à 200 Hz. . . .</i>	185
7.8	<i>Effet des fluctuations de température du PACE sur le signal des bolomètres du CQM durant le test CSL et signaux des thermomètres PID4C et PID2N correspondants.</i>	187
7.9	<i>Signaux du bolomètre 143-1b, du thermomètre 4K (PID4C) et du thermomètre 0.1K (PID2N) utilisés pour tester la correction par regression linéaire des effet du 4K et du 0.1K. La moyenne des trois vecteurs a été soustraite préalablement.</i>	188
7.10	<i>Haut : Modèle des effets thermiques soustrait (en blanc), superposé au signal du bolomètre 143-1b. Bas : Signal résiduel du bolomètre après correction des effets thermiques du 4K et du 0.1K.</i>	189
7.11	<i>Haut : Spectre du signal du bolomètre 143-1b avant correction. Bas : Spectre du signal résiduel du bolomètre après correction des effets thermiques du 4K et du 0.1K. Le pic à 40 Hz visible sur les deux bolomètres est lié à la micro-phonie induite par le réfrigérateur à 4 K du CQM.</i>	189
7.12	<i>Localisation des bolomètres (B1 et B2) dont la température doit être prédite par un réseau de neurones à partir des thermomètres (T1 à T4).</i>	191
7.13	<i>Haut : Résultat du modèle. Bas : Résultat du réseau de neurones. Les différence entre la prédiction et le modèle utilisé pour l'apprentissage du réseau n'est pas visible.</i>	191
7.14	<i>Différence entre la prédiction du réseau de neurones et le modèle utilisé pour l'apprentissage.</i>	192

8.1	<i>En haut à gauche : Simulation de la carte d'intensité mesurée par la bande à 240 μm de PILOT en mode "plan galactique". En haut à droite : Simulation de la carte de pourcentage de polarisation mesurée par la bande à 240 μm de PILOT en mode "plan galactique". En bas à gauche : Simulation de la carte d'intensité mesurée par la bande à 240 μm de PILOT en mode "champ profond" sur un cirrus. En bas à droite : Simulation de la carte de pourcentage de polarisation mesurée par la bande à 240 μm de PILOT en mode "champ profond" sur un cirrus.</i>	196
8.2	<i>La plateforme embarquant la charge pointée de PILOT. Le miroir est représenté en vert et le photomètre en rouge.</i>	197
8.3	<i>La charge pointée de PILOT.</i>	198
8.4	<i>Dessin 3D de l'intérieur du cryostat du photomètre et concept optique de PILOT.</i>	199
8.5	<i>Profils spectraux possibles pour les bandes d'observation PILOT (Simulation C. Leroy, 2005). Gauche : Bande SW. Droite : Bande LW.</i>	201
8.6	<i>Photographie des matrices de bolomètres utilisées sur PILOT et localisation des boîtiers des matrices à l'intérieur du photomètre. Chaque pixel est constitué d'un absorbeur carré avec un maillage carré sur lequel est fixé une thermistance. Une thermistance de référence est également disposée sur le côté du pixel qui n'est pas photo-sensible. Le pas entre chaque pixel est de 750 μm. La largeur de l'absorbeur carré est de 680 μm. Chaque matrice est constituée de 1024 pixels répartis sur 36 colonnes et 36 lignes. Sur chacune des deux matrices, chaque moitié de matrice est constituée d'un canal photométrique de 512 pixels à 240 μm et 550 μm.</i>	202
8.7	<i>Sensibilité de l'expérience PILOT en MJy/sr pour des rapports S/N de 3, 5 et 10 pour les deux bandes PILOT à 240 μm et 550 μm pour différentes couvertures du ciel.</i>	206
8.8	<i>Vue schématique de la source de calibration PCAL d'Herchel-SPIRE.</i>	208
8.9	<i>Schéma de la stratégie de balayage du ciel par PILOT. Chaque matrice et ses deux voies photométriques balayent dans un premier sens une direction sur le ciel avec une première orientation de la lame demi-onde (croix rouge). L'orientation de la lame demi-onde est ensuite changer pour réaliser un second balayage en sens inverse de la même direction sur le ciel (croix verte). A la fin de l'aller-retour, l'ICS est alors allumée (flash jaune). Après avoir changé l'élévation du pointage et l'orientation de la lame demi-onde, un balayage parallèle au précédent est ensuite réalisé suivi d'un autre allumage de l'ICS et ainsi de suite pour plusieurs élévations successives.</i>	208
8.10	<i>Configuration optique entre M3 et le plan focal de détection. L'ouverture de l'ICS et le miroir M3 se trouvent à gauche de la figure. Le rayonnement émis par l'ICS passe ensuite à travers la lentille L1, la lame demi-onde, le Lyot-Stop et la lentille L2. La surface de la matrice de bolomètre est représentée par la surface plate à droite de la figure.</i>	209
C.1	<i>Historique des température des thermomètres 100mK et puissances injectées par les régulations correspondantes durant la campagne d'étalonnage PFM-CAL d'HFI (semaine1)</i>	248

C.2	Historique des température des thermomètres 4K, 1.6K et puissances injectées par les régulations correspondantes durant la campagne d'étalonnage PFM-CAL d'HFI (semaine1)	249
C.3	Historique des température des thermomètres 100mK et puissances injectées par les régulations correspondantes durant la campagne d'étalonnage PFM-CAL d'HFI (semaine2)	250
C.4	Historique des température des thermomètres 4K, 1.6K et puissances injectées par les régulations correspondantes durant la campagne d'étalonnage PFM-CAL d'HFI (semaine2)	251
C.5	Historique des température des thermomètres 100mK et puissances injectées par les régulations correspondantes durant la campagne d'étalonnage PFM-CAL d'HFI (semaine3)	252
C.6	Historique des température des thermomètres 4K, 1.6K et puissances injectées par les régulations correspondantes durant la campagne d'étalonnage PFM-CAL d'HFI (semaine3)	253

Bibliographie

- [1] C. L. Bennett, M. Bay, M. Halpern, G. Hinshaw, C. Jackson, N. Jarosik, A. Kogut, M. Limon, S. S. Meyer, L. Page, D. N. Spergel, G. S. Tucker, D. T. Wilkinson, E. Wollack, and E. L. Wright. The Microwave Anisotropy Probe Mission. *ApJ*, 583 :1–23, January 2003.
- [2] C. L. Bennett, M. Halpern, G. Hinshaw, N. Jarosik, A. Kogut, M. Limon, S. S. Meyer, L. Page, D. N. Spergel, G. S. Tucker, E. Wollack, E. L. Wright, C. Barnes, M. R. Greason, R. S. Hill, E. Komatsu, M. R. Nolta, N. Odegard, H. V. Peiris, L. Verde, and J. L. Weiland. First-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations : Preliminary Maps and Basic Results. *ApJS*, 148 :1–27, September 2003.
- [3] C. L. Bennett, R. S. Hill, G. Hinshaw, M. R. Nolta, N. Odegard, L. Page, D. N. Spergel, J. L. Weiland, E. L. Wright, M. Halpern, N. Jarosik, A. Kogut, M. Limon, S. S. Meyer, G. S. Tucker, and E. Wollack. First-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations : Foreground Emission. *ApJS*, 148 :97–117, September 2003.
- [4] A. Benoît, P. Ade, A. Amblard, R. Ansari, É. Aubourg, S. Bargout, J. G. Bartlett, J.-P. Bernard, R. S. Bhatia, A. Blanchard, J. J. Bock, A. Boscaleri, F. R. Bouchet, A. Bourrachot, P. Camus, F. Couchot, P. de Bernardis, J. Delabrouille, F.-X. Désert, O. Doré, M. Douspis, L. Dumoulin, X. Dupac, P. Filliatre, P. Fosalba, K. Ganga, F. Gannaway, B. Gautier, M. Giard, Y. Giraud-Héraud, R. Gispert, L. Guglielmi, J.-C. Hamilton, S. Hanany, S. Henrot-Versillé, J. Kaplan, G. Lagache, J.-M. Lamarre, A. E. Lange, J. F. Macías-Pérez, K. Madet, B. Maffei, C. Magneville, D. P. Marrone, S. Masi, F. Mayet, A. Murphy, F. Naraghi, F. Nati, G. Patanchon, G. Perrin, M. Piat, N. Ponthieu, S. Prunet, J.-L. Puget, C. Renault, C. Rosset, D. Santos, A. Starobinsky, I. Strukov, R. V. Sudiwala, R. Teyssier, M. Tristram, C. Tucker, J.-C. Vanel, D. Vibert, E. Wakui, and D. Yvon. Cosmological constraints from Archeops. *A&A*, 399 :L25–L30, March 2003.
- [5] A. Benoît, P. Ade, A. Amblard, R. Ansari, É. Aubourg, S. Bargout, J. G. Bartlett, J.-P. Bernard, R. S. Bhatia, A. Blanchard, J. J. Bock, A. Boscaleri, F. R. Bouchet, A. Bourrachot, P. Camus, F. Couchot, P. de Bernardis, J. Delabrouille, F.-X. Désert, O. Doré, M. Douspis, L. Dumoulin, X. Dupac, P. Filliatre, P. Fosalba, K. Ganga, F. Gannaway, B. Gautier, M. Giard, Y. Giraud-Héraud, R. Gispert, L. Guglielmi, J.-C. Hamilton, S. Hanany, S. Henrot-Versillé, J. Kaplan, G. Lagache, J.-M. Lamarre, A. E. Lange, J. F. Macías-Pérez, K. Madet, B. Maffei, C. Magneville, D. P. Marrone, S. Masi, F. Mayet, A. Murphy, F. Naraghi, F. Nati, G. Patanchon, G. Perrin, M. Piat, N. Ponthieu, S. Prunet, J.-L. Puget, C. Renault, C. Rosset, D. Santos, A. Starobinsky, I. Strukov, R. V. Sudiwala, R. Teyssier, M. Tristram, C. Tucker, J.-C. Vanel, D. Vibert, E. Wakui, and D. Yvon. First detection

- of polarization of the submillimetre diffuse galactic dust emission by Archeops. *A&A*, 424 :571–582, September 2004.
- [6] A. Benoît, P. Ade, A. Amblard, R. Ansari, É. Aubourg, S. Bargout, J. G. Bartlett, J.-P. Bernard, R. S. Bhatia, A. Blanchard, J. J. Bock, A. Boscaleri, F. R. Bouchet, A. Bourrachot, P. Camus, F. Couchot, P. de Bernardis, J. Delabrouille, F.-X. Désert, O. Doré, M. Douspis, L. Dumoulin, X. Dupac, P. Filliatre, P. Fosalba, K. Ganga, F. Gannaway, B. Gautier, M. Giard, Y. Giraud-Héraud, R. Gispert, L. Guglielmi, J.-C. Hamilton, S. Hanany, S. Henrot-Versillé, J. Kaplan, G. Lagache, J.-M. Lamarre, A. E. Lange, J. F. Macías-Pérez, K. Madet, B. Maffei, C. Magneville, D. P. Marrone, S. Masi, F. Mayet, A. Murphy, F. Naraghi, F. Nati, G. Patanchon, G. Perrin, M. Piat, N. Ponthieu, S. Prunet, J.-L. Puget, C. Renault, C. Rosset, D. Santos, A. Starobinsky, I. Strukov, R. V. Sudiwala, R. Teyssier, M. Tristram, C. Tucker, J.-C. Vanel, D. Vibert, E. Wakui, and D. Yvon. The cosmic microwave background anisotropy power spectrum measured by Archeops. *A&A*, 399 :L19–L23, March 2003.
- [7] A. Benoît, P. Ade, A. Amblard, R. Ansari, E. Aubourg, J. Bartlett, J.-P. Bernard, R. S. Bhatia, A. Blanchard, J. J. Bock, A. Boscaleri, F. R. Bouchet, A. Bourrachot, P. Camus, F. Couchot, P. de Bernardis, J. Delabrouille, F.-X. Désert, O. Doré, M. Douspis, L. Dumoulin, X. Dupac, P. Filliatre, K. Ganga, F. Gannaway, B. Gautier, M. Giard, Y. Giraud-Héraud, R. Gispert, L. Guglielmi, J.-C. Hamilton, S. Hanany, S. Henrot-Versillé, V. V. Hristov, J. Kaplan, G. Lagache, J.-M. Lamarre, A. E. Lange, K. Madet, B. Maffei, D. Marrone, S. Masi, J. A. Murphy, F. Naraghi, F. Nati, G. Perrin, M. Piat, J.-L. Puget, D. Santos, R. V. Sudiwala, J.-C. Vanel, D. Vibert, E. Wakui, and D. Yvon. Archeops : a high resolution, large sky coverage balloon experiment for mapping cosmic microwave background anisotropies. *Astroparticle Physics*, 17 :101–124, May 2002.
- [8] A. Benoit and S. Pujol. Dilution refrigerator for space applications with a cryocooler. *Cryogenics*, 1994.
- [9] J.-P. Bernard. In-flight Measurements of the Far Sidelobes and Straylight. *Planck Optics Workshop presentation*, September 2006.
- [10] J.-P. Bernard, P. Ade, P. Debernardis, M. Giard, M. Griffin, P. Hargrave, A. Laurens, B. Leriche, C. Leroy, Y. Longval, C. Marty, S. Madden, B. Maffei, S. Masi, C. Meny, M.-A. Miville-Deschênes, J. Narbonne, L. Nati, F. Pajot, G. Pisano, E. Pointecouteau, N. Ponthieu, I. Ristorcelli, L. Rodriguez, G. Roudil, M. Salatino, and G. Savini. PILOT : Measuring polarization in the Interstellar Medium. In *EAS Publications Series*, pages 189–203, 2007.
- [11] J.-P. Bernard, C. Leroy, N. Ponthieu, and E. Pointecouteau. Polarisation measurement with the PILOT experiment. *Note interne PILOT. Ref : PILOT-NT-041-001-ALL*, February 2007.
- [12] J.-Ph. Bernard, C. Leroy, C. Meny, M. Griffin, and P. Hargrave. Internal Calibration Source Definition Document. *Document de Revue de Conception Système*, March 2006.
- [13] P. Bhandari, M. Prina, R. C. Bowman, C. Paine, D. Pearson, and A. Nash. 20 K Continuous Cycle Sorption Coolers for the Planck Flight Mission. In J. Waynert, J. Barclay, S. Breon, E. Daly, J. Demko, M. Dipirro, J. R. Hull, P. J. Kelley, P. Kittel, A. Klebaner, J. Lock, J. Maddocks, J. Pfothenhauer, C. Rey, Q.-S. Shu, S. van Sciver, J. G. Weisend,

- J. Zbasnik, and A. Zeller, editors, *American Institute of Physics Conference Series*, pages 1613–1620, June 2004.
- [14] J. J. Bock, A. E. Lange, M. K. Parikh, and M. L. Fischer. Emissivity measurements of reflective surfaces at near-millimeter wavelengths. *Appl. Opt.*, 34 :4812–4816, August 1995.
- [15] F.-R. Bouchet. *Eintein aujourd’hui : Cosmologie*. Savoirs Actuels, Paris : Inter Editions, Ed. du CNRS, 2005.
- [16] T. W. Bradshaw and A. H. Orłowska. Technology developments on the 4 K cooling system for ‘Planck’ and FIRST. In T.-D. Guyenne, editor, *ESA SP-400 : Sixth European Symposium on Space Environmental Control Systems*, pages 465–+, 1997.
- [17] A. Catalano and al. EFF Test Report. *HFI-PFM Calibration Report Annex*, November 2006.
- [18] A. Coulais and al. Time constants measurements with ELS. *HFI-PFM Calibration Report Annex*, November 2006.
- [19] W. de Sitter. Einstein’s theory of gravitation and its astronomical consequences. Third paper. *MNRAS*, 78 :3–28, November 1917.
- [20] F.-X. Desert. Transfer function for HFI TOI. *Planck-HFI internal Note*, February 2005.
- [21] F.-X. Desert, F. Boulanger, and J. L. Puget. Interstellar dust models for extinction and emission. *A&A*, 237 :215–236, October 1990.
- [22] F.-X. Désert and al. HFI Noise properties. *HFI-PFM Calibration Report Annex*, November 2006.
- [23] F.-X. Désert and al. IV curves measurements test report. *HFI-PFM Calibration Report Annex*, November 2006.
- [24] X. Dupac and J. Tauber. Scanning strategy for mapping the Cosmic Microwave Background anisotropies with Planck. *A&A*, 430 :363–371, January 2005.
- [25] A. Einstein. Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie. *Annalen der Physik*, 49 :769–822, 1916.
- [26] D. J. Fixsen, E. S. Cheng, D. A. Cottingham, R. E. Eplee, Jr., T. Hewagama, R. B. Isaacman, K. A. Jensen, J. C. Mather, D. L. Massa, S. S. Meyer, P. D. Noerdlinger, S. M. Read, L. P. Rosen, R. A. Shafer, A. R. Trenholme, R. Weiss, C. L. Bennett, N. W. Boggess, D. T. Wilkinson, and E. L. Wright. Calibration of the COBE FIRAS instrument. *ApJ*, 420 :457–473, January 1994.
- [27] D. J. Fixsen, G. Hinshaw, C. L. Bennett, and J. C. Mather. The Spectrum of the Cosmic Microwave Background Anisotropy from the Combined COBE FIRAS and DMR Observations. *ApJ*, 486 :623–+, September 1997.
- [28] Site Web NASA LAMBDA (Legacy Archive for Microwave background Data Analysis). <http://lambda.gsfc.nasa.gov/>.
- [29] S. Gaertner, A. Benoit, J.-M. Lamarre, M. Giard, J.-L. Bret, J.-P. Chabaud, F.-X. Desert, J.-P. Faure, G. Jegoudez, J. Lande, J. Leblanc, J.-P. Lepeltier, J. Narbonne, M. Piat, R. Pons, G. Serra, and G. Simiand. A new readout system for bolometers with improved low frequency stability. *A&AS*, 126 :151–160, November 1997.

- [30] G. Gamow. The origin of elements and separation of galaxies. *Phys. Rev.*, 74 :505–506, August 1948.
- [31] E. Gavila. Planck PLM Thermal Analyses. *Document Alcatel Alenia Space. Ref : H-P-3-ASPI-AN-0330*.
- [32] A. H. Guth. Inflationary universe : A possible solution to the horizon and flatness problems. *Phys. Rev. D*, 23 :347–356, January 1981.
- [33] G. Guyot and al. HFI CQM CSL cryotestreport. *Planck-HFI internal Note. Ref : TR-PH600734-IAS*, February 2006.
- [34] S. Hanany, P. Ade, A. Balbi, J. Bock, J. Borrill, A. Boscaleri, P. de Bernardis, P. G. Ferreira, V. V. Hristov, A. H. Jaffe, A. E. Lange, A. T. Lee, P. D. Mauskopf, C. B. Netterfield, S. Oh, E. Pascale, B. Rabii, P. L. Richards, G. F. Smoot, R. Stompor, C. D. Winant, and J. H. P. Wu. MAXIMA-1 : A Measurement of the Cosmic Microwave Background Anisotropy on Angular Scales of 10° -5 deg. *ApJ*, 545 :L5–L9, December 2000.
- [35] P. C. Hargrave, J. W. Beeman, P. A. Collins, I. Didschuns, M. J. Griffin, B. Kiernan, and G. Pisano. In-flight calibration sources for Herschel-SPIRE. In J. C. Mather, editor, *IR Space Telescopes and Instruments. Edited by John C. Mather . Proceedings of the SPIE, Volume 4850, pp. 638-649 (2003)*., pages 638–649, March 2003.
- [36] S. Henrot-Versillé. Archeops et Planck-HFI : Etude des systématiques pour l’analyse du fond diffus cosmologique. *Mémoire d’Habilitation à Diriger des Recherches*, June 2006.
- [37] G. Hinshaw, M. R. Nolta, C. L. Bennett, R. Bean, O. Doré, M. R. Greason, M. Halpern, R. S. Hill, N. Jarosik, A. Kogut, E. Komatsu, M. Limon, N. Odegard, S. S. Meyer, L. Page, H. V. Peiris, D. N. Spergel, G. S. Tucker, L. Verde, J. L. Weiland, E. Wollack, and E. L. Wright. Three-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations : Temperature Analysis. *ArXiv Astrophysics e-prints*, March 2006.
- [38] W Holmes and al. Dark Characterization of Bolometers for the Planck High Frequency Instrument, (en préparation).
- [39] E. Hubble and M. L. Humason. The Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae. *ApJ*, 74 :43–+, July 1931.
- [40] N. Jarosik, C. Barnes, M. R. Greason, R. S. Hill, M. R. Nolta, N. Odegard, J. L. Weiland, R. Bean, C. L. Bennett, O. Doré, M. Halpern, G. Hinshaw, A. Kogut, E. Komatsu, M. Limon, S. S. Meyer, L. Page, D. N. Spergel, G. S. Tucker, E. Wollack, and E. L. Wright. Three-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations : Beam Profiles, Data Processing, Radiometer Characterization and Systematic Error Limits. *ArXiv Astrophysics e-prints*, March 2006.
- [41] L. Knox. Determination of inflationary observables by cosmic microwave background anisotropy experiments. *Phys. Rev. D*, 52 :4307–4318, October 1995.
- [42] J. M. Lamarre. Photon noise in photometric instruments at far-infrared and submillimeter wavelengths. *Appl. Opt.*, 25 :870–876, March 1986.
- [43] J.-M. Lamarre and al. Planck HFI Instrument Baseline Design Volume 2. *Planck-HFI internal Note. Ref : TD-PH214-100059-IAS*, December 2004.

- [44] J.-M. Lamarre, A. Catalano, M. Piat, and V. Yurchenko. Signal and noise simple models of the High Frequency Instrument. *Planck-HFI internal Note*, June 2005.
- [45] J. M. Lamarre, B. Maffei, P. A. R. Ade, M. Piat, J. Bock, J. L. Puget, P. de Bernardis, M. Giard, A. Lange, A. Murphy, J. P. Torre, A. Benoit, R. Bhatia, F. R. Bouchet, R. Sudiwala, and V. Yurchenko. The high frequency instrument of Planck : Requirements and design. In M. de Petris and M. Gervasi, editors, *AIP Conf. Proc. 616 : Experimental Cosmology at Millimetre Wavelengths*, pages 213–218, May 2002.
- [46] J.-M. Lamarre and M. Piat. HFI Temperature Stability Requirements. *Planck-HFI internal Note. Ref : SR-PH211-990141-IAS*, April 1999.
- [47] J. M. Lamarre, J. L. Puget, F. Bouchet, P. A. R. Ade, A. Benoit, J. P. Bernard, J. Bock, P. de Bernardis, J. Charra, F. Couchot, J. Delabrouille, G. Efstathiou, M. Giard, G. Guyot, A. Lange, B. Maffei, A. Murphy, F. Pajot, M. Piat, I. Ristorcelli, D. Santos, R. Sudiwala, J. F. Sygnet, J. P. Torre, V. Yurchenko, and D. Yvon. The Planck High Frequency Instrument, a third generation CMB experiment, and a full sky submillimeter survey. *New Astronomy Review*, 47 :1017–1024, December 2003.
- [48] J.-M. Lamarre, J. L. Puget, M. Piat, P. A. R. Ade, A. E. Lange, A. Benoit, P. De Bernardis, F. R. Bouchet, J. J. Bock, F. X. Desert, R. J. Emery, M. Giard, B. Maffei, J. A. Murphy, J.-P. Torre, R. Bhatia, R. V. Sudiwala, and V. Yurchenko. Planck high-frequency instrument. In J. C. Mather, editor, *IR Space Telescopes and Instruments. Edited by John C. Mather . Proceedings of the SPIE, Volume 4850, pp. 730-739 (2003).*, pages 730–739, March 2003.
- [49] A. E. Lange, P. A. Ade, J. J. Bock, J. R. Bond, J. Borrill, A. Boscaleri, K. Coble, B. P. Crill, P. de Bernardis, P. Farese, P. Ferreira, K. Ganga, M. Giacometti, E. Hivon, V. V. Hristov, A. Iacoangeli, A. H. Jaffe, L. Martinis, S. Masi, P. D. Mauskopf, A. Melchiorri, T. Montroy, C. B. Netterfield, E. Pascale, F. Piacentini, D. Pogosyan, S. Prunet, S. Rao, G. Romeo, J. E. Ruhl, F. Scaramuzzi, and D. Sforna. Cosmological parameters from the first results of Boomerang. *Phys. Rev. D*, 63(4) :042001–+, February 2001.
- [50] C. R. Lawrence. Ongoing and future ground-based and balloon-borne CMB temperature and polarization experiments. In *Proceedings of "CMB and Physics of the Early Universe" (CMB2006). 20-22 April 2006, Ischia, Italy. Editorial board : Gianfranco De Zotti (Chairman), Luigi Danese, Charles R. Lawrence, Malcolm Longair, Nazzareno Mandolesi, Igor Novikov, Bruce Partridge, Jean-Loup Puget, José Luis Sanz, David Spergel, Rashid Sunyaev, Nicola Vittorio, Sergio Volonté, p.12, 2006.*
- [51] G. Lemaître. Expansion of the universe, The expanding universe. *MNRAS*, 91 :490–501, March 1931.
- [52] P. Lena. *Astrophysique. Methodes physiques de l'observation*. Savoirs Actuels, Paris : Inter Editions, Ed. du CNRS, 1996.
- [53] C. Leroy. Modélisation thermique par réseaux de neurones appliquée à la mission Planck. *Rapport de stage de DEA*, June 2003.
- [54] C. Leroy, A. Arondel, J.-P. Bernard, H. Carfantan, C. Dumesnil, J.-J. Fourmond, G. Guyot, J.-M. Lamarre, F. Pajot, M. Piat, J.-L. Puget, J.-F. Trouilhet, and S. Varesi. Performances of the Planck-HFI cryogenic thermal control system. In *Space Telescopes*

- and Instrumentation I : Optical, Infrared, and Millimeter. Edited by John C. Mather, Howard A. MacEwen, and Mattheus W. M. de Graauw. *Proceedings of the SPIE, Volume 6265*, pp. 626508 (2006)., July 2006.
- [55] C. Leroy, J.-P. Bernard, and J.-F. Trouilhet. Thermal Modelling with Neural Network applied to the Planck Space Mission. In *Proceedings of the IEEE XIII Workshop on Neural Networks For Signal Processing*, 2003.
- [56] C. Leroy, F. Couchot, M. Giard, Henrot-Versillé, L. Montier, O Perdereau, E. Pointecouteau, C. Rosset, R. Sudiwala, and M. Tristram. HFI PFM-CAL Calibration Report : Electronic Cross-Talk (EXT). *HFI-PFM Calibration Report Annex*, November 2006.
- [57] C. Leroy, F. Lejdström, and J.-L. Puget. CQM Thermal Stages Sensibility Measurement. *HFI-CQM Calibration Report*, July 2005.
- [58] C. Leroy and C. Meny. PILOT Photometric Model. *Document de Revue de Conception Système*, March 2006.
- [59] C. Leroy, L. Montier, S. Henrot-Versillé, and M. Giard. Report on CQM Electrical Cross-talk test. *HFI-CQM Calibration Report*, July 2005.
- [60] C. Leroy, S. Varesi, J.-L. Puget, M. Piat, and J.-Ph. Bernard. Thermal transfer functions within the FPU. *HFI-PFM Calibration Report Annex*, November 2006.
- [61] J. F. Macias-Perez, G. Lagache, B. Maffei, P. Ade, A. Amblard, R. Ansari, E. Aubourg, J. Aumont, S. Bargout, J. Bartlett, A. Benoit, J. P. Bernard, R. Bhatia, A. Blanchard, J. J. Bock, A. Boscaleri, F. R. Bouchet, A. Bourrachot, P. Camus, J. . Cardoso, F. Couchot, P. de Bernardis, J. Delabrouille, F. X. Desert, O. Dore, M. Douspis, L. Dumoulin, X. Dupac, P. Filliatre, P. Fosalba, K. Ganga, F. Gannaway, B. Gautier, M. Giard, Y. Giraud Heraud, R. Gispert, L. Guglielmi, J. C. Hamilton, S. Hanany, S. Henrot Versille, V. Hristov, J. Kaplan, J. . Lamarre, A. E. Lange, K. Madet, C. Magneville, D. P. Marone, S. Masi, F. Mayet, J. A. Murphy, F. Naraghi, F. Nati, G. Patanchon, O. Perdereau, G. P. S. Plaszczyński, M. Piat, N. Ponthieu, S. Prunet, J. L. Puget, C. Renault, C. Rosset, D. Santos, A. Starobinsky, I. Strukov, R. V. Sudiwala, R. Teyssier, M. Tristram, C. Tucker, J. C. Vanel, D. Vibert, E. Wakui, and D. Yvon. Archeops In-flight Performance, Data Processing and Map Making. *ArXiv Astrophysics e-prints*, March 2006.
- [62] K. Madet. Mesure du Rayonnement Cosmologique : Préparation et Etalonnages des Instruments Archeops et Planck. *Ph.D. Thesis*, September 2002.
- [63] B. Maffei, P. A. Ade, J. J. Bock, J. Brossard, E. M. Gleeson, J.-M. Lamarre, A. E. Lange, Y.-Y. Longval, J. A. Murphy, G. Pisano, J.-L. Puget, I. Ristorcelli, R. V. Sudiwala, and V. B. Yurchenko. Planck-hfi focal plane concept. In J. C. Mather, editor, *Microwave and Terahertz Photonics. Edited by Stohr, Andreas; Jager, Dieter; Iezekiel, Stavros. Proceedings of the SPIE, Volume 5487*, pp. 523-531 (2004)., pages 523–531, October 2004.
- [64] M. Maisonneuve. Modélisation du système de contrôle thermique de l'instrument haute fréquence du satellite PLANCK. *Rapport de stage INSA 4ème année*, September 2006.
- [65] R. Mandolesi, G. Morgante, and F. Villa. Low Frequency Instrument of Planck. In J. C. Mather, editor, *IR Space Telescopes and Instruments. Edited by John C. Mather . Proceedings of the SPIE, Volume 4850*, pp. 722-729 (2003)., pages 722–729, March 2003.
- [66] J. C. Mather. Bolometer noise : nonequilibrium theory. *Appl. Opt.*, 21 :1125–1129, March 1982.

- [67] J. C. Mather, E. S. Cheng, R. E. Eplee, Jr., R. B. Isaacman, S. S. Meyer, R. A. Shafer, R. Weiss, E. L. Wright, C. L. Bennett, N. W. Boggess, E. Dwek, S. Gulkis, M. G. Hauser, M. Janssen, T. Kelsall, P. M. Lubin, S. H. Moseley, Jr., T. L. Murdock, R. F. Silverberg, G. F. Smoot, and D. T. Wilkinson. A preliminary measurement of the cosmic microwave background spectrum by the Cosmic Background Explorer (COBE) satellite. *ApJ*, 354 :L37–L40, May 1990.
- [68] J. C. Mather, D. J. Fixsen, R. A. Shafer, C. Mosier, and D. T. Wilkinson. Calibrator Design for the COBE Far-Infrared Absolute Spectrophotometer (FIRAS). *ApJ*, 512 :511–520, February 1999.
- [69] A. Mennella, M. Bersanelli, B. Cappellini, D. Maino, P. Platania, S. Garavaglia, R. C. Butler, N. Mandolesi, F. Pasian, O. D’Arcangelo, A. Simonetto, and C. Sozzi. The Low Frequency Instrument in the ESA PLANCK mission. In G. Bertin, D. Farina, and R. Pozzoli, editors, *AIP Conf. Proc. 703 : Plasmas in the Laboratory and in the Universe : New Insights and New Challenges*, pages 401–404, April 2004.
- [70] L. Montier. Planck : De l’étalonnage de l’instrument à l’étude des poussières galactiques et intergalactiques. *Ph.D. Thesis*, October 2005.
- [71] G Morgante and al. Planck SCS PFM1 Test Report. *Rapport de stage INSA 4ème année*, June 2006.
- [72] F. Nuti. JFET Box Module Electrical Test Report. September 2004.
- [73] L. Page, G. Hinshaw, E. Komatsu, M. R. Nolta, D. N. Spergel, C. L. Bennett, C. Barnes, R. Bean, O. Doré, M. Halpern, R. S. Hill, N. Jarosik, A. Kogut, M. Limon, S. S. Meyer, N. Odegard, H. V. Peiris, G. S. Tucker, L. Verde, J. L. Weiland, E. Wollack, and E. L. Wright. Three Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations : Polarization Analysis. *ArXiv Astrophysics e-prints*, March 2006.
- [74] L. Page, M. R. Nolta, C. Barnes, C. L. Bennett, M. Halpern, G. Hinshaw, N. Jarosik, A. Kogut, M. Limon, S. S. Meyer, H. V. Peiris, D. N. Spergel, G. S. Tucker, E. Wollack, and E. L. Wright. First-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations : Interpretation of the TT and TE Angular Power Spectrum Peaks. *ApJS*, 148 :233–241, September 2003.
- [75] F. Pajot. Detailed objectives of ground vs in-flight calibration of the Planck/HFI instrument. *Planck Instruments Scientific Review, ESTEC*, November 2006.
- [76] F. Pajot, J.-M. Lamarre, and J.-L. Puget. HFI PFM Calibration Report. *HFI-PFM Calibration Report*, November 2006.
- [77] P. J. E. Peebles. Large-scale background temperature and mass fluctuations due to scale-invariant primeval perturbations. *ApJ*, 263 :L1–L5, December 1982.
- [78] A. A. Penzias and R. W. Wilson. A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s. *ApJ*, 142 :419–421, July 1965.
- [79] O. Perdereau and al. OXT measurements test report. *HFI-PFM Calibration Report Annex*, November 2006.
- [80] O. Perdereau and al. Time constants measurements with CSM. *HFI-PFM Calibration Report Annex*, November 2006.

- [81] S. Perlmutter, G. Aldering, M. della Valle, S. Deustua, R. S. Ellis, S. Fabbro, A. Fruchter, G. Goldhaber, D. E. Groom, I. M. Hook, A. G. Kim, M. Y. Kim, R. A. Knop, C. Lidman, R. G. McMahon, P. Nugent, R. Pain, N. Panagia, C. R. Pennypacker, P. Ruiz-Lapuente, B. Schaefer, and N. Walton. Discovery of a supernova explosion at half the age of the universe. *Nature*, 391 :51–+, January 1998.
- [82] M. Piat. Contributions à la Définition des Besoins scientifiques et des Solutions instrumentales du Projet Planck-HFI. *Ph.D. Thesis*, October 2000.
- [83] M. Piat and P. Granier. Thermometers and PIDs on the CQM. *HFI Calibration Workshop presentation*, April 2005.
- [84] M. Piat, G. Lagache, J. P. Bernard, M. Giard, and J. L. Puget. Cosmic background dipole measurements with the Planck-High Frequency Instrument. *A&A*, 393 :359–368, October 2002.
- [85] M. Piat, J.-M. Lamarre, J. Meissonnier, J.-P. Torre, P. Camus, A. Benoit, J.-P. Crussaire, P. A. R. Ade, J. J. Bock, A. E. Lange, R. Bhatia, B. Maffei, J. L. Puget, and R. V. Sudiwala. Planck-HFI thermal architecture : from requirements to solutions. In J. C. Mather, editor, *IR Space Telescopes and Instruments. Edited by John C. Mather . Proceedings of the SPIE, Volume 4850, pp. 740-748 (2003).*, pages 740–748, March 2003.
- [86] M. Piat, J. P. Torre, J. M. Lamarre, J. W. Beeman, R. S. Bhatia, B. Leriche, J. P. Crussaire, and F. Langlet. Design and tests of high sensitivity NTD Ge thermometers for the Planck-High Frequency Instrument. *AIP Conf. Proc. 605 : Low Temperature Detectors*, 605 :79–82, February 2002.
- [87] E. Pointecouteau and al. QEC measurements test report. *HFI-PFM Calibration Report Annex*, November 2006.
- [88] N. Ponthieu. Polarisation du Fond diffus cosmologique et de l’Emission des Poussières Galactiques. *Ph.D. Thesis*, July 2003.
- [89] N Ponthieu and al. (en préparation).
- [90] N. Ponthieu and al. EFF-CS2 Test Report. *HFI-PFM Calibration Report Annex*, November 2006.
- [91] N. Ponthieu, J. F. Macías-Pérez, M. Tristram, P. Ade, A. Amblard, R. Ansari, J. Aumont, É. Aubourg, A. Benoît, J.-P. Bernard, A. Blanchard, J. J. Bock, F. R. Bouchet, A. Bourrachot, P. Camus, J.-F. Cardoso, F. Couchot, P. de Bernardis, J. Delabrouille, F.-X. Désert, M. Douspis, L. Dumoulin, P. Filliatre, P. Fosalba, M. Giard, Y. Giraud-Héraud, R. Gispert, J. Grain, L. Guglielmi, J.-C. Hamilton, S. Hanany, S. Henrot-Versillé, J. Kaplan, G. Lagache, A. E. Lange, K. Madet, B. Maffei, S. Masi, F. Mayet, F. Nati, G. Patanchon, O. Perdereau, S. Plaszczyński, M. Piat, S. Prunet, J.-L. Puget, C. Renault, C. Rosset, D. Santos, D. Vibert, and D. Yvon. Temperature and polarization angular power spectra of Galactic dust radiation at 353 GHz as measured by Archeops. *A&A*, 444 :327–336, December 2005.
- [92] J.-L. Puget. HFI cryogenic chain static behaviour. *HFI Core Team WG3-1 Note*, November 2006.
- [93] C. Renault. TIPS Pipeline. *Planck HFI DPC-L2 Meeting*, October 2005.

- [94] C. Rosset. Contribution à la mesure de la polarisation du fond diffus cosmologique dans le cadre des programmes Archeops et Planck. *Ph.D. Thesis*, October 2003.
- [95] C. Rosset and al. PFM-CAL Polarisation measurements test report. *HFI-PFM Calibration Report Annex*, November 2006.
- [96] G. Savini and al. FTS Measurements Test Report. *HFI-PFM Calibration Report Annex*, November 2006.
- [97] M. Sibony and J.-C. Mardon. Analyse numérique II. Approximations et équations différentielles. *Herman*, June 1988.
- [98] G. F. Smoot. The Cosmic Microwave Background Spectrum. *ArXiv Astrophysics e-prints*, May 1997.
- [99] G. F. Smoot, C. L. Bennett, A. Kogut, J. Aymon, C. Backus, G. de Amici, K. Galuk, P. D. Jackson, P. Keegstra, L. Rokke, L. Tenorio, S. Torres, S. Gulkis, M. G. Hauser, M. Janssen, J. C. Mather, R. Weiss, D. T. Wilkinson, E. L. Wright, N. W. Boggess, E. S. Cheng, T. Kelsall, P. Lubin, S. Meyer, S. H. Moseley, T. L. Murdock, R. A. Shafer, and R. F. Silverberg. First results of the COBE satellite measurement of the anisotropy of the cosmic microwave background radiation. *Advances in Space Research*, 11 :193–205, 1991.
- [100] D. N. Spergel, R. Bean, O. Doré, M. R. Nolta, C. L. Bennett, G. Hinshaw, N. Jarosik, E. Komatsu, L. Page, H. V. Peiris, L. Verde, C. Barnes, M. Halpern, R. S. Hill, A. Kogut, M. Limon, S. S. Meyer, N. Odegard, G. S. Tucker, J. L. Weiland, E. Wollack, and E. L. Wright. Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Three Year Results : Implications for Cosmology. *ArXiv Astrophysics e-prints*, March 2006.
- [101] D. N. Spergel, L. Verde, H. V. Peiris, E. Komatsu, M. R. Nolta, C. L. Bennett, M. Halpern, G. Hinshaw, N. Jarosik, A. Kogut, M. Limon, S. S. Meyer, L. Page, G. S. Tucker, J. L. Weiland, E. Wollack, and E. L. Wright. First-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations : Determination of Cosmological Parameters. *ApJS*, 148 :175–194, September 2003.
- [102] R. A. Sunyaev and Y. B. Zeldovich. The Observations of Relic Radiation as a Test of the Nature of X-Ray Radiation from the Clusters of Galaxies. *Comments on Astrophysics and Space Physics*, 4 :173–+, November 1972.
- [103] Site Web ESA sur Planck. <http://www.rssd.esa.int/index.php?project=PLANCK>.
- [104] J. A. Tauber. The Planck mission. *Advances in Space Research*, 34 :491–496, 2004.
- [105] The Planck Collaboration. The Scientific Programme of Planck. *ESA Publication*, April 2006.
- [106] S. Triqueneaux, L. Sentis, P. Camus, A. Benoit, and G. Guyot. Design and performance of the dilution cooler system for the Planck mission. *Cryogenics*, 46 :288–297, April 2006.
- [107] M. Tristram. de Archeops à Planck analyse des anisotropies du fond diffus cosmologique. *Ph.D. Thesis*, September 2005.
- [108] M. Tristram, G. Patanchon, J. F. Macías-Pérez, P. Ade, A. Amblard, R. Ansari, É. Aubourg, A. Benoît, J.-P. Bernard, A. Blanchard, J. J. Bock, F. R. Bouchet, A. Bourrachot, P. Camus, J.-F. Cardoso, F. Couchot, P. de Bernardis, J. Delabrouille, F.-X. Désert,

- M. Douspis, L. Dumoulin, P. Filliatre, P. Fosalba, M. Giard, Y. Giraud-Héraud, R. Gispert, L. Guglielmi, J.-C. Hamilton, S. Hanany, S. Henrot-Versillé, J. Kaplan, G. Lagache, J.-M. Lamarre, A. E. Lange, K. Madet, B. Maffei, C. Magneville, S. Masi, F. Mayet, F. Nati, O. Perdereau, S. Plaszczyński, M. Piat, N. Ponthieu, S. Prunet, C. Renault, C. Rosset, D. Santos, D. Vibert, and D. Yvon. The CMB temperature power spectrum from an improved analysis of the Archeops data. *A&A*, 436 :785–797, June 2005.
- [109] S. Varesi. HFI 0.1K stages simulations and ground tests results, (en préparation).
- [110] A. L. Woodcraft, R. V. Sudiwala, P. A. R. Ade, M. J. Griffin, E. Wakui, R. S. Bhatia, A. E. Lange, J. J. Bock, A. D. Turner, M. H. Yun, and J. W. Beeman. Predicting the response of a submillimeter bolometer to cosmic rays. *Applied Optics*, 42 :5009–5016, September 2003.
- [111] F. Zwicky. Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln. *Helvetica Physica Acta*, 6 :110–127, 1933.
- [112] F. Zwicky. Nebulae as Gravitational Lenses. *Physical Review*, 51 :290–290, February 1937.

Contribution to the study of systematic effects for the Planck-HFI data processing

Abstract : The observation of the Cosmic Microwave Background during the forty last years has been one of the most prolific field of astrophysics. Celebrated by two Nobel prizes, this major result confirmed spectacularly the Big-Bang theory. The detailed study of this microwave background also helped to strongly constrain the various Universe cosmological models. With the ESA Planck experiment, cosmology enters a new age ; “the precision cosmology era”. It will be the most sensitive experiment performing an all-sky survey with such angular resolution. The high sensitivity of Planck implies a tighter control of the systematic effects of instrumental origin. This Ph-D was completed in the context of the control of the systematic effects for the High Frequency Instrument (HFI) of Planck. Control of the systematic effects implies three types of activities : Identification, Quantification and Correction. This Ph-D mostly presents the results obtained during the work on the identification and quantification of the thermal systematic effects of Planck-HFI. Some results about the quantification of the electronics cross-talk and the correction of the thermal effects are also presented.

Keywords : Observationnal cosmology, Planck-HFI, PILOT, Bolometers, Systematic effects, Thermal tests, Thermal modelling, Electronics Cross-talk

Auteur : Christophe LEROY

Titre : « Contribution à l'étude des effets systématiques pour le traitement des données de l'instrument Planck-HFI »

Directeurs de thèse : Jean-François TROUILHET & Jean-Philippe BERNARD

Lieu et date de soutenance : Toulouse le 10 Mai 2007

Résumé : Ces quarante dernières années, l'observation du Fond Cosmique Micro-Onde a été l'un des champs d'étude les plus prolifiques de l'astrophysique. Couronnée par deux prix Nobel, cette découverte majeure a permis de confirmer de façon spectaculaire la théorie du Big-Bang. L'étude détaillée de ce fond micro-onde a également permis de mieux contraindre les différents modèles d'Univers issus de la cosmologie. Avec l'expérience Planck de l'ESA qui va succéder en 2008 à COBE et WMAP, la cosmologie entre dans une nouvelle ère, celle de la "cosmologie observationnelle de précision". Jamais une expérience spatiale aussi sensible n'aura effectué un relevé complet du ciel micro-onde avec une aussi grande résolution. La grande sensibilité de Planck implique la nécessité d'un contrôle accru des effets systématiques d'origine instrumentale. Cette thèse s'inscrit dans le cadre du contrôle de ces effets systématiques pour Planck, en particulier pour son instrument hautes fréquences : HFI (High Frequency Instrument). Contrôler les effets systématiques implique trois types d'activités : l'Identification, la Quantification et la Correction de ces effets. Cette thèse présente essentiellement les résultats obtenus sur les travaux d'identification et de quantification des effets systématiques d'origine thermique dans Planck-HFI. La quantification de la diaphonie électronique ainsi que la correction des effets thermiques y sont également abordés.

Mots-clefs : Cosmologie observationnelle, Planck-HFI, PILOT, Bolomètres, Effets systématiques, Tests thermiques, Modélisation thermique, Diaphonie électronique

Laboratoire d'Astrophysique de Toulouse Tarbes, UMR 5572
Observatoire Midi-Pyrénées, 14 avenue Edouard Belin, 31400 TOULOUSE

Centre d'Etude Spatiale des Rayonnements, UMR 5187
9 avenue du Colonel Roche, 31028 TOULOUSE