

Essais cryogéniques sur le satellite Planck au Centre Spatial de Liège

Ing. I. DOMKEN
Responsable du projet Planck
Centre Spatial de Liège
GRAMME – Liège

Après une campagne d'essais longue de 10 mois, le satellite "Planck" de l'Agence Spatiale Européenne (ESA) quittera, début de l'année 2009, les installations de test du Centre Spatial de Liège (CSL) pour la base de lancement de Kourou (Guyane Française).

A CSL, un équipement spécialement dédié à Planck a été développé afin de refroidir le plan focal du télescope à une température de $-273,05^{\circ}\text{C}$ (à $100\text{m}^{\circ}\text{C}$ du zéro absolu) durant 2 semaines, exploit unique au monde.

Les solutions imaginées pour recréer en laboratoire un environnement comparable à celui que Planck subira dans l'espace sont décrites dans cet article.

Mots- clefs : Cryogénie, satellite, tente thermique, écran optique, panneau à charbons actifs.

After a test campaign of about 10 months, the European Space Agency (ESA) "Planck" spacecraft will leave, at the beginning of 2009, the Centre Spatial de Liège (CSL) test facilities for the Kourou Space Center (French Guyana).

At the CSL, a set-up specially designed for Planck has been developed in order to cool down the telescope focal plane assembly at $-273,05^{\circ}\text{C}$ ($100\text{m}^{\circ}\text{C}$ from absolute zero) for 2 weeks, which is an outstanding achievement in the world.

The devised solutions to create the Planck space environment in laboratory are described in this paper.

Keywords : Cryogenics, spacecraft, shrouds, optical shield or skyload, charcoal panel.

Table des matières

1. Introduction	139
2. Le satellite Planck	141
2.1 Présentation générale du satellite	141
2.2 Le lancement et la mise sur orbite	146
3. Le test du satellite Planck au Centre Spatial de Liège	148
4. Les développements réalisés pour le test Planck	150
4.1 Spécifications	150
4.2 Description de la chambre à vide	150
Description générale de la cuve	150
Système thermique à l'azote	151
Réseau de refroidissement à l'hélium	151
4.3 Configuration du set-up d'essais pour le satellite Planck.....	152
Configuration générale.....	152
Equerre support	154
Tente thermique	157
Optical shield	166
Charcoal panel.....	170
Instrumentation et système d'acquisition.....	172
5. Conclusion	173
6. Références bibliographiques	174
6.1 Ouvrages.....	174
6.2 Sources Internet	174

1. Introduction

Planck, du nom de célèbre physicien allemand du 19^{ème} siècle, est la prochaine mission scientifique de l'Agence Spatiale Européenne (ESA).

Pierre angulaire du programme scientifique de l'ESA, ce satellite a été conçu pour étudier les infimes variations dans le «bruit de fond » cosmique. Ce rayonnement fossile est l'ultime vestige de la première lumière apparue dans l'univers quelques 380 000 ans après le Big Bang, soit il y a plus de 13 milliards d'années. L'univers était à ce moment mille fois plus petit qu'aujourd'hui et sa température était descendue à 3000K, permettant aux premiers atomes d'hydrogène de se former et à la lumière, séparée de la matière, de se déplacer librement.

Cette hypothèse sur les origines de l'Univers a été formulée par l'astrophysicien belge, le Chanoine Georges Lemaître (1894-1966). Avec Planck, on espère mesurer les paramètres de l'Univers avec une précision telle qu'il permettra non seulement de lever un coin du voile sur les secrets du Big Bang mais également de comprendre certains de ses mécanismes. Planck nous aidera sans doute à mieux comprendre pourquoi aujourd'hui, 13,8 milliards d'années après le Big Bang, l'expansion de l'Univers continue à accélérer.

Après la première mission COBE (Cosmic Background Explorer) lancée en 1989, WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) en 2001, Planck en 2009 fournira de nouvelles mesures avec une résolution et une sensibilité jamais atteintes jusqu'à présent. Ces mesures aideront à évaluer l'âge de l'univers, et amélioreront la compréhension de ses origines.

Ce sujet a fait l'objet de deux prix Nobel de physique dont le dernier en 2006.

Le satellite Planck sera lancé en avril 2009 par une fusée Ariane 5 à plus de 1.500.000 kms de la terre, soit 4 fois la distance terre-lune, dans la direction opposée au soleil. Il mettra environ 5 mois pour atteindre cette position qui lui permettra de réaliser ses observations durant 18 mois dans les meilleures conditions possibles, loin des perturbations terrestres et dans un environnement stable.

Pour atteindre ses ambitieux objectifs scientifiques, Planck doit travailler à des températures très basses et très stables. Une fois dans l'espace, ses détecteurs sont refroidis à des températures proches du zéro absolu, allant de -253°C à -273°C , ce qui fait de Planck une vitrine des cryotechnologies européennes de pointe.

Avant son lancement, il a fallu tester ce satellite sur terre en récréant en laboratoire un environnement comparable à celui que Planck subira dans l'espace.

Amener un satellite de 1,8 tonne à des températures aussi basses (-220°C sur les surfaces extérieures du satellite) est un défi technique sans précédent qui a été réalisé à CSL.

C'est la seule et unique fois que la chaîne complète de refroidissement du satellite a été testée sur terre avant son lancement.

Trois campagnes d'essai ont été réalisées à CSL entre 2005 et 2008: le modèle de qualification (QM), le modèle proto-flight (PFM) et cet été, le modèle de vol (FM).

Financés par les Etats membres de l'ESA (Agence Spatiale Européenne) dans le cadre du programme scientifique, le satellite Planck est réalisé sous la maîtrise d'œuvre de Thales Alenia Space (Cannes-France) par l'industrie européenne.

2. Le satellite Planck

2.1 Présentation générale du satellite

Le satellite Planck a une hauteur de 4,2 m, un diamètre maximal de 4,2 m et une masse de 1800 kg.

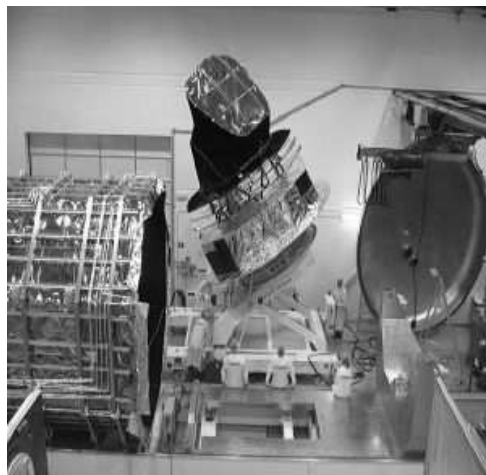


Figure 1 : Le satellite Planck (modèle CQM- juin 2005) dans la salle blanche du CSL



Figure 2 : Le satellite Planck (modèle FM- juin 2008) dans la salle blanche du CSL

Les principaux éléments du satellite sont :

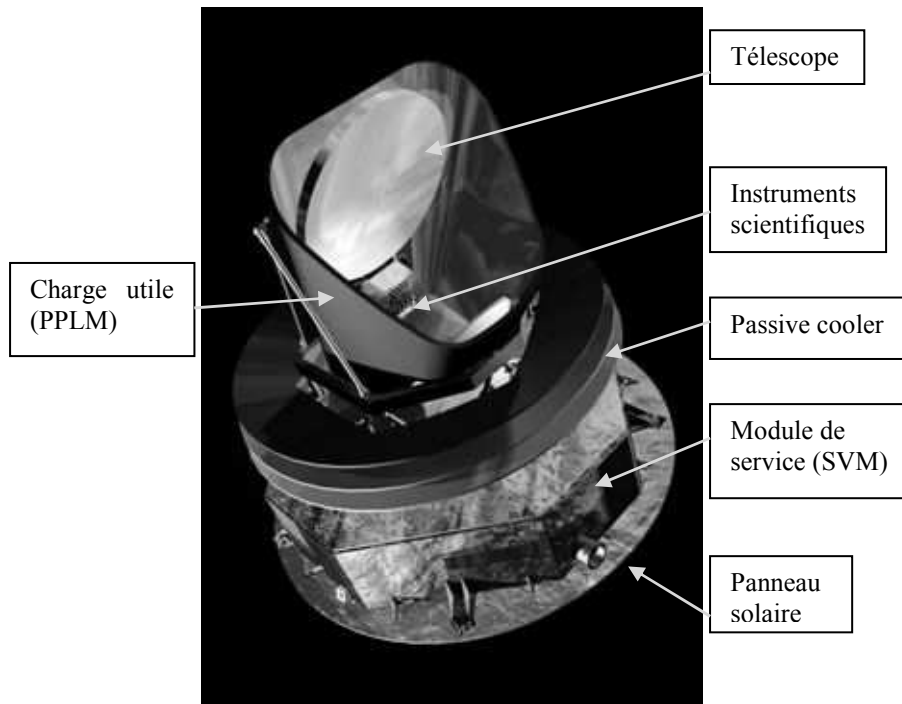


Figure 3 : Les principaux éléments du satellite

Planck transporte un télescope de 1,5m de diamètre muni d'un miroir primaire et d'un miroir secondaire.

Au plan focal de ce télescope se trouvent 2 instruments :

- le LFI (Low Frequency Instrument) comprenant un détecteur couvrant les basses fréquences (30 GHz–77 GHz). Cet instrument observe l'énergie rayonnante dans le domaine des micro-ondes ;
- le HFI (High Frequency Instrument) muni de 36 détecteurs bolométriques couvrant les hautes fréquences. Ces détecteurs mesurent l'énergie rayonnante dans l'infrarouge très lointain et dans les micro-ondes (100 GHz – 857 GHz).

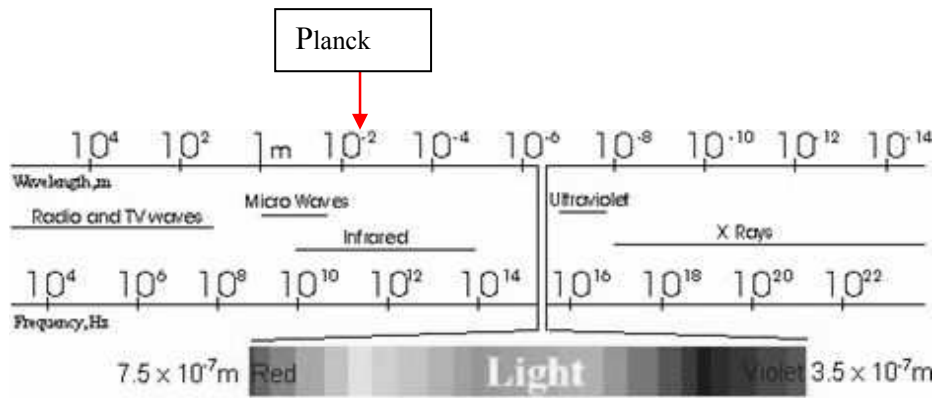


Figure 4 : Longueurs d'ondes couvertes par les instruments du satellite Planck

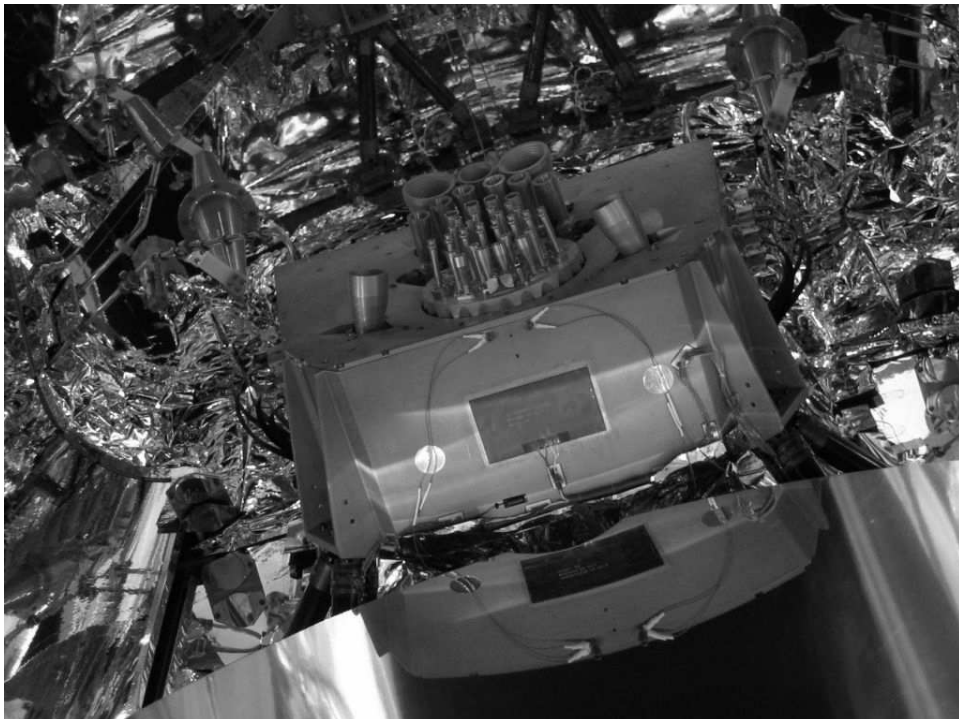


Figure 5 : Les instruments HFI et LFI au plan focal du satellite

Ces deux instruments sont véritablement les yeux du satellite. Ensemble, ils vont mesurer la température du rayonnement de fond cosmologique, en cherchant les régions plus chaudes ou plus froides que la moyenne et établir ainsi des cartes d'une précision inégalée du rayonnement fossile micro-ondes dans lequel baigne notre univers. Planck sera sensible à des variations de température de quelques millièmes de degré et cartographiera l'ensemble du ciel dans 9 longueurs d'onde.

Pour relever ces défis, Planck doit fonctionner à des températures très basses et très stables. Une fois le satellite arrivé dans l'espace, il faudra refroidir ses détecteurs de manière à ce qu'ils atteignent une plage de température comprise entre -253 °C et à peine quelques dixièmes de degré au-dessus du zéro absolu ($-273,15\text{ °C}$).

La chaîne complète de refroidissement est composée de 4 refroidisseurs en cascade :

- les refroidisseurs passifs, appelés V-groove, qui permettent de refroidir passivement le satellite jusqu'à 50 K (-223 °C)
- le refroidisseur Joule-Thomson à hydrogène, utilisant les compresseurs à sorption, qui permet d'atteindre 18 K (-255 °C)
- le refroidisseur Joule-Thomson à hélium qui permet de refroidir à $4,5\text{ K}$ ($-268,5\text{ °C}$)
- le dernier étage est un refroidisseur à dilution d'hélium 3 dans de l'hélium 4, permettant de refroidir les bolomètres (détecteurs de l'instrument HFI) jusqu'à **$0,1\text{ K}$** (-273 °C).

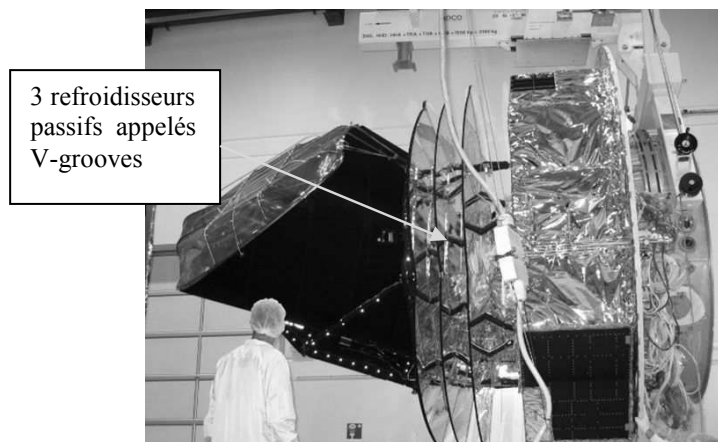


Figure 6 : Les refroidisseurs passifs

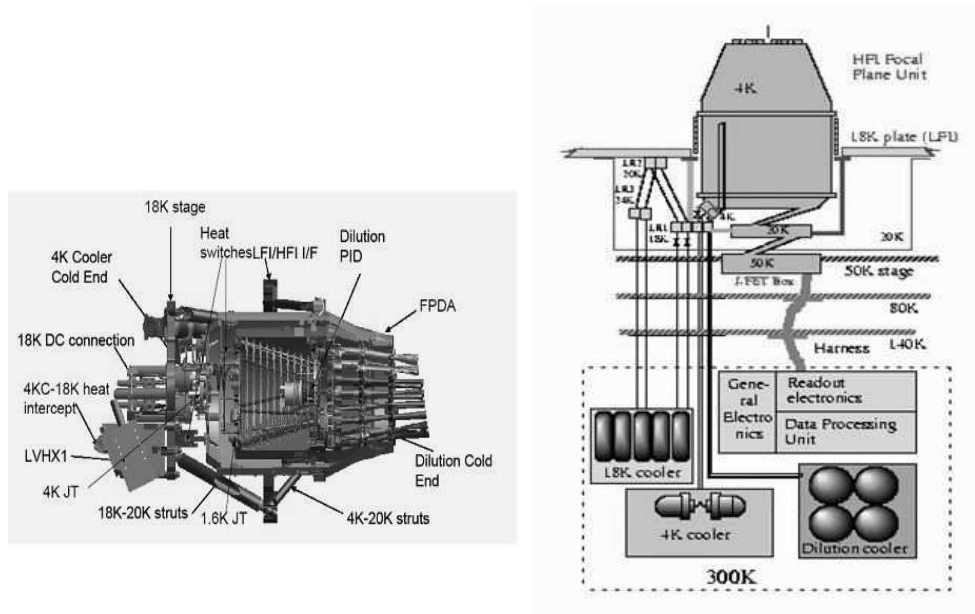


Figure 7 : Vues générales de la cascade de refroidisseurs

C'est au Centre Spatial de Liège, uniquement, que la chaîne complète des refroidisseurs sera testée pour atteindre 100mK !

2.2 Le lancement et la mise sur orbite

Le satellite Planck sera lancé en avril 2009 par une fusée Ariane 5, depuis le site de Kourou, conjointement avec le satellite Herschel. Planck et Herschel se sépareront immédiatement après le lancement pour rejoindre leurs orbites autour du point de Lagrange L2. A cet endroit, les satellites peuvent pointer de façon continue dans la direction antisolaire, minimisant ainsi le bruit thermique solaire.

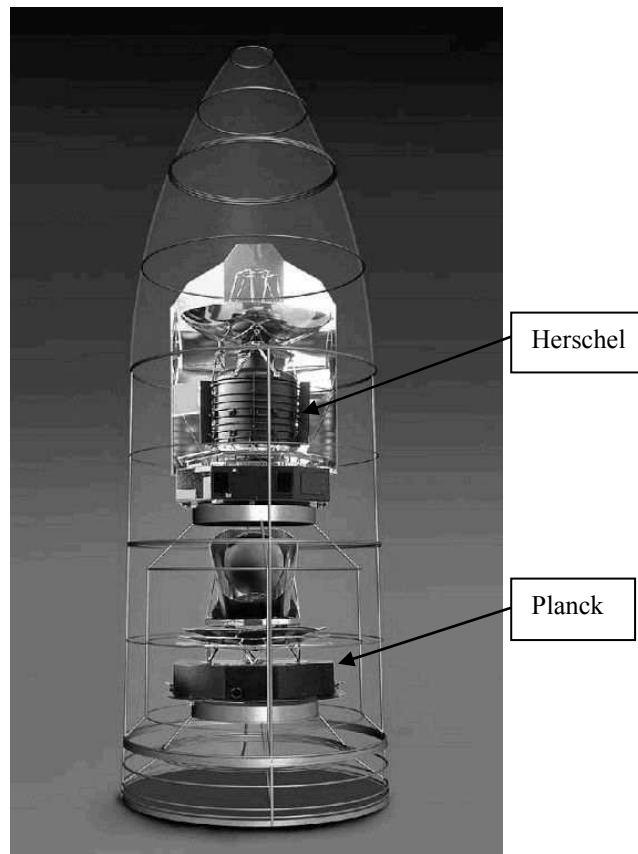


Figure 8 : Vue artistique des satellites Herschel et Planck dans la coiffe de la fusée Ariane 5

La spécification scientifique principale de la mission Planck est de mesurer les fluctuations du Fond Cosmologique Micro-onde (CMB en anglais) avec une précision minimum de $\Delta T/T = 2.10^{-6}$ et une résolution inférieure à 10' d'arc.

Afin de dresser la carte des fluctuations du CMB, le satellite Planck sera placé au point de Lagrange L2 où il effectuera un relevé complet du ciel pendant 18 mois.

Un objet de faible masse situé exactement au point de Lagrange n'en bouge plus et tourne de concert avec la planète autour du soleil. Cinq points de Lagrange sont définis, c'est-à-dire cinq positions relatives de l'espace différentes.

Si on donne en exemple les points de Lagrange du système soleil-terre, ces cinq points sont notés et définis comme suit :

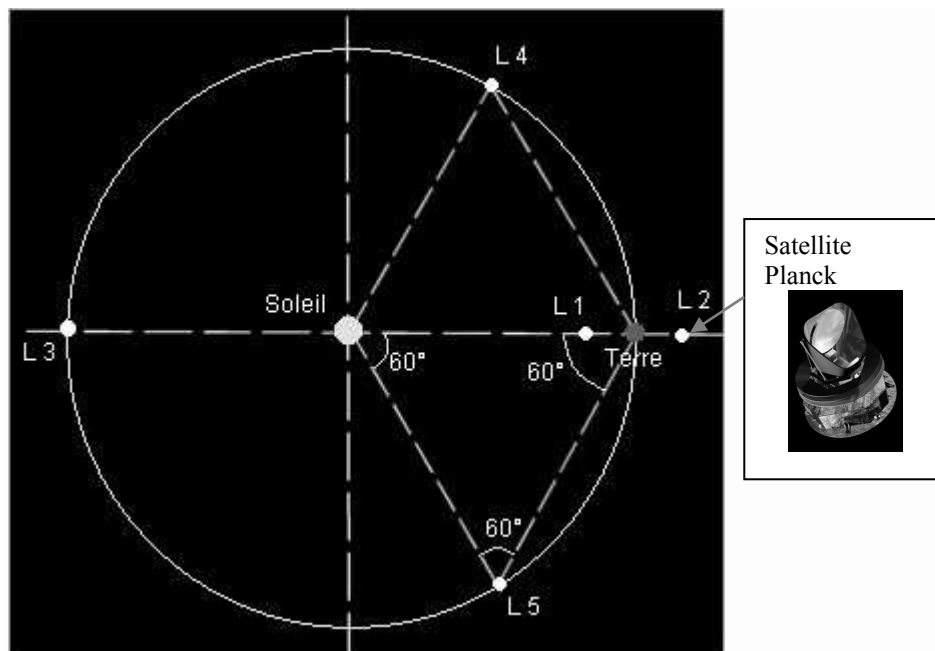


Figure 9 : Positionnement des points L1, L2 et L3 des points de Lagrange

Le point de Lagrange L2 est sur la ligne définie par les deux masses, au-delà de la plus petite. Le satellite Planck sera positionné au point L2. A cette position, l'objet devrait tourner moins vite que la terre parce que la gravité solaire y est moindre, mais le champ gravitationnel supplémentaire dû à la terre tend à l'accélérer. Au point L2, l'objet tourne donc exactement à la même vitesse angulaire que la terre autour du soleil.

Les avantages d'une orbite L2 sont nombreux :

- du fait de l'éloignement de la terre et du soleil, l'environnement thermique du satellite est très stable. Les effets radiatifs thermiques de la Terre sont faibles et entraînent un environnement froid favorable à des satellites cryogéniques comme PLANCK et HERSCHEL,
- l'environnement radiatif est très faible comparativement à des orbites excentriques, ou même géostationnaire,
- les panneaux solaires dirigés vers le soleil et la terre, masquant la charge utile du rayonnement thermique solaire et de la lumière parasite terrestre, favorisent également les communications satellite-terre.

Le satellite sera stabilisé par rotation sur lui-même. Sa vitesse de rotation sera d'un tour par minute et l'axe de rotation du satellite sera fixe pendant une heure. Puis toutes les heures, son axe de rotation sera repointé par pas de 3' d'arc environ. Le satellite suivra également un mouvement de nutation sur son orbite. Avec cette stratégie de mesure, en 18 mois, Planck aura balayé toutes les directions du ciel au moins 1,5 fois.

Les mesures réalisées par Planck seront stockées à bord puis transmises au sol via la nouvelle station de réception de l'ESA (European Space Agency) située en Australie. La mission Planck disposera d'un temps d'antenne de 2.5 heures/jour. Le débit de la liaison est de 1.5Mbits/s en vue directe de la station. Les données seront compressées à bord avant d'être transmises avec un taux de compression de 4. Ce rendez-vous journalier avec la station australienne sera également utilisé pour le contrôle d'orbite du satellite.

3. Le test du satellite Planck au Centre Spatial de Liège

Le Centre Spatial de Liège fait partie du réseau européen des infrastructures qui sont équipées de simulateurs d'environnement spatial.

Une coïncidence amusante; le satellite Planck (modèle de vol) est arrivé à CSL le 23 avril 2008, ce jour-là Max Planck aurait eu 150 ans...

Après une longue phase préparatoire de 7 années, c'est au CSL que le fonctionnement du satellite Planck a été ultimement vérifié. La mise au

point de l'équipement d'essai pour ce satellite a nécessité un programme de développement important, avec en 2005 des essais préparatoires au CSL sur un prototype de qualification.

Les équipements du satellite utilisent des technologies très avancées qui requièrent des vérifications précises dans des conditions proches de celles que connaîtra le satellite dans l'espace. Ces conditions particulières sont reproduites dans les installations du Centre Spatial de Liège. Dans ce cas précis, le CSL a réalisé un environnement qui permet le refroidissement du satellite à -220°C . L'instrument de mesure qui est au cœur du satellite sera lui-même refroidi à -273°C , c'est-à-dire à $0,1^{\circ}\text{C}$ du zéro absolu.

Le CSL a mené, l'été 2008, la principale campagne de test sous vide pendant plus de 65 jours avec des équipes se relayant sans interruption 24h/24, 7j/7 et mettant en œuvre des moyens techniques très spécifiques pour refroidir de façon contrôlée cet équipement de 1800 kg. Ce test est extrêmement critique, tant du point de vue technique où aucune erreur n'est permise sur le matériel de vol, que du point de vue planning ; le moindre retard se répercutant sur la date de lancement ainsi que sur celle de la mission Herschel.

Cette campagne de tests - la dernière avant son départ pour le Centre Spatial Guyanais de Kourou – est de vérifier que l'instrumentation du télescope de 1,5 m de diamètre donne entière satisfaction pour son fonctionnement dans les conditions de froid extrême.

Le CSL est intervenu dans la campagne du satellite Planck en plusieurs étapes :

- en 2003 et 2004, test du modèle de qualification (prototype) du miroir secondaire ;
- en 2005, test du modèle de vol du miroir secondaire et test du prototype et du modèle de vol du miroir primaire ;
- la même année, test du modèle de qualification (prototype) du satellite Planck (65 jours sous vide) ;
- en 2006, test sur une partie du modèle de vol de Planck (21 jours sous vide);

- durant cet été 2008, le Centre Spatial a testé avec succès le modèle de vol de Planck, le satellite complet avec tous ses instruments, tel qu'il sera lancé, hormis les panneaux solaires (65 jours sous vide).

4. Les développements réalisés pour le test Planck

4.1 Spécifications

La principale spécification concerne la dégradation des performances thermiques du refroidisseur passif. En vol, ce refroidisseur passif est utilisé pour refroidir à 50K les tuyauteries du refroidisseur à sorption (hydrogène) afin d'atteindre 20K sur la platine froide. Durant le test à CSL, la dégradation permise sur les performances du refroidisseur passif est inférieure à 2K par rapport aux conditions de l'espace.

Une seconde spécification est le niveau de vibration autorisé aux points d'interfaces du satellite. Le niveau de vibration doit être suffisamment bas afin de ne pas amener trop d'énergie au point le plus froid (100mK) ce qui risquerait de le réchauffer.

Une troisième spécification est relative à la vérification des instruments du satellite. Un corps noir dans les radiofréquences doit être placé au niveau du plan focal, juste en face des instruments. Ce corps doit avoir une homogénéité meilleure que 0,1K et une stabilité thermique de l'ordre de 0,001K.

La pression partielle d'hélium dans la chambre à vide est également un critère de réussite. Un niveau élevé d'hélium au niveau du plan focal pourrait créer un film superfluide sur le point froid (qui est à 100mK) et par conduction amener de l'énergie sur ce dernier, ce qui le réchaufferait.

4.2 Description de la chambre à vide

Description générale de la cuve

Focal 5 (acronyme de Facility for Optical Calibration At Liège) est une cuve cylindrique de 120 m³ à axe horizontal et de 5 m de diamètre, située dans une salle blanche de classe 10 000.

Différents environnements thermiques peuvent être simulés dans la cuve au moyens de panneaux thermiques dédiés (appelés « **shrouds** ») alimentés en azote et/ou en hélium.

Un banc optique est installé dans la chambre à vide. Ce banc a une planéité de 10^{-5} m/m et est supporté par 6 pieds passant au travers de la cuve et reposant sur un bloc séismique. Le banc est ainsi isolé des vibrations de la cuve et garantit au banc optique une bonne stabilité. Des soufflets assurent l'étanchéité au vide.

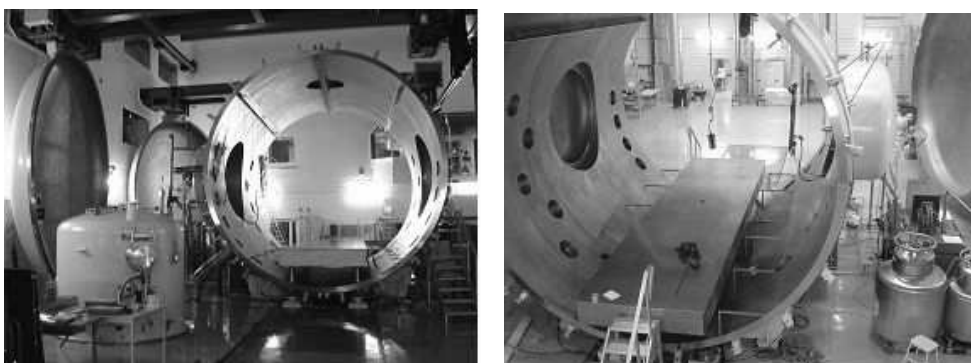


Figure 10 : Vues générales de la cuve Focal

Système thermique à l'azote

Dix lignes indépendantes permettent d'alimenter des panneaux dédiés. La gamme des températures s'étend de 120 K (-150°C) à 350 K (+80°C) en mode GN₂ régulé, ou 85 K (-188°C) pour le mode LN₂. Des résistances chauffantes électriques ou des lampes infrarouges permettent d'atteindre des températures plus élevées. En plus des dix lignes régulées, 4 lignes d'azote liquides sont également disponibles sur Focal5 pour alimenter certains panneaux thermiques.

Réseau de refroidissement à l'hélium

Un système de refroidissement travaillant en boucle fermée a été installé à CSL. L'hélium gazeux est ainsi refroidi à 5 K (-268°C) grâce à deux liquéfacteurs/réfrigérateurs d'hélium. C'est ainsi que ces deux machines permettent à partir d'hélium gazeux à 20°C de produire de l'hélium gazeux froid à 20K (-253°C) et de l'hélium liquide à 5K, ce dernier étant stocké

dans un Dewar. La capacité de ces machines permet notamment de produire de l'ordre de 50 litres d'hélium liquide par heure et par machine.

Une boîte de distribution et un réseau de tuyauteries permet d'alimenter en hélium gazeux froid des panneaux thermiques installés dans les différentes chambres à vide de CSL et donc de mener plusieurs essais en parallèle.

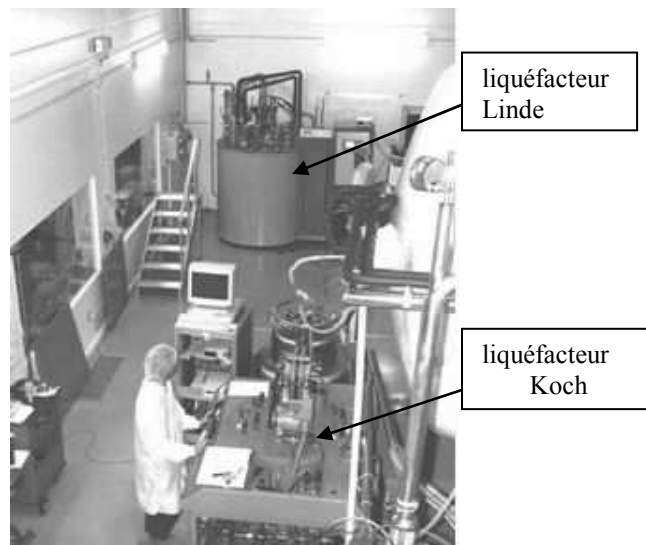


Figure 11 : Vues générales des liquéfacteurs d'hélium en salle blanche

4.3 Configuration du set-up d'essais pour le satellite Planck

Configuration générale

Le satellite est tenu horizontalement sur une équerre support, laquelle remplace le banc optique original de Focal5. L'équerre support repose sur le bloc sismique et est mécaniquement découplé de la chambre à vide et du reste du bâtiment.

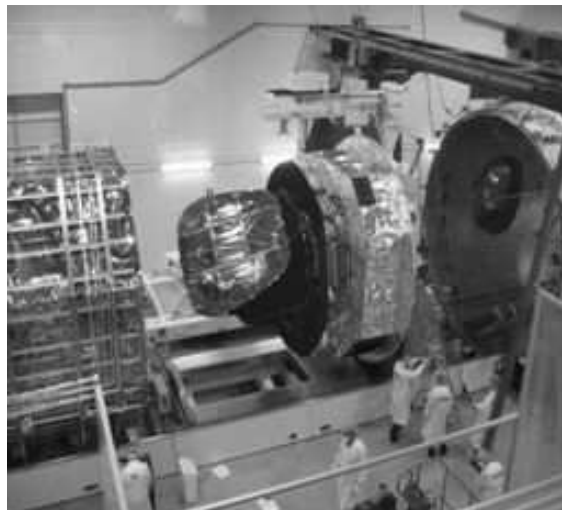
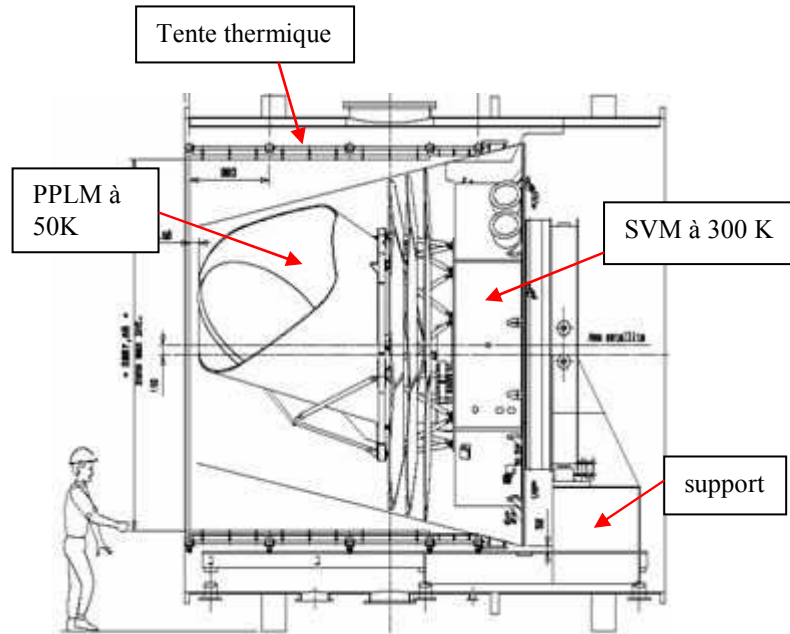


Figure 12 : Le satellite Planck installé dans la cuve Focal5

Une tente thermique entoure le satellite. Cette tente thermique est composée de deux parties principales :

- une partie alimentée en hélium en face de la charge utile du satellite (la partie qui comprend le télescope et les instruments). Cette partie de la tente thermique permet de refroidir le PPLM à 50K.
- Une partie alimentée en azote est utilisée en face du module de service du satellite (la partie électronique). Le module de service reste à température ambiante mais irradie plusieurs kilowatts.



Figure 13 : Vue générale de la tente thermique installée dans la cuve Focal5

Equerre support

Etant donné que l'énergie induite par les vibrations pourrait être suffisante pour produire un réchauffement du refroidisseur 100mK, la spécification était d'atteindre un niveau très bas de micro-vibrations dans la plage de 20Hz à 200Hz.

L'équerre support a été réalisée en acier inoxydable et est constituée de caissons afin d'obtenir une haute rigidité. Le satellite est fixé sur l'équerre support via un anneau d'adaptation du lanceur et est tenu par trois points.

Un modèle de calcul par éléments finis de l'équerre support a permis d'estimer le niveau de vibration aux trois points d'interfaces. La déflexion maximale, la torsion ou les contraintes dans les différentes parties ont été également calculées afin de vérifier les facteurs de sécurité.



Figure 14 : Modèle d'éléments finis de l'équerre support (Samcef software)

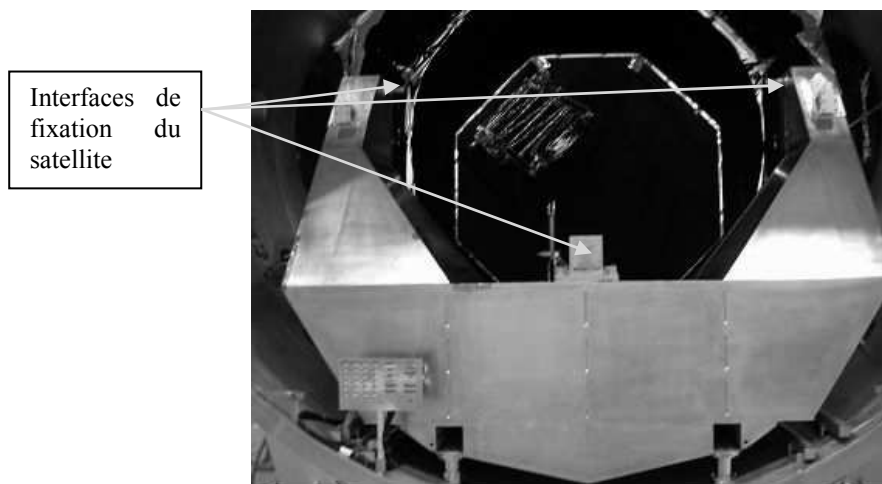


Figure 15 : Equerre support intégrée dans la cuve Focal5

L'équerre support est déposée dans la cuve sur 6 pieds. Ces 6 pieds reposent sur le bloc séismique afin de garantir une bonne stabilité.

Pour l'intégration, l'équerre est entrée et sortie de la cuve en utilisant un trolley dédié. Ce trolley roule sur un système de rails placés devant et à l'intérieur de la cuve Focal5. En dehors de la cuve, le support peut également être posé sur 6 pieds afin d'assurer un travail dans des conditions sûres et stables.

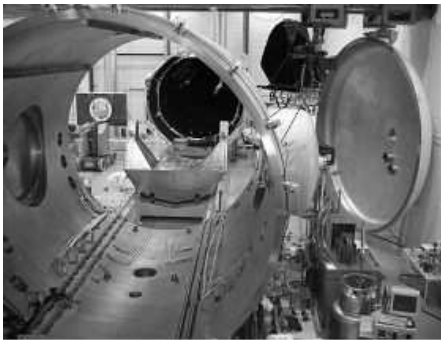


Figure 16 : Equerre support en dehors de la chambre

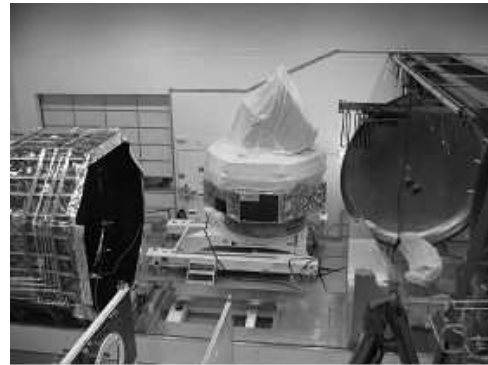


Figure 17 : Equerre support posée sur les 6 poids

La mesure de micro vibration est réalisée par des accéléromètres (Wilcoxon 731A) installés sur l'équerre support aux trois points d'interface.



Figure 18 : Localisation des accéléromètres sur l'équerre support

Les résultats de la campagne CQM ont montré que les vibrations induites par le moyen d'essai, environ 1mg RMS, sont inférieures aux vibrations induites par le compresseur du refroidisseur 4K du satellite, environ 3 mg RMS. Le spectre des mesures de vibrations selon l'axe vertical est présenté ci-après.

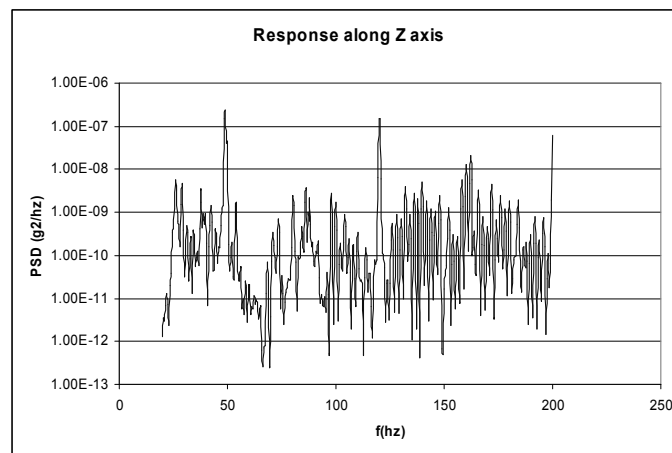


Figure 19 : Résultats des micro vibrations durant la campagne d'essais du modèle CQM (le compresseur 4K ne fonctionne pas)

Tente thermique

Modèle mathématique thermique

Lorsque le satellite sera en orbite, la majorité du flux thermique irradié par la partie électronique du satellite (SVM, partie chaude) sera envoyée vers l'espace grâce aux trois grands réflecteurs, appelés V-groove. Sur terre, une partie du flux émis par le SVM va être réfléchi sur les panneaux de la tente thermique et risque de perturber la partie froide du satellite. Le challenge est de reproduire sur terre, tout autour du satellite, l'espace froid en termes de température et d'absorptivité.

La principale spécification concernant la tente thermique est relative à la dégradation des performances thermiques du refroidisseur passif (V-Grooves). Le dernier étage du refroidisseur passif (V-groove3) est utilisé pour refroidir vers 48K les tuyauteries du cooler à hydrogène afin d'atteindre 20K sur le doigt froid de ce refroidisseur. Une dégradation de plus de 2K à l'interface du refroidisseur passif avec les tuyauteries du

refroidisseur 20K dégraderait les performances du refroidisseur 20K et la chaîne complète n'atteindrait pas les températures souhaitées.

La principale source de chaleur dans le volume froid est le satellite lui-même. Le module de service (SVM) est proche de la température ambiante tandis que la charge utile, le Payload Module de Planck (PPLM), est sous 48K au point le plus froid.

Le programme Esatan-Esarad a été utilisé comme modèle mathématique pour les simulations thermiques. C'est ainsi que l'entièreté de la tente thermique et du satellite ont été modélisés afin de trouver la configuration thermique répondant aux spécifications.

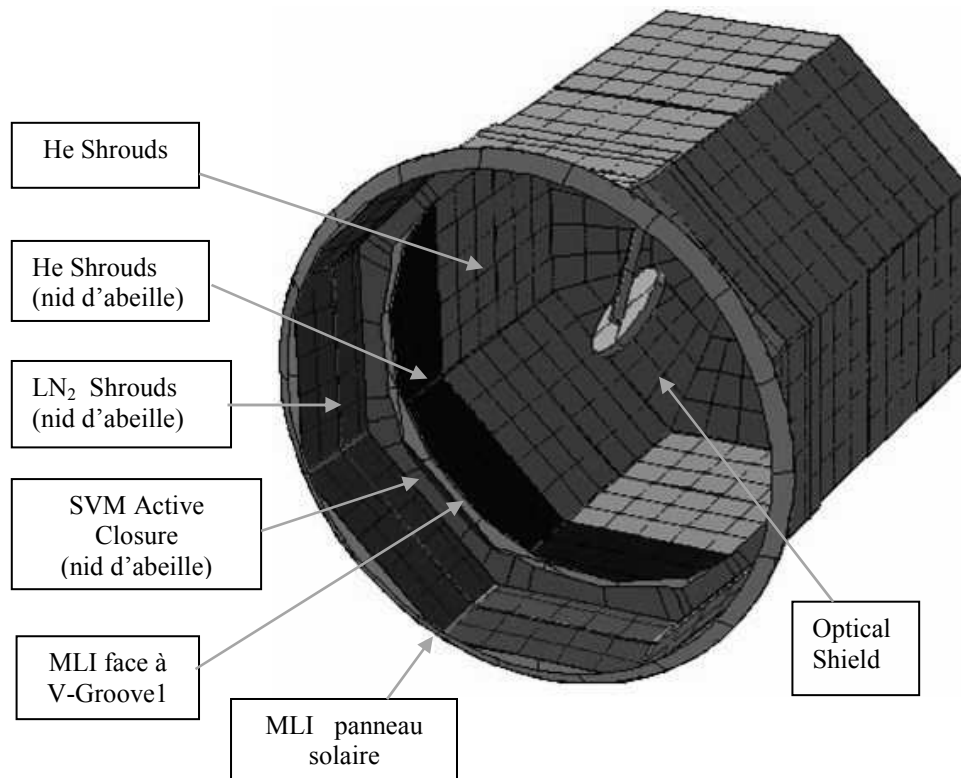


Figure 20 : Vue générale de la tente thermique modélisée par le modèle thermique

Les performances du système sont très liées au coefficient d'absorptivité des panneaux de la tente thermique à 20K. Des études de sensibilité ont été

faites afin de définir les conditions limites. Le plus mauvais cas montrait une dégradation thermique de 1,5K au point le plus froid du refroidisseur passif, auquel on ajoute 0,5K pour les incertitudes du modèle. Pour arriver à ces performances et augmenter l'absorptivité des panneaux de la tente thermique, le programme Esatan-Esarad montrait qu'une partie de la tente thermique devait être recouverte de nid d'abeille peint en noir.

Une autre modélisation des flux thermiques dans les panneaux a permis de vérifier la distribution de température sur tous les panneaux, les vitesses de descente en température ainsi que les chutes de pression dans les tuyauteries.

Modèle mathématique mécanique

Le design et les analyses mécaniques ont été réalisés par la société Amos (Liège). Un modèle mathématique d'éléments finis (Samcef) a été utilisé pour analyser les structures mécaniques, vérifier les déplacements et les contraintes maximales aux points d'interface.

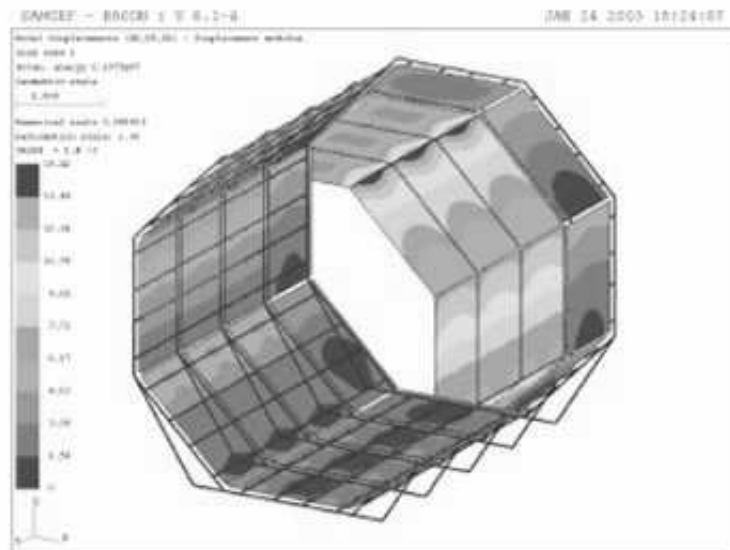


Figure 21 : Contraintes et déplacements modélisés par le modèle d'éléments finis Samcef.

Configuration des panneaux azote et hélium

La tente thermique a la forme d'un octogone fermé par un couvercle. La partie cylindrique formée d'une double paroi est composée de 3 anneaux de 8 panneaux et du couvercle comportant également 8 panneaux. Les panneaux internes sont alimentés en hélium gazeux et les panneaux externes sont alimentés en azote liquide, réalisant de la sorte une barrière thermique.

En face du SVM, les panneaux thermiques sont placés en laissant une marge minimum de 100 mm avec le satellite. Huit voies thermiques indépendantes permettent d'alimenter ces panneaux en azote liquide ou en azote gazeux régulé.

Au niveau de la partie hélium, étant donné que le maximum du flux provient des refroidisseurs passifs (V-groove), l'hélium froid rentre dans la tente thermique par le couvercle et termine sa course au niveau du dernier anneau de panneaux, face aux V-grooves. Avec cette configuration, la partie la plus froide de la tente thermique est face à la partie la plus froide du PPLM.

La masse totale de cuivre à refroidir est d'environ 1500 kg, à laquelle il y a lieu d'ajouter la masse de la partie froide du satellite.

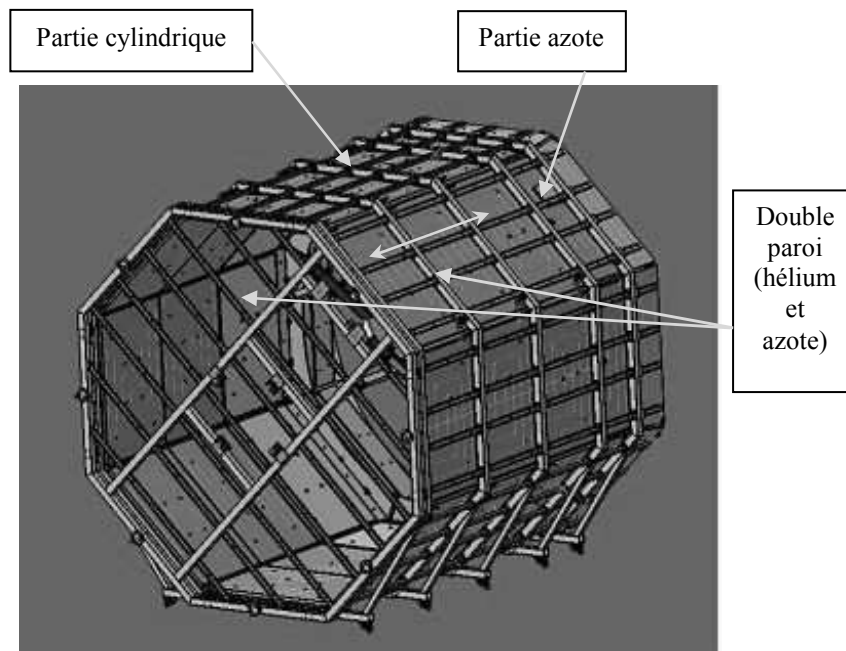


Figure 22 : Vue générale de la tente thermique (modèle Catia)

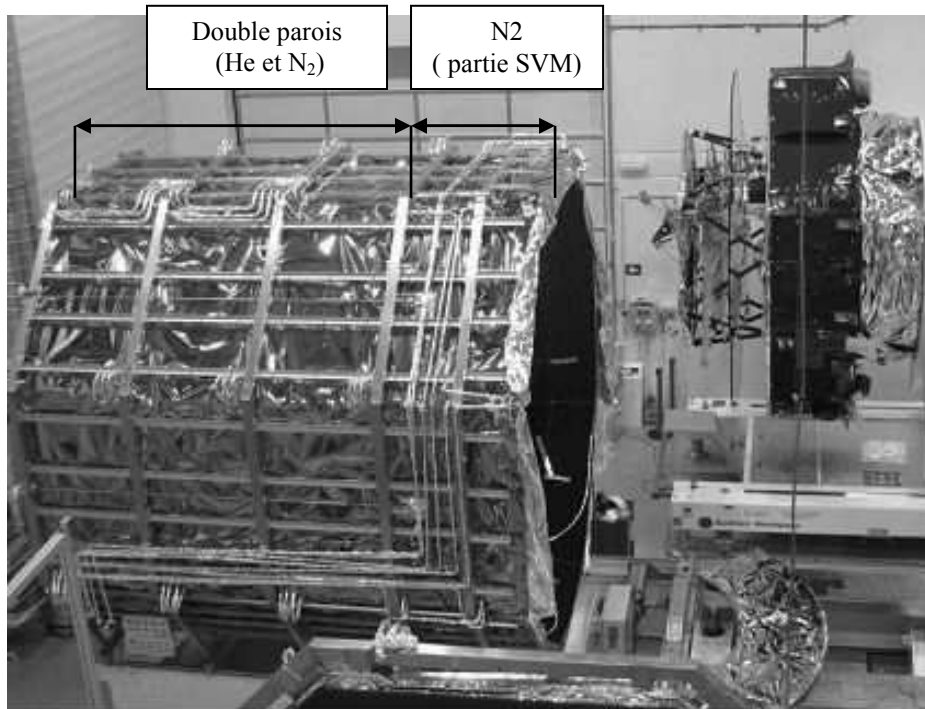


Figure 23 : Vue générale de la tente thermique

En vue de remplir les spécifications en arrêtant un maximum de flux provenant radiativement du SVM (partie électronique), des fermetures actives ont été ajoutées à la tente thermique. Ces fermetures actives consistent en de petits panneaux posés verticalement entre le SVM et le premier V-groove. Ces panneaux sont également couverts de nid d'abeille sur les deux faces et sont refroidis par une tuyauterie alimentée à l'azote liquide. Un mécanisme permet la rotation de ces panneaux après intégration du satellite dans la tente thermique.

Un MLI (Multi Layers Insulation, matelas réalisé à l'aide de plusieurs feuilles en mylar) a été également placé sur la tente thermique pour séparer la zone alimentée en LN2 et la zone alimentée en hélium, face au V-groove¹. Ce MLI est fixé verticalement sur la tente thermique et arrive à 40 mm du bord du V-groove

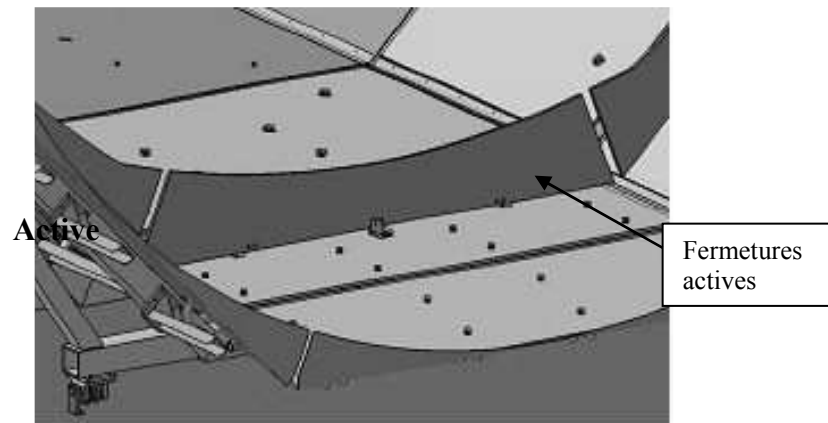


Figure 24 : Fermetures actives (panneaux LN2) et MLI au niveau du V-groove

Nid d'abeille peint en noir

L'absorptivité des panneaux thermiques est d'une très haute importance. Des mesures d'absorptivité ont été réalisées sur différents coatings dans « le laboratoire des basses températures de CSL » afin de confirmer les hypothèses prises dans le modèle thermique. Bien que le modèle thermique mathématique montre que le nid d'abeille était nécessaire uniquement en face des parties les plus chaudes du satellite, il a été finalement décidé de placer du nid d'abeille sur l'entièreté de la tente thermique afin de se placer du côté de la sécurité.

Tous les espaces entre les panneaux sont fermés par des plaques de cuivre peintes en noir afin de minimiser également les pertes thermiques et les réflexions parasites.

Le nid d'abeille a été collé sur les panneaux de cuivre par de la colle Stycast. Les panneaux ont ensuite été recouverts de peinture noire de type MAP PU1. La procédure de peinture a été optimisée afin de couvrir au mieux le fond des cellules du nid d'abeille. C'est ainsi que des essais de peintures ont été réalisés sur plusieurs échantillons; ces échantillons ont été analysés au microscope électronique afin de mesurer l'épaisseur de peinture sur les parois des cellules du nid d'abeille.

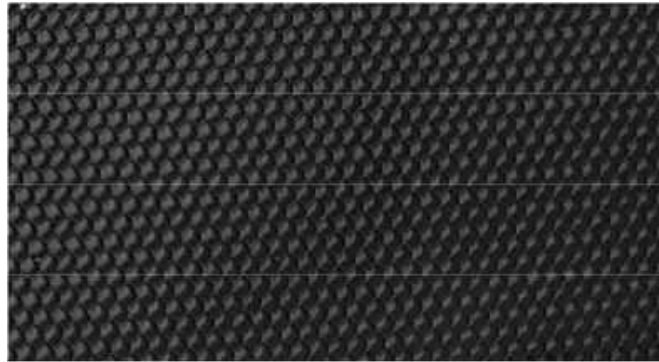


Figure 25 : Vue de face du nid d'abeille peint en noir

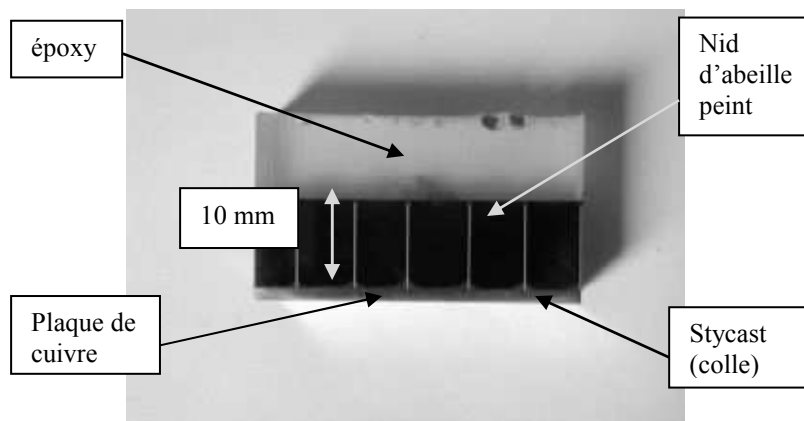


Figure 26 : Coupe transversale d'un échantillon de nid d'abeille

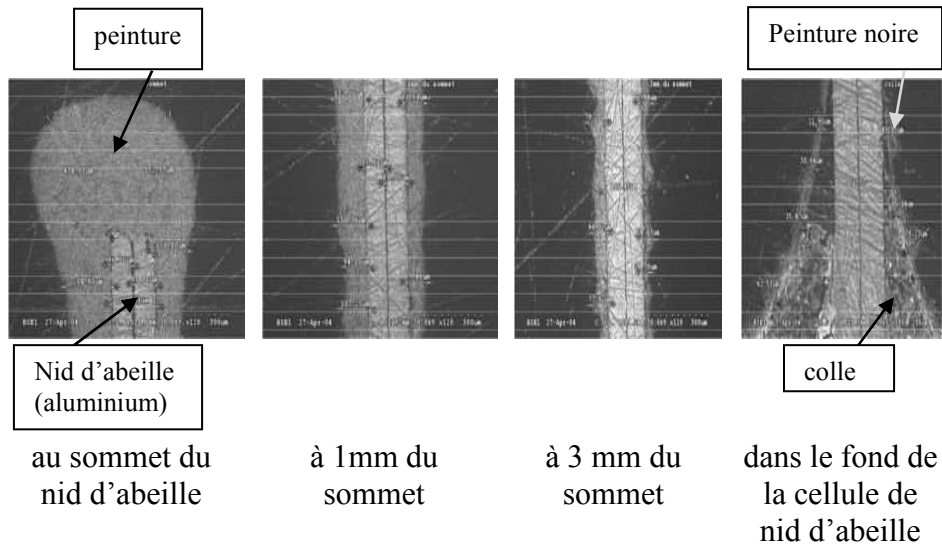


Figure 27 : Mesures de l'épaisseur de peinture le long des parois du nid d'abeille (mesures réalisées au microscope électronique)

Vérifications mécaniques

Le set-up d'essai doit permettre une marge de sécurité de 100 mm au minimum entre le satellite et la face interne de la tente thermique afin d'éviter tout dommage durant l'intégration du satellite et lors du test sous vide. Afin de vérifier ces marges, le set-up mécanique complet a été essayé avec une maquette grandeur réelle. Cette maquette était géométriquement représentative des dimensions du satellite Planck.



Figure 28 : Vérification des marges avec une maquette représentative du satellite

Résultats de la tente thermique

Le temps estimé par calcul pour le refroidissement de la tente thermique était d'environ 48 heures. Durant la phase d'essai avec le satellite, tous les panneaux de la tente thermique (partie hélium) étaient sous 20K après une journée de refroidissement.

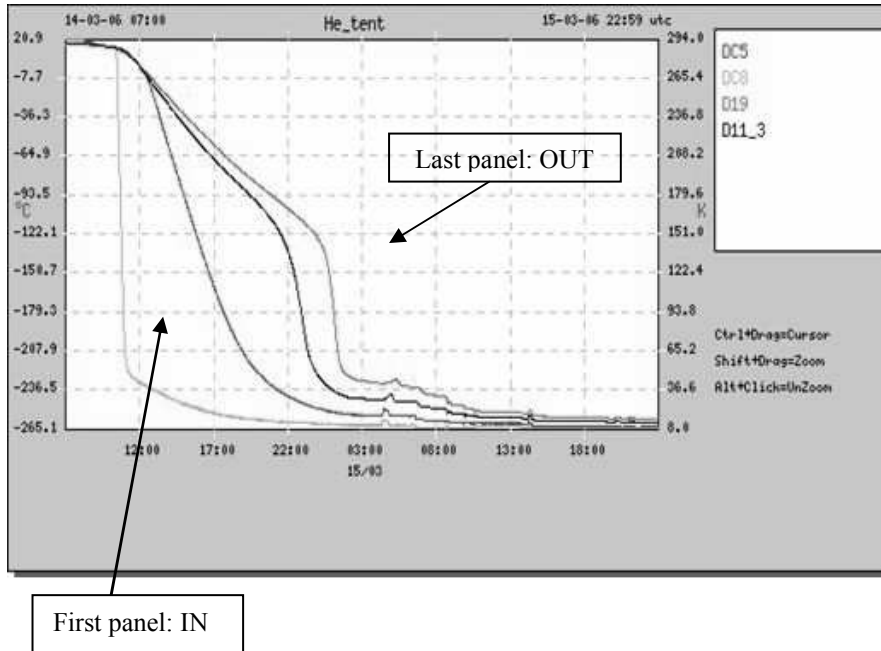


Figure 29: Refroidissement de la tente hélium durant le test FM#1

Les 32 panneaux hélium sont alimentés en série. A la stabilisation, tous les panneaux hélium sont sous 20K et l'homogénéité entre le premier et le dernier panneau est d'environ 6K. Concernant le satellite Planck, une température de 45K a été atteinte au niveau du V-groove3, confirmant de la sorte que le challenge de reproduire sur terre l'espace froid, tout autour du satellite, était un succès.

Optical shield

Le corps noir dans le domaine des radiofréquences, placé au niveau du plan focal juste en face des instruments doit avoir une stabilité de l'ordre de 1mK. Pour atteindre cela, un panneau thermique de type 'bain d'hélium liquide' supportant un corps noir dans les radiofréquences a été choisi. L'ensemble du système est appelé 'optical shield'.

L'optical shield est installé en face des instruments, à l'intérieur du satellite et est fixé sur la structure du couvercle. Un mouvement motorisé est implémenté afin de permettre l'introduction de l'optical shield dans la charge utile, en passant entre les réflecteurs (télescope) du satellite.

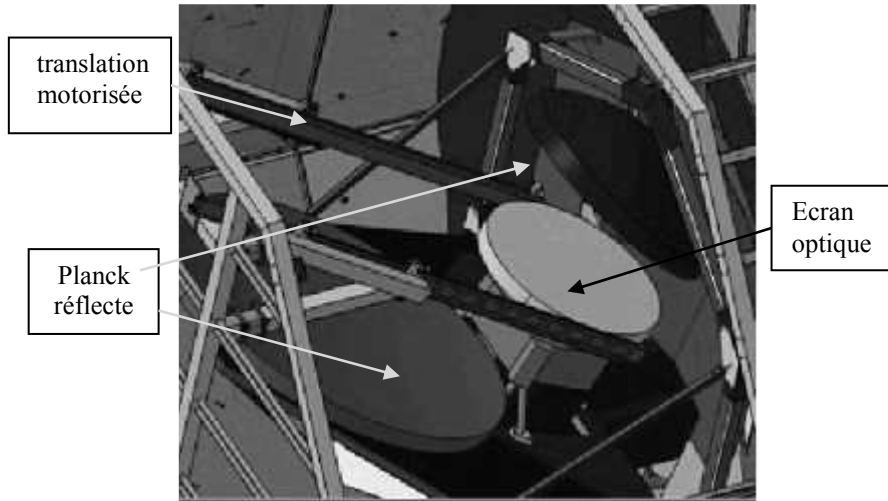


Figure 30 : Optical shield en face du plan focal du satellite

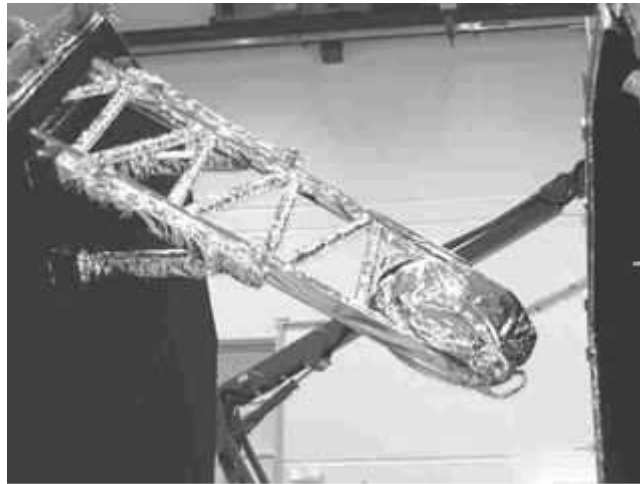


Figure 31 : Structure porteuse de l'optical shield (partie motorisée)

L'optical shield est fait de tuyaux de cuivre soudés sur une plaque de cuivre. Un réservoir d'hélium additionnel est placé au-dessus de la plaque en cuivre afin d'augmenter l'autonomie entre deux remplissages. L'optical shield a un diamètre de 825 mm.

Sur la plaque de cuivre est fixée une plaque d'aluminium comportant des pyramides d'Eccosorb. L'Eccosorb est un matériel qui a une haute

absorptivité dans le domaine des radiofréquences. Les plaques de cuivre et d'aluminium sont couplées thermiquement par 90 straps flexibles, permettant une contraction différentielle entre l'aluminium et le cuivre.

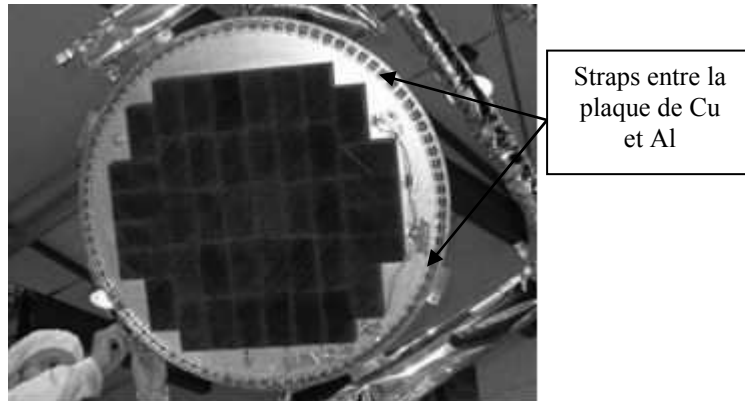


Figure 32 : Straps entre la plaque aluminium et la plaque de cuivre

Un modèle thermique a permis de prévoir l'homogénéité de la plaque de cuivre de l'optical shield, soit meilleure que 0,1K.

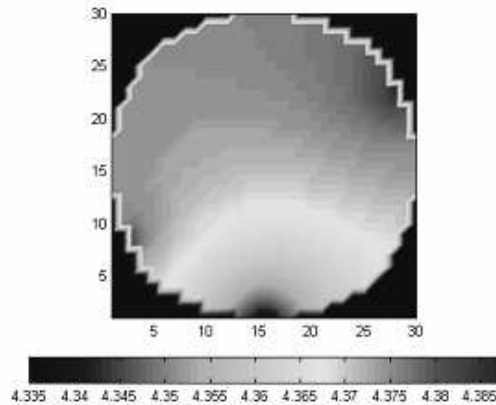


Figure 33 : Modélisation mathématique de l'homogénéité de l'optical shield (meilleure que 0,1K)

Les tests ont confirmé ces prévisions mathématiques. En effet, la plaque de cuivre est sous 5K et l'Eccosorb est 0,6K plus chaud. La stabilité (1 mK) et

l'homogénéité (0,1K) sont meilleures que demandées, excepté durant les phases de remplissage qui se font tous les 3 jours.

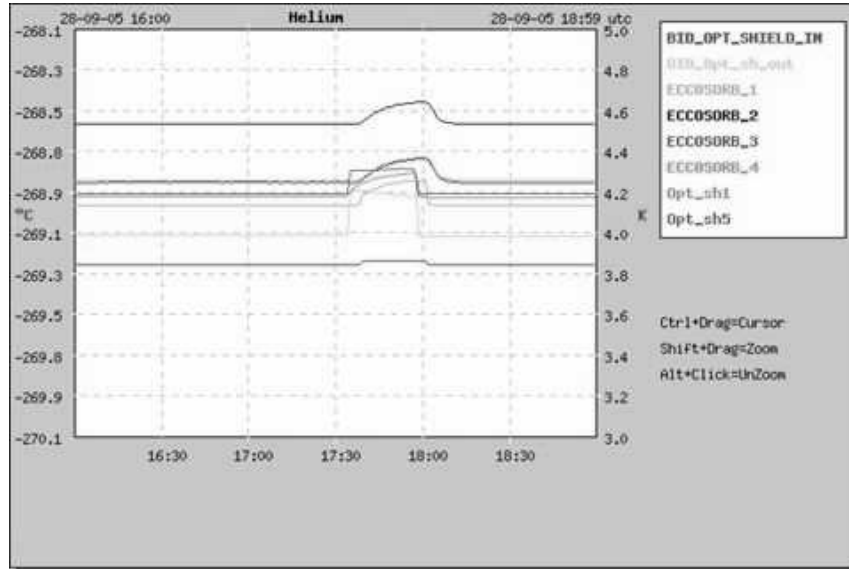


Figure 34 : Stabilisation thermique de l'optical shield et perturbations durant le remplissage

Afin de calibrer les instruments, trois sources thermiques ont été placées au centre de l'Eccosorb.

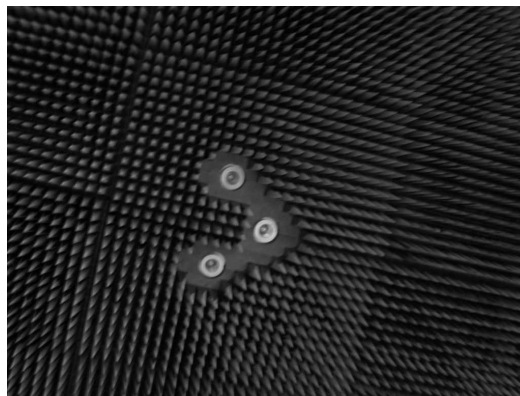


Figure 35 : Source de calibration au centre de l'Eccosorb



Figure 36 : Introduction de l'optical shield vers le plan focal.

Charcoal panel

La pression partielle d'hélium dans la cuve Focal 5 durant l'essai Planck est très critique. Elle doit être la plus faible possible afin d'éviter la création d'un film superfluide qui se condenserait sur le refroidisseur à dilution de 100mK, créant ainsi un lien thermique entre l'étage 100mK et l'étage 4K. La propriété d'adsorption de l'hélium par des charbons actifs a été utilisée pour diminuer le gaz résiduel d'hélium dans la cuve.

Un panneau fait de tubes soudés et de plaques sur lesquelles ont été collés des granulés de charbons actifs est rempli d'hélium liquide. Ce panneau est appelé 'charcoal panel'. La surface couverte avec du charbon actif est d'environ 2 m² permettant une capacité de pompage de l'ordre de 100 000 l s⁻¹ et un temps de saturation de l'ordre de deux fois la durée estimée de l'essai. Un réservoir a été ajouté afin d'augmenter l'autonomie entre deux remplissages. Ce panneau est placé à l'intérieur de la tente thermique.

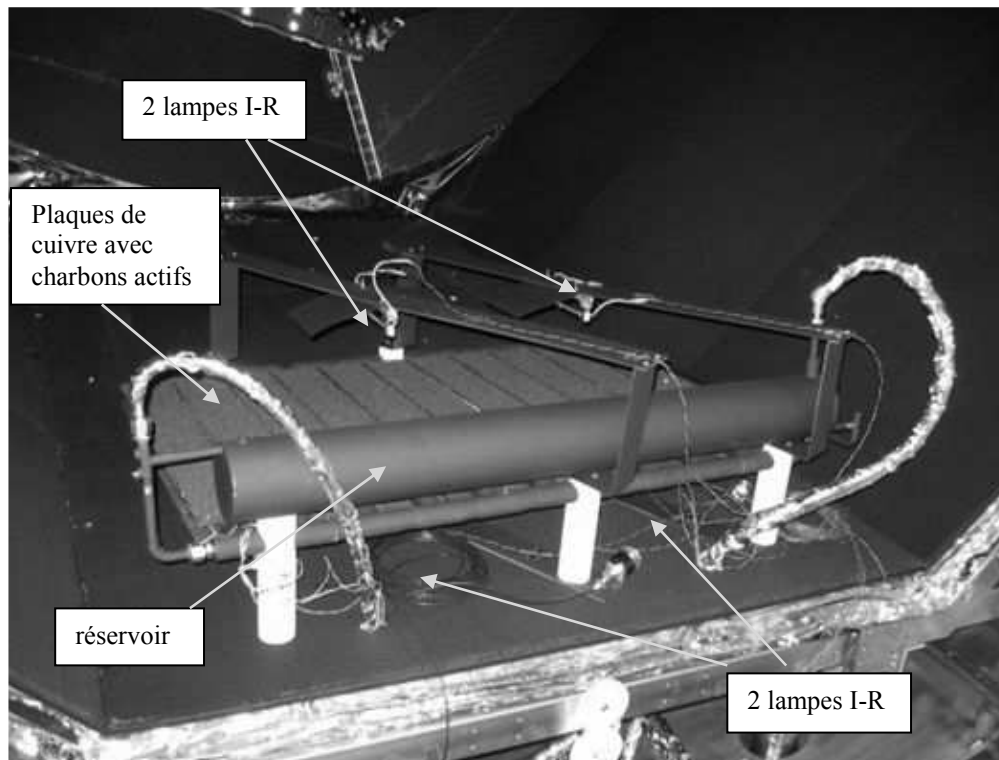


Figure 37 : Charcoal panel installé dans la tente thermique

Quatre lampes infrarouges de 500W chacune sont installées sur le charcoal panel afin de contrôler le dégazage du panneau lors de la phase de régénération, c'est-à-dire le réchauffage du panneau.

Les mesures au spectromètre de masse (RGA) installé sur la cuve montrent l'efficacité du panneau à charbons actifs; lors du remplissage du panneau à charbon actif en hélium liquide, la pression partielle d'hélium dans la cuve diminue d'un facteur 10.

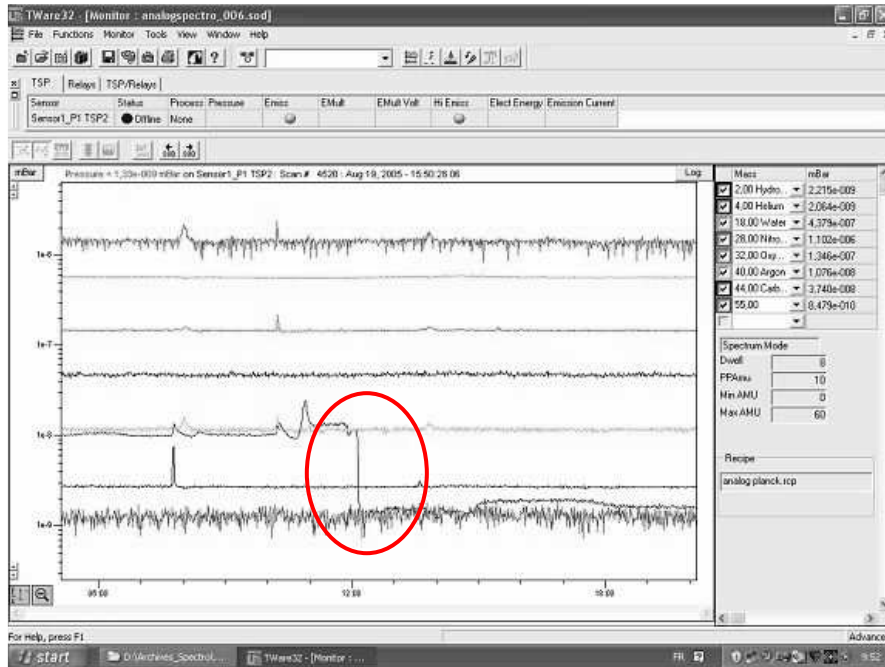


Figure 38 : Impact du charbon actif sur la pression partielle d'hélium

Instrumentation et système d'acquisition

Plusieurs types de senseurs sont utilisés pour suivre les températures du set-up et du satellite.

Pour les basses températures, des diodes au silicium de Lakeshore (montage en 4 fils, modèle DT-470-SD-11 A and modèle DT-470-SD-12A) ont été choisies. Des diodes calibrées (model DT-470-SD-13) sont utilisées pour le monitoring des températures de l'optical shield. Des sondes platine (PT100) et thermocouples sont utilisés pour les panneaux alimentés à l'azote.

L'ensemble des senseurs de température du set-up et du satellite est divisé en deux groupes répartis sur 6 data loggers Keithley 2701. La fréquence d'acquisition est la minute. Les diodes de l'optical shield et du charcoal panel sont mesurées par un data logger Lakeshore afin de suivre les températures en temps réel.

Toutes les données sont stockées et sauvegardées dans des bases de données sur deux serveurs. Les données sont accessibles via les réseaux internes à CSL mais également via le réseau internet ce qui permet aux clients de suivre les essais à distance.

5. Conclusion

Depuis plus de 35 ans le Centre Spatial de Liège est impliqué dans des essais spatiaux et cryogéniques tels que Météosat, le télescope ISO, etc...Les spécifications, qu'elles soient thermiques, mécaniques ou optiques, deviennent toujours plus complexes et le challenge à relever semble toujours plus inaccessible.

Tous les éléments doivent être étudiés dans les moindres détails car une faille, même petite peut compromettre tout un essai.

La réalisation de l'équipement du moyen d'essai doit être faite avec le plus grand soin si on veut atteindre les performances cryogéniques, même si les dimensions du satellite sont imposantes.

La durée des essais doit faire prendre conscience de l'importance des systèmes de redondances (groupes électrogène, no break, liquéfacteurs d'hélium de spare) pour se couvrir d'aléas qui auraient un impact important sur la durée de l'essai, sur sa performance et donc sur le coût.

Quant à l'essai, il ne pourra aboutir que parce que de nombreuses personnes, ingénieurs et techniciens, se seront relayés sans relâche au chevet du moyen d'essai pour mener à bien les différentes tâches liées à ces équipements.

Les modèles CQM, PFM#1 et FM#2 du satellite ont été testés avec succès au Centre Spatial de Liège. L'espace froid a ainsi été recréé sur terre. La pression partielle d'hélium, le niveau de micro vibration, le corps noir dans les radiofréquences ont permis de tester la chaîne complète des refroidisseurs du satellite Planck et d'atteindre 100mK sur le point le plus froid de la charge utile du satellite durant plus de 2 semaines (un dixième du zéro absolu!). Ce test a permis également de vérifier les performances des instruments, de les étalonner et ainsi de garantir les résultats des futures observations.

Actuellement, les dernières vérifications de l'interface entre Ariane 5 et le satellite sont en cours. Les essais de communications entre le satellite et la station de l'Esoc (centre de l'Esa pour le suivi du satellite) sont terminés. L'alignement des tuyères du satellite doit encore être vérifié.

En février, le satellite quittera Liège vers Kourou...vers d'autres aventures !

6. Références bibliographiques

6.1 Ouvrages

DELREZ C., COLLIN C., CHISOGNE JP., DOMKEN I., GRODENT C., TYCHON I., *Planck telescope thermal testing mechanical and thermal GSE design and manufacturing-Nordwijk (Estec) juin 2005*

DOMKEN I., BONNET E., JAMOTTON P., FRANCO P., GRODENT C., LIEBECQ S., THOMÉ M., TYCHON I., CUCCHIARO A., *Planck S/C thermal testing in Focal5 facility-Manhattan Beach (Los Angeles) octobre 2006*

JAMOTTON P., CUCCHIARO A., DOMKEN I., *Planck/Herschel cryogenic testing from elements to spacecraft in CSL premises-Colorado Spring juillet 2004*

TYCHON I., JAMOTTON P. , DOMKEN I. , CUCCHIARO A., GRODENT C., *Herschel/Planck environmental tests in the CSL facilities- Nordwijk (Estec) juin 2005*

6.2 Sources Internet

Wikipedia, site de l'Esa, site de ThalesAleniaSpace et FuturaSciences.