HAL
open science

Etude des échanges thermiques et conception d'un système de refroidissement pour le système de lecture du trajectographe SciFi de LHCb

Sonia Hamrat

To cite this version:

Sonia Hamrat. Etude des échanges thermiques et conception d'un système de refroidissement pour le système de lecture du trajectographe SciFi de LHCb. Physique Nucléaire Expérimentale [nucl-ex]. Université Clermont Auvergne [2017-2020], 2017. Français. NNT : 2017CLFAC104 . tel-01978554

HAL Id: tel-01978554

https://theses.hal.science/tel-01978554

Submitted on 11 Jan 2019

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.

ED SF n° d'ordre :

UNIVERSITE CLERMONT AUVERGNE
ECOLE DOCTORALE DES SCIENCES FONDAMENTALES

THESE

présentée pour obtenir le grade de

DOCTEUR D'UNIVERSITE

Spécialité :

Physique

Par
Sonia HAMRAT

Master
Conception Innovante - Maintenance – Durabilité
en Génie Mécanique

Étude des échanges thermiques et conception d'un système de refroidissement pour le système de lecture du trajectographe SciFi de LHCb

Sous la direction de Christine GASQ et Pascal PERRET

Soutenue publiquement le 13/12/2017, devant la commission d'examen :

M. MIALLIER Didier	Président
Mme CORTI Gloria	Rapporteur
M. SCHMIDT Burkhard	Rapporteur
Mme BADAUD Frédérique	Examinateur
M. PELLEGRINO Antonio	Examinateur
M. PERRET Pascal	Directeur de thèse

Thèse réalisée au Laboratoire de Physique de Clermont
IN2P3 -CNRS
Campus Universitaire des Cézeaux
4 Avenue Blaise Pascal
TSA 60026 CS 60026
63178 Aubière Cedex
Tél : +33 4 73 40 72 72
Fax : +33 4 73 26 45 98

Web : http ://clrwww.in2p3.fr/

Financement CNRS - Region Auvergne

Résumé

Dans le cadre de l'évolution du plus grand accélérateur circulaire de particules « LHC », un important programme de mise à niveau sur l'ensemble des détecteurs qui le constitue a été lancé. Parmi eux, on retrouve la mise à niveau du détecteur LHCb qui comprend le remplacement complet de plusieurs sous-détecteurs.

La fréquence de lecture élevée de 40MHz, sans précédent dans une expérience de physique des particules, et l'environnement de rayonnement sévère lié à l'augmentation de l'intensité du LHC, sont les principaux défis à relever par les nouveaux sous-détecteurs.

Le travail présenté dans ce manuscrit, décrit une petite partie de l'évolution du détecteur LHCb. Le développement et la construction d'un nouveau trajectographe à grande échelle, basé sur une nouvelle technologie à fibres scintillantes «SciFi», lues avec des photomultiplicateurs au silicium «SiPM», est l'un des projets clés du programme de mise à niveau de LHCb.

La première partie, consiste à étudier les échanges thermiques et à concevoir un système de refroidissement pour chaque Read-Out Box « ROB » qui contient deux cartes électroniques frontales « FE », et qui permettent de lire les données du détecteur. Ces dernières possèdent une dissipation thermique d'environ 110W.

Pour assurer le bon fonctionnement des composants électroniques, il est obligatoire de mettre en place un refroidisseur. Des contraintes importantes sont prisent en compte dans cette étude, la première représente l'espace limité en regard du besoin du système de refroidissement, des interfaces électroniques et mécanique, la seconde concerne les SiPM. Reliés à l'électronique par des câbles flexibles, elles sont situées à proximité de l'électronique « FE » et leur température de fonctionnement doit être parfaitement réglée autour des -40°C.

Des travaux de simulations numériques sur les logiciels FloTHERM et ANSYS ont été menés sur le banc expérimental réalisé au sein du laboratoire, et qui nous ont permis de déterminer la solution de refroidissement la mieux adaptée. Cette étude nous a aussi montré qu'il est plus que nécessaire d'intégrer des interfaces thermiques « IT» telles que des pâtes thermiques afin d'assurer un meilleur transfert de chaleur entre les composants électroniques et le refroidisseur.

La deuxième partie, représente une étude approfondie sur les interfaces thermiques qui sont un point délicat de transfert de chaleur, car elles peuvent avoir plusieurs dizaines de pour cent de la résistance thermique globale. Pour garantir une utilisation adéquate et durable de ces matériaux, plusieurs paramètres ont été vérifiés, en particulier la dureté, la consistance (pas de production de graisse ou d'huile) et la conductivité thermique, grâce à un banc de mesures adapté d'après la méthode normalisé ASTM D5470, grâce auquel on a pu mesurer le flux de chaleur qui traverse l'échantillon d'interface thermique testé et qui est généré par une source chaude et un source froide qui sont montées aux extrémités de notre banc.

Grâce à l'installation CHARME (CERN) et à la plate-forme PAVIRMA (Campus des Cézeaux), une série de mesure d'irradiations aux neutrons et aux rayons X sont également effectuées, correspondant à l'environnement dans lequel elles seront exposées dans l'expérience, d'un côté pour identifier les dégradations et changements possibles sur les résistances thermiques par l'analyse de l'impédance thermique, de l'autre pour identifier l'interface thermique qui convient le mieux à notre application et qui permet d'assurer un excellent échange thermique et donc un bon refroidissement de l'électronique frontale au sein du trajectographe du détecteur LHCb. .

Mots-clés : Étude Thermique, Simulation Thermique, FloTHERM, ANSYS, Système de Refroidissement, Refroidissement à Eau, Interface Thermique, Conductivité Thermique, Caractérisation Statique Thermique, Dégradation des Matériaux d'Interfaces, Tenus aux Radiations des Interfaces Thermiques.

Abstract

In the context of the evolution of the biggest circular accelerator of particles «LHC», an important program of upgrade on all the detectors which establishes itself was thrown. Among them, we find the upgrade of the detector LHCb which includes the complete replacement of several sub-detectors.

The frequency of high reading of 40MHz, an unprecedented in an experiment of physical appearance of particles, and the environment of severe radiation bound to the increase of the intensity of the LHC, are the main challenges by the new sub-detectors.

The work presented in this manuscript, described as a small part of the evolution of the LHCb detector. The development and the construction of a new wide-scale tracker, based on a new technology with scintillating fiber «SciFi», read with photomultipliers to the silicon «SiPM», is one of the key projects of the LHCb upgrade program.

The first part, consists in studying the thermal exchanges and designing a cooling system for every Read-Out Box «ROB» which contains two electronic front-end « FE », and which allow to read the data of the detector. The latter has a thermal dissipation about 110W.

To ensure the smooth running of electronic components, it is compulsory to set up a cooler. Important constraints are taken into account in this study, the first one represents the space limited compared to the need for the cooling system, the electronic interfaces and mechanical, the second concerns the SiPM. Connected with the electronics by flexible cables, they are located near the electronics «FE» and their temperature of operation is perfectly settled around -40 ° C.

Works of digital simulations on the software FloTHERM and ANSYS were led on the experimental bench realized within the laboratory, and which allowed us to determine the best adapted solution of cooling. This study also showed to us that he is more than necessity to integrate thermal interfaces «IT» such as thermal pastas to assure a better transfer of heat between electronic components and cooler.

The second part, represents an in-depth study on the thermal interfaces which are a delicate point of transfer of heat, because they can have dozens percent of the global thermal resistance. To guarantee an adequate and sustainable use of these materials, several parameters were verified, in particular hardness, consistency (no production of fat or oil) and the thermal conductivity, thanks to a bench of measures adapted according to the method normalized ASTM D5470, with this bench we could measure the flow of heat through the tested thermal interface sample and which is generated by a hot source and a cold source that are mounted at the ends of our bench.

With the installation CHARME (CERN) and PAVIRMA (Cézeaux), a series of measure of irradiations at the neutrons and the X-rays are also made, corresponding to the environment in which they will be exposed in the experience, on one side to identify the damages and the possible changes on the thermal resistances by the analysis of the thermal impedance, the other one to identify the thermal interface which suits best our application and which allows to assure an excellent thermal exchange and thus a good cooling of the frontal electronics within the trajectographe of the detector LHCb.

Keywords: Thermal Study, Thermal Simulation, FloTHERM, ANSYS, Cooling System, Water Cooling, Thermal Interface, Thermal Conductivity, Static Thermal Characterization, Interfacing Materials Degradation, Radiation Interfaces of Thermal Interfaces.

Remerciements

Une thèse est un long chemin, un vrai parcours du combattant, qui peut parfois vite nous mener dans un terrain inconnu qui nous pousse vers nos limites. C'est dur et enrichissant à la fois celà nous rend bien plus fière de notre parcours à la fin. Par conséquent, la construction de ce mémoire n'aurait été possible sans l'intervention de certaines personnes. Qu'elles trouvent ici l'expression de mes plus sincères remerciements pour leurs précieux conseils.

En première lieu, je tiens à remercier mon directeur de thèse M. Pascal PERRET sans qui je n'aurais pas tenté cette aventure.

Je remercie également Mme Christine GASQ pour son encadrement, son soutien, ces conseils, sa gentillesse, tout l'intérêt qu'elle a porté à mon travail. Sans oublier M. Christophe INSA et M. François DAUDON pour leur soutien, discussion, conseil et aide précieuse qu'ils ont pu m'apporter. Au fil du temps je peux dire que ces belles personnes sont devenues ma deuxième famille car ils ont toujours été là pour moi.

Merci à mon collègue et ami M. Pierre-Etienne VERT pour sa disponibilité lorsque j'en avais besoin, son aide et ses conseils, ainsi qu'à son amitié que j'espère garder précieusement le plus longtemps possible.

Merci à M. Richard VANDAELE avec sa joie de vivre et sa bonne humeur qui a été un excellent conseillé et qui m'a soutenu quand j'en avais le plus besoin. Ainsi qu'à M. Nicolas PILLET, M. Laurent ROYER, M. Samuel MANEN et M. Alexandre SOULIER qui m'ont tout de suite accueilli dans leur équipe comme si j'en faisais partie.

Je remercie M. Dominique PALLIN directeur du laboratoire de m'avoir accueilli au sein du LPC et pour sa gentillesse, ainsi que l'ancien directeur M. Alain FALVARD.

Merci aussi aux autres collègues du LPC, Mme Magali MAGNE pour son aide précieuse et ces moments de discussion qui des fois nous plonge vers d'autres ateliers complètements différents de la vie du laboratoire, ainsi qu'à M. Guillaume BLANCHARD et M. Eric SAHUC, pour leur bonne humeur et joie de vivre.

Merci aux personnes de mon service mécanique, et particulièrement à M. Hervé CROIZET, M. Gilles MAGAUT et M. Guy REINMUTH pour tous les services et conseils qu'ils m'ont prodigué dès le début de ma thèse, ainsi que les personnes des autres services microélectronique, électronique et informatique, sans oublier toutes les personnes, chercheurs et physiciens, qui ont pu m'aider de prés ou de loin.

Je souhaite exprimer toute ma gratitude aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer et juger mon travail.

Je souhaite vivement remercier mon entourage, mes chers parents, mon frère, ma sœur, ma tante et son défunt mari, à qui je dédie ce mémoire. Toutes ces merveilleuses personnes m'ont soutenu et apporté tout le courage et l'amour nécessaire qu'il faut pour continuer, sans eux je ne serais pas là. Sans oublier d'autres personnes toutes aussi importantes à mes yeux, mon oncle Didi et sa petite famille ainsi que mon oncle Dadou et sa petite famille sans oublier ma tante, que je remercie profondément pour leur soutien.

Je remercie en particulier ma chère amie Arianna qui m'a soutenu dans les moments les plus difficiles.

Et pour finir un énorme merci à mes amis Alain, Dimia, Jonathan, Nadia et d'autres, tous aussi importants que je ne peux citer par manque de place, pour nos discussions passionnantes, leur conseils précieux et pour leur soutien.

Pour ma petite famille !

Table des matières

Résumé i

Abstract iii

Remerciements v

Table des matières vii

Table des figures xiii

Liste des tableaux xix

Liste des algorithmes xxi

Introduction 1

Partie I - Étude thermique et conception du système de refroidissement des cartes électroniques du trajectographe LHCb 5

1 Présentation du LHC et de l'expérience LHCb 7

1.1 Introduction 7
1.2 Présentation du CERN 7
1.3 Le LHC 8
1.4 Le détecteur LHCb 10
1.5 Le nouveau trajectographe de LHCb « SciFi » 12
1.5.1 Introduction 12
1.5.2 Le SciFi 13
1.5.3 Les Read-Out Box du SciFi 15

1.5.4 Électronique Front-End 18
1.5.5 Système de refroidissement de l'électronique FE 19
1.5.6 Environnement de radiations 19
1.6 Conclusion 21

2 Principes et technologies de refroidissement en électronique 23
2.1 Introduction 23
2.2 Généralités sur la dissipation thermique dans les composants et systèmes électroniques 24
2.2.1 Rappels élémentaires de thermique 24
2.2.2 Les enjeux de la dissipation thermique 26
2.3 Principe de transfert de la chaleur 27
2.4 Refroidissement des composants électroniques 29
2.4.1 Généralité sur les systèmes de refroidissement 31
2.4.2 Les différents systèmes de refroidissement 32
2.5 Conclusion 37

3 Étude thermique des cartes électroniques du trajectographe LHCb et conception du système de refroidissement 39
3.1 Introduction 39
3.2 La FE-Box et son bilan énergétique 40
3.2.1 Première version des cartes FE 41
3.2.2 Deuxième version des cartes FE 42
3.2.3 Conception des cartes d'essais FE 46
3.3 Simulation des cartes seules sans refroidissement 48
3.3.1 Avec la version n°1 des cartes FE 48
3.3.2 Avec la version n°2 des cartes FE 49
3.4 Calcul et estimation du système de refroidissement 51
3.4.1 Estimation du débit d'eau 51
3.4.2 Estimation de la surface de convection 51
3.4.3 Vitesse d'écoulement 52
3.4.4 Nombre de Reynolds 52
3.5 Solutions envisagées pour le refroidissement 53
3.5.1 Solutions avec des plaques embouties 53
3.5.2 Solutions avec des blocs froids 57
3.6 Modélisations et simulations thermiques 62
3.6.1 Description de la modélisation FloTHERM 62
3.6.2 Description de la modélisation ANSYS 62
3.6.3 Simulations FloTHERM des solutions envisagées avec les plaques embouties 63
3.6.4 Simulations des solutions envisagées avec les blocs froids . . 66

3.7 Conclusion 70

4 Réalisation du banc expérimental et tests du système de refroidissement des cartes électroniques FE 73

4.1 Introduction 73
4.2 Description des moyens de test mis en œuvre 74
4.2.1 La FE-Box 74
4.2.2 Système de refroidissement 77
4.2.3 Banc de tests pour Nikhef 79
4.2.4 Banc de tests pour LPC 80
4.3 Tests des différents systèmes de refroidissement pour la FE-Box . . 81
4.3.1 Première version de la carte FE 81
4.3.2 Deuxième version de la carte FE (tests au LPC) 85
4.4 Conclusion 91

Partie II - Étude et conception d'un banc de mesures de conductivité thermique pour les interfaces thermiques 93

5 Interfaces thermiques et méthode de caractérisation thermophysique ASTM D5470 95

5.1 Introduction 95
5.2 Les interfaces thermiques et leurs compositions 96
5.3 Les interfaces thermiques utilisées 101
5.4 Méthode d'essai standard ASTM D5470 104
5.4.1 Explication générale de la norme ASTM D5470 104
5.4.2 Éléments nécessaires pour la constitution du banc de mesures 105
5.4.3 Application de la norme ASTM D5470 à notre étude 107
5.5 Conclusion 110

6 Conception, fabrication et caractérisation du banc de mesures de la conductivité thermique « λ » 111

6.1 Introduction 111
6.2 Conception du banc expérimental 112
6.2.1 Calcul et conception du banc de mesures 112
6.2.2 Structure du banc de mesures 113
6.2.3 Le flux de chaleur 115
6.2.4 Instrumentation du banc expérimental 121
6.2.4.1 Mesure des températures 121

6.2.5 Contrôle et calcul des incertitudes de mesures des paramètres de la mesure . . . 123
6.2.5.1 Résistance thermique et conductivité thermique . . 123
6.3 Validation du banc de mesures de la conductivité thermique 128
6.3.1 Protocole des mesures de la conductivité thermique 128
6.3.2 Calcul de l'épaisseur de l'interface thermique sous pression et en cycle de chauffe . . . 129
6.3.3 Mesure de la discontinuité de température au niveau des interfaces thermiques . . . 132
6.3.4 Résultats obtenus pour un échantillon de référence d'interface thermique « T1.3M » . . . 133
6.4 Conclusion . . . 137

7 Caractérisation des interfaces thermiques 139
7.1 Introduction . . . 139
7.2 Observations et mesures sur les échantillons avant irradiations . . . 140
7.3 Protocole d'irradiation des interfaces et résultats de caractérisations obtenus . . . 149
7.3.1 Conditions d'irradiation aux rayons X . . . 149
7.3.2 Résultats et observations après irradiation aux rayons X . . 152
7.3.3 Conditions d'irradiation aux neutrons . . . 160
7.3.4 Résultats et observations après irradiations aux neutrons . . 163
7.4 Conclusion . . . 167

Conclusion et perspectives 169

Annexes 173

A Mesures de température par thermocouple 175

B Incertitude sur la mesure de température en fonction des thermocouples 183

C Métrologie thermique 187
C.1 Métrologie thermique . . . 187
C.1.1 Introduction . . . 187
C.1.2 Classification des méthodes de caractérisation thermique . . 188
C.1.2.1 Méthode en régime permanent . . . 189
C.1.2.2 Méthode en régime quasi-établi . . . 190

C.1.2.3 Méthode en régime transitoire 191

D Calcul de dilatation du banc de mesures de la conductivité thermique 195

Bibliographie 203

Table des figures

1.3.1 Large Hadron Collider LHC. 8
1.3.2 Vue satellite du LHC. 9
1.4.1 Le détecteur LHCb. 10
1.4.2 Emplacement des détecteurs sur LHCb. 12
1.5.1 Positionnement du trajectographe SciFi sur LHCb. 13
1.5.2 Le trajectographe SciFi. 14
1.5.3 Vue schématique des nouveaux plans de détection. 15
1.5.4 Vue d'une ROB à une extrémité d'un module de fibres scintillantes. 16
1.5.5 Eclaté d'une ROB sans le système de refroidissement des SiPMs. . 17
1.5.6 SiPM monté sur un Kapton flex-PCB avec des connecteurs pour l'électronique FE. 17
1.5.7 Schéma fonctionnel de la chaîne de lecture. 19
1.5.8 Le flux équivalent de 1 MeV de neutron attendue par cm^2 à $z = 783$ cm (T1) après une luminosité intégrée de 50 fb^{-1}. 20
1.5.9 La dose attendue dans le plan X - Y à $z = 783$ cm (T1) après une luminosité intégrée de 50 fb^{-1}. 21

2.2.1 Schéma du transfert de chaleur conductif. 25
2.2.2 Schéma du transfert de chaleur convectif. 25
2.2.3 Schéma du transfert de chaleur radiatif. 26
2.3.1 Assemblage en 3D d'un module électronique. 28
2.3.2 Les différentes couches qu'on peut trouver dans un module électronique. 28
2.4.1 Principe de dissipation de chaleur dans un composant électronique. 29
2.4.2 Modèle thermique équivalent pour un assemblage d'un composant électronique sur son dissipateur. 31
2.4.3 Module Peltier. 32
2.4.4 Dissipateur thermique. 33
2.4.5 Caloduc. 34
2.4.6 Principe de fonctionnement d'un Caloduc. 34
2.4.7 Ensemble dissipateur à ventilateur axial. 35

2.4.8 Exemple de circuit de refroidissement par liquide. 35
2.4.9 Autres moyens de refroidissement pour l'électronique. 37

3.2.1 La première version des cartes FE (deux ensembles par FE-Box). . 41
3.2.2 Principe de fonctionnement des cartes FE version n°1. 41
3.2.3 La deuxième version des cartes FE (deux ensembles par FE-Box). 43
3.2.4 Les cartes d'essais FE version n°1 conçus par le LPC. 46
3.2.5 Les cartes d'essais FE version n°2 conçus par le LPC. 46
3.3.1 Carte thermique des cartes FE seules sans refroidissement sur FloTHERM. 48
3.3.2 Carte thermique de la FE-Box sans refroidissement. 50
3.5.1 La boîte des cartes électroniques FE. 54
3.5.2 Plaque avec le circuit d'eau en forme de serpentin qui représente la solution °1. 55
3.5.3 Autres modèles de refroidisseurs qui représentent la solution °2 et la solution °3. 55
3.5.4 Montage de la première solution du système de refroidissement qui consiste a l'assemblage des refroidisseurs sur la FE-Box. 56
3.5.5 Les deux blocs de refroidissement pour l'électronique FE avec un seul tube (solution n°4). 57
3.5.6 Les deux blocs de refroidissement pour l'électronique FE avec deux tubes. 57
3.5.7 Blocs de refroidissement pour les FE-Box qui se trouvent sur les plans inclinés. 58
3.5.8 Montage de la dernière solution de refroidissement pour la FE-Box. 59
3.5.9 Le montage des 6 FE-Box et la chaîne de refroidissement sur un demi-plan du détecteur. 60
3.5.10 Montage du second dissipateur en aluminium sur la carte Master. . 61
3.6.1 Simulation de la solution n°1 du système froid. 63
3.6.2 Simulation de la solution n°2 du système froid. 64
3.6.3 Simulation de la solution n°3 du système froid. 65
3.6.4 Simulation de la solution n°4 du système froid. 66
3.6.5 Carte thermique de la FE-Box sur ANSYS avec les vraies puissances dissipées des cartes FE, mais avec la géométrie simplifiée des cartes d'essais FE pour le cas défavorable. 68
3.6.6 Carte thermique de la FE-Box sur FloTHERM avec les cartes d'essais. 70

4.2.1 Composition de la FE-Box. 75
4.2.2 Le premier dissipateur conçu et réalisé par le LPC pour le banc de tests du système de refroidissement des cartes FE version n°1. . . . 76

4.2.3 Dissipateur version n°2 de la carte FE avec l'emplacement des interfaces thermiques qui se positionnent exactement là où on a des composants électroniques afin d'assurer le contact thermique entre les deux surfaces. 77
4.2.4 Les premiers blocs froids conçus pour le banc de tests. 78
4.2.5 Blocs de refroidissement fabriqués au LPC. 78
4.2.6 Maquette sur CATIA du banc de mesure pour le refroidissement de la FE-Box. 80
4.3.1 Le banc de tests pour le refroidissement de la FE-Box utilisé à Nikhef. 81
4.3.2 Courbes des résultats obtenus lors des tests de refroidissement à Nikhef. 82
4.3.3 Le banc de tests pour le refroidissement de la FE-Box utilisé au LPC avec les cartes d'essais version n°1. 84
4.3.4 Le banc de tests pour le refroidissement de la FE-Box utilisé au LPC avec les cartes d'essais. 86

5.2.1 Graisse thermique de chez RS. 98
5.2.2 Plaques élastomériques ou « PAD » - Image du fabricant Stacem. 99
5.2.3 Bandes adhésives thermiquement conductrices. 100
5.2.4 Matériau à changement de phase - Image du fabricant Stacem. . . 101
5.3.1 PADs Thermiques utilisés dans cette étude. 102
5.4.1 Représentation graphique de la norme ASTM D5470. 106
5.4.2 Application de la norme ASTM D5470 à notre étude. 107
5.4.3 Méthode de caractérisation des interfaces thermiques. 108

6.2.1 Banc de mesures de la conductivité thermique. 114
6.2.2 La source froide « Refroidisseur ». 115
6.2.3 Modélisation de la source chaude sous le logiciel CATIA 116
6.2.4 Montage de l'isolation sur le banc de mesures. 117
6.2.5 Matelas isolant elit. 118
6.2.6 Source chaude avec cartouches chauffantes. 118
6.2.7 Schéma de fonctionnement de la carte Arduino qui sert de régulateur de température pour les cartouches chauffantes. 119
6.2.8 Maquette sous CATIA du banc de mesures de conductivité thermique. 120
6.2.9 Montage et profil de température pour l'étalonnage des thermocouples dans un bain-thermostaté et la détermination de l'erreur de mesure. 122
6.2.10 Schéma 2D du banc de mesures et les différents paramètres nécessaires qui le complète. 124

6.2.11 Positionnement et dénomination des thermocouples T sur le banc de test. 127
6.3.1 Banc expérimental de caractérisation de la conductivité thermique des interfaces. 129
6.3.2 Schéma de positionnement des paramètres à calculer pour la dilatation des matériaux du banc de mesures. 130
6.3.3 Distribution de température avec l'interface thermique Compelma T1.3M échantillon n°4 test n°1 d'épaisseur 1,771 mm. 132
6.3.4 Positionnement des thermocouples sur le banc de mesures et courbes de stabilisation de température. 134
6.3.5 Courbes de comparaison de température des différents échantillons T1.3M. 135
6.3.6 Dégradation de la surface du bloc cylindrique supérieur en contact avec l'interface thermique. 136

7.2.1 Duromètre Shore 00. 140
7.2.2 Histogramme pour le rapport entre la conductivité mesurée et celle donnée par le fabricant. 144
7.2.3 Distribution de température des échantillons HC3.0 et HC5.0 testés lors de la caractérisation thermique avant tests d'irradiations. . 146
7.2.4 Distribution de température des échantillons T2.5G, T003M et T4.5M testés lors de la caractérisation thermique avant tests d'irradiations. 147
7.2.5 Distribution de température des échantillons Putty T013, TFLEX et TH-1851 testés lors de la caractérisation thermique avant tests d'irradiations. 148
7.3.1 Irradiateur à rayons X de la plate-forme PAVIRMA. 150
7.3.2 Faisceau d'irradiation aux rayons X de PAVIRMA. 151
7.3.3 Histogramme pour le rapport entre la conductivité mesurée après et avant irradiation. 155
7.3.4 Distribution de température des échantillons HC3.0, HC 5.0 et T1.3M testés lors de la caractérisation thermique après test d'irradiations aux rayon X. 156
7.3.5 Distribution de température des échantillons T2.5G, T003M et T4.5H testés lors de la caractérisation thermique après test d'irradiations aux rayon X. 157
7.3.6 Distribution de température des échantillons Putty T013, TFLEX et TH-1851 testés lors de la caractérisation thermique après test d'irradiations aux rayon X. 158
7.3.7 Histogramme des différents résultats obtenus lors de la caractérisation de la conductivité thermiques des échantillons testées. . . . 159

7.3.8 Cern High-energy AcceleRator test facility (CHARM). 160
7.3.9 Courbes FLUKA des tests d'irradiations pour la configuration CuOOOO.161
7.3.10 Installation des interfaces thermiques pour les tests d'irradiations à CHARM. 162
7.3.11 Histogramme pour le rapport entre la conductivité mesurée après et avant irradiation aux neutrons. 166
7.3.12 Histogramme des différents résultats obtenus lors de la caractérisation de la conductivité thermique des échantillons testées avant et après irradiations. 167

A.1 Montage illustrant l'effet Seebeck. 176
A.2 Exemple de dispositif de mesure de coefficient Seebeck. 177
A.3 Schéma de connexion entre un thermocouple type T et une centrale de mesure numérique. 179
A.4 Schéma d'un thermocouple. 179
A.5 Tension des thermocouples en fonction de la température. 180
A.6 Coefficient de Seebeck (S) en fonction de la température. 180

B.1 Principe de détermination de la formule de correction par rapport au thermocouple de référence T1, pour le thermocouple T2. 184
B.2 Correction du thermocouple T2 en fonction du thermocouple de référence T1. 185

C.1 Principe de mesure en régime permanent. 189
C.2 Principe de la plaque chaude gardée. 189
C.3 Principe de la méthode de la barre. 190
C.4 Principe de la méthode du fil chaud. 191
C.5 Principe de la méthode flash arrière. 192

D.1 Comparateur numérique. 196
D.2 Calcul de dilatation du banc sans interface thermique. 197

Liste des tableaux

2.1 Valeurs du coefficient de transfert de chaleur par convection « h » selon le mode de refroidissement. 32

3.1 Estimation de la puissance des cartes FE version n°1. 42
3.2 Consommation et puissance des DC-DC. 44
3.3 Consommation et puissance des autres composants des cartes FE. 45
3.4 Puissance des composants des cartes d'essais FE. 47
3.5 Résultats de simulations thermiques de la FE-Box sans refroidissement. 48
3.6 Puissance maximale des composants de la version n°2 des cartes FE. 49
3.7 Résultats de simulation thermiques de la FE-Box sans refroidissement sur ANSYS. 50
3.8 Estimation de la surface d'échange pour un « h » fixé à 2000 W/m².K avec plusieurs valeurs de $\triangle T$ 52
3.9 Résultats de simulation pour la solution n°1. 63
3.10 Résultats de simulation pour la solution n°2. 64
3.11 Résultats de simulation pour la solution n°3. 65
3.12 Résultats de simulation pour la solution n°4. 66
3.13 Résultats de la simulation du nouveau système de refroidissement avec ANSYS sur les cartes d'essais FE avec les puissances dissipées des vraies cartes FE. 69
3.14 Résultats de la simulation FloTHERM du système de refroidissement sur les cartes d'essais FE version n°2. 69

4.1 Résultats obtenus par les tests expérimentaux du système de refroidissement de la FE-Box effectués à Nikhef avec les vraies cartes FE. 83
4.2 Résultats obtenus par les tests expérimentaux du système de refroidissement de la FE-Box effectués au LPC avec les cartes d'essais version n°1. 84

4.3 Principales caractéristiques physiques de l'alliage utilisé dans le 1er test de refroidissement pour la version n°2 des cartes d'essais FE. . 87
4.4 Résultats des mesures effectuées avec les blocs froids en aluminium. 87
4.5 Principales caractéristiques physiques de l'alliage utilisé dans le 2ème test de refroidissement pour la version n°2 des cartes d'essais FE. 88
4.6 Résultats des mesures effectuées avec les blocs froids en cuivre. . . 88
4.7 Principales caractéristiques physiques de l'alliage utilisé dans le 3ème test de refroidissement pour la version n°2 des cartes d'essais FE. 89
4.8 Résultats des mesures effectuées avec les blocs froids en inox. . . . 90

5.1 Interfaces thermiques utilisées pour l'étude de la conductivité thermique. 103

6.1 Caractéristiques physiques de l'Aluminium 2017A. 113
6.2 Caractéristiques physiques du cuivre CW004A. 116
6.3 Caractéristiques thermiques du matelas isolant elit. 118
6.4 Erreurs des différents thermocouples par rapport au thermocouple de référence T_1. 122
6.5 Comparaison des différents paramètres du pad T1.3M. 135

7.1 Valeurs données, et mesurées de la dureté Shore des ITs. 141
7.2 Observations visuelles des interfaces thermiques. 142
7.3 Valeurs données, et mesurées de l'épaisseur des ITs. 143
7.4 Résultats obtenus de la caractérisation thermique des neuf interfaces thermiques. 145
7.5 Incertitudes sur les paramètres mesurées. 145
7.6 Valeurs données, et mesurées de la dureté Shore des ITs, ainsi que celles mesurées avant et après irradiations aux rayons X. 152
7.7 Valeurs données, et mesurées de l'épaisseur des ITs après irradiations aux rayons X. 153
7.8 Résultats obtenus de la caractérisation thermique après irradiations aux rayons X des neuf interfaces thermiques. 154
7.9 Incertitudes sur les paramètres mesurées pour les tests après irradiation. 155
7.10 Paramètres du test d'irradiation aux neutrons des interfaces thermiques. 161
7.11 Niveau de rayonnement délivré pour les interfaces thermiques à CHARM. 163

7.12 Valeurs données de l'épaisseur des ITs, ainsi que celles mesurées avant et après irradiations aux neutrons. 164
7.13 Résultats obtenus de la caractérisation thermique après irradiations aux neutrons des neuf interfaces thermiques. 165
7.14 Incertitudes sur les paramètres mesurées pour les tests après irradiation aux neutrons. 165

A.1 Classement et principales caractéristiques des thermocouples normalisés. 178

C.1 Tableau des choix d'une méthode d'après la gamme de conductivité thermique. 193

D.1 Mesure de la dilatation thermique grâce au comparateur numérique. 196

Introduction

Au sein du projet Upgrade LHCb, la collaboration LHCb s'est lancée dans le développement et la construction d'un nouveau trajectographe à grande échelle, basé sur une nouvelle technologie de fibres scintillantes « SciFi », lues avec des Photomultiplicateurs Silicium « SiPM ». C'est l'un des principaux projets du programme de mise à niveau de l'expérience LHCb.

En combinant des fibres de $250\,\mu m$ de diamètre avec des SiPMs (Silicon Photomultipliers) à 128 canaux pour leur lecture, il est possible d'atteindre une résolution sur la position des traces inférieure à $100\,\mu m$. Le détecteur devrait pouvoir fonctionner avec les performances requises pour une luminosité intégrée allant jusqu'à $50\,fb^{-1}$. De nouvelles cartes électroniques sont donc conçues pour cette lecture (Front-End). Elles ont pour objectif de lire, numériser et traiter les signaux des SiPMs reliés aux fibres. Les cartes doivent réaliser la lecture du détecteur à haute fréquence ($40\,MHz$), une lecture qui sera commune à tous les systèmes de LHCb. Pour bien fonctionner, les SiPMs doivent être maintenus à une température de $-40°C$. Pour cela, un système de refroidissement est nécessaire. L'ensemble SiPMs avec leur système de refroidissement est contenu dans une boite appelée Cold-Box.

Les travaux de ce mémoire de thèse s'emploient dans une première partie à étudier la dissipation thermique des cartes électroniques du trajectographe LHCb et la conception d'un système de refroidissement pour ces cartes. L'ensemble des cartes avec le système de dissipation thermique est contenu dans une boîte appelée FE-Box.

L'étude du système de refroidissement par convection forcée et avec de l'eau comme liquide caloporteur, nous a imposé plusieurs étapes de simulations à l'aide des logiciels utilisant la méthode des éléments finis FloTHERM et ANSYS et des tests pour lesquels la conception des bancs a été effectuée sous le logiciel de conception assistée par ordinateur CATIA.

En premier lieu, nous avons effectué une simulation des cartes électroniques sans boîtier ni système de refroidissement afin de déterminer leur carte de température. Ce calcul nous a permis de connaître les points de température les plus élevés et donc de savoir où concentrer en priorité le refroidissement. Ensuite, nous avons effectué des simulations de plusieurs versions du système de refroidissement nous

paraissant adaptées à notre cas. Dans la suite des développements, le système de refroidissement des SiPMs devenant de plus en plus imposant, nous avons dû réduire l'encombrement de notre propre système de refroidissement, ce qui nous a amené à de nouvelles simulations.

Une partie des cartes étant enfin disponibles à Nikhef (laboratoire en Hollande Septentrionale où ces cartes étaient développées), nous avons souhaité effectuer des premiers tests, couplés à des tests électroniques. Nous nous sommes donc rendus aux Pays-Bas pour ces premiers tests. Suite à ces tests, nous avons voulu faire des cartes électroniques d'essais (PCB muni de pièces fabriquées en impression 3D pour les composants et dans lesquelles sont placées des résistances chauffantes) pour pouvoir réaliser des tests sur place au LPC. Cela nous a donc permis d'obtenir des premiers résultats sur place comparables aux mesures effectuées à Nikhef afin de valider nos cartes d'essais.

Les développements des cartes électroniques ont également amené des modifications de ces cartes vers une version n°2 pour lesquelles la dissipation totale est passée de 90 Watts environ à 110 Watts environ.

Nous avons donc aussi développé une version n°2 des cartes d'essais afin de réaliser de nouveaux tests.

Nous avons effectué de nouvelles simulations sur les cartes électroniques version n°2 pour connaître la carte des températures et vérifier si notre principe de système de refroidissement était toujours adapté. Nous avons ensuite effectué des tests sur les cartes d'essais version n°2 avec différents matériaux tel que l'aluminium, le cuivre et l'inox, dans le but de définir le matériau le mieux adapté pour cette expérience.

Après avoir déterminé le système de refroidissement des cartes FE le plus efficace, il nous reste encore à définir les interfaces thermiques les mieux adaptées et celles qui résisteront le mieux aux radiations émises par l'expérience LHCb.

C'est pour cela que la deuxième partie de cette thèse est consacrée à l'étude de la conductivité thermique des interfaces thermiques avant et après irradiation aux différentes particules telles que les rayons X et les neutrons.

Dans le but de faire une étude de caractérisation de la conductivité thermique, la seconde partie de ce mémoire est consacrée à la fabrication d'un banc expérimental qui suit une méthode normalisée ASTM D5470. Après avoir détaillé la démarche, les moyens de tests et les méthodes qui sont utilisés pour mener à bien cette étude, nous exposons les résultats expérimentaux de caractérisation obtenus sur un panel de neuf échantillons d'interfaces thermiques.

Le dernier chapitre est consacré à l'exposition du protocole du déroulement des deux tests d'irradiations, aux rayons X et aux neutrons, qui se sont déroulés respectivement sur la plate-forme PAVIRMA, au Campus des Cézeaux à Clermont-Ferrand, et à CHARM qui se trouve au CERN. Les résultats des mesures de

caractérisation de la conductivité thermique des neuf échantillons après les tests d'irradiations sont par la suite exposés. En premier lieu, on présente les résultats suite à l'exposition aux rayons X, qui a été effectuée dans le but d'analyser la réaction de ces matériaux face à des rayonnements aux photons à forte dose, vu que les tests ont été effectués à 500 Gy. En deuxième lieu, on présente les résultats suite à l'exposition à un flux de neutrons, particules qui correspondent à l'environnement où se trouve l'expérience LHCb et dans lequel les cartes électroniques FE seront exposées durant plusieurs années avec une dose de 80 Gy. Ceci est fait dans le but de définir l'interface thermique qui sera la mieux adaptée pour notre application.

Partie I - Étude thermique et conception du système de refroidissement des cartes électroniques du trajectographe LHCb

« Il y a deux tragédies dans la vie. L'une est de réaliser ses rêves. L'autre est de ne pas les réaliser »

(George Bernard Shaw)

Chapitre 1

Présentation du LHC et de l'expérience LHCb

1.1 Introduction

La physique des particules nous réserve encore des surprises pour les années à venir grâce aux expériences du LHC qui explorent des conditions physiques encore jamais produites sur terre.

On a déjà pu voir que la physique des particules a régulièrement détruit des préjugés, démonté des certitudes et ouvert des perspectives inédites. Découvrir l'atome, tel un micro-univers peuplé lui-même de particules plus petites encore est juste une étape supplémentaire vers la route de l'infiniment petit.

C'est pourquoi, ce premier chapitre sera dédié à la découverte du LHC et aux expériences qu'on peut y trouver, ainsi qu'à l'explication de l'environnement dans lequel se déroule ce projet d'étude.

1.2 Présentation du CERN

Le CERN, « Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire », est l'un des plus grands et des plus prestigieux laboratoires scientifiques du monde.

Il a pour vocation la physique fondamentale, la découverte des constituants et des lois de l'Univers. Il utilise des instruments scientifiques très complexes pour sonder les constituants ultimes de la matière : les particules fondamentales. En étudiant ce qui se passe lorsque ces particules entrent en collision, les physiciens appréhendent les lois de la Nature.

Fondé en 1954, le CERN est situé de part et d'autre de la frontière franco-suisse, près de Genève. Il a été l'une des premières organisations à l'échelle européenne et compte aujourd'hui 22 États membres.

Les instruments qu'utilise le CERN sont des accélérateurs et des détecteurs de particules. Les accélérateurs portent des faisceaux de particules à des énergies élevées pour les faire entrer en collision avec d'autres faisceaux ou avec des cibles fixes. Les détecteurs, eux, observent et enregistrent le résultat de ces collisions.

1.3 Le LHC

Le LHC est actuellement le plus grand accélérateur circulaire de particules au monde (figure 1.3.1). Il représente aussi la dernière machine à être venue enrichir le complexe d'accélérateurs du CERN. Le projet a été approuvé en décembre 1994 mais sa mise en fonctionnement n'a eu lieu que le 10 septembre 2008. Son inauguration officielle a eu lieu le 21 octobre de la même année.

Construit dans un tunnel circulaire de $26,659$ km de circonférence (figure 1.3.2), il est le plus puissant accélérateur de particules au monde pouvant accélérer des faisceaux de protons jusqu'à une énergie de 7 TeV. Ses objectifs sont de chercher le boson de Higgs (découvert en 2012) et de pouvoir apporter aux physiciens des réponses à plusieurs questions concernant la physique des particules et la cosmologie à l'aide de ses détecteurs. Cet anneau est jalonné d'aimants supraconducteurs, associés à des structures accélératrices qui augmentent l'énergie des particules qui y sont propulsées.

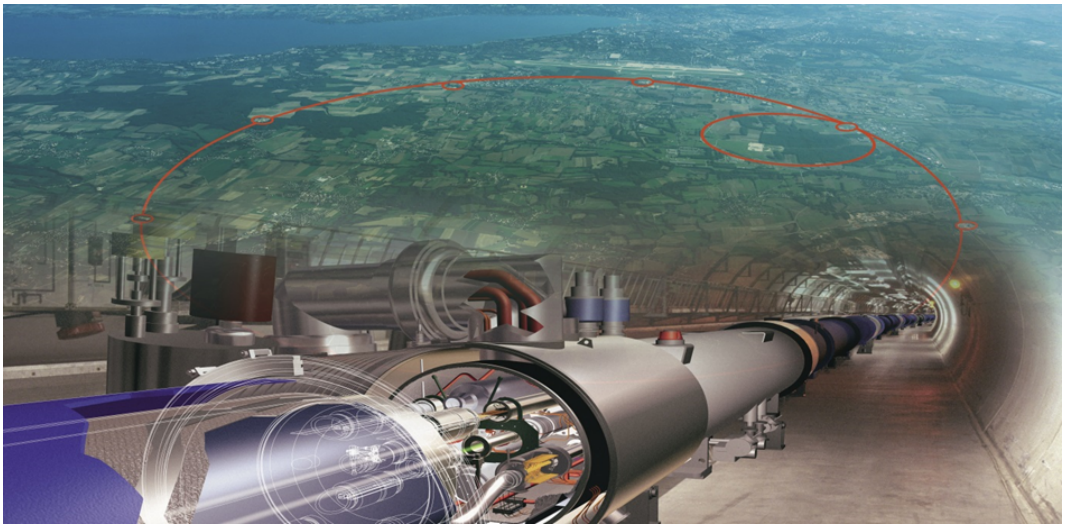


FIGURE 1.3.1 – Large Hadron Collider LHC.

L'accélérateur se compose de deux faisceaux de particules de haute énergie circulant à une vitesse proche de celle de la lumière avant d'entrer en collision.

Les faisceaux se déplacent dans des directions opposées, dans des tubes distincts placés sous ultravide. Un puissant champ magnétique généré par des électroaimants supraconducteurs les guide tout au long de leur parcours dans l'accélérateur. Ces aimants sont composés de bobines d'un câble électrique spécial qui, parce qu'il est à l'état supraconducteur, conduit l'électricité sans la moindre résistance ni perte d'énergie.

Les aimants sont maintenus à $-271,3°$C, une température plus basse que celle de l'espace intersidéral. Aussi, une grande partie de l'accélérateur est-elle reliée à un système de distribution d'hélium liquide, qui refroidit les aimants.

Des milliers d'aimants de natures et de tailles différentes guident les faisceaux le long de l'accélérateur. On utilise notamment 1232 aimants dipolaires (de 15 mètres de long) pour courber les faisceaux et 392 aimants quadripolaires (de 5 à 7 mètres de long) pour concentrer les faisceaux. Juste avant la collision, un autre type d'aimant vient resserrer les particules et augmenter la probabilité des collisions. Réaliser une collision entre des particules aussi minuscules exige une grande précision.

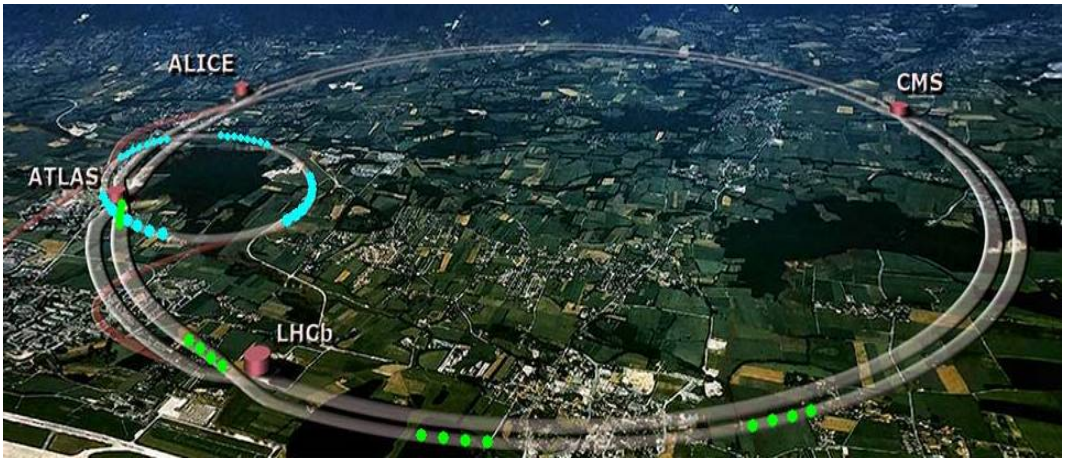


Figure 1.3.2 – Vue satellite du LHC.

Toutes les commandes de l'accélérateur, ses services et son infrastructure technique sont regroupés au Centre de contrôle du CERN.

C'est à partir de là que les faisceaux du LHC sont guidés pour entrer en collision en quatre points de l'anneau où se situent quatre détecteurs de particules – ATLAS, CMS, ALICE et LHCb.

1.4 Le détecteur LHCb

LHCb « Large Hadron Collider beauty » (figure 1.4.1) est l'une des expériences de physique des particules situées sur le collisionneur LHC.

Cette expérience regroupe plus de 1160 membres, issus de 72 instituts de 16 pays : France, Espagne, Italie, Royaume-Uni, Allemagne, Suisse, Pologne, Ukraine, Russie, Brésil, Colombie, États-Unis, Pays-Bas, Chine, Irlande et Roumanie.

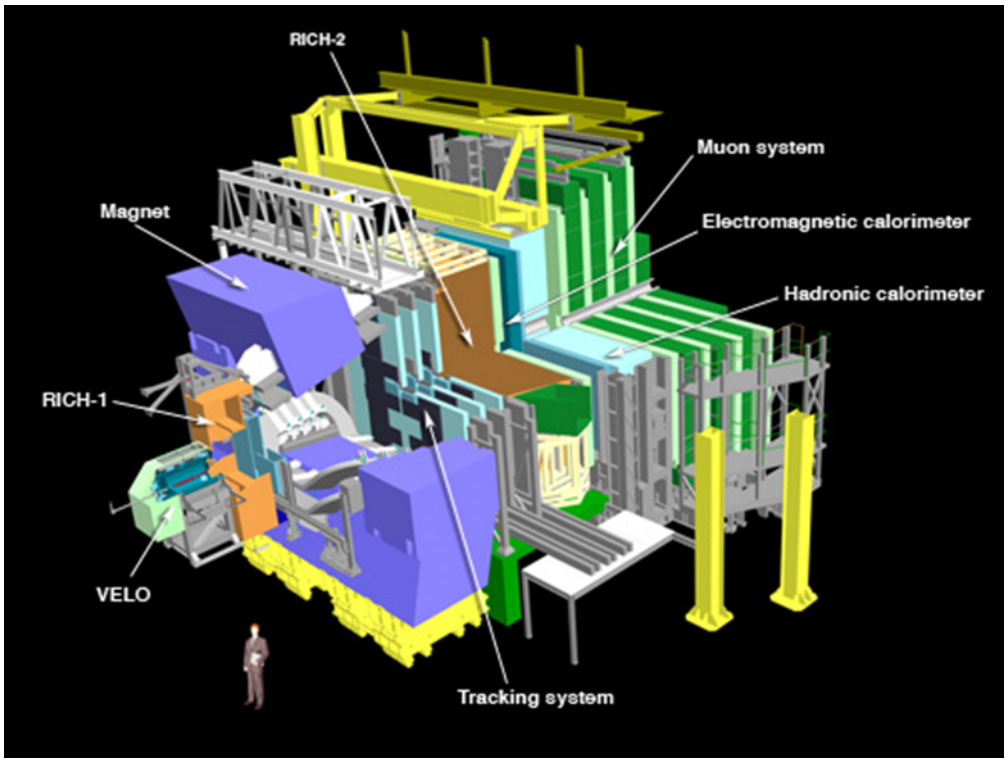


FIGURE 1.4.1 – Le détecteur LHCb.

L'objectif ultime de l'expérience est de mieux comprendre pourquoi l'Univers est constitué exclusivement de matière, alors qu'à sa naissance, matière et antimatière étaient présentes à parts égales [1, 2].

L'expérience explore les légères différences qui existent entre matière et antimatière grâce à l'étude d'un type de particule appelé « quark beauté » ou « quark b ». Au lieu d'utiliser un détecteur fermé au niveau du point de collision tel que ceux d'ATLAS et de CMS, l'expérience LHCb a recours à plusieurs plans de sous-détecteurs conçus pour observer principalement les particules émises « à petits angles ». Le premier sous-détecteur est placé à proximité du point de collision, les autres se suivent sur une longueur de 20 mètres.

Le LHC produit une grande variété de quarks, qui se désintègrent rapidement en d'autres particules. Pour intercepter les quarks b, la collaboration LHCb a mis au point des trajectographes mobiles perfectionnés et les a installé au plus près de la trajectoire des faisceaux dans le LHC.

Les plans de détections sont positionnés les uns derrière les autres suivant l'axe du faisceau « axe Z » afin de réceptionner un maximum de particules issues de la collision (figure 1.4.2).

LHCb est constitué d'un spectromètre et de détecteurs planaires. Les simulations faites ont montré que les quarks - antiquarks b sont émis au point de collision avec un angle petit par rapport aux faisceaux.

La région d'intérêt pour détecter ces particules correspond donc au cône formé par l'instrument. Il permet de mesurer la trajectoire, la charge et l'impulsion des particules chargées et l'énergie de certaines particules. L'expérience est constituée de plusieurs éléments :

— Un détecteur de vertex (VELO) placé autour du point d'interaction et au plus près des collisions. Il permet de reconstituer avec une grande précision, le point de création des particules quark b qui parcourent quelques millimètres avant de se désintégrer.
— Un aimant fournissant un champ magnétique très important pour courber les trajectoires des particules chargées,
— Une station TT « Tracker Turicensis » placée avant l'aimant,
— Trois stations de détecteurs de traces chargées T1, T2 et T3 situées après l'aimant. L'ensemble aimant et trajectographe (TT, T1, T2, et T3) permet de mesurer la courbure des trajectoires des particules et donc de déterminer précisément leur impulsion.
— Deux détecteurs RICH (Ring Imaging CHerenkov) utilisant l'effet Cherenkov pour identifier le type des particules chargées qui traversent le détecteur. L'un est situé devant le détecteur TT du trajectographe et l'autre derrière la station T3.
— Un calorimètre constitué de 4 sous-détecteurs : un détecteur de traces chargés (SPD), un détecteur de pied de gerbes ou pre-shower (PS) précédé d'une feuille de plomb, puis un calorimètre électromagnétique (ECAL) et enfin un calorimètre hadronique (HCAL). Ils permettent d'identifier et de mesurer l'énergie des particules électromagnétiques et hadroniques.
— Un détecteur de muons constitué de 5 plans de chambres à muons (M1 à M5) entrelacées de fer. La première chambre M1 est située juste avant le calorimètre, comme on peut le voir dans la figure 1.4.2. Ce détecteur permet d'identifier les muons.

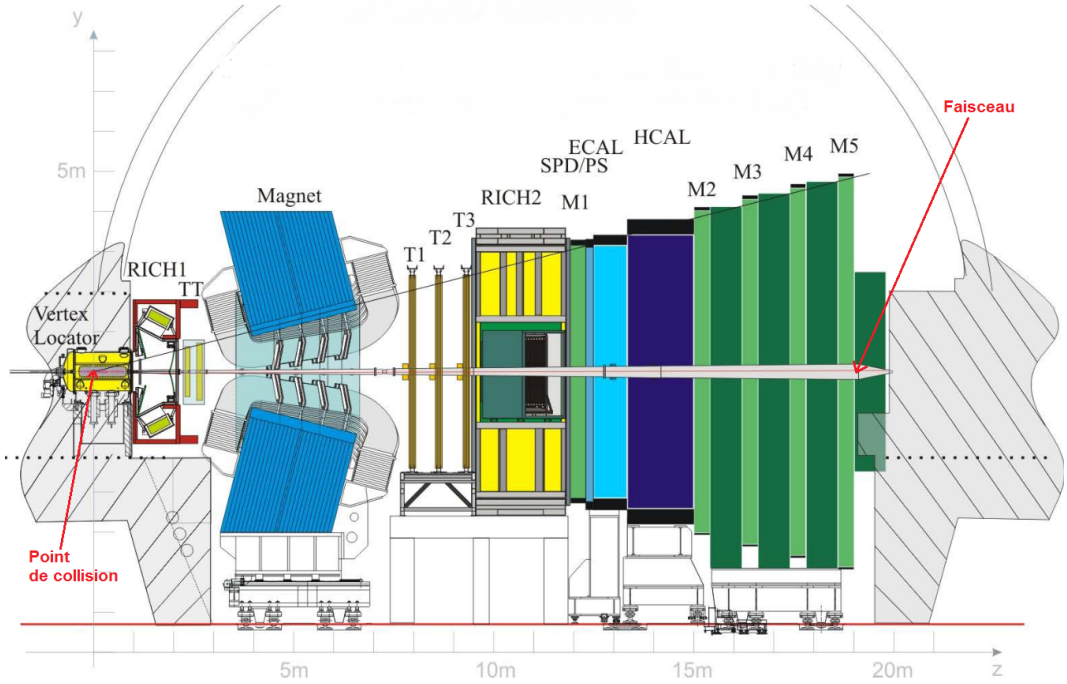


FIGURE 1.4.2 – Emplacement des détecteurs sur LHCb.

1.5 Le nouveau trajectographe de LHCb « SciFi »

1.5.1 Introduction

Le détecteur LHCb a lancé un programme de mise à niveau majeur dans le but d'augmenter considérablement la vitesse et la sélectivité de la prise de données. La mise à niveau comprend le remplacement de plusieurs sous-détecteurs, elle sera effectuée aussi au niveau de l'électronique frontale et introduira de nouvelles possibilités, à savoir une technologie qui permet la lecture complète du détecteur à une vitesse de 40 MHz, la fréquence de collisions du LHC.

Le développement et la construction d'un nouveau détecteur de suivi à grande échelle, basé sur une nouvelle technologie de fibres scintillantes « SciFi », lues avec des Photomultiplicateurs Silicium « SiPM », est l'un des principaux projets du programme de mise à niveau de l'expérience LHCb.

Dans ce cadre, une partie de la collaboration LHCb développe un nouveau type de trajectographe basé sur des fibres scintillantes. En combinant des fibres de 250 μm de diamètre avec des SiPMs (Silicon Photomultipliers) à 128 canaux pour

leur lecture, il est possible d'atteindre une résolution sur la position des traces inférieure à 100 μm (figure 1.5.3). Le détecteur devrait pouvoir fonctionner avec les performances requises pour une luminosité intégrée allant jusqu'à 50 fb^{-1}.

De nouvelles cartes électroniques sont donc conçues pour cette lecture (Front-End et ASIC 64 voies). Elles ont pour objectif de lire, numériser et traiter les signaux des SiPMs reliés aux fibres. Les cartes doivent réaliser la lecture du détecteur à haute fréquence (40 MHz), une lecture qui sera commune à tous les systèmes de LHCb.

1.5.2 Le SciFi

Le trajectographe à Fibres Scintillantes (figure 1.5.2), « Tracker SciFi en anglais » se compose de trois stations (T1, T2, T3) situées entre l'aimant dipolaire et le RICH2 comme représenté sur la figure 1.5.1. Elles sont composées chacune de quatre plans de détections. Il y a un écart de 20 mm le long de l'axe Z entre les plans de détection d'une station donnée [3, 4].

Les plans de détection ont un trou au centre pour permettre au faisceau de circuler dans son tube à vide. Comme sur l'ancien détecteur, les premier et dernier plan d'une station sont verticaux par rapport à l'axe Y (couches x) tandis que les deux du milieu ont un angle incliné de $\pm 5°$ (couches u et v).

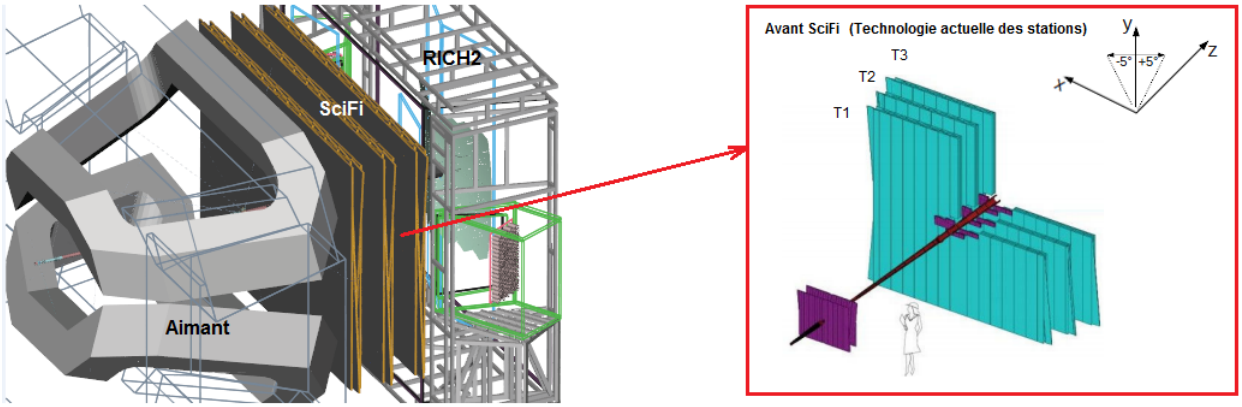


FIGURE 1.5.1 – Positionnement du trajectographe SciFi sur LHCb.

Chaque plan est divisé en 2 demi-plans de 6 modules chacun (voir figure 1.5.2) pour des questions de praticité. Nous aurons donc un total de 144 modules pour la totalité du détecteur.

Une fois installé, le trajectographe SciFi comptera plus de 500 000 canaux pour 12 plans disposés dans les 3 stations de suivi avec une surface totale d'environ 340 m^2.

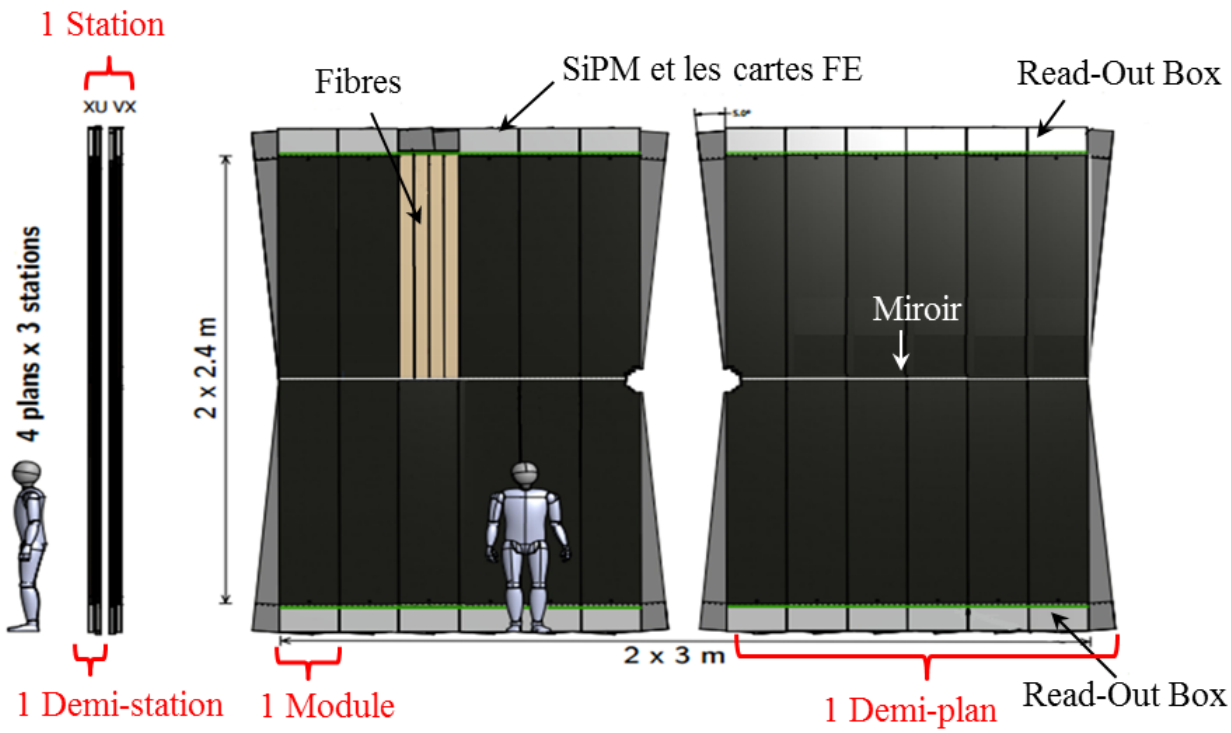


FIGURE 1.5.2 – Le trajectographe SciFi.

L'infrastructure mécanique nécessaire pour soutenir le trajectographe à fibres scintillantes sera similaire à celle existante. A l'heure actuelle, les modules de détection interne et externe (Inner & Outer tracker) sont fixés aux C-Frames [1]. Chaque C-Frame possède deux plans d'une demi-station (xu ou vx). Chaque demi-plan à son tour possède 6 modules.

Les C-Frames sont fixés en haut à un support en acier inoxydable appelé le « pont » et à leur base à une structure en aluminium appelée « table », de manière à pouvoir coulisser le long de la direction X. Ils peuvent être rétractés loin du faisceau pendant les périodes d'entretien et de maintenance. Ces mouvements sont possibles grâce aux rails.

Chaque plan (ou demi-plan) est composé de 6 couches de fibres (voir figure 1.5.3).

1. Un C-Frame est le châssis qui contient les plans et les modules et qui a la forme d'un « C » d'où le nom C-Frame.

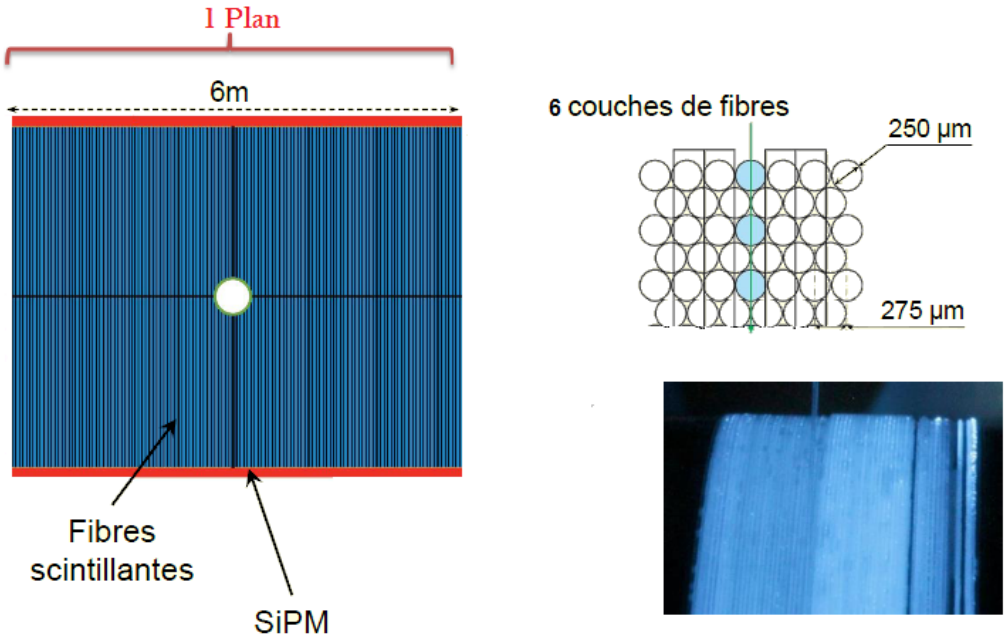


FIGURE 1.5.3 – Vue schématique des nouveaux plans de détection.

1.5.3 Les Read-Out Box du SciFi

Une électronique frontale « FE » est nécessaire pour permettre de lire les données du détecteur à 40 MHz et de les transmettre à cette fréquence au système d'acquisition de données. La partie la plus difficile pour l'électronique FE est la numérisation du signal. Un nouvel ASIC frontal avec 64 canaux, la moitié du nombre de canaux d'un SiPM, est en cours de développement pour traiter et numériser le signal analogique des SiPMs [5].

La trajectoire de collision de la particule doit être calculée avec une résolution spatiale inférieure à 100 μm. Quatre fonctions seront nécessaires pour l'atteindre : amplification, mise en forme, intégration et numérisation.

Cette électronique nécessite un système de refroidissement afin d'assurer son bon fonctionnement et elle doit être contenue dans une boite appelée FE-Box.

Aux extrémités des fibres scintillantes, on trouve des SiPMs, reliés à l'électronique frontale par l'intermédiaire des câbles flex-PCB, comme on peut le voir sur la figure 1.5.4.

Pour bien fonctionner, les SiPMs doivent être maintenus à une température de -40°C. Pour cela, un système de refroidissement est nécessaire. L'ensemble SiPMs avec leur système de refroidissement est contenu dans une boite appelée Cold-Box.

On appelle « Read-Out Box » ou « ROB » l'ensemble de toute la chaîne de lecture des SiPMs à l'électronique FE.

Comme expliqué dans le paragraphe précédent, chaque demi-plan est divisé en 6 modules. Chaque module a deux ROB, une en haut et une en bas (à chaque extrémité des fibres scintillantes).

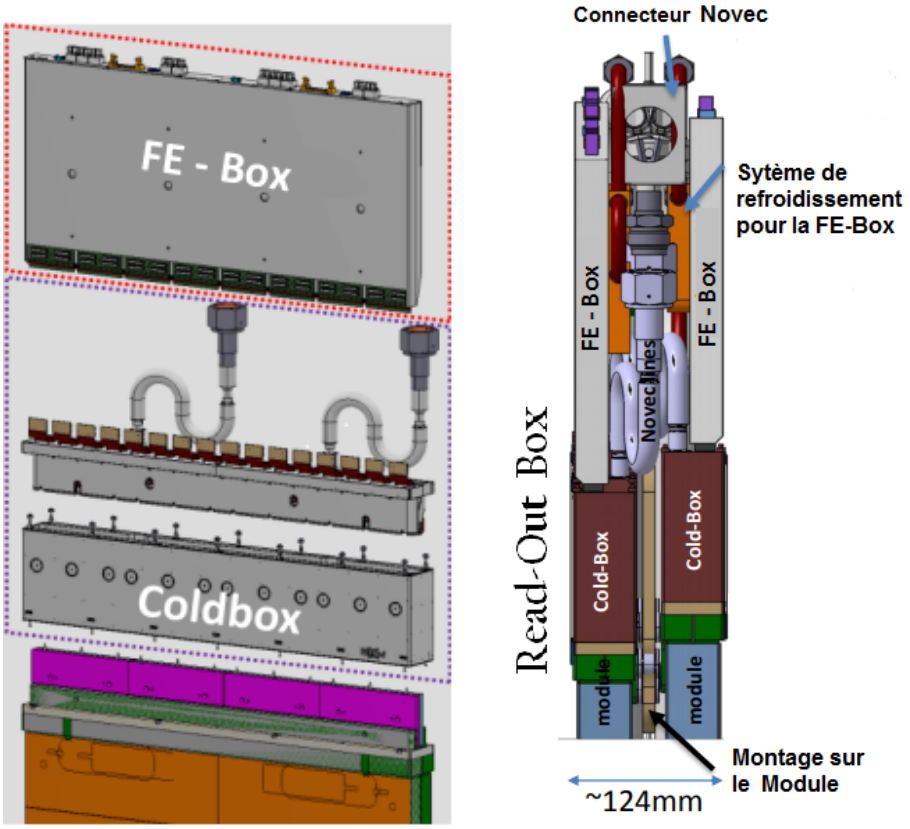


FIGURE 1.5.4 – Vue d'une ROB à une extrémité d'un module de fibres scintillantes.

La conception de l'ensemble de lecture (FE-Box et refroidissement) est techniquement difficile pour les raisons suivantes :

— L'espace limité en regard des besoins du système de refroidissement, des interfaces électroniques et mécaniques,

— La « Cold Box » doit être bien étanche à la lumière, avec une bonne isolation (thermique et humidité), immergée dans un gaz sec ayant les points de gel et d'humidité inférieur à $-70°C$ à l'entrée et au-dessous de $-50°C$ à la sortie pour empêcher la condensation et le givre sur les surfaces froides au sein du système de refroidissement.

Dans la figure 1.5.5 on peut voir leur disposition sur un module.

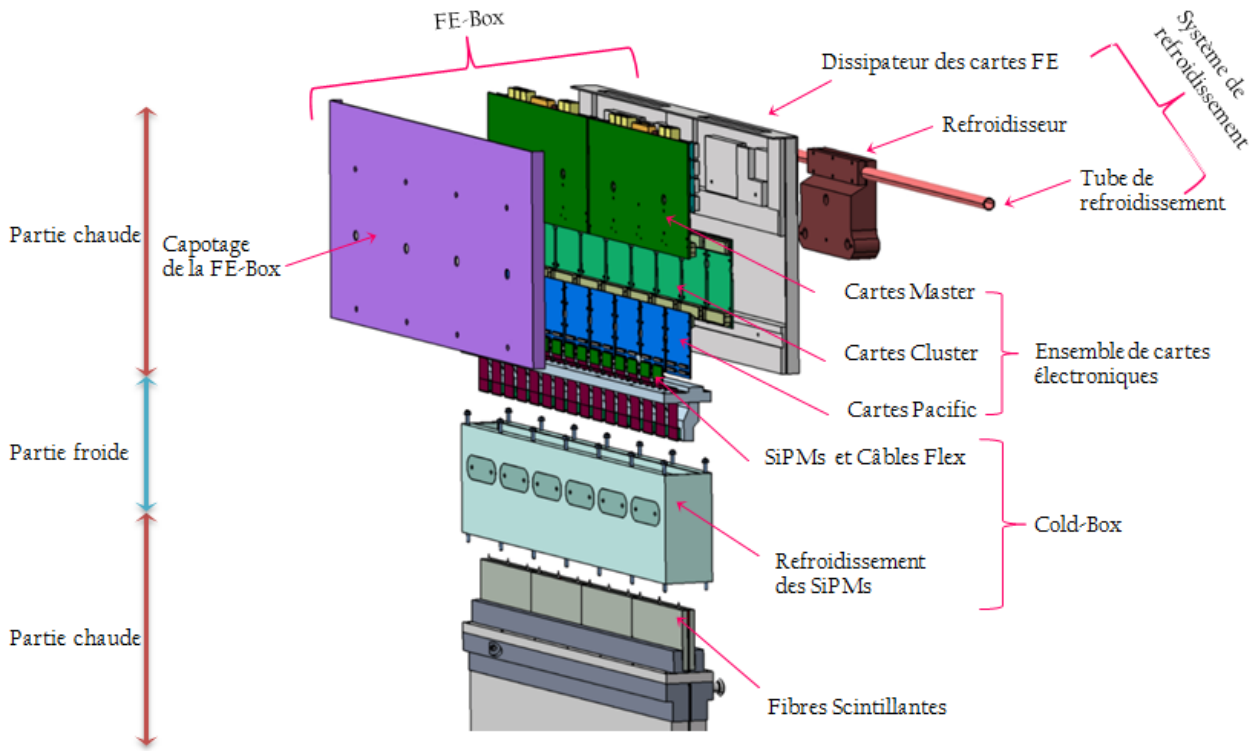


FIGURE 1.5.5 – Eclaté d'une ROB sans le système de refroidissement des SiPMs.

Des quantités significatives d'isolation ($\sim$ 5 cm) seront nécessaires pour séparer les deux parties « électronique FE » et « SiPM » dans la Read-Out Box.

Les SiPMs sont montés sur un Kapton flex-PCB qui a une longueur d'environ 100 mm (figure 1.5.6).

Chaque SiPM est monté séparément sur un flex-PCB relié à des connecteurs de l'électronique FE.

FIGURE 1.5.6 – SiPM monté sur un Kapton flex-PCB avec des connecteurs pour l'électronique FE.

1.5.4 Électronique Front-End

L'architecture de l'électronique FE du trajectographe SciFi suit les directives définis dans le document d'architecture de l'électronique pour la mise à niveau de LHCb.

Au niveau fonctionnel, on peut le résumer par le schéma représenté dans la figure 1.5.7. Tous les signaux SiPM sont amplifiés, traités et numérisés par l'ASIC Pacific situé sur les cartes Pacific. Les données sont ensuite acheminées par le biais des connecteurs vers les cartes Cluster.

Ces signaux numériques sont reçus par des FPGA, dans lesquels sont implantés des microprogrammes qui exécutent un algorithme de clusterisation rapide (détection de données) et une suppression de zéro pour réduire le volume de données. Ces données vont ensuite être transmises grâce à des connecteurs vers les cartes Master, où les données vont être sérialisées à 4,8 Gb/s à l'aide des composants GBTx puis transmises aux composants VTTx qui vont convertir les signaux électriques en signaux optiques.

Ces données sont ensuite envoyées sur le système d'acquisition de données de l'expérience et sa ferme de calcul pour les analyses futures.

Les cartes Master hébergent aussi une partie alimentation de toutes les cartes électroniques. Cette partie se compose principalement de composants FeastMP qui sont des convertisseurs de tension DC-DC et qui représentent une grande source de chaleur.

De par leur longueur, chaque ROB va contenir 16 SiPMs. Ces SiPMs sont reliés deux par deux aux cartes Pacific qui sont reliées chacune à une carte Cluster.

Les cartes Cluster sont reliées quatre par quatre à une carte Master. Pour chaque ROB, et donc sur chaque FE-Box, nous avons deux ensembles de une carte Master, quatre cartes Cluster et quatre cartes Pacific.

Il faut savoir qu'il y a deux versions de cartes électroniques qui ont été développées. La dissipation totale de chaque FE-Box dans la première version est d'environ 90 W. Elle est d'environ 110 W dans la deuxième version (plus de détails dans la section 3.2.2 du chapitre 3).

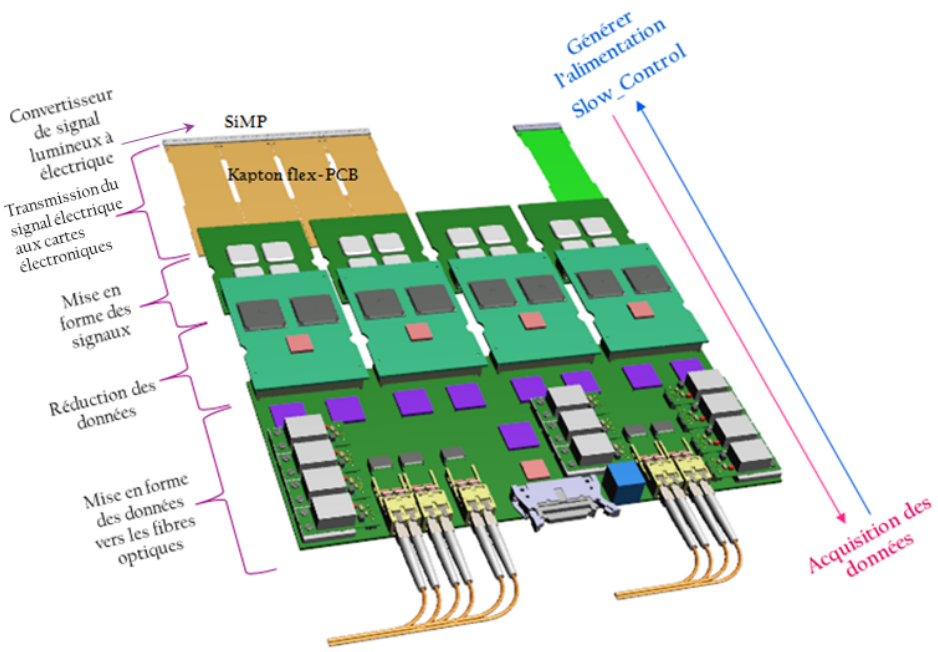


FIGURE 1.5.7 – Schéma fonctionnel de la chaîne de lecture.

1.5.5 Système de refroidissement de l'électronique FE

Afin d'assurer le bon fonctionnement des composants électroniques, il est donc obligatoire de concevoir un système de refroidissement compact et efficace, qui sera alimenté avec de l'eau déminéralisée à 19°C.

Une étude thermique de la carte électronique permettra de connaitre les températures maximales des composants.

La température ne doit pas monter au-delà de 50°C pour le bon fonctionnement des composants ainsi que des SiPMs qui se trouvent à proximité. Le chapitre 3 est dédié à cette étude.

1.5.6 Environnement de radiations

Le rayonnement prévu au niveau des stations trackers a été estimé à l'aide d'une simulation FLUKA du détecteur LHCb [6, 7].

La simulation a été réalisée en utilisant la dernière version de la géométrie du détecteur pour les conditions de mise à niveau prévues à $\sqrt{S} = 14$ TeV supportant une luminosité intégrée de 50 fb^{-1} et une section de proton-proton de 100 mb Plus de détails dans la Réf [8].

L'estimation de 1 MeV neutron équivalent en T1 ($z = 783$ cm) est représentée sur la figure 1.5.8 et la dose est représentée sur la figure 1.5.9.

La fluence attendue et la dose ont également été estimées pour T3 ($z = 920$ cm). Le flux maximum pour les SiPMs ($y = \pm 250$ cm) après une luminosité intégrée de $50\,fb^{-1}$ est estimée à $9,5 \times 10^{11} n_{eq}/\text{cm}^2$ et $13 \times 10^{11} n_{eq}/\text{cm}^2$ pour T1 et T3 respectivement.

La dose d'ionisation intégrée dans les SiPMs est de 40 Gy dans T1 et 80 Gy dans T3. Les doses maximales absorbées par les fibres devraient être d'environ 35 kGy et de 25 kGy dans T1 et T3 respectivement.

Les simulations ont également montré que le blindage est techniquement possible, construit de polyéthylène avec 5% de bore, il peut réduire l'influence des neutrons dans la région des SiPMs par au moins un facteur deux.

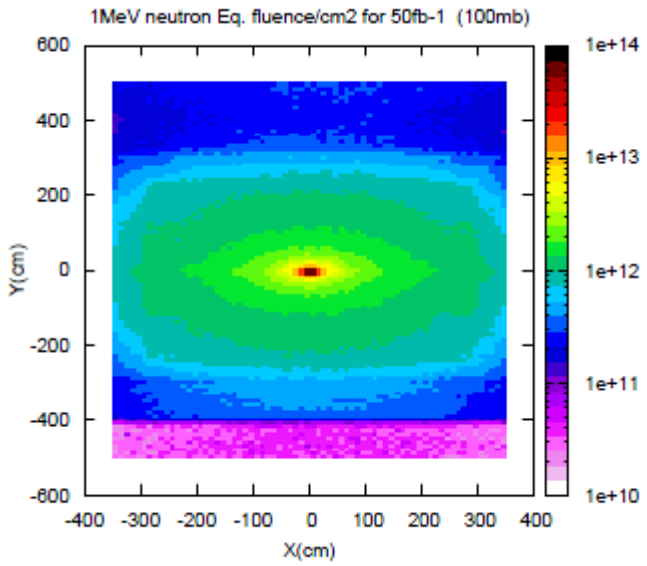


FIGURE 1.5.8 – Le flux équivalent de 1 MeV de neutron attendue par cm² à $z = 783$ cm (T1) après une luminosité intégrée de $50\,fb^{-1}$.

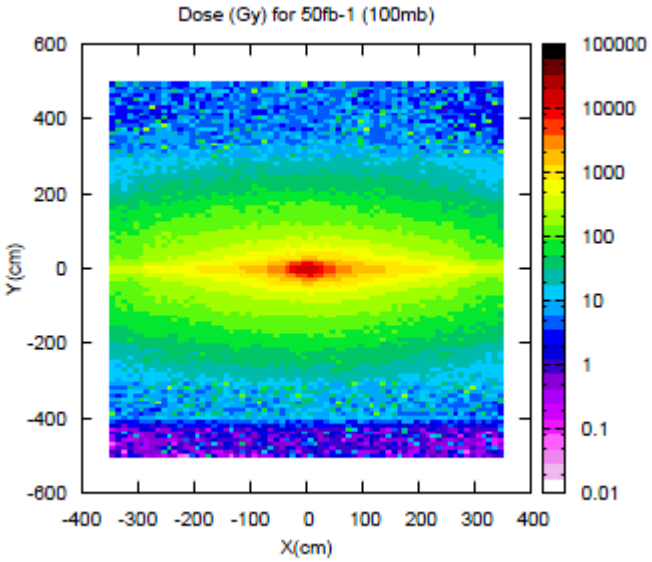


FIGURE 1.5.9 – La dose attendue dans le plan X - Y à $z = 783$ cm (T1) après une luminosité intégrée de 50 fb^{-1}.

1.6 Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté le projet LHCb Upgrade qui est porté par la collaboration LHCb, et qui s'inscrit parmi les nombreuses recherches menées sur la découverte de nouvelles particules. On a défini la problématique exposée qui est celle de concevoir un système de refroidissement des cartes électroniques compact et efficace.

Ce refroidissement est nécessaire afin d'assurer le bon fonctionnement de l'électronique de lecture. Il l'est également pour éviter d'affecter le fonctionnement des SiPMs qui sont situés à proximité des cartes et dont la température de fonctionnement doit être régulée parfaitement aux alentours de -40°C.

Le défi est celui de trouver un système efficace dans un espace très réduit et contraint, et de maintenir une température maximale des cartes électroniques FE vers les 50°C.

Les nouveaux détecteurs incluant ces nouvelles technologies doivent voir le jour pour un fonctionnement en 2021 avec un assemblage des détecteurs qui va commencer en 2018.

C'est pourquoi dans les prochains chapitres, nous allons effectuer une étude approfondie sur la dissipation thermique des cartes électroniques et trouver le système de refroidissement le plus adapté pour le bon déroulement de l'expérience LHCb.

Chapitre 2

Principes et technologies de refroidissement en électronique

2.1 Introduction

De nos jours, la tendance est à l'introduction croissante de systèmes électroniques, que ce soit dans le domaine des transports ou simplement dans la vie quotidienne avec les smartphones, les ordinateurs ou autres. Cette introduction s'est faite depuis un certain nombre d'années. Si en 1958 il n'y avait qu'un transistor par circuit, il y en a maintenant au moins un demi-million par pastille de silicium (puce) des circuits intégrés.

La technologie utilisée dans la réalisation des transistors des puces a évolué en diminuant la consommation par transistor. On observe néanmoins une augmentation de la puissance dissipée par unité de surface de puce.

L'augmentation très rapide du nombre de transistors n'a pu être compensée par la diminution de la dissipation thermique.

En réalité, les problèmes thermiques que l'on rencontre dans les équipements ne sont pas liés à la puissance mais à la température. Or, celle-ci est une fonction directe de la densité de puissance. La plupart des composants électroniques produisent de la chaleur lors de leur fonctionnement. Cette chaleur non désirée doit être dissipée pour maintenir la performance et éviter une mort prématurée du composant ou du système.

Ce besoin d'un transfert de chaleur efficace est devenu un point clé lors du design car les composants deviennent de plus en plus petits en taille et augmentent en puissance, ceci étant particulièrement visible avec les microprocesseurs, les LED's et les alimentations de puissance.

Les travaux de ce mémoire de thèse s'emploient donc dans cette première partie à étudier la dissipation thermique des cartes électroniques du trajectographe LHCb et la conception d'un système de refroidissement.

2.2 Généralités sur la dissipation thermique dans les composants et systèmes électroniques

2.2.1 Rappels élémentaires de thermique

Le transfert thermique à l'intérieur d'un système micro-électronique s'effectue de trois façon différentes : la conduction, la convection et le rayonnement [9].

Dans tous les cas il est possible de modéliser la dissipation du flux de chaleur par l'intermédiaire de résistances thermiques.

Conduction

C'est le transfert de chaleur au sein d'un milieu opaque, sans déplacement de matière, sous l'influence d'une différence de température.

La propagation de la chaleur par conduction à l'intérieur d'un corps s'effectue selon deux mécanismes distincts : une transmission par vibration des atomes ou molécules et une transmission par électrons libres [10].

La théorie de la conduction repose sur la **loi de Fourier**, la densité de flux est proportionnelle au gradient de température :

$$\vec{\varphi} = -\lambda S \, \vec{grad}(T) \tag{2.2.1}$$

Ou sous forme algébrique :

$$\varphi = -\lambda S \, \frac{\partial T}{\partial x} \tag{2.2.2}$$

Avec :
φ : Flux de chaleur transmis par conduction (W).
λ : Conductivité thermique du milieu (W/m.K).
x : Variable d'espace dans la direction du flux (m).
S : Aire de la section de passage du flux de chaleur (m^2).

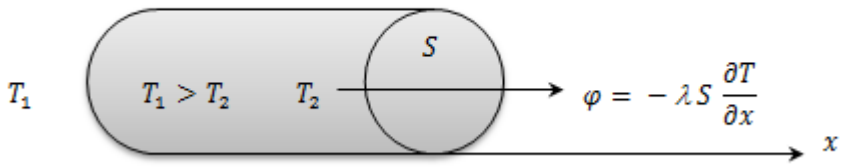


FIGURE 2.2.1 – Schéma du transfert de chaleur conductif.

Convection

C'est le transfert de chaleur entre un solide et un fluide, l'énergie étant transmise par déplacement du fluide.

Ce mécanisme de transfert est régi par la **loi de Newton** :

$$\varphi = hS\,(T_p - T_\infty) \tag{2.2.3}$$

Avec :
φ : Flux de chaleur transmis par convection (W).
h : Coefficient de transfert de chaleur par convection (W/m^2.K).
T_p : Température de surface du solide (°C).
T_∞ : Température du fluide loin de la surface du solide (°C).
S : Aire de la surface de contact solide/fluide (m^2).

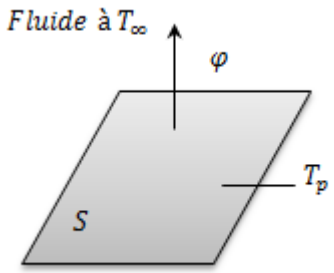


FIGURE 2.2.2 – Schéma du transfert de chaleur convectif.

La valeur du coefficient de transfert de chaleur par convection [h] est fonction de la nature du fluide, de sa température, de sa vitesse et des caractéristiques géométriques de la surface de contact solide/fluide.

Rayonnement

C'est un transfert d'énergie électromagnétique entre deux surfaces (même dans le vide). Il est difficile de l'étudier avec précision.

Dans les problèmes de transfert thermique, on prend en compte le rayonnement entre un solide et le milieu environnant et dans ce cas nous avons la relation :

$$\varphi = \sigma \varepsilon_p \, S \, (T_p^4 - T_\infty^4) \tag{2.2.4}$$

Avec :
φ : Flux de chaleur transmis par rayonnement (W).
σ : Constante de Stefan ($5,67.10^{-8}$W/m^2.K^4).
ε_p : Facteur d'émission de la surface.
T_p : Température de la surface (K).
T_∞ : Température du milieu environnant la surface (K).
S : Aire de la surface (m^2).

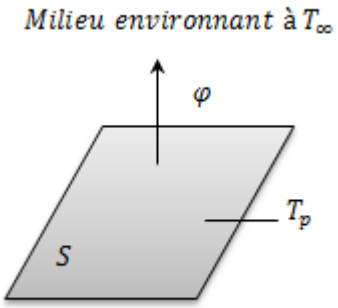


FIGURE 2.2.3 – Schéma du transfert de chaleur radiatif.

2.2.2 Les enjeux de la dissipation thermique

Tous les composants électroniques sont sensibles à la température, ils ont des performances médiocres en dehors de certaines limites de température et peuvent être détruits si la température est en dehors de ce domaine de fonctionnement [11, 12].

L'influence de la température se manifeste sur :

— Les performances électriques : la température peut être une valeur limite au-delà de laquelle le fonctionnement n'est plus garanti, des dérives des paramètres provoquent une diminution des performances.
— Le packaging est soumis à des gradations de température très importante. Il existe des températures critiques pour lesquelles se produisent des changements d'état, de structure physique...
— Le fluage et le relâchement des contraintes dans les matériaux sont accélérés par la température et peuvent conduire à des ruptures d'éléments.
— Les cycles thermiques auxquels sont soumis des matériaux reliés entre eux et de coefficient de dilatation différent induisent des forces très importantes qui peuvent conduire à une rupture.

La dissipation thermique est donc très importante, même primordiale. L'utilisation d'un système de refroidissement performant en termes de dissipation thermique est cruciale.

La mise en œuvre de ces systèmes de refroidissement est de plus en plus complexe en raison de plusieurs facteurs.

Parmi eux on a :

— La mise sous contrainte des composants et systèmes électroniques : puissance à dissiper plus importante, surface d'échange réduite et environnement thermique plus sévère.
— La présence d'échange thermique entre les différents éléments du système électronique.
— Une répartition inhomogène des composants sources de chaleur.
— Une répartition inhomogène des composants réagissant différemment aux impacts thermique.

2.3 Principe de transfert de la chaleur

Il existe trois types d'échelles pour considérer les problématiques de dissipation thermique des éléments électriques : l'échelle du composant (puce, diode...), celle du système (onduleur, KERS...), et celle des applications (automobile, avion, ...).

Les puissances thermiques à dissiper dépendent du rendement des éléments électroniques. Selon la taille de l'élément, le rendement varie de 60% à 99%. A titre d'exemple le rendement d'un moteur électrique est d'environ 90% donc pour un moteur de 100 kW, la puissance thermique à dissiper est de 10 kW[13][14].

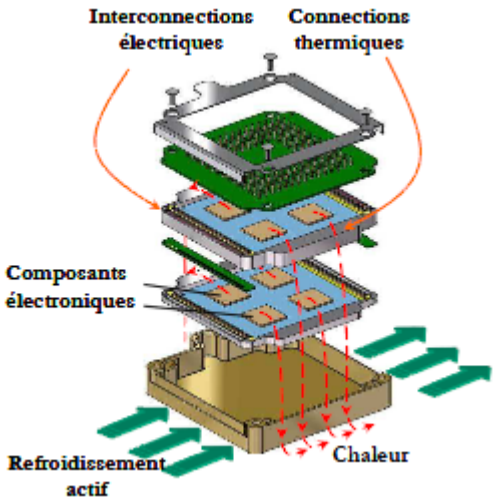


FIGURE 2.3.1 – Assemblage en 3D d'un module électronique.

Un système de refroidissement classique d'un module électronique est composé d'un assemblage de différentes couches de matériaux différents, partant des puces conductrices, monté sur un substrat qui doit être à la fois isolant électrique et bon conducteur thermique. Cet assemblage est représenté par la figure 2.3.2. On peut distinguer sur cette figure les différentes composantes de la structure électronique (de puissance dans ce cas) [15].

Les puces semi-conductrices sont brasées sur une couche DBC (Direct Bonded Copper Cu/AIN/Cu), cette dernière est soudée sur une épaisse semelle en métal (généralement du cuivre) qui est directement en contact avec un puit de chaleur. La chaleur générée dans les zones actives des puces semi-conductrices par des dissipations de puissance se traduit sous forme de pertes thermiques [16].

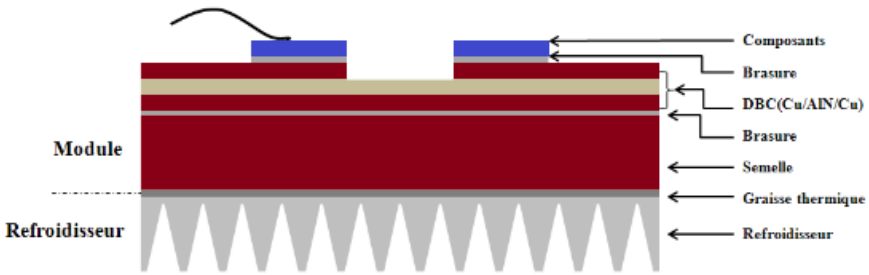


FIGURE 2.3.2 – Les différentes couches qu'on peut trouver dans un module électronique.

2.4 Refroidissement des composants électroniques

Le refroidissement d'un composant électronique ou d'un circuit intégré se fait d'une manière générale tel que sur la figure 2.4.1 qui nous montre le problème des transferts de chaleur par convection naturelle et forcée. Dans un composant électronique, la chaleur est dissipée dans une zone qu'on peut nommer la zone active, la température qui est atteinte dans cette zone est celle de la jonction.

La zone active se trouve en surface du silicium. Lorsque le flux de chaleur est important dans cette zone, il est nécessaire de le canaliser vers une surface d'échange qui possède un coefficient d'échange important. C'est pourquoi, la conception d'un dissipateur ou support métallique en cuivre ou aluminium aidera à l'évacuation du flux de chaleur de la zone active du composant vers la surface d'échange. Réf [17].

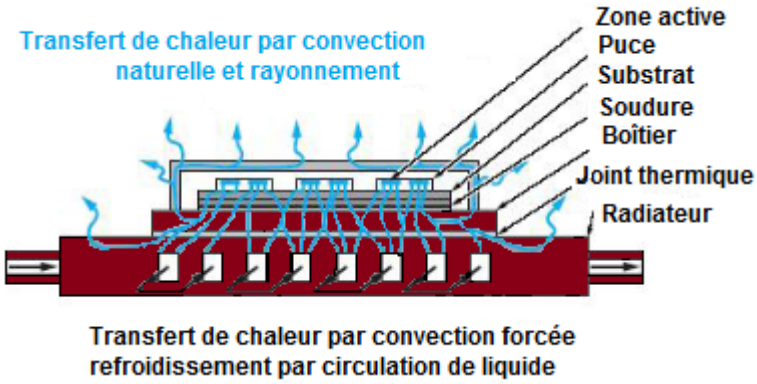


FIGURE 2.4.1 – Principe de dissipation de chaleur dans un composant électronique.

Notion de température de jonction

La jonction est la notion utilisée en électronique pour effectuer un calcul ou une simulation thermique pour un composant ou un circuit intégré électronique.

Le maximum de température est atteint dans la zone active du composant qui représente la puissance dissipée par ce dernier.

La dissipation de chaleur étant elle-même en interaction avec la répartition de température dans cette zone, le calcul peut donc être complexe.

Notion de résistance thermique

La résistance thermique notée [Rth] est fondée sur l'analogie formelle qui existe entre la conduction de la chaleur (loi de Fourier) et la conduction du courant électrique (loi d'Ohm). Cette notion est définie pour un transfert de chaleur à flux constant entre deux surfaces isothermes, établie dans un milieu qui ne comporte pas de source de chaleur et pour laquelle la conductivité thermique ne dépend pas de la température locale [18, 19].

L'écoulement du flux de chaleur se fait par conduction à travers les différentes couches d'assemblage qui constituent le composant électronique ainsi que son refroidisseur. Ce transfert est établi grâce à la différence de température entre chaque couche, qui elles sont définies par une épaisseur et une conductivité thermique différente qui correspond donc à une résistance thermique qu'elles génèrent.

La température de jonction [T_j] peut être formulée en régime statique en fonction des différentes résistances thermiques [Rth_i] constituant le système et la puissance dissipée [P] du composant par la relation suivante :

$$T_j = \sum_{i=1}^{n} Rth_i.P + T_a \tag{2.4.1}$$

Avec :

n : Nombre de couches qui composent le système global, du composant électronique au refroidisseur.

T_a : La température ambiante (°C).

Rth_i : Résistance thermique du flux établi (K/W).

P : Puissance dissipée (W).

Dans la figure 2.4.2, la résistance thermique globale notée [Rth_{j-a}] est assimilée à la somme en série des trois résistances thermiques :

— On a la résistance thermique de jonction de la semelle [Rth_{j-c}] (jonction to case thermal resistance) du module qui est définie entre la température de jonction [T_j] et celle de la semelle [T_c],

— Puis on a la résistance située entre la semelle et le refroidisseur notée [Rth_{c-h}] (case to heatsink thermal resistance). Elle représente la résistance thermique du matériau d'interface thermique qui a pour but d'améliorer la conductivité thermique entre la semelle du composant et le radiateur [T_h].

— La troisième résistance thermique notée [Rth_{h-a}] (heatsink to ambiant thermal resistance) correspond à la résistance située entre le dissipateur et l'air ambiant [T_a].

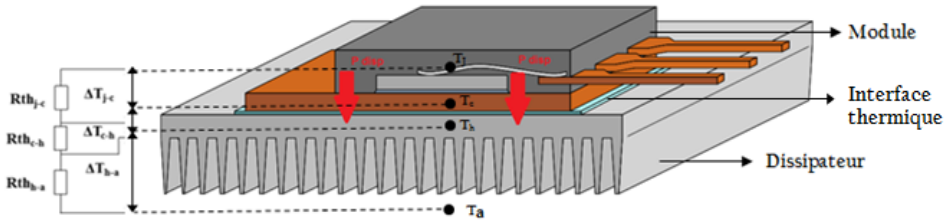


FIGURE 2.4.2 – Modèle thermique équivalent pour un assemblage d'un composant électronique sur son dissipateur.

En se référant au modèle thermique de la figure (2.4.2) et la relation (2.4.1), on peut écrire :

$$Rth_{j-a} = Rth_{j-c} + Rth_{c-h} + Rth_{h-a} \tag{2.4.2}$$

2.4.1 Généralité sur les systèmes de refroidissement

Aujourd'hui il existe plusieurs moyens et systèmes de refroidissement, que ce soit par convection naturelle ou forcée. On trouve dans les faibles puissances à évacuer des systèmes par rayonnement ou convection naturelle. Par contre, lorsque la puissance est supérieur à 50 W, il faut se résoudre au transfert forcé par air ou par liquide, quoique le refroidissement par air reste plus simple et facile car ce dernier est toujours disponible et ne pose pas les problèmes rencontrés avec les liquides, tel que la solidification, l'ébullition, la nucléation (ou germination) et le stockage.

Le refroidissement forcé par liquide donne un transfert thermique par unité de surface beaucoup plus important que par air. On y recourt pour les grandes puissances ainsi qu'à haute altitude où l'air est raréfié. Ce type de refroidissement élimine les nuisances acoustiques ainsi que le problème des vibrations puisque les pompes et autres échangeurs de chaleur sont repoussés à l'extérieur des racks (centre de données).

Mode de refroidissement	Fluide	h (W/m².K)
Convection naturelle	Gaz - Eau	5 à 30 / 100 à 1 000
Convection forcé	Gaz - Eau	10 à 300 / 300 à 12 000
Changement de phase	Ebullition - Condensation	3 000 à 60 000 / 5 000 à 110 000

TABLE 2.1 – Valeurs du coefficient de transfert de chaleur par convection « h » selon le mode de refroidissement.

Le refroidissement avec changement de phase est employé pour des composants de très fortes puissances, soit en maintenant un bain à température constante, soit directement par immersion de l'ensemble.

Les différents facteurs à prendre en compte sont alors : choix du fluide, surface du composant où a lieu l'évaporisation, orientation de l'équipement, pression, condenseur, etc.

2.4.2 Les différents systèmes de refroidissement

Parmi les refroidisseurs pour l'électronique les plus utilisés dans l'industrie, on trouve :

Refroidissement thermoélectrique

C'est une technique de refroidissement utilisant la thermoélectricité. Ces refroidisseurs fonctionnent selon le principe de l'effet Peltier qui transforme un courant électrique en différence de température.

Un module Peltier se compose d'une série de « couples » constitués d'un matériau semi-conducteur sélectionné pour que les électrons puissent jouer le rôle de fluide caloporteur[20].

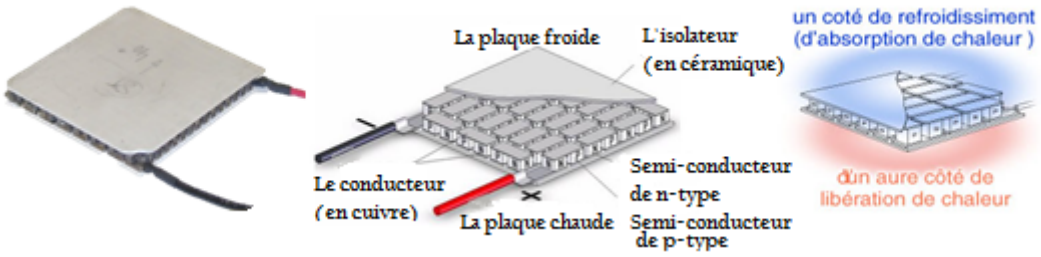


FIGURE 2.4.3 – Module Peltier.

Dissipateur thermique

C'est un dispositif destiné à favoriser l'évacuation des pertes dissipées par les éléments semi-conducteurs de puissance. Il s'agit de dispositifs généralement munis d'ailettes, qui doivent de préférence être montées verticalement pour faciliter le refroidissement par convection. Pour son dimensionnement il faut se baser sur la loi d'Ohm thermique 2.4.3, qui permet d'évaluer l'élévation en température en fonction de la puissance dissipée.

$$T_J = T_A + P.R_{thJA} \tag{2.4.3}$$

Avec :
T_A : La température ambiante (°C),
P : La puissance dissipée par l'élément semi-conducteur (W),
R_{thJA} : La résistance thermique jonction-ambiante (°C/W).

FIGURE 2.4.4 – Dissipateur thermique.

Caloduc

Le caloduc du mot latin qui veut dire calor « chaleur » et ductus « conduite », ou en anglais « heat pipe », est un conducteur de chaleur fonctionnant en cycle fermé selon le principe évaporation – condensation, avec retour de liquide soit par gravité, soit par capillarité [21, 22]. Ils sont généralement composés de trois éléments principaux :

— La plaque évaporateur : plaque métallique qui est en contact avec le composant électronique à refroidir.
— Les tubes caloducs : assemblés avec la plaque évaporateur, ils permettent de transférer les calories collectés par la zone évaporateur vers la zone condenseur.
— La zone condenseur : il peut s'agir d'ailettes métalliques qui dissipent les calories dans un fluide, ou d'une plaque en contact avec une surface froide.

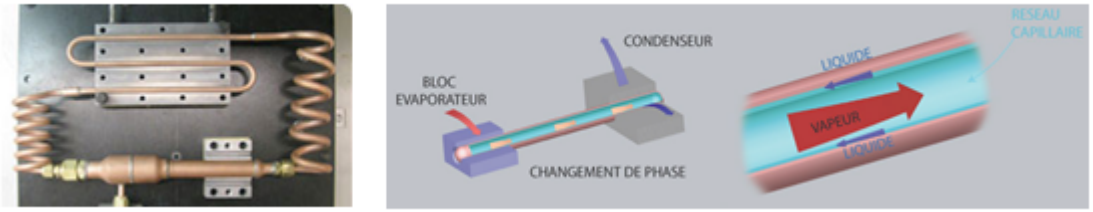


FIGURE 2.4.5 – Caloduc.

La nature du fluide et sa quantité sont choisies de manière à ce que, dans les conditions de fonctionnement optimales, le caloporteur se trouve en état d'équilibre liquide-vapeur, la phase liquide saturant au mieux le réseau capillaire.

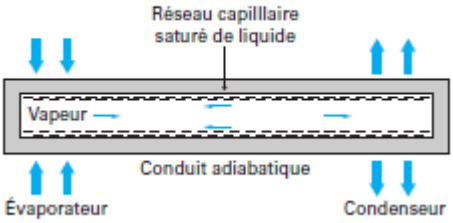


FIGURE 2.4.6 – Principe de fonctionnement d'un Caloduc.

Refroidissement forcé par air

Ce type de refroidissement est conseillé lorsque la puissance à dissiper est supérieure à 50 W. Par contre, cette solution possède quelques inconvenants tels que :

- Une augmentation de la complexité : un ventilateur et ses équipements tels que le filtre, conduit, etc. sont nécessaires.
- Une réduction du rendement électrique puisque le ventilateur requiert une puissance électrique.
- Une augmentation des vibrations et du bruit.

Le choix d'un système de refroidissement forcé par air se fait en 2 étapes :

- Les dimensions du radiateur doivent être choisies dans le but d'avoir le meilleur rendement thermique et minimiser les pertes de charge.
- Le ventilateur doit être choisi non seulement en fonction de la pression, mais aussi en fonction de son encombrement, sa masse, son prix, ses vibrations, son bruit...

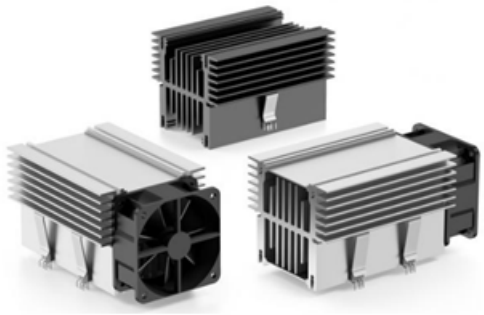


FIGURE 2.4.7 – Ensemble dissipateur à ventilateur axial.

Refroidissement forcé par liquide

Le refroidissement par liquide caloporteur permet de transférer des densités de flux importantes et s'impose également à haute altitude où le transfert par air n'est plus efficace.

Lors du refroidissement par air, la chaleur est transférée à l'air, rejetée dans l'ambiante et remplacée par de l'air frais. Dans le refroidissement par liquide, ce dernier n'est pas rejeté dans l'environnement mais réutilisé constamment, par contre il doit être refroidi.

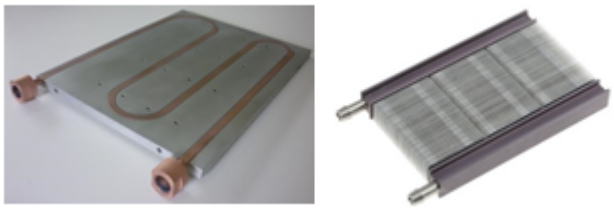


FIGURE 2.4.8 – Exemple de circuit de refroidissement par liquide.

Une installation de refroidissement par liquide comprend une pompe, un régulateur de débit, un réservoir de stockage, ainsi qu'un échangeur thermique.

Les facteurs intervenants lors de la conception d'une telle installation sont :

— La géométrie de conduite : forme, pertes de charge, section, surface d'échange, ...etc.
— La nature du liquide,
— Sa température d'entrée,
— La pompe, l'échangeur thermique et les autres équipements.

Il existe plusieurs types de refroidissement utilisant un liquide caloporteur. Les plus connus dans l'industrie sont ceux à l'eau et à l'huile, le reste correspond à des cas spécifiques :

Refroidissement à eau

Le refroidissement à eau (ou le watercooling en anglais) est un dispositif faisant circuler de l'eau, bien meilleur conducteur thermique que l'air, à l'aide d'une pompe sur un circuit qui passe dans un ou plusieurs « blocs », situés sur le composant à refroidir et permettant un transfert thermique entre l'eau et le composant.

Le silence de fonctionnement est un autre atout du refroidissement à l'eau.

Refroidissement à huile

Ce type de refroidissement est rarement utilisé, car il consiste à immerger tous les composants dans de l'huile végétale ou minérale, afin de les refroidir uniformément.

Refroidissement par changement de phase

Le refroidissement à changement de phase est un système qu'on peut trouver par exemple dans les réfrigérateurs, mais avec un compresseur un peu plus poussé. Parmi ces systèmes, on a plusieurs méthodes telles que :

1. Le refroidissement par changement de phase : basé sur le principe de la pompe à chaleur, cette méthode permet le changement de phase d'un fluide frigorigène.
2. Le waterchiller : c'est un système combinant le refroidissement par eau « watercooling » avec le refroidissement par changement de phase afin de profiter des avantages des deux méthodes. Son fonctionnement consiste donc à faire tremper l'évaporateur d'un système de refroidissement à changement de phase dans un réservoir d'un système de refroidissement à eau. Le liquide refroidi du « refroidissement à eau » circule alors dans tout le circuit de ce dernier, en le refroidissant. Le réservoir tient donc le rôle d'échangeur thermique entre le fluide du refroidisseur à changement de phase et le liquide du refroidisseur à eau.

Refroidissement par azote liquide

C'est un système qui permet un refroidissement extrême grâce à une température de – 196°C mais difficile à mettre en œuvre [23].

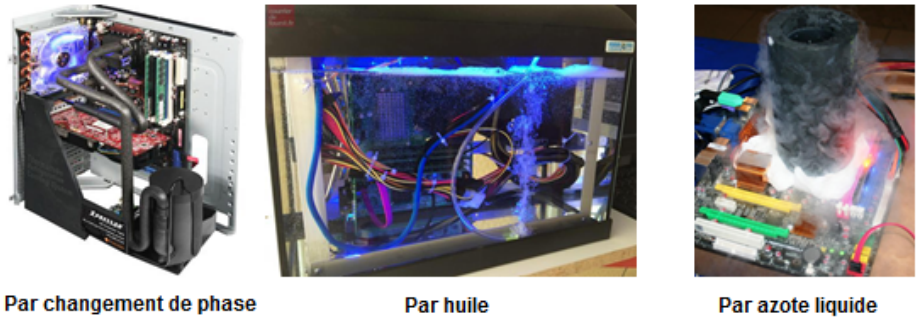


FIGURE 2.4.9 – Autres moyens de refroidissement pour l'électronique.

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, on a vu le principe de transfert de chaleur dans les composants électroniques et la nécessité de refroidir. Les cartes électroniques « Front-End » de LHCb ne possèdent pas de composants de puissances, qui eux peuvent chauffer à une très grande température. Mais le fait d'être confinés dans une boite fermée « FE-Box » peut conduire à une augmentation importante des températures et donc à la détérioration des composants et à mettre en péril la transmission de données et donc le bon fonctionnement du détecteur.

On a vu aussi, différents systèmes de refroidissement pour l'électronique, plus au moins, utilisés d'après la puissance dissipée par ces derniers. Dans notre cas, on va favoriser l'idée d'un refroidissement forcé par liquide caloporteur vu le manque de place. Le système de refroidissement possèdera forcément un dissipateur ou deux, qui vont nous permettre d'évacuer la chaleur.

Dans le chapitre qui suit « Chapitre 3 », une étude thermique est réalisée sur les cartes FE ainsi que sur le système de refroidissement adéquat qui sera validé par des tests et des mesures réelles.

Chapitre 3

Étude thermique des cartes électroniques du trajectographe LHCb et conception du système de refroidissement

3.1 Introduction

L'étude du système de refroidissement par eau nous a imposé plusieurs étapes de simulations à l'aide des logiciels utilisant la méthode des éléments finis FloTHERM [1] et ANSYS [2] et des tests pour lesquels la conception des bancs a été effectuée sous le logiciel de conception assistée par ordinateur CATIA [3].

En premier lieu, nous avons effectué une simulation des cartes électroniques sans boitier ni système de refroidissement afin de déterminer leur carte de température. Ce calcul nous a permis de connaître les points de température les plus élevés et donc de savoir où concentrer en priorité le refroidissement. Cette simulation est détaillée dans le paragraphe 3.3.

Ensuite, nous avons effectué des simulations (paragraphe 3.6) de plusieurs versions de système de refroidissement nous paraissant adaptées à notre cas. Dans la suite des développements, le système de refroidissement des SiPMs devenant de plus en plus imposant, nous avons dû réduire l'encombrement de notre propre

1. FloTHERM est un logiciel d'analyses thermiques fluidiques spécialisé pour l'équipement électronique.
2. ANSYS est un logiciel spécialisé en simulation numérique, qui met en œuvre la méthode des éléments finis dans le but de résoudre des modèles préalablement discrétisés.
3. CATIA pour « Conception Assistée Tridimensionnelle Interactive Appliquée ».

système de refroidissement, ce qui nous a amené à de nouvelles simulations développées dans le paragraphe 3.6.4.

Une partie des cartes étant enfin disponibles à Nikhef (laboratoire en Hollande Septentrionale où ces cartes étaient développées), nous avons souhaité effectuer des premiers tests, couplés à des tests électroniques. Nous nous sommes donc rendus aux Pays-Bas pour ces premiers tests qui sont détaillés dans le chapitre 4.

Suite à ces tests, nous avons voulu faire des cartes électroniques d'essais (PCB muni de pièces fabriquées en impression 3D pour les composants et dans lesquelles sont placées des résistances chauffantes) pour pouvoir réaliser des tests sur place au LPC. Cela nous a donc permis d'obtenir des premiers résultats sur place décrits au chapitre 4 comparables aux mesures effectuées à Nikhef afin de valider nos cartes d'essais.

Les développements des cartes électroniques ont également amené des modifications de ces cartes vers une version n°2 pour lesquelles la dissipation totale est passée de 90 Watts environ à 110 Watts environ (paragraphe 3.3.2).

Nous avons donc aussi développé une version n°2 des cartes d'essais afin de réaliser de nouveaux tests décrits dans le paragraphe 3.2.3.

Nous avons effectué de nouvelles simulations sur les cartes électroniques version n°2 pour connaître la carte des températures (paragraphe 3.3.2) et vérifier si notre principe de système de refroidissement était toujours adapté. Nous avons ensuite effectués des tests sur les cartes d'essais version n°2 avec différents matériaux tel que l'aluminium, le cuivre et l'inox, où les résultats sont représentés dans le paragraphe 4.3.2, dans le but de définir le matériau le mieux adapté pour cette expérience.

3.2 La FE-Box et son bilan énergétique

Les cartes électroniques contiennent des composants actifs et passifs, tels que les connexions électriques et les résistances qui transfèrent de la chaleur. Trois modes de transfert de la chaleur permettent aux cartes de dissiper celle-ci vers l'environnement ambiant : conduction, convection et rayonnement.

Dans cette partie, nous allons effectuer un bilan énergétique simple afin de définir les différents paramètres nécessaires au refroidissement des cartes électroniques, tels que le débit d'eau, la surface d'échange, le régime de l'eau, etc. Et grâce aux logiciels de simulations thermiques, on va pouvoir modéliser des solutions qui répondrons aux contraintes imposées.

3.2.1 Première version des cartes FE

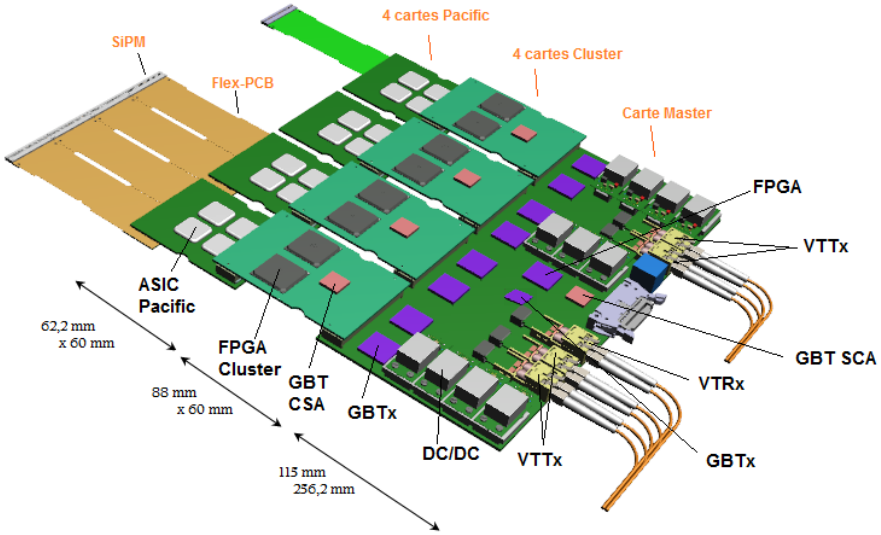


FIGURE 3.2.1 – La première version des cartes FE (deux ensembles par FE-Box).

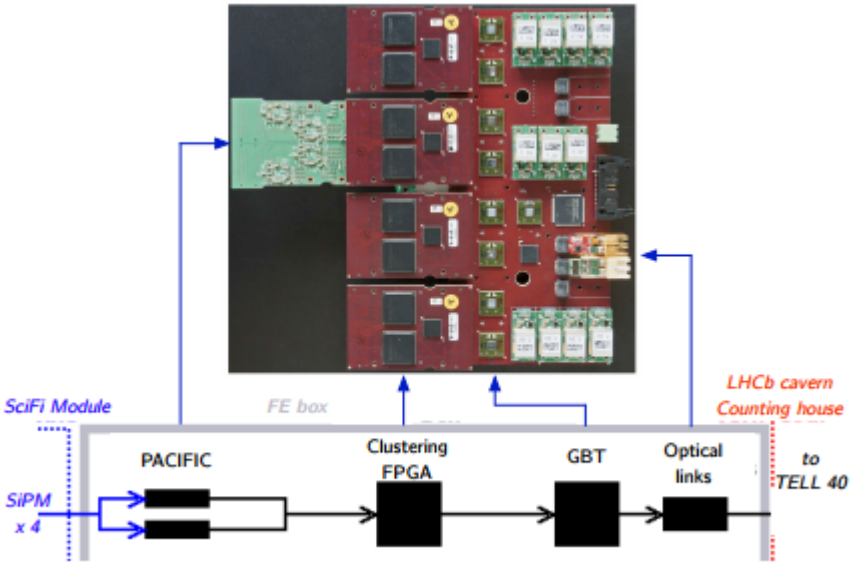


FIGURE 3.2.2 – Principe de fonctionnement des cartes FE version n°1.

Avec la première version des cartes FE (figure 3.2.1 et 3.2.2), des simulations thermiques ont été réalisées dans l'objectif de définir les composants qui montaient le plus en température et de trouver une solution afin de pouvoir les maintenir à une température stable d'environ 50°C maximum pour garantir leur bon fonctionnement et limiter le flux de chaleur pouvant transiter vers la partie froide du détecteur. Dans le tableau 3.1, on retrouve la dissipation estimée pour chaque composant électronique des cartes Master, Cluster et Pacific. Ce sont les mêmes valeurs qui ont servi à la modélisation pour les simulations sous le logiciel FloTHERM, soit une dissipation totale de près de 100 W.

Cartes	Composant	Nbr /FE-Box	Puissance (W)
Master	GBTx data	16	1
	GBTx master	2	1,40
	GBT SCA	2	0,75
	FPGA Master	2	0,80
	DC-DC 1v2-A	2	0,90
	DC-DC 1v2-B	2	0,90
	DC-DC 1v2-C	2	0,90
	DC-DC 1v2-D	2	0,90
	DC-DC 1v5-A	2	1,04
	DC-DC 1v5-B	2	1,53
	DC-DC 1v5-C	2	1,53
	DC-DC 1v5-D	2	1,06
	DC-DC 2v5-A	2	0,88
	DC-DC 2v5-B	2	0,76
	DC-DC 3v3-B	2	0
	VTTx	8	1
	VTRx	2	0,625
Cluster	FPGA Cluster	16	1,07
	GBT SCA	8	0,75
Pacific	Pacific ASIC	32	0,60
		Total/FE-Box	**94,27**

TABLE 3.1 – Estimation de la puissance des cartes FE version n°1.

3.2.2 Deuxième version des cartes FE

La deuxième version des cartes FE est représentée dans la figure 3.2.3. Ce changement est dû d'une part au changement du mode de transmission des données entre le composant PACIFIC et la carte Cluster qui introduit les modifications sur les trois cartes mais aussi principalement par la mise en place d'une meilleure protection des composants de la carte aux effets des radiations ce qui nécessite

l'utilisation de nouveaux composants et le découplage des alimentations des composants ce qui a mené à l'augmentation de la consommation électrique, et du nombre de DC-DC (ou FeastMP) sur la carte Master. Les dimensions de cette dernière ont donc également changé, sa largeur est passée de 115 mm à 132.5 mm.

La nouvelle carte Master consomme plus et donc dissipe davantage de puissance thermique, ce qui entraine la nécessité de faire d'autres modélisations et simulations thermiques afin de savoir si le système de refroidissement calculé pour la première version des cartes pourrait suffire à dissiper la nouvelle puissance des cartes FE.

La consommation des DC-DC est résumée dans le tableau 3.2.

Dans le tableau 3.3, on trouve la puissance dissipée pour chaque composant électronique qui compose les cartes FE.

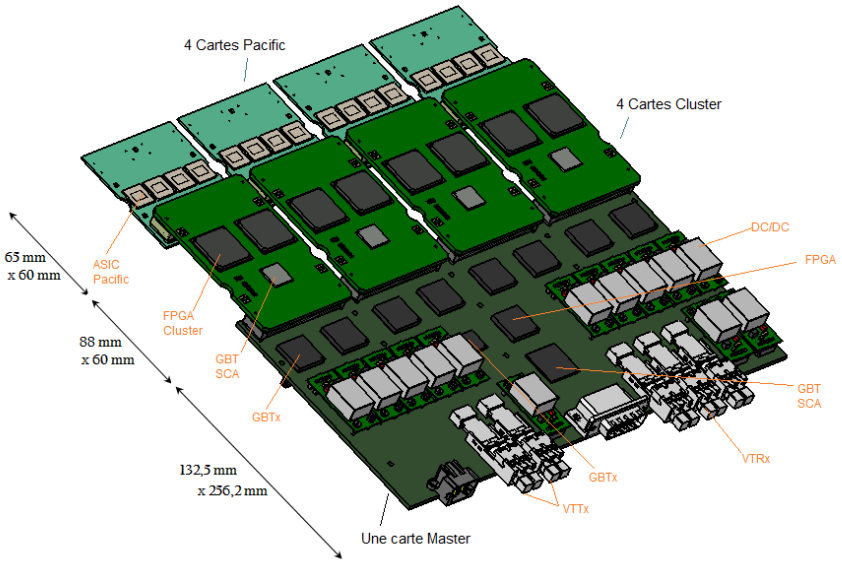


FIGURE 3.2.3 – La deuxième version des cartes FE (deux ensembles par FE-Box).

	DC-DC	Voltage (V)	Courant max (mA)	Puissance max (W)	Puissance d'entrée (W)	Puissance perdue (W)	Nbr /FE-Box	Puissance max (W) /FE-Box
Carte Master	1v2a	1,2	3220	3,864	5,600	1,736	2	3,472
	1v2b	1,2	3120	3,744	5,426	1,682	2	3,364
	1v2c	1,2	3120	3,744	5,426	1,682	2	3,364
	1v2d	1,2	3120	3,744	5,426	1,682	2	3,364
	1v5a	1,5	1866	2,799	3,589	0,790	2	1,579
	1v5b	1,5	1766	2,649	3,397	0,747	2	1,495
	1v5c	1,5	1766	2,649	3,397	0,747	2	1,495
	1v5d	1,5	1766	2,649	3,397	0,747	2	1,495
	1v5e	1,5	1335	2,002	2,567	0,565	2	1,129
	2v5a/b	2,5	2100	5,250	6,250	1,000	2	2,000
	2v5c/d	2,5	2000	5,000	5,952	0,952	2	1,905
	2v5e	2,5	470	1,175	1,399	0,224	2	0,448
	3v3	3,3	0	0,000	0,000	0,000	2	0,000

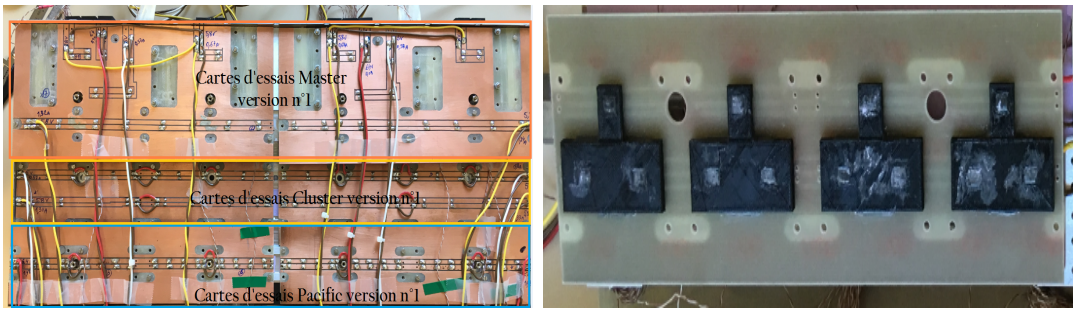
TABLE 3.2 – Consommation et puissance des DC-DC.

Carte	Composant		Voltage (V)	Courant moy (mA)	Courant max (mA)	Puissance moy (W)	Nbr / FE-Box	Puissance max (W)
Master	VTRX		2,5	140	250	0,350	2	0,625
	VTTX		2,5	200	400	0,500	8	1,000
	Master_GBTx		1,5	933	1263	1,400	2	1,895
	Data_GBTx		1,5	672	747	1,008	16	1,121
	GBT_sca		1,5	44	72	0,066	2	0,108
	Master_FPGA	core	1,2	100	100	0,120	2	0,120
		VCCIO	1,5	100	100	0,150		0,150
		VCCIO	2,5	100	100	0,250		0,250
Cluster	Cluster_FPGA	core	1,2	400	400	0,480	16	0,480
		VCCIO	1,5	60	60	0,090		0,090
		VCCIO	2,5	300	300	0,750		0,750
	GBT_sca		1,5	44	72	0,066	8	0,108
Pacific	Pacific	core	1,2	500	580	0,600		0,696
		IO	1,5	10	20	0,015	32	0,030
							Total/ FE-Box	**102,55**

Table 3.3 – Consommation et puissance des autres composants des cartes FE.

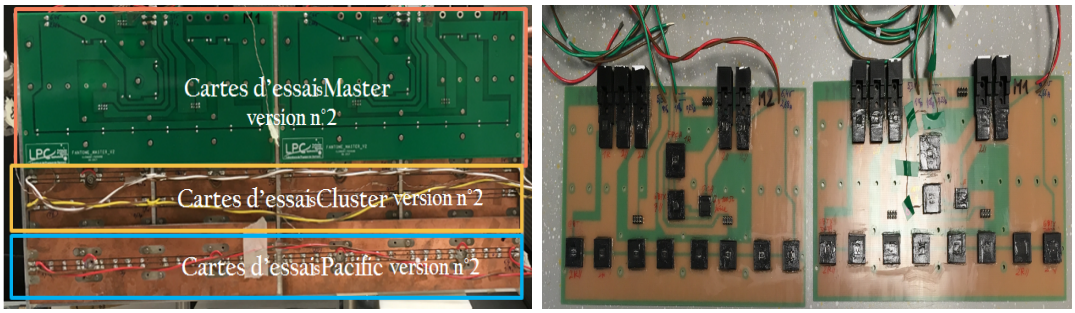
3.2.3 Conception des cartes d'essais FE

Pour effectuer les mesures et pouvoir tester les différents systèmes de refroidissement, il a fallu concevoir des cartes électroniques d'essais car les vraies n'étaient pas disponibles. On retrouve donc deux différentes versions de ces cartes, une première version des cartes d'essais qui suit la géométrie et la dissipation de la version n°1 des cartes FE (figure 3.2.4), ainsi qu'une deuxième version des cartes d'essais (figure 3.2.5), qui suit donc l'évolution des cartes FE, version n°2.



(a) Vue de face des cartes d'essais version n°1. (b) Les cartes d'essais représentant les cartes Cluster.

FIGURE 3.2.4 – Les cartes d'essais FE version n°1 conçus par le LPC.



(a) Les cartes d'essais FE version n°2. (b) Les cartes d'essais Master version n°2.

FIGURE 3.2.5 – Les cartes d'essais FE version n°2 conçus par le LPC.

Ces cartes d'essais possèdent une géométrie très proche de celles des vraies cartes FE, et grâce à des résistances CMS [4] (faible encombrement) montées dans des boîtiers fabriqués en impression 3D, eux-mêmes montés sur des PCB. Du côté de la dissipation de chaleur, on a veillé à ce que celle-ci soit la même que celle qui est

4. Composant Monté en Surface, ou SMD pour « Surface Mounted Device » en anglais.

dissipée par les vraies cartes FE, en combinant plusieurs montages de résistances (en série et en parallèle « 2.R.P [5], 3.R.P [6] ou 1.R [7] »).

Les puissances dissipées et utilisées par les résistances montées pour la conception des cartes d'essais sont regroupés dans le tableau 3.4.

Ces cartes électroniques ont été réalisées par le service électronique et le service mécanique du LPC.

Cartes d'essais	Composant et résistance	Nombre/FE-Box	Puissance (W)
Master	VTRX = 2.R.P[6]	2	0,60
	VTTX = 2.R.S	8	1,20
	Master_GBTx = 3.R.P[7]	2	1,80
	Data_GBTx = 2.R.P	16	1,20
	GBT_sca = 1.R	2	0,15
	Master_FPGA = 1.R	2	0.60
	DC-DC = 4.R.P	8	1,70
	DC-DC = 2.R.P	12	0,85
	DC-DC = 2.R.S	4	0,21
	DC-DC = 1.R[8]	2	0,41
Cluster	Cluster_FPGA = 2.R.P	8	0,66
	GBT_sca = 2.R.P	16	1,32
Pacific	ASIC = 1.R	32	0,72
		Total	**110 W**

Table 3.4 – Puissance des composants des cartes d'essais FE.

5. 2 Résistances montées en Séries.
6. 3 Résistances montées en Parallèles.
7. Une résistance simple CMS.

3.3 Simulation des cartes seules sans refroidissement

3.3.1 Avec la version n°1 des cartes FE

L'objectif de cette première simulation est de pouvoir faire une approche réelle des valeurs que les cartes FE peuvent atteindre en température maximum et d'identifier les composants qui montent le plus en température afin d'envisager la solution requise pour dissiper toute la puissance dégagée par la FE-Box.

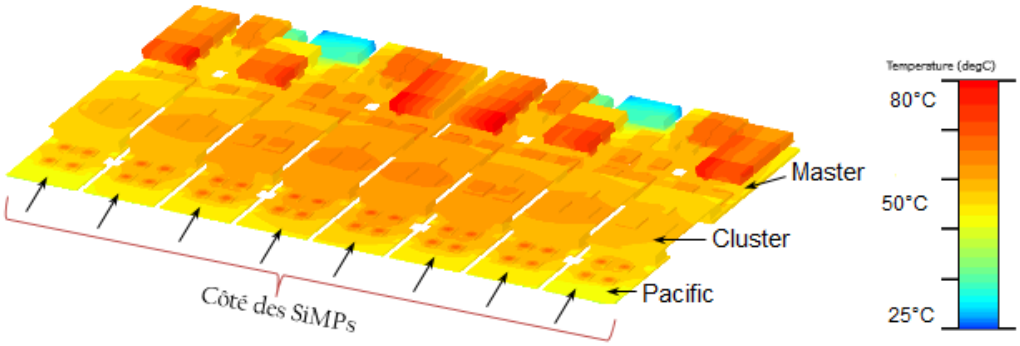


FIGURE 3.3.1 – Carte thermique des cartes FE seules sans refroidissement sur FloTHERM.

D'après la carte thermique 3.3.1, on remarque bien que les points de température les plus élevés au niveau des cartes FE sont sur les composants électroniques DC-DC, les résultats de cette simulation sont regroupés dans le tableau 3.5.

Température de FE max (°C)	Température de FE min (°C)	Température du côté des SiPMs (°C)	Température des DC-DC max (°C)
75,9	66,8	69 - 71,1	75,9

TABLE 3.5 – Résultats de simulations thermiques de la FE-Box sans refroidissement.

Ces résultats nous confirment que le refroidissement de la FE-Box est primordial pour assurer le bon fonctionnement de l'électronique. Grâce aux valeurs obtenues et avec les contraintes déjà existantes, on va concevoir un système de refroidissement qui sera bien adapté, que cela soit au niveau technologique ou au niveau de l'efficacité.

3.3.2 Avec la version n°2 des cartes FE

Comme dans le cas de la première version des cartes FE, le but de cette simulation qui consiste à tester la nouvelle version de la carte Master avec les autres cartes FE, seule sans refroidissement, est de pouvoir estimer la température. Dans cette simulation, les cartes électroniques sont montées avec un dissipateur pour chaque carte Master qui va permettre d'avoir une plus grande surface de dissipation et faciliter les échanges thermiques. Plus de détails dans le paragraphe 3.5.2.

Nous avons simplifié la modélisation géométrique des cartes FE en utilisant les cartes d'essais FE qui ont été conçues et fabriquées spécialement pour les tests réels qu'on a pu voir plus en détail dans la section 3.2.3, dans le but d'alléger au maximum le temps de calcul sous le logiciel ANSYS, les puissances dissipées par les vraies composants électroniques de cette nouvelle version des cartes FE sont regroupés dans le tableau 3.6.

Carte	Composant	Référence	Puissance max (W)
Master	VTRX		0,625
	VTTX		1,000
	Master_GBTx		1,900
	Data_GBTx		1,100
	GBT_sca		0,110
	Master_FPGA		0,500
	DC-DC	1V5c-b-d	0,750
		1V2c-d-b	1,680
		2V5b-a	1,000
		1V5a	0,800
		1V2a	1,750
		1V5e	0,560
		2V5e	0,220
		3V3	0,900
Cluster	Cluster_FPGA		1,320
	GBT_sca		0,110
Pacific	ASIC		0,730
		Totale/FE-Box	**106**

Table 3.6 – Puissance maximale des composants de la version n°2 des cartes FE.

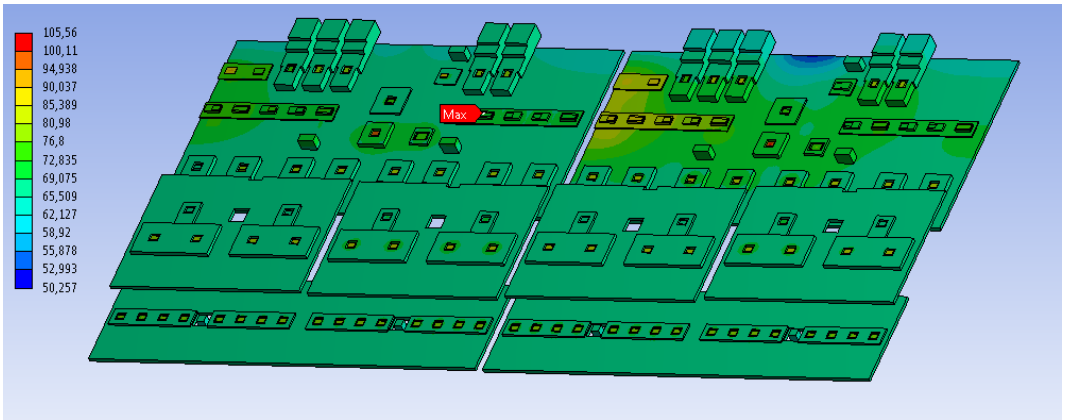


FIGURE 3.3.2 – Carte thermique de la FE-Box sans refroidissement.

Les résultats obtenus, sont représentés par la carte thermique dans la figure 3.3.2, où on peut voir une température maximum qui atteint les 106°C et qui vient des composants électroniques DC-DC. Du côté des SiPMs la température peut atteindre les 64°C, ce qui peut mettre ces derniers dans un environnement critique affectant leur bon fonctionnement.

Température de FE max (°C)	Température de FE moy (°C)	Température du côté des SiPMs (°C)	Température des DC-DC max (°C)
106	65 - 71	66 - 68	70 - 106

TABLE 3.7 – Résultats de simulation thermiques de la FE-Box sans refroidissement sur ANSYS.

Les simulations des deux versions des cartes FE, nous ont montré que la température maximale qui était d'environ 76°C pour la première version est de 106°C pour la deuxième version, ceci est dû à l'augmentation du nombre de composants DC-DC comme évoqué plus haut. On a eu comme conséquence une élévation globale de température d'environ 30°C.

Ces composants électroniques ont comme principale fonction de convertir la tension d'entrée et l'ajuster à la sortie, d'où leur puissance un peu plus importante que le reste des composants électroniques. D'autres composants électroniques possèdent une grande puissance tels que les FPGA et les GBT, qui peuvent aussi monter très vite en température vu leur puissance. Ce qui confirme la nécessité de refroidir la FE-Box.

3.4 Calcul et estimation du système de refroidissement

3.4.1 Estimation du débit d'eau

Afin d'éliminer une puissance équivalente à 100 W (environ la dissipation totale des cartes), soit $23,81$ cal par FE-Box, on utilise la formule de calcul thermique en puissance 3.4.1 suivante :

$$P = Qm.Cp.\triangle T \tag{3.4.1}$$

Avec :
P : Puissance (W).
Qm : Débit massique (kg/s).
Cp : Capacité thermique massique (J/kg.K). Celle de l'eau est de 4185 J/kg.K.
$\triangle T$: Différence de température entre l'entrée et la sortie d'eau (°C), fixée à 1°C car, en dessous de cette valeur, l'échange thermique est moins bon, et un $\triangle T$ très supérieur donnerait un débit trop faible et plus difficile à générer.

On obtient un débit massique d'eau d'une valeur de $2,39 \times 10^{-2}$kg/s, ce qui nous donne un débit volumique de $1,43$ l/min pour une puissance de 100 W et un $\triangle T$ de 1°C.

3.4.2 Estimation de la surface de convection

La formule 3.4.2 nous permet d'estimer la surface d'échange nécessaire pour ce système de refroidissement :

$$\Phi = h.S.\triangle T \tag{3.4.2}$$

Avec :
Φ : Puissance dissipée (W).
h : Coefficient de convection (W/m².K).
S : Surface d'échange (m²).

Le coefficient de convection dépend entre autre du nombre de Reynolds. Dans ce cas « h » est estimé entre 200 et 2000 W/m².K, car la valeur réelle du coefficient de convection se trouve dans un large intervalle de [100 à 5000] W/m².K.

Le tableau 3.8 représente les différentes surfaces d'échanges avec un coefficient de convection « h » fixé à 2000 W/m².K.

$\triangle T$ [°C]	1	2	3	4	5
S [m^2]	$0,050$	$0,025$	$0,017$	$0,013$	$0,010$

TABLE 3.8 – Estimation de la surface d'échange pour un « h » fixé à 2000 W/m^2.K avec plusieurs valeurs de $\triangle T$.

D'après le tableau 3.8, on trouve pour un $\triangle T$ de 1°C et pour un « h » estimé de 2000 W/m^2.K une surface d'échange de $0,05$ m^2.

3.4.3 Vitesse d'écoulement

L'estimation de la vitesse d'écoulement est calculée à partir de la section et donc du diamètre équivalent du tube de circulation d'eau utilisé. Pour un tube circulaire, le diamètre équivalent est celui du tube, mais pour un tube de section carrée (comme le logiciel FloTHERM nous oblige à le faire) le diamètre équivalent est alors $\frac{d}{2}\sqrt{\pi}$. On choisit une section de tube de 16 mm^2, soit $1,6 \times 10^{-5}$m^2.

Pour le débit volumique de $1,43$ l/min, on obtient une vitesse d'écoulement égale à $1,49$ m/s, soit $149,3$ cm/s.

3.4.4 Nombre de Reynolds

L'estimation du nombre de Reynolds nous permet de déterminer la nature de l'écoulement de notre régime. Petit rappel :

Si $Re < 2000$, on a un régime laminaire ;
Si $2000 < Re < 3000$, le régime est intermédiaire ;
Et si $Re > 3000$, le régime est plutôt turbulent.

Grâce à la formule 3.4.3 suivante :

$$Re = \frac{V.L}{v} \tag{3.4.3}$$

Avec :
V : Vitesse d'écoulement du fluide (m/s).
L : Dimension équivalent du tube (m).
v : Viscosité cinématique du fluide (m^2/s). En sachant que $v = \frac{\mu}{\rho}$ où μ représente la viscosité dynamique de l'eau donc 10^{-3} kg/m.s, et ρ sa masse volumique qui est de 1000 kg/m^3.

On obtient donc de la formule 3.4.3 une valeur de 5974, le régime est turbulent. Cette valeur nous confirme que le coefficient de convection va être élevé, donc on part sur la valeur de $h = 2000$ W/m^2.K qui va nous donner une estimation de la surface d'échange de $0,05$ m^2.

Après avoir estimé les principaux paramètres du système de refroidissement et des surfaces et sections équivalentes pour les simulations, on est passé à la conception des différents systèmes envisagés.

3.5 Solutions envisagées pour le refroidissement

Plusieurs solutions ont été envisagées pour refroidir correctement et surtout en respectant les trois contraintes les plus importantes qui sont :

1. Maintenir une température stable du côté des SiPMs d'environ 30°C maximum. Et une température maximale sur les cartes et composants de 50°C.
2. Respecter le volume disponible pour la FE-Box qui est de 26 mm d'épaisseur, ce qui nous oblige à adapter un refroidisseur compact qui respecte cette contrainte.
3. Essayer de concevoir un système de refroidissement qui possède un très bon matériau conducteur thermiquement, qui aura une bonne résistance aux radiations qui se trouve au sein de l'expérience LHCb, et qui soit le moins cher possible.

Parmi les solutions envisagées au départ, on trouve l'idée du refroidissement à changement de phase, qui pouvait être une solution idéale vu le peu de place qu'on possède et l'efficacité de ce genre de refroidisseur qui utilise en général des Caloduc (plus de détails dans le paragraphe 2.4.2). Après réflexion, cette solution s'est avérée trop couteuse et ne peut donc pas être envisagée. C'est pourquoi nous nous sommes retournés vers une solution plus traditionnelle, celle du refroidissement par eau.

3.5.1 Solutions avec des plaques embouties

Les cartes FE sont positionnées dans une boîte constituée de plusieurs éléments comme on peut le voir dans la figure 3.5.1. On y trouve les cartes FE ainsi qu'un dissipateur (nommé aussi cooling frame). Le principe du dissipateur en aluminium est d'avoir une géométrie adaptée pour épouser au mieux la forme des composants électroniques afin d'augmenter la surface d'échange et pouvoir refroidir au mieux les cartes électroniques. Des interfaces thermiques (PADs thermiques) sont prévues pour assurer un bon contact entre le dissipateur et les composants électroniques, et éliminer les micros-couches d'air qui peut s'y trouver. L'efficacité des interfaces thermiques a été confirmée grâce à une simulation thermique qui a été réalisée dans un premier temps sans PADs, ensuite avec les PADs dans le refroidissement des cartes où on obtient un meilleur refroidissement entre les deux d'une dizaine de degrés.

Pour permettre l'évacuation du flux thermique au niveau du dissipateur, un système à convection forcée hydraulique utilisant de l'eau comme fluide caloporteur est donc ajouté. Plus de détails sur la simulation dans le document Ref [24].

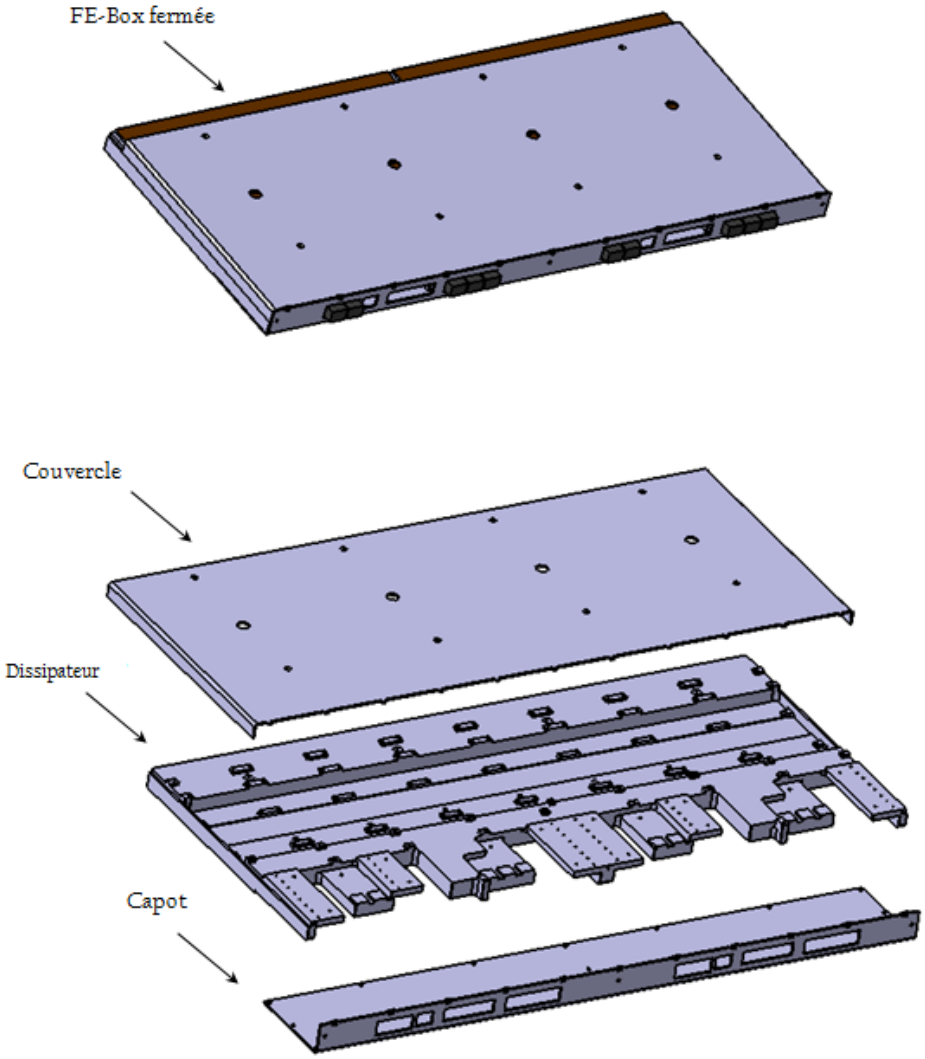


FIGURE 3.5.1 – La boîte des cartes électroniques FE.

Plusieurs solutions technologiques ont été envisagées pour le refroidissement. La première était de réaliser deux plaques embouties et assemblées pour fermer (figure 3.5.2). Cette solution répondait aux contraintes d'encombrement, la plaque de refroidissement étant équipée de deux orifices où seraient sertis des connecteurs de raccordement sur le circuit de distribution d'eau.

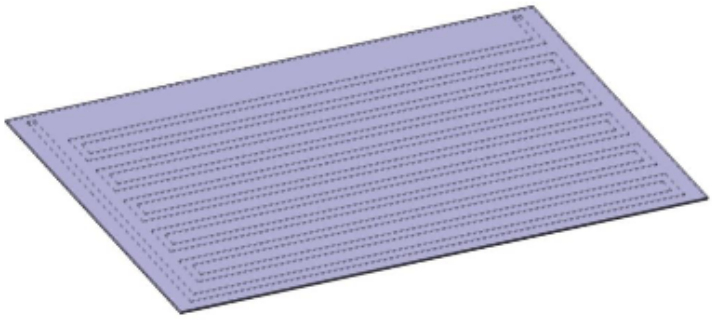


FIGURE 3.5.2 – Plaque avec le circuit d'eau en forme de serpentin qui représente la solution °1.

Les deuxième et troisième solutions possèdent le même principe mais avec des circuits d'eau moins volumineux comme on peut le voir dans la figure 3.5.3, où on a une plaque avec un circuit en forme de « U » et un autre en forme de « I ». Dans la figure 3.5.4 on peut voir le montage des refroidisseurs sur la FE-Box.

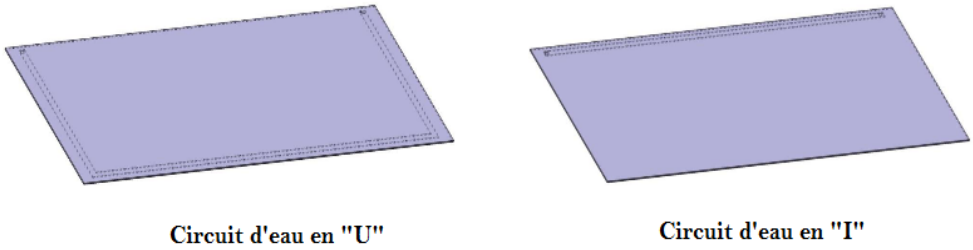
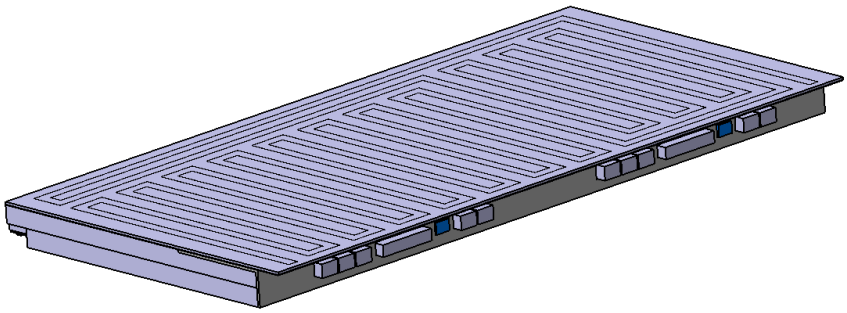
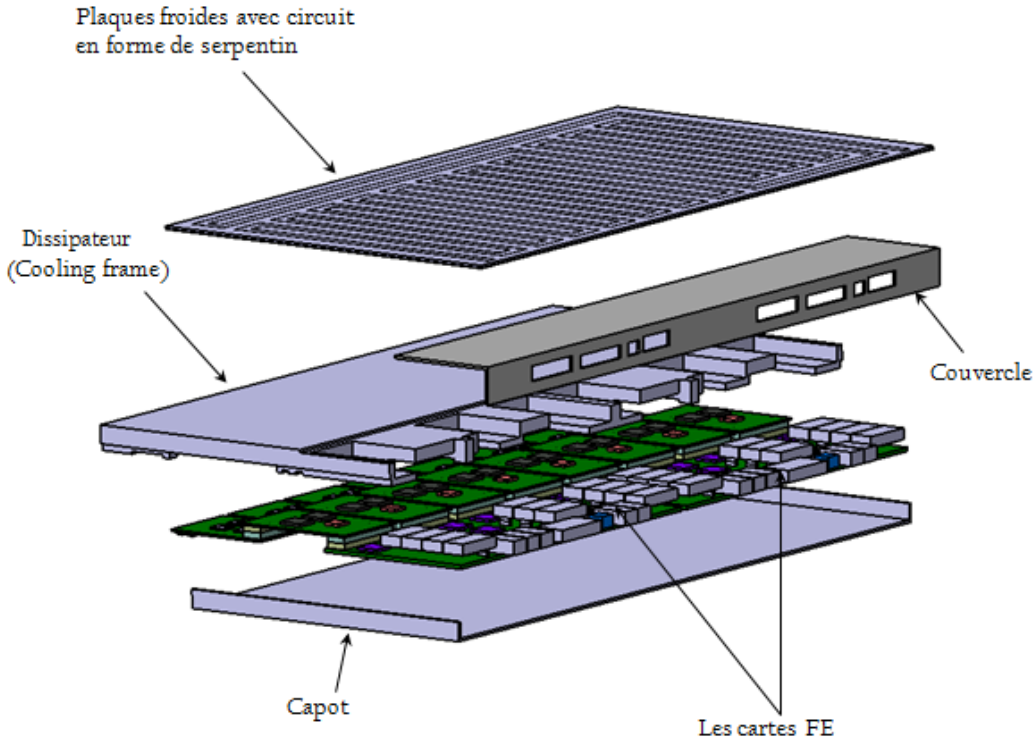


FIGURE 3.5.3 – Autres modèles de refroidisseurs qui représentent la solution °2 et la solution °3.



(a) Montage des refroidisseurs sur la FE-Box.



(b) Vue éclatée du montage des refroidisseurs sur la FE-Box.

FIGURE 3.5.4 – Montage de la première solution du système de refroidissement qui consiste a l'assemblage des refroidisseurs sur la FE-Box.

Il s'est avéré que ce type de solution n'était pas envisageable car il fallait éviter les connecteurs (pour éviter tout risque de fuite d'eau). De plus, l'évolution de la conception du système de refroidissement des SiPMs à imposer de placer ce dernier à l'arrière des cartes électroniques (contrainte de place) entre les deux

plans de chaque demi-station. Il fallait donc laisser un accès suffisant à travers le système de refroidissement des cartes FE.

3.5.2 Solutions avec des blocs froids

Un nouveau système de refroidisseur indémontable, mais qui permet un accès plus facile au système de refroidissement des SiPMs lors de l'entretien, est envisagé. Cette solution consiste à relier, grâce à un tuyau d'eau, deux blocs d'un même matériau conducteur thermique, fixés à l'arrière de la FE-Box. Les blocs auront une forme telle qu'on peut le voir dans la figure 3.5.5, afin de conserver tout de même le maximum de surface d'échange possible.

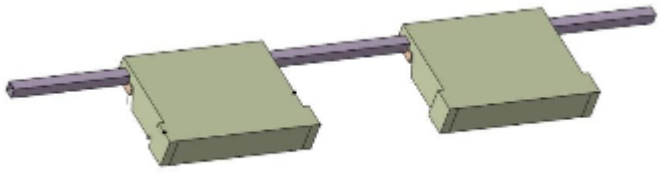


FIGURE 3.5.5 – Les deux blocs de refroidissement pour l'électronique FE avec un seul tube (solution n°4).

Afin d'avoir une plus grande possibilité de garder la même température d'entrée d'eau pour tous les modules (les 6 FE-Box), la solution envisagée est de rajouter un autre tuyau d'eau dans le système de refroidissement à blocs. On aura donc un tuyau pour l'entrée et un deuxième pour la sortie d'eau. Cette solution est modélisée avec deux blocs en aluminium d'une surface totale d'échange de $0,046$ m^2 (qui est proche de nos estimations cf.3.4.2) et une épaisseur de 20 mm, comme représenté par la figure 3.5.6.

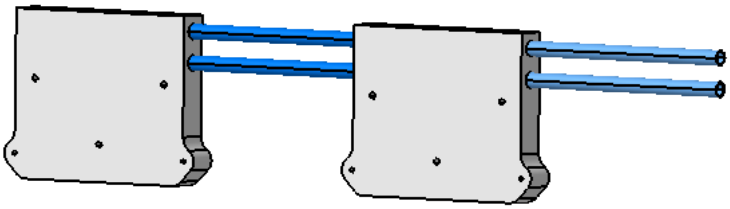


FIGURE 3.5.6 – Les deux blocs de refroidissement pour l'électronique FE avec deux tubes.

Ce système de refroidissement est dédié aux plans verticaux. Pour les plans inclinés, on aura des blocs de refroidissement adaptés à l'inclinaison des $\pm 5°$ comme on peut le voir dans la figure 3.5.7.

Le bloc de gauche (sur la figure 3.5.7) possède une plus grande surface d'échange que celui de droite, $0,054$ m^2 et $0,046$ m^2 respectivement.

Les tuyaux qui relient les blocs possèdent un diamètre intérieur de 8 mm et un diamètre extérieur de 10 mm.

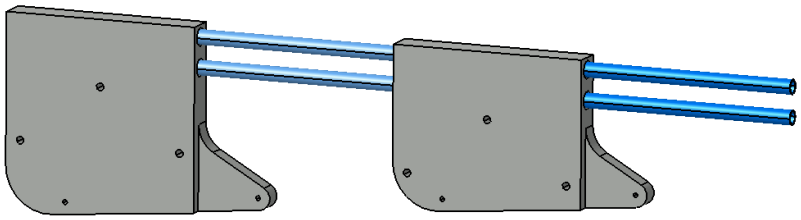
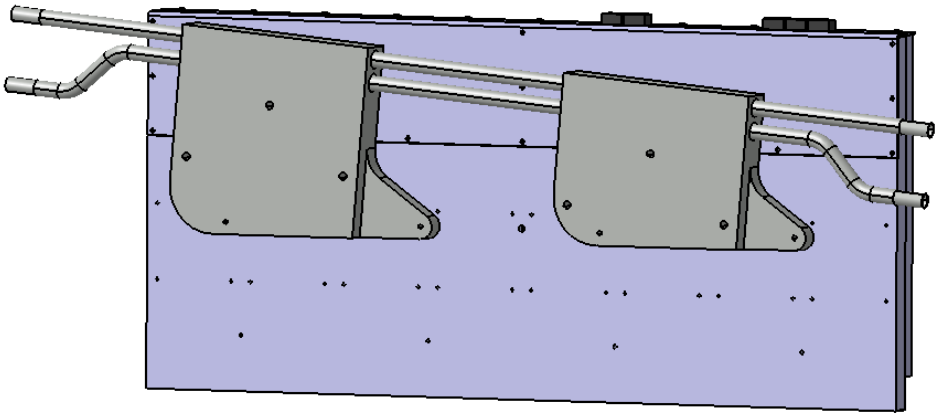
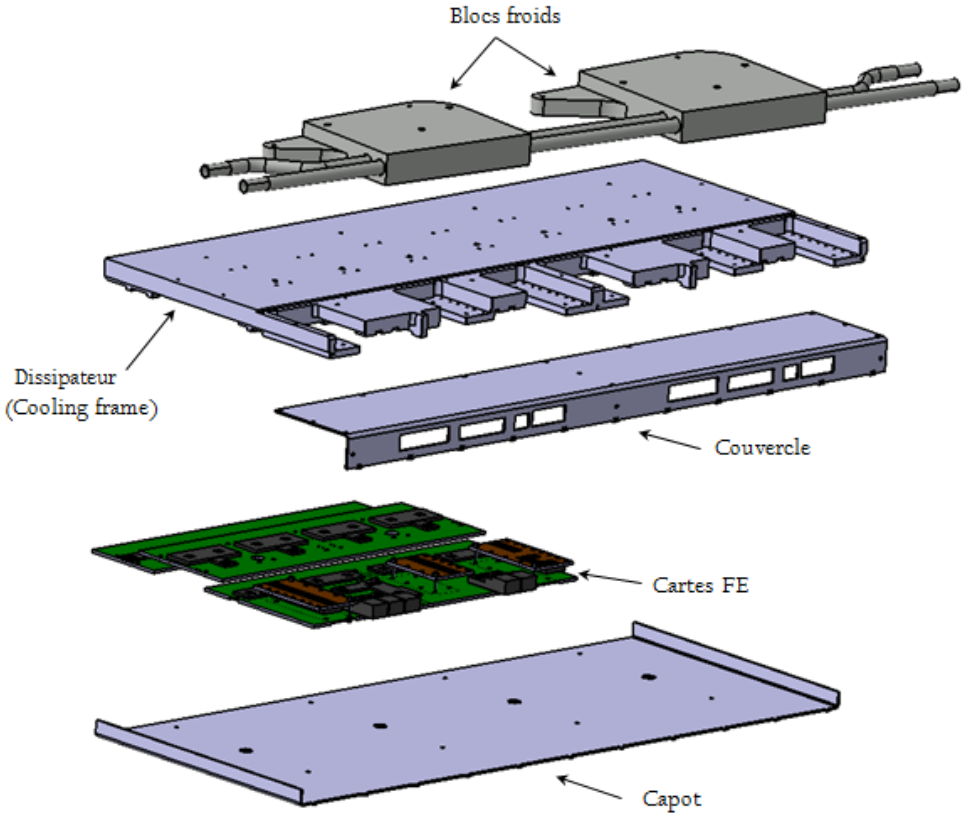


FIGURE 3.5.7 – Blocs de refroidissement pour les FE-Box qui se trouvent sur les plans inclinés.

La fixation des blocs sur la FE-Box est faite grâce à des vis, d'où la forme un peu complexe des blocs sur les plans inclinés. Afin d'assurer un bon contact entre les deux, l'utilisation d'une graisse thermique est aussi possible. Cette solution est en cours de fabrication réelle, le principe est de pouvoir tester ce mode de refroidissement avec trois matériaux différents qui sont l'aluminium, le cuivre, et l'inox et de vérifier la solution qui convient le mieux au niveau de l'échange thermique. Dans la figure 3.5.8 on peut voir le montage du nouveau système de refroidissement des cartes FE. Ces trois modèles de refroidissement ont été conçus et fabriqués par le service mécanique du LPC, des mesures réelles ont été réalisées et les résultats sont présentés dans le chapitre 4. On peut y voir en détails les différentes étapes de réalisation ainsi que les mesures obtenues afin de comparer les résultats avec ceux des simulations et valider la solution finale pour le refroidissement des FE-Box en prenant en compte tous les paramètres nécessaires pour cette expérience, tels que la réaction des matériaux utilisés en exposition aux particules radioactives.



(a) Montage des blocs froids sur la FE-Box.



(b) Vue éclatée du montage des blocs froids sur la FE-Box.

FIGURE 3.5.8 – Montage de la dernière solution de refroidissement pour la FE-Box.

Dans la figure 3.5.9, on peut voir le montage des FE-Box en série sur les modules, ainsi que la chaîne de refroidissement.

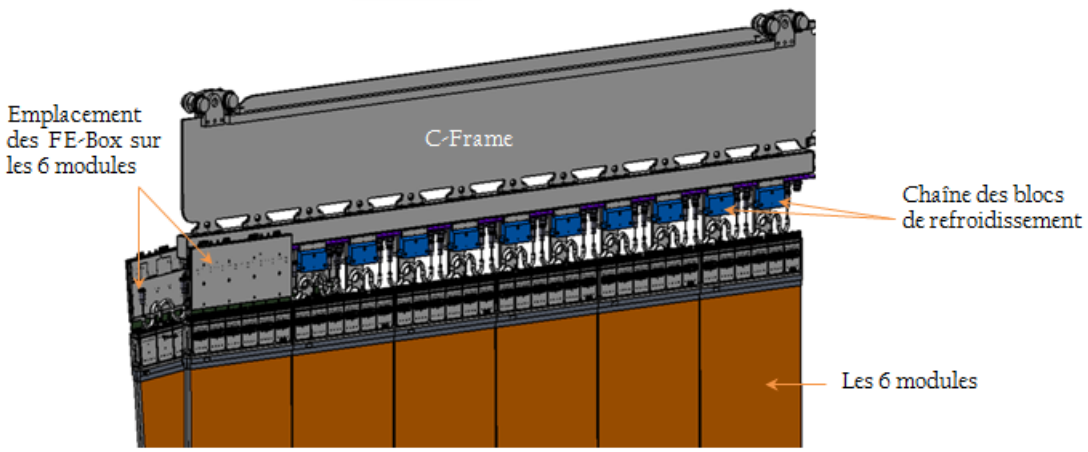


FIGURE 3.5.9 – Le montage des 6 FE-Box et la chaîne de refroidissement sur un demi-plan du détecteur.

Dans la version n°2 des cartes FE, pour faciliter le montage des DC-DC sur la carte Master, un second dissipateur en aluminium est monté sur la carte. Son positionnement suivra l'emplacement initial des DC-DC sur la carte et facilitera leur fixation. Cette solution va permettre d'améliorer le contact entre les deux éléments (dissipateur et DC-DC qui possèdent des boîtiers en aluminium dans la vraie carte Master), car le dissipateur sera en contact direct avec les DC-DC d'un côté et avec le Cooling frame de l'autre.

Des interfaces thermiques assurent le contact à chaque interface, elles seront aussi utilisées pour assurer un bon contact d'échange thermique entre les composants électronique et le dissipateur principale pour éliminer toutes les micro-couches d'air possibles entre les deux surfaces (la deuxième partie est consacrée à l'étude des interfaces thermiques). Dans la figure 3.5.10 on peut voir le montage complet.

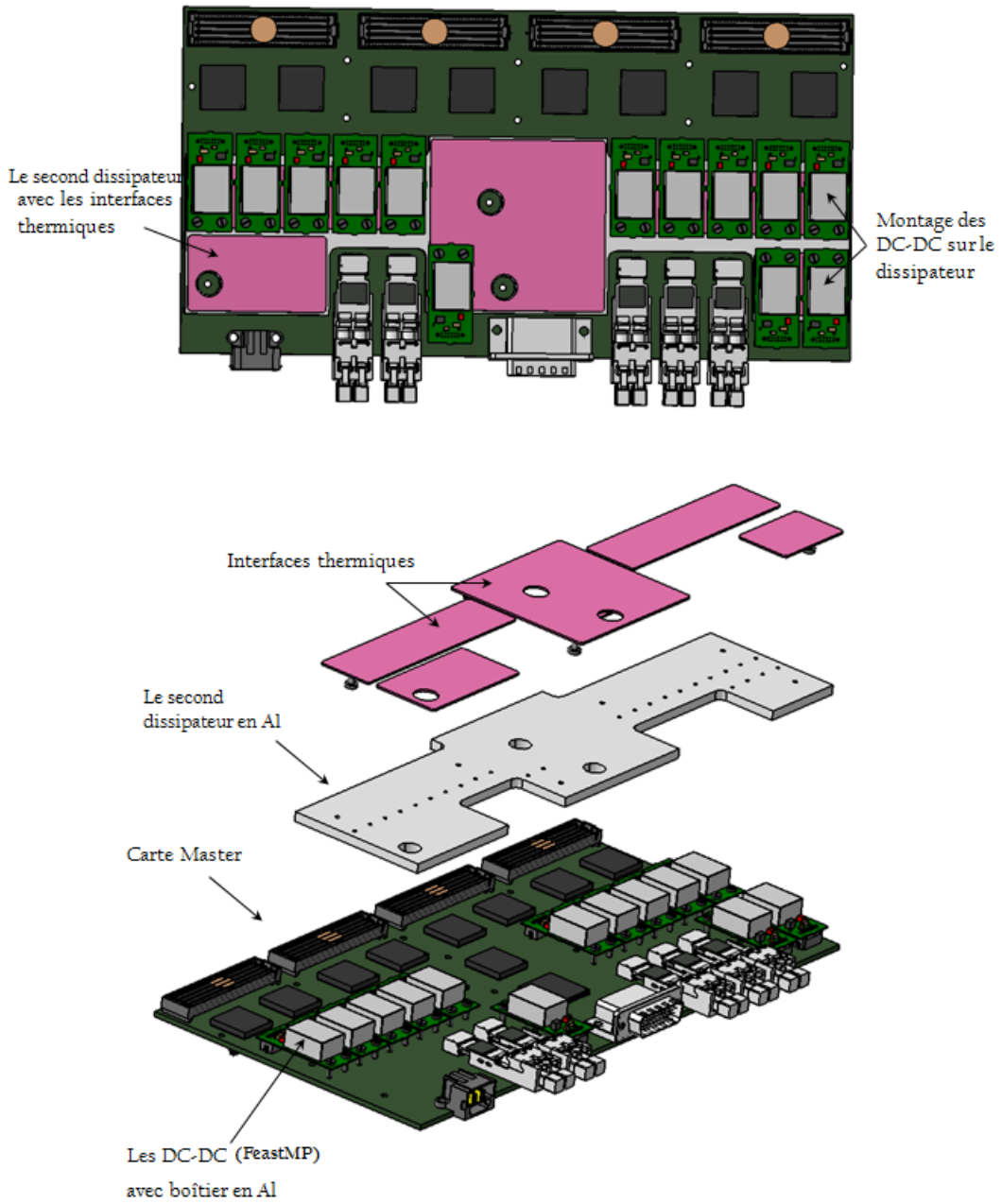


FIGURE 3.5.10 – Montage du second dissipateur en aluminium sur la carte Master.

3.6 Modélisations et simulations thermiques

Dans cette partie, les simulations effectuées sur le logiciel FloTHERM sont basées dans un premier temps sur la première version des cartes FE car c'était la seule version existante. Pour les simulations ANSYS, les cartes utilisées représentent les cartes d'essais FE avec des résistances qui donnent sensiblement les valeurs dissipées par les véritables cartes, et cela dans le but de comparer ces résultats avec les vraies mesures qui seront présentées dans le dernier chapitre.

3.6.1 Description de la modélisation FloTHERM

Comme évoqué plus haut, dans cette étude on a utilisé deux logiciels différents de simulations thermiques afin de comparer et valider nos résultats. Une première série de modélisations et de simulations est donc effectuée grâce au logiciel FloTHERM qui a pour fonction principale l'étude des cartes électroniques. On commence par une modélisation simplifiée en 3D conçue sur le logiciel de conception mécanique CATIA, car un modèle complexe alourdirait le calcul. Ensuite on importe le modèle grâce au module FloMCAD Bridge (un module dans FloTHERM qui permet d'importer la géométrie), vers FloTHERM où on saisit les différents paramètres nécessaires pour finaliser la modélisation tels que la température, puissance, résistance...etc.

Une fois tous les paramètres rentrés (valeurs du tableau 3.1), on lance les calculs.

Pour avoir un bon résultat du point de vue de la convection, le domaine de calcul doit être respecté, ainsi que la taille et le positionnement du système global pour l'environnement de calcul.

Dans ce genre de simulation, le maillage utilisé doit être conforme aux règles de la thermique car la fiabilité du calcul dépend de lui. La méthode des éléments finis possède une propriété essentielle, lorsque la taille de l'élément tend vers le zéro, la solution de l'élément finis converge vers la solution continue, donc la finesse du maillage est essentielle mais plus le maillage est fin, plus le temps de calcul est long. Il faut donc trouver le meilleur compromis.

3.6.2 Description de la modélisation ANSYS

La deuxième vague de simulations est faite sur le logiciel ANSYS. On a toujours la première étape qui consiste à transférer le modèle CATIA vers ANSYS. Une fois cette étape effectuée on passe à la configuration des différentes données et paramètres nécessaires pour la modélisation comme les matériaux, le maillage, les sources de chaleurs internes que peuvent dissiper les composants électroniques, la

convection, la température ambiante et autres. Une fois la configuration terminée on peut alors lancer les calculs.

3.6.3 Simulations FloTHERM des solutions envisagées avec les plaques embouties

— Simulation de la solution n°1 qui représente la FE-Box avec le premier système de refroidissement qui se compose d'une plaque froide muni d'un circuit d'eau en forme de serpentin qui occupera toute la surface de la plaque. Dans cette solution, on a l'avantage d'avoir une grande surface d'échange.

Les résultats de la simulation sont regroupés dans le tableau 3.9 :

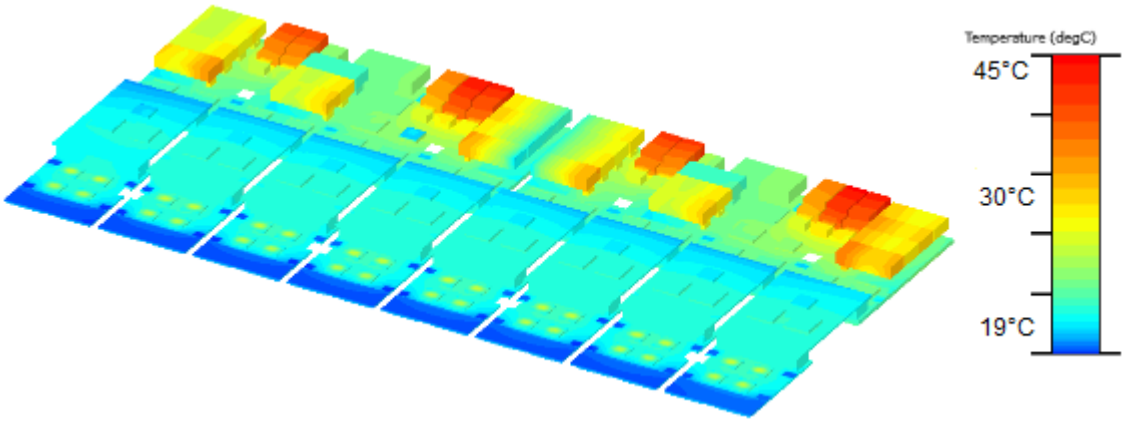


FIGURE 3.6.1 – Simulation de la solution n°1 du système froid.

T. entrée d'eau (°C)	Débit d'eau (l/min)	T.de la carte max (°C)	T.de la carte min (°C)	T. du côté des SiPMs (°C)	T. de sortie d'eau (°C)	T. des DC-DC moy (°C)
15	1,38	24,9	15,4	15,8 - 16	16	22
19	1	29,1	19,5	19,8 - 20,1	20,4	26,3
	1,38	28,7	19,4	19,7 - 20	20	26
	1,5	28,6	19,3	19,7 - 19,9	19,9	25,9
	2	28,5	19,3	19,6 - 19,8	19,7	25,7
20	1,38	29,7	20,4	20,7 - 21	21	27
25	1,38	34,3	25,3	25,6 - 25,9	25,9	31,8

TABLE 3.9 – Résultats de simulation pour la solution n°1.

D'après les résultats obtenus dans cette première simulation, on a un refroidissement satisfaisant avec une température d'entrée d'eau de 19°C vu qu'on sera dans cette condition dans l'expérience LHCb, et avec un débit d'eau de 1, 38 l/min qui se rapproche du calcul d'estimation. On obtient une température maximum sur la carte d'environ 29°C, et du côté des SiPMs on obtient un maximum de 20°C, ces résultats sont satisfaisants et cette solution pourrait très bien convenir.

— Simulation de la solution n°2 qui représente une plaque de refroidissement avec un circuit d'eau en forme de « U ».

Les résultats de la simulation sont regroupés dans le tableau 3.10 :

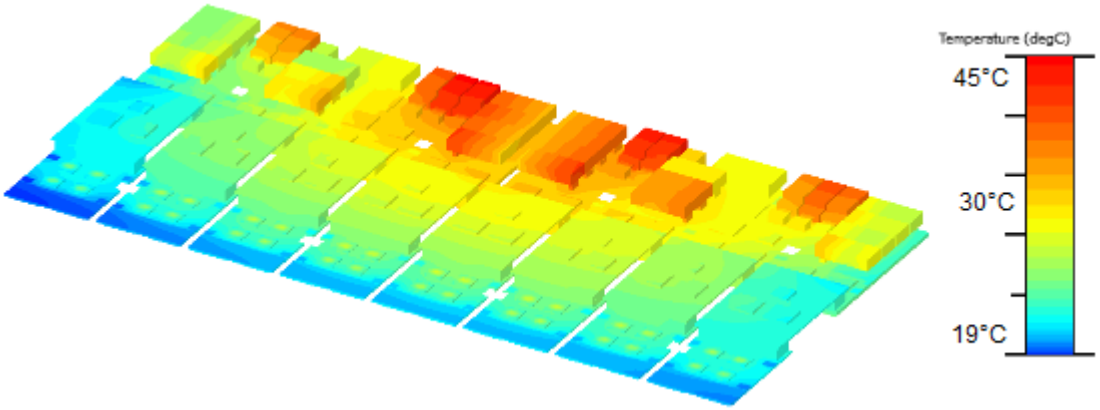


FIGURE 3.6.2 – Simulation de la solution n°2 du système froid.

T. entrée d'eau (°C)	Débit d'eau (l/min)	T.de la carte max (°C)	T.de la carte min (°C)	T.du côté des SiPMs (°C)	T. de sortie d'eau (°C)	T. des DC-DC moy (°C)
15	1,38	29,9	15,8	16,3 - 17,5	16	27,6
19	1	33,7	20	20,3 - 21,8	20,3	31,6
	1,38	33,3	19,7	20,2 - 21,4	20	31,3
	1,5	33,2	19,6	20,1 - 21,4	19,9	31,3
	2	33,2	19,6	20 - 21,1	19,7	31,1
20	1,38	34,3	20,8	21,1 - 22,4	21	32,2
25	1,38	38,4	25,7	26 - 27,2	25,9	36,7

Table 3.10 – Résultats de simulation pour la solution n°2.

Les résultats obtenus dans cette simulation nous montrent que le fait d'avoir une grande surface d'échange comme tel est le cas dans la simulation précédente est

important. Ce modèle de circuit d'eau passe par les endroits les plus chaud dans notre FE. Le fait de refroidir plus le côté des DC-DC nous donne un refroidissement global plutôt satisfaisant comme on peut le voir, on obtient une température maximum sur les cartes d'environ 33°C et du côté des SiPMs d'environ 22°C.

— Simulation de la solution n°3 qui représente une plaque de refroidissement avec un circuit d'eau en forme de « I ».

Les résultats de la simulation sont regroupés dans le tableau 3.11 :

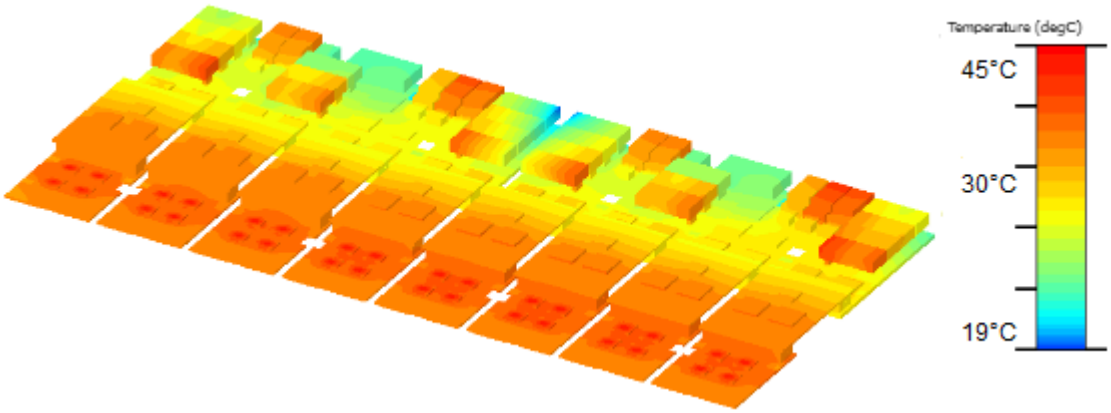


FIGURE 3.6.3 – Simulation de la solution n°3 du système froid.

T. entrée d'eau (°C)	Débit d'eau (l/min)	T.de la carte max (°C)	T.de la carte min (°C)	T. du côté des SiPMs (°C)	T. de sortie d'eau (°C)	T. des DC-DC moy (°C)
15	1,38	35,6	24,4	31,7 - 32,1	15,9	33,7
19	1	38,9	28,4	34,9 - 35,4	20,1	37,4
	1,38	38,6	27,9	34,5 - 35,1	19,8	36,9
	1,5	38,4	27,8	34,4 - 35	19,7	36,8
	2	38,1	27,4	34,2 - 34,7	19,6	36,4
20	1,38	39,3	28,7	35,2 - 35,8	20,8	37,7
25	1,38	43	33	38,8 - 39,4	25,7	41,6

TABLE 3.11 – Résultats de simulation pour la solution n°3.

Les résultats obtenus avec ce système de refroidissement sont dégradés en comparaison des deux solutions précédentes. En effet, avec si peu de surface d'échange, la température maximum des cartes monte vers les 39°C et du coté des SiPMs on retrouve une température proche des 35°C.

Conclusion

Ces simulations confirment que l'emplacement du système de refroidissement sur la FE-Box est très important. C'est pourquoi la simulation de la carte seule a été réalisée pour enfin déterminer les composants électroniques les plus chauds car il sera nécessaire de les refroidir au mieux.

3.6.4 Simulations des solutions envisagées avec les blocs froids

Simulation FloTHERM

Ce nouveau principe de refroidissement consiste à relier deux blocs d'aluminium avec un tuyau d'eau passant directement à l'intérieur des blocs, qui eux seront fixés sur le côté extérieur de la FE-Box.

Les résultats de la simulation de cette quatrième solution sont donnés par la carte thermique dans la figure 3.6.4 et par le tableau 3.12 :

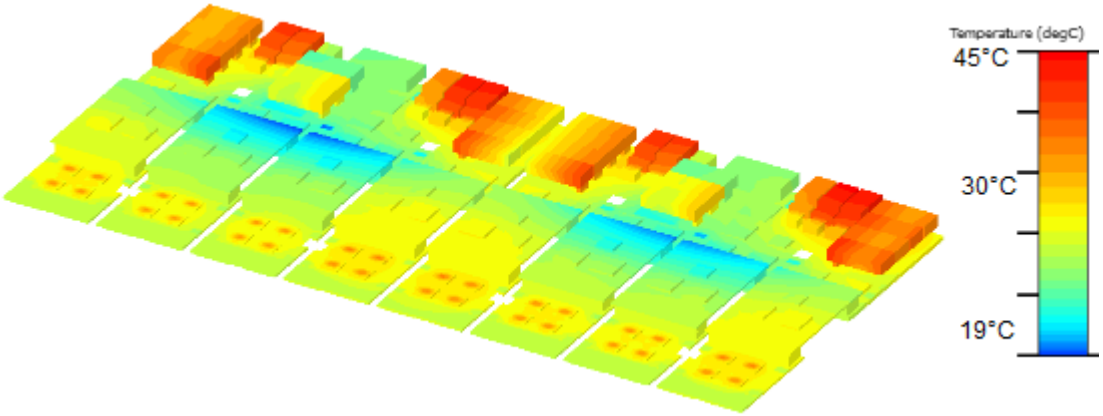


FIGURE 3.6.4 – Simulation de la solution n°4 du système froid.

T. entrée d'eau (°C)	Débit d'eau (l/min)	T.de la carte max (°C)	T.de la carte min (°C)	T. du côté des SiPMs (°C)	T. de sortie d'eau (°C)	T. des DC-DC moy (°C)
19	1	39,9	29,9	33,1 - 33,7	20,1	38,5
	1,38	39	28,9	32,3 - 32,9	19,8	37,6
	2	38	27,9	31,3 - 31,8	19,5	36,5
25	1,38	42,7	33,4	36 - 36,6	25,7	41,6

TABLE 3.12 – Résultats de simulation pour la solution n°4.

Les résultats de cette simulation restent dans les conditions limites définies par les contraintes imposées par le projet, avec une température maximum de 39°C sur les cartes FE et une température proche des 33°C du côté des SiPMs, on peut encore optimiser ce système de refroidissement.

D'après toutes ces simulations, on remarque bien que la température de sortie de l'eau dépend du débit volumique et de la surface d'échange du circuit de refroidissement.

Pour une entrée d'eau à 19°C comme on a pu le voir dans la première solution des plaques embouties et avec un débit de $1,38$ l/min, la température de sortie d'eau pour la FE-Box varie entre $19,8$ et 20°C.

Cette variation de température de l'eau entre l'entrée et la sortie est approximativement linéaire et la température de sortie varie entre 23 et 24°C, pour les 6 modules (6 FE-Box) montés en série pour une eau à 19°C en entrée. Donc on a un $\triangle T$ de 4°C qui sera ajouté à la température d'entrée d'eau à chaque fois si on a un branchement d'eau en série. Ce qui pourrait rendre le système de refroidissement inefficace une fois monté sur tous les modules de l'expérience LHCb. Pour éviter un tel problème, un montage en parallèle pourrait être envisagé.

Parmi ces solutions, celle qui est la plus satisfaisante est celle de la plaque qui contient un circuit d'eau en forme de serpentin qui arrive à couvrir toute la surface du refroidisseur pour obtenir une surface d'échange plus grande et globale ce qui permet de refroidir tous les éléments chauffants qui se trouvent sur les cartes. Mais comme cette dernière ne sera pas possible à cause des nouvelles contraintes, la solution des blocs froids reste donc le seul moyen envisageable pour refroidir les cartes FE.

Simulation ANSYS

Une modélisation sur ANSYS est réalisée afin de déterminer la température maximum de la FE-Box avec le système de refroidissement qui se compose de deux blocs en aluminium de nuance 6060 qui sont reliés par deux tuyaux d'eau, un pour l'entrée et l'autre pour la sortie, le modèle est simplifié.

Cette modélisation est faite dans un premier temps en fixant la température des deux blocs en aluminium. Les calculs sont effectués sur les cartes d'essais mais la puissance des composants est la même que sur les vraies cartes FE (version n°2).

Les résultats sont représentés par la carte thermique 3.6.5. La température globale de la FE-Box est entre 25 et 42°C.

Pour une température fixe des blocs froids à 25°C, on obtient un flux de chaleur total sur les cartes de $0,18$ W/mm² avec une température maximum sur un composant DC-DC de 45°C, comme on peut le voir dans la carte thermique 3.6.5.

Dans le cas le plus défavorable, avec une température des blocs froids fixée de 24°C sur l'un et de 26°C sur l'autre (pour une température d'entrée d'eau supposée à 19°C), on obtient des résultats plutôt satisfaisants car on a une température moyenne raisonnable d'environ 42°C, qui ne met pas en péril les composants électroniques et surtout qui ne risque pas de perturber le bon fonctionnement des SiPMs. On a un flux de chaleur total de $0,25$ W/mm² et qui nous donne un pic de température maximum autour de 47°C.

Résultats regroupés dans le tableau 3.13.

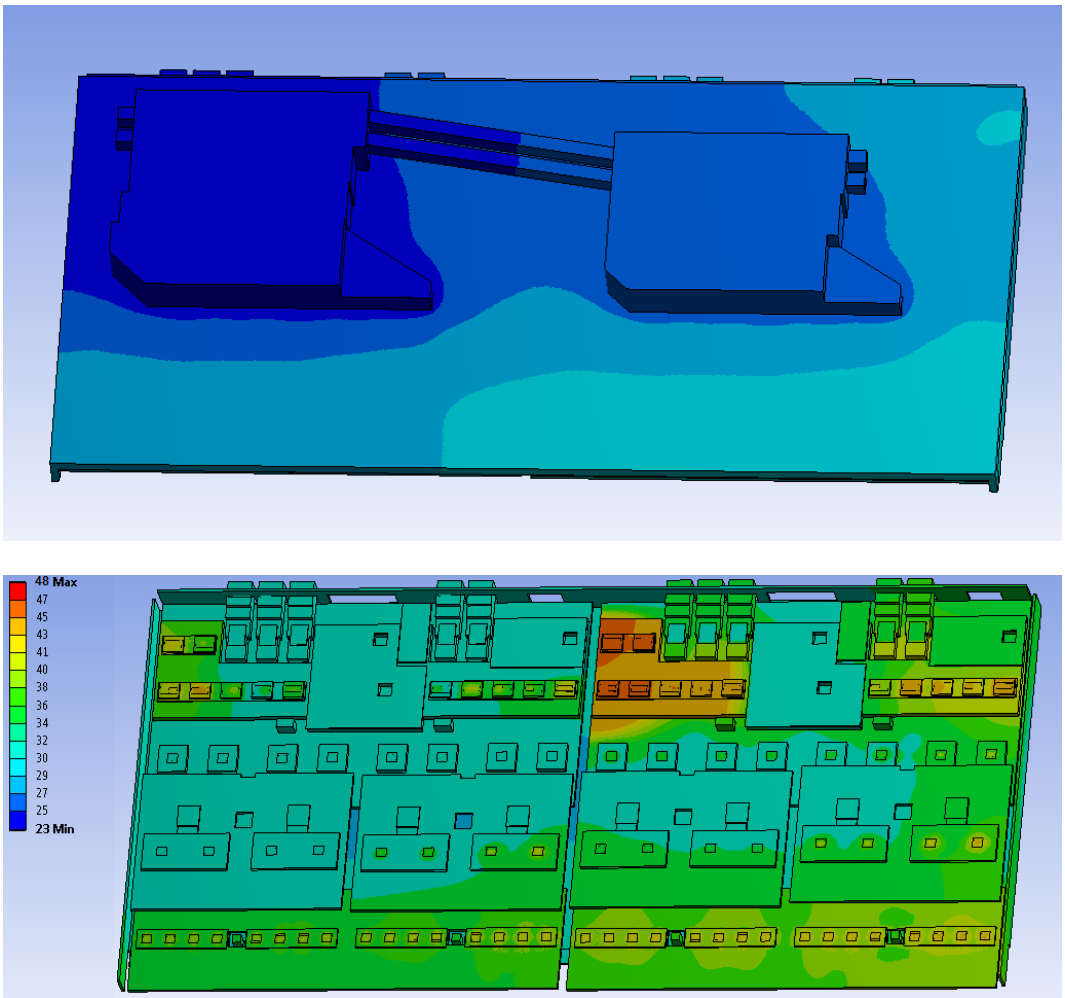


FIGURE 3.6.5 – Carte thermique de la FE-Box sur ANSYS avec les vraies puissances dissipées des cartes FE, mais avec la géométrie simplifiée des cartes d'essais FE pour le cas défavorable.

Puissance totale (W)	T. des blocs froids (°C)	T. max des cartes (°C)	T. moy des cartes (°C)	T. min des cartes (°C)	T. du côté des SiPMs (°C)
106	25	45	25-41	24	28-29
106	24 et 26	47	25-42	25	28-32

T. des DC-DC max(°C)	T. du dissipa moy (°C)	T. des ASIC (°C)	Flux de chaleur total (W/mm²)	Dissip- par les blocs (W)	Dissip- par conv (W)
27-45	25-40	32-40	0,188	92	13
28-47	24-35	32-42	0,256	59,6	13,5

TABLE 3.13 – Résultats de la simulation du nouveau système de refroidissement avec ANSYS sur les cartes d'essais FE avec les puissances dissipées des vraies cartes FE.

D'après cette simulation on remarque que la température reste au-dessus des objectifs fixés avec 47°C qui représente le point le plus chaud sur nos cartes. Par contre la température globale des cartes est d'environ 42°C dans le pire des cas (avec des blocs froids fixés à une température entre 24 et 26°C). Du côté des SiPMs, la température est autour de 32°C, ce qui représente 2°C de plus que la contrainte imposée par le projet. Ce système de refroidissement n'est pas encore satisfaisant pour refroidir la FE-Box, ce qui nous a conduits à faire des tests et essayer d'optimiser au mieux ce système de refroidissement (au niveau des matériaux et des interfaces). Dans le dernier chapitre nous nous sommes intéressés de plus près à ce problème.

Une deuxième simulation est effectuée grâce au logiciel FloTHERM qui nous donne la carte thermique 3.6.6, et le tableau 3.14, résume les résultats obtenus pour une puissance dissipée de 106 W :

T.Entrée d'eau (°C)	Débit d'eau (l/min)	T.Max de FE (°C)	T.Moy de FE (°C)	T.Min de FE (°C)	T. côté SiPM (°C)	T. DC-DC max (°C)
19	1,4	49	27	24	30	49

TABLE 3.14 – Résultats de la simulation FloTHERM du système de refroidissement sur les cartes d'essais FE version n°2.

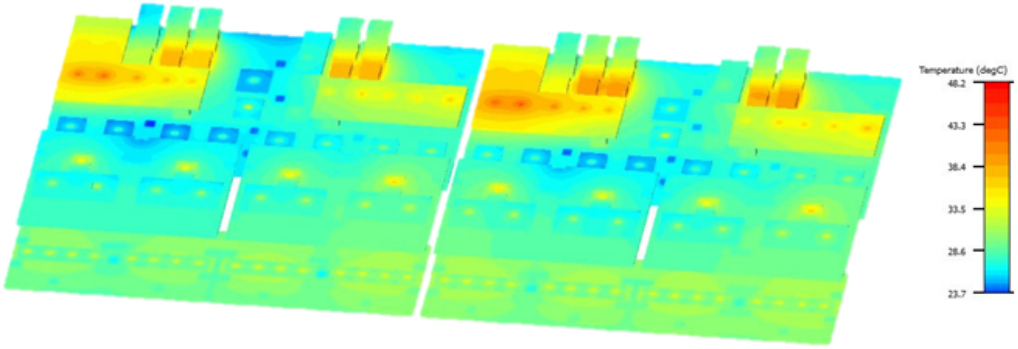


FIGURE 3.6.6 – Carte thermique de la FE-Box sur FloTHERM avec les cartes d'essais.

D'après ces résultats, on remarque que les deux simulations sont proches par rapport aux résultats obtenus, la température maximale sur les cartes FE est d'environs 49°C qui se trouve sur les composants DC-DC, et une température moyenne vers les 27°C. On a donc une température tolérée des DC-DC et plutôt admissible du côté des SiPMs avec environ 30°C. Cette simulation a été recalée par la suite par rapport aux résultats obtenus par les tests (teste de refroidissement dans le chapitre 4), dans le but de refaire des simulations optimisées au niveau de différents paramètres tels que le débit d'eau, température d'entrée d'eau, matériaux etc.

3.7 Conclusion

Dans ce chapitre, on a vu l'étude thermique de la carte électronique en réalisant un bilan énergétique et des simulations thermiques qui nous ont permis de connaître les points de température les plus élevés et donc d'identifier les zones prioritaires à refroidir sur nos cartes électroniques.

On a ensuite réalisé plusieurs simulations de plusieurs versions du système de refroidissement, qui correspondent aux changements dûs aux deux versions des cartes électroniques qui nous a conduit au final à notre choix, qui converge vers l'utilisation d'un système de refroidissement qui se compose de deux blocs en aluminium qui sont reliées l'un à l'autre par deux tuyaux qui permettent à l'eau de circuler (un pour l'entrée et l'autre pour la sortie). Ce choix est pris aussi à cause de la nouvelle contrainte qui exige d'avoir un système fixe mais qui permet en même temps l'accès au système de refroidissement des SiPMs lors de la maintenance de LHCb.

Ce qu'il faut savoir, c'est que le système de refroidissement possède deux points

forts qui permettent d'avoir un bon refroidissement des cartes électroniques qui sont, d'une part le dissipateur qui possède une forme complexe mais utile car il épouse parfaitement la forme des cartes électroniques, et d'autre part l'utilisation d'interfaces thermiques qui viennent améliorer le contact entre les surfaces des composants et du dissipateur. La deuxième partie de cette thèse est consacrée à l'étude de ces interfaces thermiques.

Après avoir déterminer le système de refroidissement, nous avons effectué des tests en fabriquant un banc expérimental, au départ avec la version n°1 des cartes électroniques, au laboratoire hollandais Nikhef car ces dernières étaient disponibles, ensuite on a procédé à la fabrication du prototypage des cartes électroniques afin de pouvoir effectuer d'autres tests au sein de notre laboratoire « LPC ». D'autres tests ont donc été réalisées avec la version n°1 et la version n°2 des cartes électroniques.

Les tests effectués pour le refroidissement des deux versions de cartes au sein du laboratoire Nikhef et ceux effectués au LPC, sont détaillés dans le chapitre 4.

Chapitre 4

Réalisation du banc expérimental et tests du système de refroidissement des cartes électroniques FE

4.1 Introduction

Dans ce quatrième et dernier chapitre de la première partie de cette thèse, on passe à la fabrication du banc expérimental pour le système de refroidissement des cartes électroniques du système de lecture de l'expérience LHCb.

Pour cela, et comme cité dans l'introduction du chapitre précédent, nous sommes passés par plusieurs étapes. Nous avons effectué une simulation des cartes électroniques sans boîtier ni système de refroidissement afin de déterminer leur carte de température. Ce calcul nous a permis de connaître les points de température les plus élevés et donc de savoir où concentrer en priorité le refroidissement. Cette simulation est détaillée dans le paragraphe 3.3 du chapitre 3.

Ensuite, nous avons effectué des simulations (paragraphe 3.6) de plusieurs versions de système de refroidissement nous paraissant adaptées à notre cas. Dans la suite des développements, le système de refroidissement des SiPMs devenant de plus en plus imposant, nous avons dû réduire l'encombrement de notre propre système de refroidissement, ce qui nous a amené à de nouvelles simulations développées dans le paragraphe 3.6.4.

Une partie des cartes étant enfin disponibles à Nikhef (laboratoire en Hollande Septentrionale où ces cartes étaient développées), nous avons souhaité effectuer des premiers tests, couplés à des tests électroniques. Nous nous sommes donc rendus aux Pays-Bas pour ces premiers tests qui sont détaillés dans le paragraphe 4.3.1.

Suite à ces tests, nous avons voulu faire des cartes électroniques d'essais (PCB

muni de pièces fabriquées en impression 3D pour les composants et dans lesquelles sont placées des résistances chauffantes) pour pouvoir réaliser des tests sur place au LPC. Cela nous a donc permis d'obtenir des premiers résultats sur place décrits dans le paragraphe 4.3.1 comparables aux mesures effectuées à Nikhef afin de valider nos cartes d'essais.

Les développements des cartes électroniques ont également amené des modifications de ces cartes vers une version n°2 pour lesquelles la dissipation totale est passée de 90 Watts à 110 Watts environ (paragraphe 3.3.2).

Nous avons donc aussi développé une version n°2 des cartes d'essais (vu dans la section 3.2.3) afin de réaliser de nouveaux tests décrits dans le paragraphe 4.3.2.

Nous avons effectué de nouvelles simulations sur les cartes électroniques version n°2 pour connaître la carte des températures (paragraphe 3.3.2) et vérifier si notre principe de système de refroidissement était toujours adapté. Nous avons ensuite effectués des tests sur les cartes d'essais version n°2 avec différents matériaux tel que l'aluminium, le cuivre et l'inox, où les résultats sont représenté dans le paragraphe 4.3.2, dans le but de définir le matériau le mieux adapté pour cette expérience.

4.2 Description des moyens de test mis en œuvre

4.2.1 La FE-Box

Le montage de la FE-Box, comme expliqué dans le chapitre précédent, se compose d'une boîte avec une partie inférieure qui représente le dissipateur, où on a deux versions, dû au changement de version des cartes FE, vu que ce dernier doit épouser leur forme géométrique dans le but d'assurer le contact entre les surfaces d'échange. Ainsi que d'un couvercle qui suit aussi la géométrie globale de la FE-Box. Il est fabriqué en aluminium de nuance 5754 (choisi pour les raisons de coût et de conductivité thermique de 132 W/m.K) dans la première version avec les dimensions de $524,4 \times 218,3 \times 12,44$ mm, pour la version n°1. La version n°2 est en cours de conception, les tests ont été faits sans couvercle dans la deuxième version. Il est utile pour protéger l'électronique et permet d'agrandir la surface d'échange thermique.

On a aussi dans la FE-Box, le montage des cartes FE (2 Master, 8 Cluster et 8 Pacific), ainsi que les interfaces thermiques qui aident à avoir un meilleur contact entre le refroidisseur et les composants électroniques (plus de détails dans la partie II 4.4) comme on peut le voir sur la figure 4.2.1. Donc on peut dire qu'on a deux version de FE-Box.

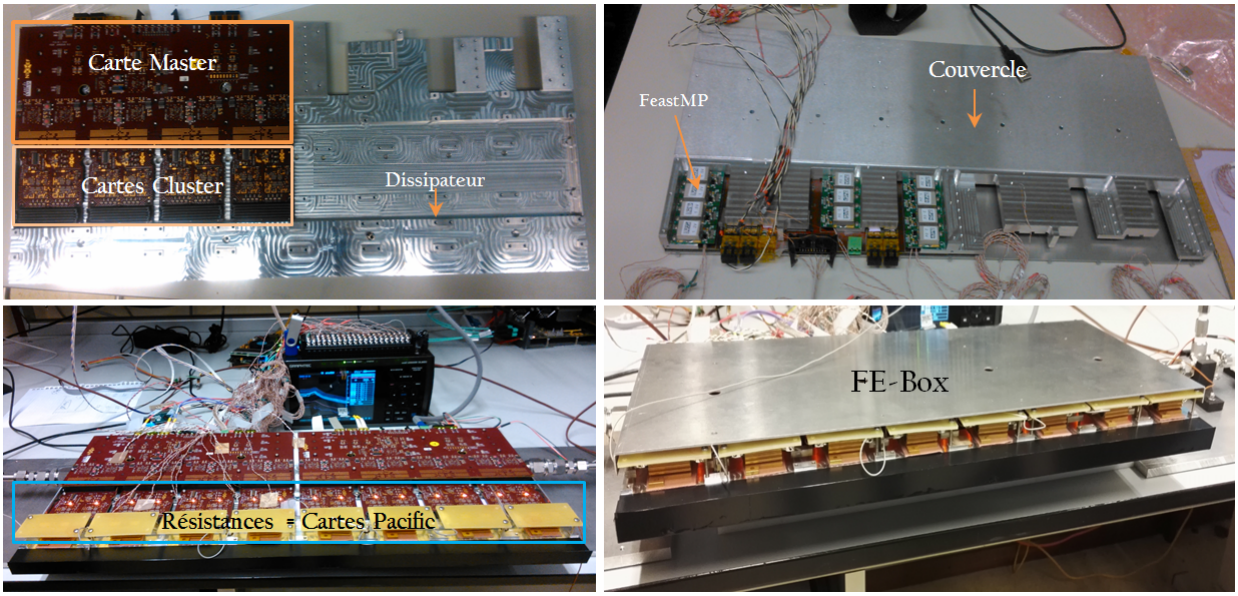


FIGURE 4.2.1 – Composition de la FE-Box.

Dissipateur version n°1

La première version possède les dimensions de $524,4 \times 218,3 \times 16$ mm, est fabriquée en aluminium de nuance 7075 suivant la norme européennes EN 573-1 qui fait référence au système de désignation numérique permettant d'identifier les alliages d'aluminium par leur composition chimique. Ce matériau a été choisi pour des raisons d'usinage car la forme attendue est complexe, il possède une bonne conductivité thermique grâce à son pourcentage de cuivre.

Cette version est représentée par la figure 4.2.2. L'utilisation d'interfaces thermiques est prévue pour ce montage qui va nous permettre d'éliminer la micro-couche d'air qui se trouve entre les composants électroniques et le dissipateur.

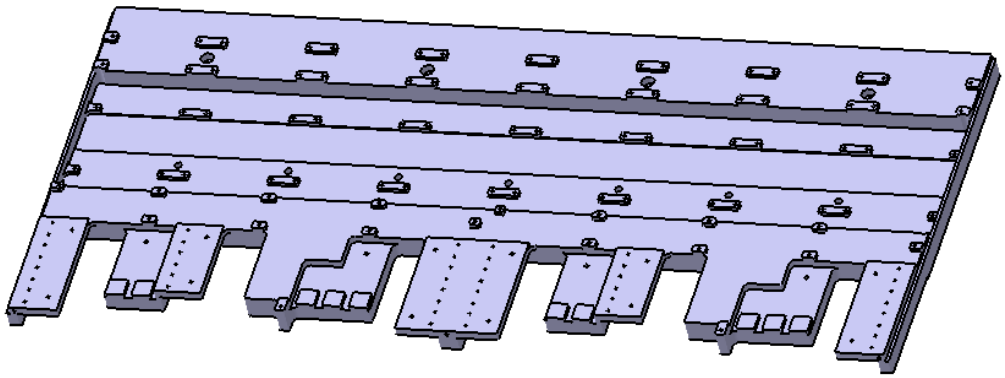
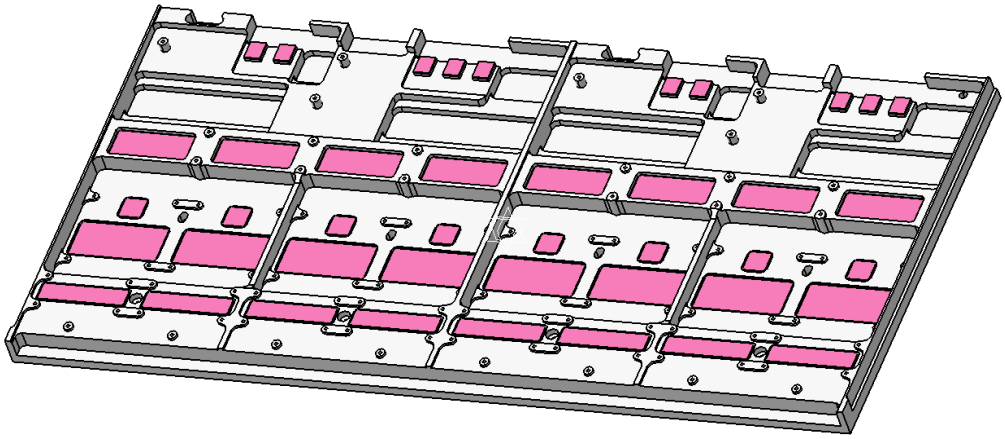


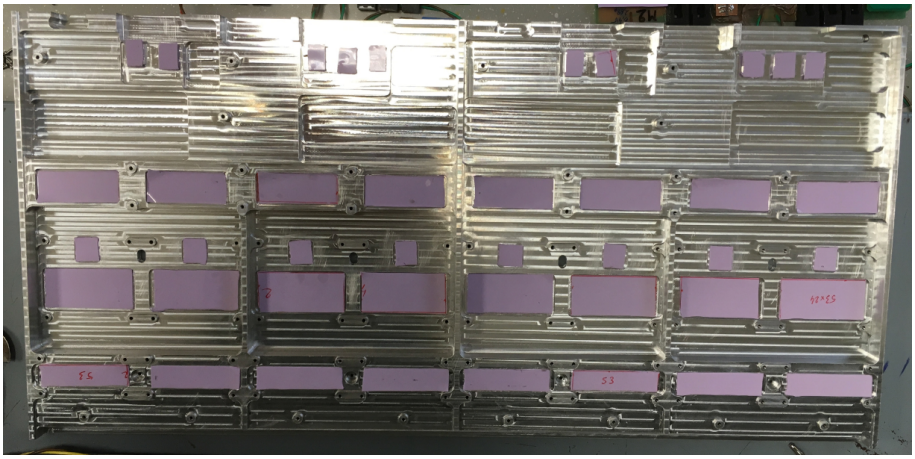
FIGURE 4.2.2 – Le premier dissipateur conçu et réalisé par le LPC pour le banc de tests du système de refroidissement des cartes FE version n°1.

Dissipateur version n°2

La deuxième version possède les dimensions de $526,5 \times 259 \times 18$ mm, est en aluminium de nuance 6060 (AGS) choisi pour son prix économique, et sa bonne conductivité thermique qui est de 209 W/m.K. Dans la figure 4.2.3 on peut voir le dissipateur avec les interfaces thermiques placées là ou y a des composants électroniques, afin d'assurer un meilleur contact thermique.



(a) Dissipateur version n°2 en 3D sous le logiciel CATIA.



(b) Le refroidisseur réel fabriqué au LPC.

FIGURE 4.2.3 – Dissipateur version n°2 de la carte FE avec l'emplacement des interfaces thermiques qui se positionnent exactement là où on a des composants électroniques afin d'assurer le contact thermique entre les deux surfaces.

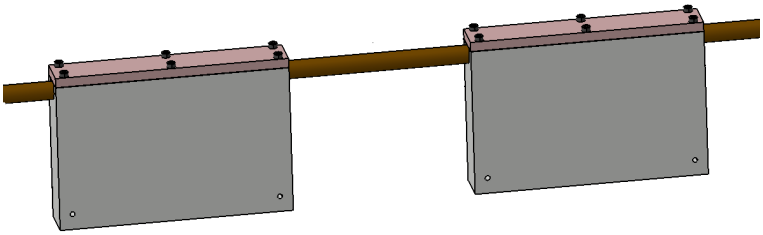
4.2.2 Système de refroidissement

Premier modèle du système de refroidissement

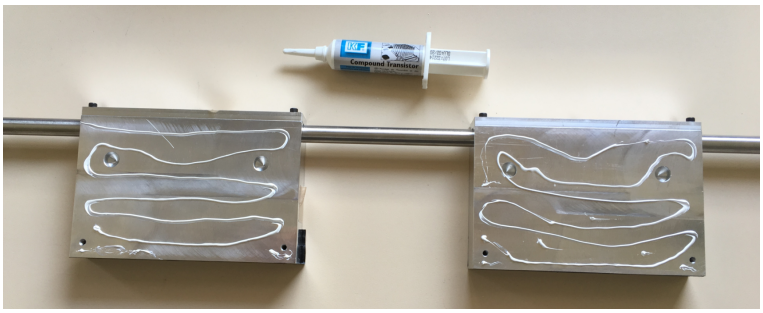
Dans le premier modèle du système de refroidissement, dédié donc à la version n°1 de la FE-Box, nous avons des blocs en aluminium qui ne possèdent qu'un seul tuyau d'eau (comme expliqué dans le paragraphe 3.5.2). La figure 4.2.4 représente ce système.

Deuxième Modèle du système de refroidissement

Contrairement au premier modèle, le deuxième modèle du système de refroidissement aura une forme plus complexe des blocs froids qui possèdent deux tuyaux d'eau (un pour l'entrée et un pour la sortie d'eau). Cette forme est choisie dans le but d'augmenter la surface d'échange. La figure 4.2.5 représente les blocs froids qui se trouvent sur les plans inclinés du détecteur LHCb. Les tests pour la version n°2 des cartes FE, seront effectués avec ce modèle avec trois matériaux différents, qui sont l'aluminium, le cuivre et l'inox dans le but de comparer la conduction thermique pour chaque matériau. On retrouve les propriétés physiques de ces matériaux dans la section 4.3.

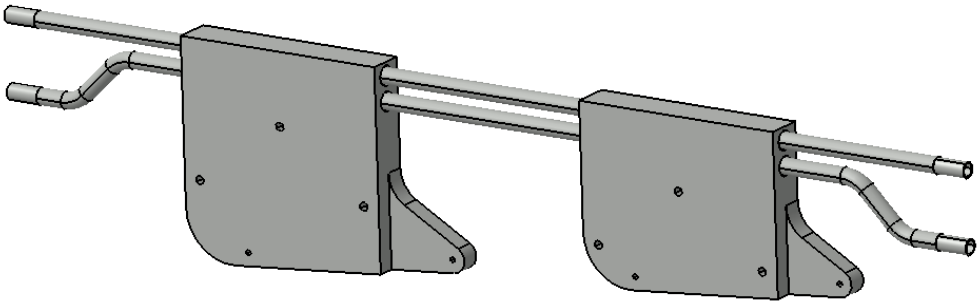


(a) Modélisation sous CATIA V5

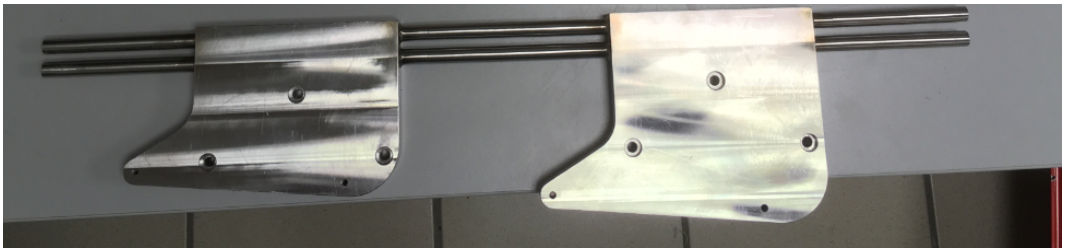


(b) Fabrication réelle au LPC

FIGURE 4.2.4 – Les premiers blocs froids conçus pour le banc de tests.



(a) Conception sous CATIA V5



(b) Fabrication des blocs au LPC

FIGURE 4.2.5 – Blocs de refroidissement fabriqués au LPC.

4.2.3 Banc de tests pour Nikhef

Le banc de tests se compose de l'ensemble à tester qui représente donc, la FE-Box et le système de refroidissement, ainsi que de plusieurs éléments permettant de contrôler les différents paramètres nécessaire au bon déroulement de l'expérience (voir la figure 4.2.6). La liste de matériels utilisés est donc :

- Un débitmètre de chez Fisher Scientific avec une gamme de débit entre $0,4$ l/min et 5 l/min, avec une précision de $\pm(0,5-1\%)$.
- Une vanne pointeau type N de diamètre 3/8" (équivalent à $9,525$ mm) qui permet de contrôler le débit d'eau de la marque Rotarex,
- Un réducteur de pression de chez Rotarex, pour s'assurer de ne pas dépasser la pression de 100 psi (6,8 bar) admissible au maximum par le débitmètre,
- Deux thermocouples chemisés, pour contrôler la température d'entrée et de sortie d'eau,
- Plusieurs raccords de diamètre 3/8" mâle et femelle,
- Des tuyaux d'eau de diamètre 3/8",
- Des bagues pour tube extérieur de 12 mm,
- Plusieurs thermocouples de type T de diamètre 1 mm pour contrôler la température des composants électroniques de chez TC Direct,
- Des interfaces thermiques pour améliorer la surface d'échange entre les composants et le refroidisseur de type Gap Pad TH-1851 de 1 mm d'épaisseur de chez Stacem.

Acquisition des données

Nous avons utilisé une centrale de mesure modèle GL820-E de chez Distrame avec 20 voies d'acquisitions qui dispose d'une entrée analogique, avec une plage de tension de 20 mV à 50 V, une connexion directe de thermocouples ou PT100. Cette centrale a l'avantage de se connecter directement au PC via USB ou Ethernet. Elle permet d'effectuer des mesures de températures, de tension ou même d'humidité de 0 à 100 % selon les capteurs utilisés.

Mesure de débit

Le débit nécessaire estimé par les calculs et simulations précédents, est de 1.38 l/min. Nous avons donc utilisé un débitmètre de type GOLD $400-5000$ ml/min qui mesure un débit entre $0,4$ et 5 l/min avec une précision de $\pm 0,5\%$, une reproductibilité de $\pm 0,2\%$ et une pression maximale de 7 à 35 bar de chez Fisher Scientific.

Mesures de températures

Pour mesurer les températures sur les cartes électroniques, nous avons utilisé des thermocouples type T mesurant de −50°C à +250°C avec une précision de ±1°C, parmi ces thermocouples l'un est étalonné et peut servir de référence. Nous avons 20 thermocouples dont deux thermocouples chemisés montés dans des jonctions en T pour raccordement en eau. Un de ces thermocouples servira à mesurer la température ambiante de la pièce.

Pâtes thermiques

Les interfaces thermiques utilisées sont de type TH-1851 de chez Stacem d'une épaisseur de 1 mm, leur conductivité thermique est de 3 W/m.K et leur dureté est de 25 Shore 00.

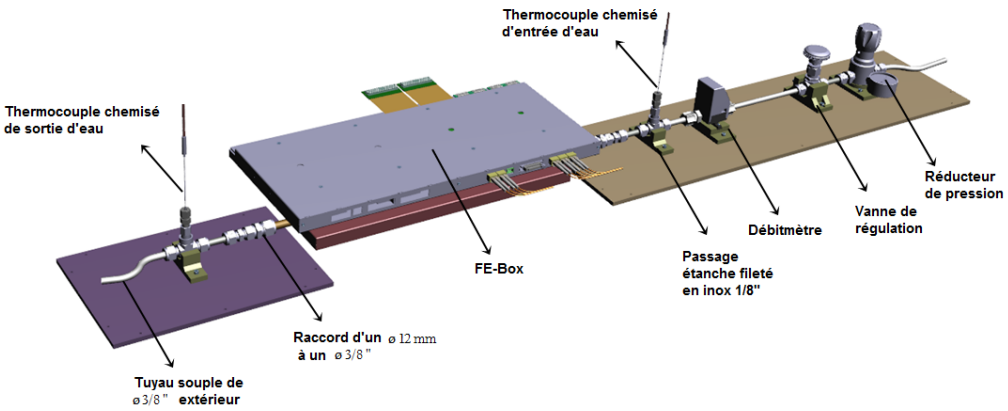


FIGURE 4.2.6 – Maquette sur CATIA du banc de mesure pour le refroidissement de la FE-Box.

4.2.4 Banc de tests pour LPC

Le banc de tests pour le LPC est le même que celui utilisé à Nikhef, un changement a été effectué au niveau des outils de contrôle, la température de l'eau variait au cours du temps lors des tests à Nikhef, une enceinte thermique a été rajouté pour maîtriser ce paramètre. Le réducteur de pression de l'eau et de la vanne pointeau ont aussi été supprimés, car ces derniers limitaient le débit d'eau requis. Le changement des différents raccords a aussi été effectué, vu le changement de diamètre des tuyaux entre les deux modèles de refroidissement.

4.3 Tests des différents systèmes de refroidissement pour la FE-Box

4.3.1 Première version de la carte FE

Tests à Nikhef

a) Conditions du test

Les tests effectués sur la FE-Box se composaient des 2 véritables cartes Master-V1 et des 8 cartes Cluster, mais vu que la conception des cartes Pacific était en cours, on a utilisé 8 résistances qui dissipent la même puissance attendue sur les cartes définitives Pacific.

La dissipation totale de la FE-Box est estimée à 90 W, pendant ces mesures le débit d'eau utilisé est de 3 l/min avec une température d'eau d'environ 15°C. La température ambiante de la pièce a été relevée à environ 23°C et le système de refroidissement utilisé correspond à la première solution des blocs d'aluminium avec un seul tuyau d'eau qui les relie en acier inoxydable, sans oublier le dissipateur qui se trouve au sein de la FE-Box. La figure 4.3.1 représente le banc de tests de refroidissement de la FE-Box effectué à Nikhef.

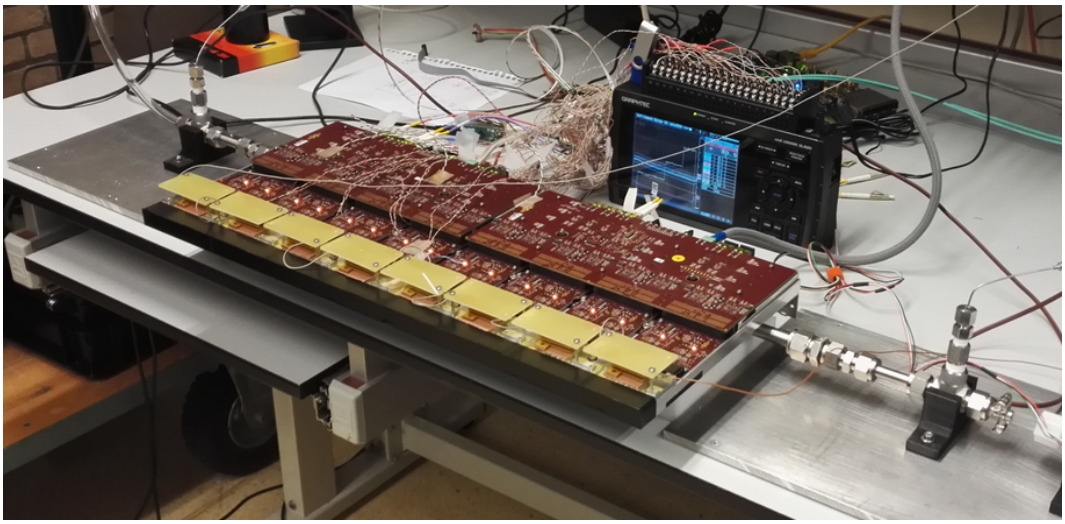


FIGURE 4.3.1 – Le banc de tests pour le refroidissement de la FE-Box utilisé à Nikhef.

b) Résultats expérimentaux

Dans ce paragraphe, nous allons présenter des résultats expérimentaux obtenus lors des tests effectués au laboratoire de Nikhef.

Les résultats obtenus lors de cette première expérience sont d'environ 35°C comme température maximum du côté des SiPMs et sur le refroidisseur, et entre 33 et 38°C comme température maximale retrouvée sur les composants les plus chauds, les DC-DC (FeastMP).

Les résultats obtenus avec la variation du débit sont représentés dans le tableau 4.1 et figure 4.3.2.

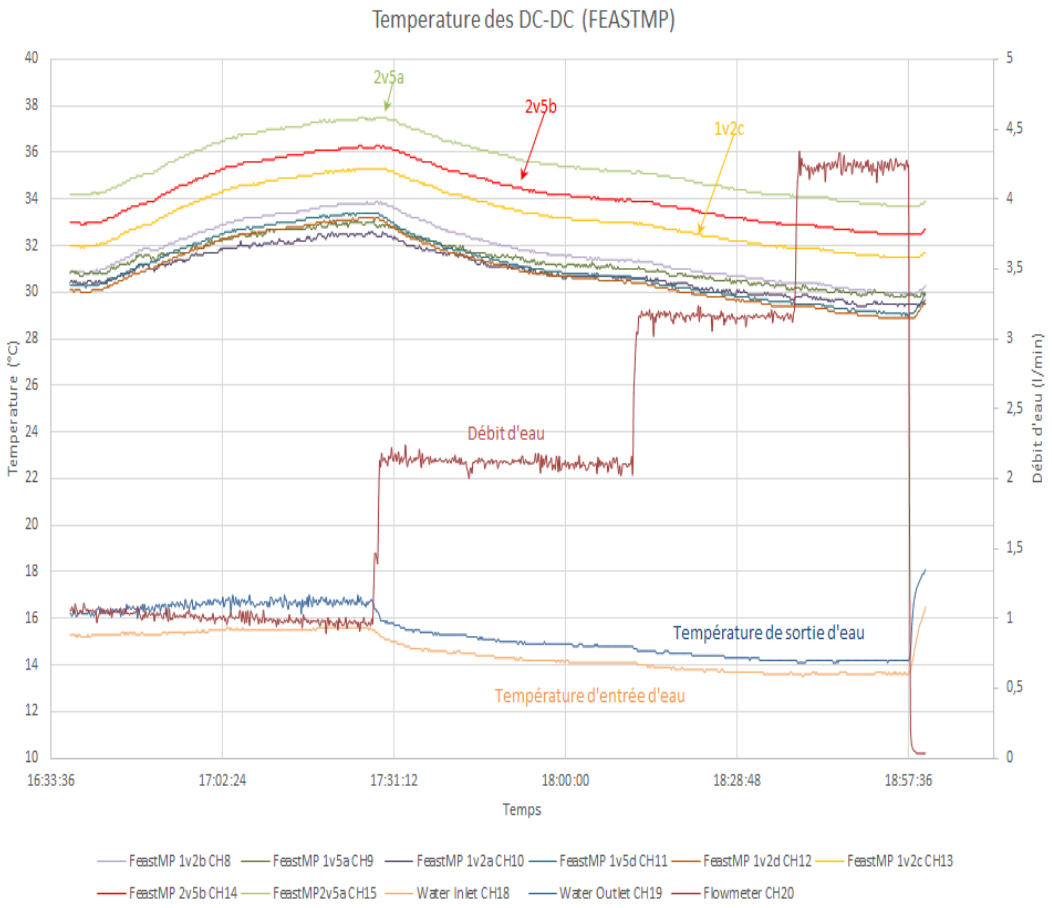


FIGURE 4.3.2 – Courbes des résultats obtenus lors des tests de refroidissement à Nikhef.

T. ambiante (°C)	Débit d'eau (l/min)	T. entrée d'eau (°C)	$\triangle T$ entrée et sortie d'eau (°C)	T. max des composants (°C)	$\triangle T$ entre le point le plus chaud et l'entrée d'eau (°C)
23	1	15,5	1,1	37,5	22
23	2	14,1	0,7	35,2	21
23	3	13,6	0,6	34,1	20,5
23	4	13,6	0,55	33,7	20

TABLE 4.1 – Résultats obtenus par les tests expérimentaux du système de refroidissement de la FE-Box effectués à Nikhef avec les vraies cartes FE.

Tests au LPC avec les cartes d'essais version n°1

a) Conditions du test

Une deuxième série de tests est effectuée au LPC, les cartes utilisées sont des cartes d'essais fabriquées au laboratoire même (figure 4.3.3). Le but est de reproduire les tests effectués à Nikhef pour vérifier leur validité afin de pouvoir ensuite tester les évolutions du système de refroidissement.

Le refroidissement sera d'abord fait avec une eau circulant entre $13,5°C$ et 15°C, pour reproduire les mêmes conditions de tests faits à Nikhef, puis avec une eau à 19°C et à 22°C pour se placer dans les conditions expérimentales de l'expérience LHCb.

Le système de refroidissement utilisé reste le même que celui utilisé à Nikhef, qui correspond à la première solution des blocs d'aluminium avec un seul tuyau d'eau qui les relie en acier inoxydable, sans oublier le dissipateur qui se trouve au sein de la FE-Box.

b) Résultats expérimentaux

Les tests ont été effectués pour plusieurs débits. On note que la pièce de travail était plutôt fraiche, car on est passé de $17,5$°C à 19°C. Cette ambiance peut augmenter la convection naturelle du radiateur vers l'ambiant au détriment du refroidissement par eau.

De la même façon la température de l'eau circulant à circuit ouvert, était plutôt fraiche avec une température comprise entre 13 et 14°C. On est passé a une température plus élevée, vers les 21°C, au cours des tests.

La puissance totale apportée est de 90 W. Les résultats sont regroupé dans le tableau 4.2 :

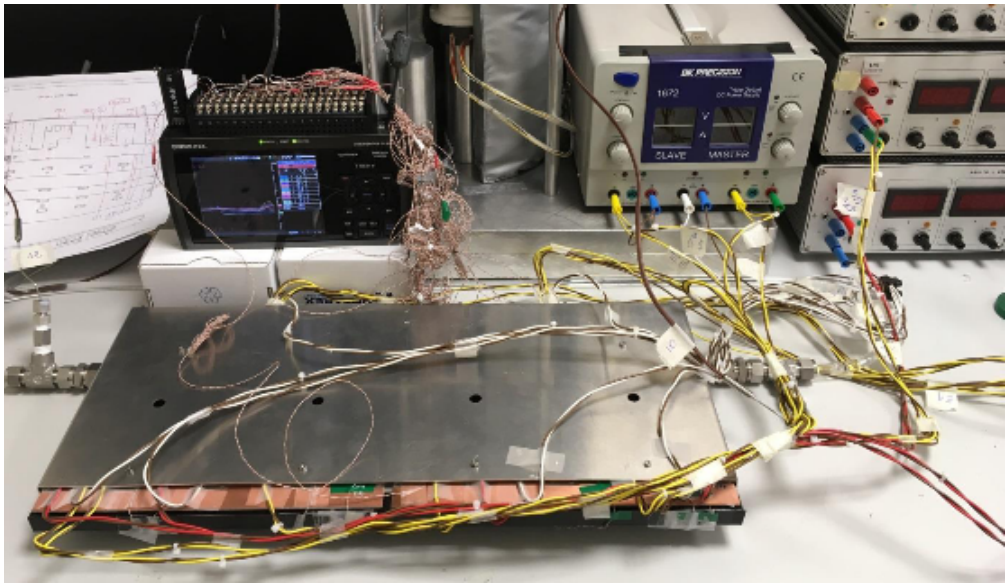


FIGURE 4.3.3 – Le banc de tests pour le refroidissement de la FE-Box utilisé au LPC avec les cartes d'essais version n°1.

T. ambiante (°C)	Débit d'eau (l/min)	T. entrée d'eau (°C)	$\triangle T$ entrée et sortie d'eau (°C)	T. max des composants (°C)	$\triangle T$ entre le point le plus chaud et l'entrée d'eau (°C)
22,5	0,58	21,5	1,2	46,6	25,1
24	0,65	21	1,2	45,2	24,2
24	1,1	20,5	0,6	44,9	24,4
22	1,15	20,8	0,6	45	24,2
18	2	13	0,1	37,3	24,3
18	4	12,9	0,1	34,6	21,7

TABLE 4.2 – Résultats obtenus par les tests expérimentaux du système de refroidissement de la FE-Box effectués au LPC avec les cartes d'essais version n°1.

Comparaison des deux tests (Nikhef et LPC)

D'après les deux tests effectués sur la première version des cartes FE, on remarque :

— La température maximale dans les deux cas est comprise entre 34 et 37°C, pour une température d'entrée d'eau fraiche d'environ 14°C. Ces résultats

montrent l'influence de la température ambiante et de l'eau.
— Les cartes d'essais reproduisent correctement les résultats obtenus avec les prototypes des cartes FE.
— Une ambiance fraiche associée à une eau plutôt froide a favorisé l'échange thermique. Les conditions réelles de l'expérience, avec une température ambiante d'environ 20°C et une température d'eau entre 19 et 25°C sont mieux prises en compte dans le cas des tests avec une température d'entrée d'eau de 20°C (tests effectués au LPC). Dans ce cas, on a une meilleure proportion (50%) de la puissance qui peut être évacuée par l'eau, le reste étant évacué par convection.
— La température entre le point le plus chaud des cartes et celui de l'entrée d'eau reste linéaire en fonction de la température de l'eau, avec une valeur comprise entre 21 et 25°C, un gradient de température important qui nous montre les pertes thermiques que possède le système de refroidissement, et qu'on devra améliorer.
— Le système de refroidissement reste efficace globalement, et répond aux exigences demandé, dont la température maximale des cartes FE tolérée inférieure à 50°C.

4.3.2 Deuxième version de la carte FE (tests au LPC)

Des tests de refroidissement ont été réalisés dans notre laboratoire dans le but de vérifier les résultats obtenus lors des simulations thermiques sur les différents logiciels et de prendre en compte l'évolution du design des cartes.

Dans un premier temps, ces tests ont été réalisés avec les cartes d'électronique d'essais qui représentent la même puissance de dissipation que les cartes définitives (version n°2), ces dernières étant indisponibles.

Les tests sont effectués avec trois différents matériaux pour le système de refroidissement (blocs froids), les caractéristiques physiques de ces matériaux sont dans le tableau 4.3 pour l'aluminium, le tableau 4.5 pour le cuivre et le tableau 4.7 pour l'inox. Et contrairement aux premiers tests effectués à Nikhef, la régulation de température de l'eau pour ces tests est effectuée par un refroidisseur industriel de type Labo02 de chez Eurodifroid.

a) Conditions du test

La température ambiante est mesurée dans la salle à environ 22°C, les tests sont effectués pour une plage de débit d'eau de 1 à 4 l/min avec une température d'eau qui varie de 19 à 24°C, pour se placer dans les conditions suivant la variation du débit, car plus le débit d'eau est faible plus la température d'eau augmente et donc

on obtient un refroidissement moins efficace. Le positionnement de la FE-Box est testé verticalement pour se mettre dans les vraies conditions du montage sur le détecteur LHCb comme on peut le voir dans la figure 4.3.4.

Le positionnement des sondes thermiques est effectué sur les composants qui montent le plus en température, les DC-DC, ainsi que sur d'autres composants. On a aussi des sondes positionnées à l'extérieur de la FE-Box, notamment sur le dissipateur et les blocs froids.

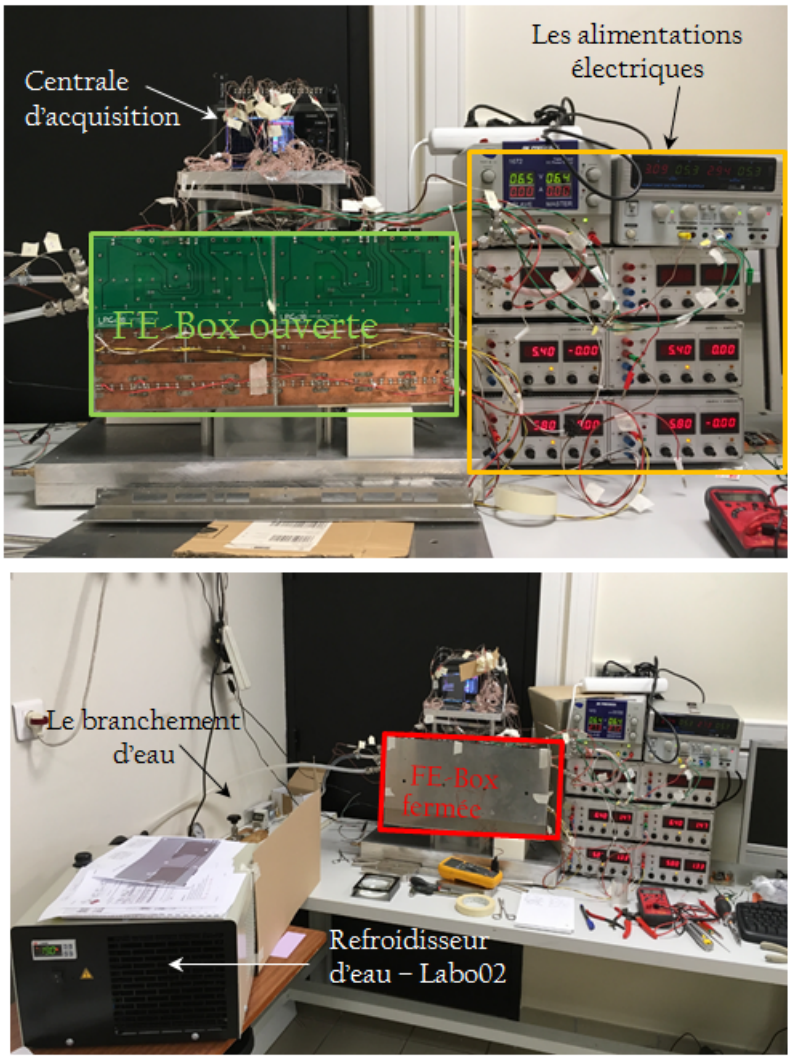


FIGURE 4.3.4 – Le banc de tests pour le refroidissement de la FE-Box utilisé au LPC avec les cartes d'essais.

b) Les résultats expérimentaux

b -1) Tests du système de refroidissement en aluminium

Les propriétés physiques de l'aluminium utilisé pour la fabrication du système de refroidissement sont regroupées dans le tableau 4.3, le choix s'est fait en fonction de la conductivité thermique, du coût ainsi que de l'usinabilité.

Propriétés physiques	Aluminium 6082.T6 pour les blocs	Aluminium 6060.T5 pour les tubes
Coefficient dilatations linéique [10^{-6}/K]	23,5	23,4
Masse volumique [g/cm^3]	2,7	2,7
Capacité thermique massique [J/kg.K]	894	945
Conductivité thermique [W/m.K]	172	209
Module de rigidité [MPa]	264 00	26 100
Module d'élasticité [MPa]	70 000	69 500
Coefficient de poisson	0,33	0,33

Table 4.3 – Principales caractéristiques physiques de l'alliage utilisé dans le 1er test de refroidissement pour la version n°2 des cartes d'essais FE.

Pour une puissance maximale dissipée par les cartes d'essais de 106 W, on a les résultats regroupés dans le tableau 4.4 suivant :

Débit d'eau (l/min)	T. entrée d'eau (°C)	T.sortie d'eau (°C)	$\triangle T$ eau (°C)	$\triangle T$ entre l'eau et les blocs (°C)	T. max des composants (°C)
1,5	20,5	21,5	1	3,1	41,5
2,5	19,9	20,4	0,5	2,5	40,4
4	19,2	19,7	0,5	2,3	39,7

Table 4.4 – Résultats des mesures effectuées avec les blocs froids en aluminium.

Observations

D'après les résultats répertoriés dans le tableau 4.4, on peut voir que :

— La température maximale des composants électroniques est de $41,5$°C pour un débit de $1,5$ l/min.
— L'augmentation du débit agit directement sur la température maximum car on possède un meilleur échange thermique qui est relié au régime de l'eau (régime turbulent).
— Pour un débit plus élevé de $2,5$ l/min, on obtient une température maximale d'environ 40°C ce qui est plutôt satisfaisant et qui reste dans l'intervalle de température tolérée pour le refroidissement des cartes.
— Plus le débit d'eau est important plus l'échange thermique est meilleur.

b - 2) Tests du système de refroidissement en cuivre

Dans cette section, les tests ont été réalisés avec les blocs en cuivre montés avec une graisse thermique qui se trouve entre les deux surfaces de contact (blocs et dissipateur). Les propriétés physiques du cuivre utilisé sont représentées dans le tableau 4.5 :

Propriétés physiques	Cu -C1
Coefficient dilatations linéique [10^{-6}/K]	17
Masse volumique à 20°C [g/cm^3]	8,94
Conductivité thermique à 20°C [W/m.K]	389
Module de rigidité [MPa]	47 000
Module d'élasticité [MPa]	125 000
Limite d'élasticité à 0.2 % [MPa]	320
Coefficient de poisson	0,33

TABLE 4.5 – Principales caractéristiques physiques de l'alliage utilisé dans le 2ème test de refroidissement pour la version n°2 des cartes d'essais FE.

Pour une puissance maximale dissipée par les cartes d'essais de 106 W, on a les résultats regroupés dans le tableau 4.6 suivant :

Débit d'eau (l/min)	T. entrée d'eau (°C)	T.sortie d'eau (°C)	$\triangle T$ eau (°C)	$\triangle T$ entre l'eau et les blocs (°C)	T. max des composants (°C)
1,5	21,1	21,8	0,7	3,1	39,7
2,5	19,5	20,1	0,6	1,6	38,7
4	19,5	19,8	0,35	0,8	37,5

TABLE 4.6 – Résultats des mesures effectuées avec les blocs froids en cuivre.

Observations

D'après les résultats répertoriés dans le tableau 4.6, on peut voir que :

— La température maximale des composants électroniques est d'environ 40°C avec un faible débit d'eau.
— La température d'entrée d'eau a un impact direct sur la température globale des cartes, l'écart de température est de 4°C.
— L'ajout de la graisse thermique entre les blocs et le refroidisseur diminue la température maximum de plusieurs degrés.
— L'augmentation du débit agit directement sur la température maximum.
— L'erreur de mesure sur la température de l'eau est importante à haut débit (car on mesure un faible écart). On peut considérer que sur 110 W dissipés, 10 W s'en vont par convection naturelle et 100 W sont évacués par l'eau.
— La température du refroidisseur est relativement homogène (du haut au bas) avec des écarts de 1 à 1,6°C (selon le débit).

b - 3) Tests du système de refroidissement en inox

Pour ces tests, nous sommes passés aux mesures avec les blocs en inox. Les propriétés physiques de l'inox sont représentés dans le tableau 4.7 :

Propriétés physiques	Inox 304 pour les blocs	Inox 316L pour les tubes
Coefficient dilatations linéique [10^{-6}/K]	16	15,9
Masse volumique à 20°C [g/cm^3]	7,8	7,9
Conductivité thermique à 20°C [W/m.K]	15	16,3
Module d'élasticité [MPa]	190 000	200 000
Limite d'élasticité à 20°C [MPa]	241	190
Coefficient de poisson	0,3	0,3

TABLE 4.7 – Principales caractéristiques physiques de l'alliage utilisé dans le 3ème test de refroidissement pour la version n°2 des cartes d'essais FE.

Toujours avec une puissance maximale dissipée par les cartes d'essais de 106 W, on obtient les résultats qui sont regroupés dans le tableau 4.8 suivant :

Débit d'eau (l/min)	T. entrée d'eau (°C)	T.sortie d'eau (°C)	$\triangle T$ eau (°C)	$\triangle T$ entre l'eau et les blocs (°C)	T. max des composants (°C)
1,5	20	20,7	0,7	2	47
2,5	19,8	20,2	0,4	1,4	46
4	19,7	19,9	0,2	1	45,8

TABLE 4.8 – Résultats des mesures effectuées avec les blocs froids en inox.

Observations

D'après les résultats répertoriés dans le tableau 4.8, on peut voir que :
— La température maximum des composants électroniques est d'environ 47°C.
— Le refroidissement est meilleur si le débit d'eau est plus élevé.
— La puissance évacuée par l'eau est calculée à 68 W pour un débit de $1,5$ l/min, et en augmentant ce dernier la dissipation par eau augmente également. Cela est lié au régime de l'eau, plus le régime est turbulent, plus l'évacuation de la puissance par eau est meilleure.

Conclusion des différents tests

Le système de refroidissement avec les blocs en cuivre est bien plus performant et permet une diminution de la température maximale sur la carte de plus de 7°C par rapport à celui avec des blocs en inox. Cette différence est évidente vu la conductivité thermique du cuivre qui est de 389 W/m.K, bien supérieure à celle de l'inox, qui est d'environ 15 W/m.K.

On remarque que les résultats obtenus avec les blocs en aluminium sont bien meilleurs que ceux obtenus avec le système en inox et moins bons que ceux obtenus avec le cuivre, grâce à la conductivité thermique de l'aluminium qui est de 172 W/m.K, on a des résultats satisfaisants avec une température maximale d'environ 40°C sur le DC-DC, ce qui répond aux contraintes imposées par le projet (un système de refroidissement qui maintient la température des cartes au-dessous des 50°C).

En vue de l'environnement radioactif qui se trouve dans l'expérience LHCb, et en sachant que le cuivre est un matériau qui s'active en présence de radioactivité, le choix du système de refroidissement des cartes électroniques FE du trajectographe à fibres scintillantes, se tourne donc vers une solution de système de refroidissement en aluminium. Ce matériau qui est plutôt satisfaisant au niveau du transfert et de la conductivité thermique, et qui plus-est un matériau accessible au niveau du

coût et facile à usiner, semble être le parfait candidat pour ce projet Upgrade de LHCb.

4.4 Conclusion

Dans ce chapitre on a pu voir en détail les différentes étapes effectuées pour la réalisation des bancs de tests ainsi que les résultats obtenus.

La réalisation du système de refroidissement passait par le choix du matériau, vu que celui-ci compte parmi les paramètres les plus importants au point de vue de l'échange thermique. Le fait de réaliser différents tests avec plusieurs matériaux qui sont le cuivre, l'aluminium et l'inox, était nécessaire.

Comme on a pu le voir plus haut, les résultats obtenus avec le système en cuivre sont les plus satisfaisants étant donné que le cuivre possède la meilleure conductivité thermique qui est de 389 W/m.K, malheureusement cette solution n'est pas envisageable pour la simple raison de son activation radioactive sur le site de l'expérience LHCb, en effet après des tests et des études sur l'irradiation des matériaux métalliques au CERN, le cuivre pourrait interagir et son activation gênerait les interventions humaines.

Le choix donc reste entre l'inox et l'aluminium, la différence entre les deux matériaux est très importante au niveau du transfert thermique avec 15 et 172 W/m.K respectivement pour l'inox et l'aluminium. Les résultats obtenus avec le système en inox ne sont pas satisfaisants avec une température maximale sur les composants d'environ 60°C, on reste loin de la limite tolérée. Donc la solution la plus efficace et rentable reste le système en aluminium, qui nous donne une température maximale sur les composants électroniques d'environs 40°C.

Le choix est pour le moment fixé sur cette solution, l'installation des systèmes de refroidissement est prévue pour l'année 2018.

Le fait d'avoir un dissipateur thermique qui épouse parfaitement la forme des cartes électroniques est très important, et permet d'avoir une bonne efficacité de refroidissement car on a un meilleur contact entre les composants et la surface d'échange qui est le dissipateur, et grâce aux interfaces thermiques, on l'améliore encore mieux en éliminant les micro-couches d'air qui peuvent s'y trouver.

Le choix d'intégrer un deuxième dissipateur, qui se trouve sur les cartes Master est très ingénieux. Cela va permettre d'une part, un meilleur contact entre les FeastMP (DC-DC) et la surface d'échange du dissipateur principal d'un côté, et entre le FeastMP et le second dissipateur de l'autre. Et d'autre part, cela va faciliter le montage global de ces derniers sur les cartes Master.

La température d'entrée de l'eau est aussi importante d'après les simulations et les tests, on a bien vu que la température maximale de la FE-Box avait un impact

direct en lien avec la température d'entrée de l'eau. La possibilité de diminuer cette dernière est envisageable, vers les 16°C au lieu de 19°C, ce qui ne peut qu'améliorer d'avantage le refroidissement des FE-Box.

Après avoir déterminé le système de refroidissement des cartes FE le plus efficace, il nous reste encore à définir les interfaces thermiques les mieux adaptées et celles qui résisteront le mieux aux radiations émises par l'expérience LHCb. C'est pour cela que la deuxième partie de cette thèse est consacrée à l'étude de la conductivité thermique des interfaces thermiques avant et après irradiation aux différentes particules telles que les rayons X et les neutrons.

Partie II - Étude et conception d'un banc de mesures de conductivité thermique pour les interfaces thermiques

« Vous devez être le changement que vous voulez voir dans ce monde »

(Gandhi)

Chapitre 5

Interfaces thermiques et méthode de caractérisation thermophysique ASTM D5470

5.1 Introduction

Dans le cadre du refroidissement des cartes électroniques du trajectographe, et pour la gestion thermique de ces dispositifs, l'intégration d'interfaces thermiques, telles que des pâtes thermiques par exemple, est requise. Or ces interfaces sont un point délicat du transfert de chaleur car elles peuvent présenter plusieurs dizaines de pour-cent de la résistance thermique globale. Elles nécessitent donc une connaissance approfondie de leur comportement aux sollicitations thermiques, ainsi qu'à leur exposition aux radiations de neutrons et rayons X.

Afin de garantir une utilisation adéquate durable de ces matériaux, plusieurs paramètres sont à vérifier, notamment la dureté, la consistance (pas de production de graisse ou d'huile) et la conductivité thermique.

Des tests en radiation sont donc à prévoir afin de vérifier la tenue de matériaux sur la durée totale prévue pour le détecteur. Des mesures de dureté et de conductivité thermique ainsi que des contrôles visuels seront nécessaires afin de vérifier les différents paramètres à toutes les étapes. La mesure de conductivité thermique est un élément important et compliqué du processus.

Un état de l'art sur les méthodes de caractérisation des propriétés thermophysiques des matériaux (détaillé dans l'Annexe C) va nous permettre de mettre en œuvre les outils expérimentaux et mathématiques permettant de suivre l'éventuelle évolution de matériaux d'interfaces utilisés lorsqu'ils sont soumis aux radiations. Pour cela, une méthode va être présentée qui repose sur la mesure de la conducti-

vité thermique des interfaces en régime stationnaire avec un transfert de chaleur monodimensionnel.

Des travaux de simulations numériques seront menés sur ce type de banc expérimental, pour pouvoir évaluer les pertes thermiques latérales du banc statique.

Dans ce chapitre, on exposera l'étude des matériaux d'interfaces thermiques avec la méthode requise pour extraire la conductivité ou la résistance thermique du matériau d'interface issue d'une méthode approuvée, basée sur la norme ASTM (Active Standard Method) D5470[25]. Un banc de mesures constitue en soi le moyen de suivre leur éventuelle évolution face aux irradiations et le suivi des caractéristiques thermiques. On exposera les résultats expérimentaux de caractérisation obtenus sur plusieurs modèles d'interfaces thermiques.

5.2 Les interfaces thermiques et leurs compositions

Entre deux surfaces, de multiples poches d'air se forment dans la zone d'union à cause d'imperfections surfaciques pouvant provenir de marques d'usinage, de défauts de planéité etc. Ces poches d'air forment une résistance thermique qui empêche le bon transfert de chaleur entre les deux surfaces. L'objectif est donc de supprimer ces poches d'air et garantir un bon contact thermique. C'est pourquoi, des interfaces thermiques « IT » liquides ou solides sont nécessaires.

La plupart de ces « IT » est composée d'une matrice polymère telle qu'une résine en silicone ou époxy, ainsi que de renforts thermiquement conducteurs comme le nitrure de bore, l'aluminium, l'oxyde de zinc, l'alumine ou l'argent [26, 27].

L'utilisation des matrices polymères dans des produits de base permet, d'une part, la possibilité de les moduler à volonté par mixage avec d'autres matériaux, vu leur faible rigidité et résistance mécanique, contrairement à d'autres matériaux tels que les métaux et céramiques. D'autre part, elle permet également la simplicité et le faible coût de production étant donné que leur obtention ne nécessite pas de traitement à haute pression, ni à haute température.

La conception de l'interface thermique dépend du choix de la matrice polymère qui, à son tour, dépend de certaines caractéristiques telles que la compatibilité avec les particules de chargement, la capacité de mouillage, la viscosité ou encore ses propriétés mécaniques. La quantité maximale de particules qu'il est possible d'introduire dans un volume donné de matrice polymère résulte d'une combinaison entre la mouillabilité thermodynamique de la particule par le produit de base et la viscosité de polymère. Le rôle joué par la matrice est le plus important car c'est elle qui permet d'adapter les propriétés mécaniques du composite suivant l'utilisation à laquelle est destinée l'interface thermique. C'est de cette façon qu'on a recours aux résines époxy si les critères ciblés sont le module d'élasticité élevé

et l'adhérence, et aux résines à base de silicone si un faible module d'élasticité et une bonne absorption des contraintes thermomécaniques sont préférés dans une application [28].

La conductivité thermique du produit de base est initialement faible, c'est pourquoi l'usage de particules de chargements thermiques conductrices est souvent utilisé pour augmenter leurs propriétés thermiques. Les particules fabriquées à partir de poudres céramiques, comme l'alumine et l'oxyde de magnésium, sont communément utilisées en raison de leur faible coût de production et de leurs propriétés diélectriques isolantes. Pour obtenir une meilleure conduction thermique, la matrice polymère est de préférence chargée avec des particules issues du nitrure d'aluminium ou du nitrure de bore, ce qui nous donne une amélioration d'un facteur de cinq à dix de la conductivité thermique mais avec un coût de fabrication très élevé de dix à cent fois, dû aux techniques de réalisation pointues.

Dans le but d'avoir une conductivité thermique optimale avec un coût moins important que celle cité avant, on aura plutôt recours à des particules métalliques d'aluminium ou d'argent. L'argent est plutôt coûteux, il sera choisi principalement pour sa haute conductivité thermique volumique et sa densité. Il faut savoir que ce dernier ainsi que l'aluminium, le cuivre et le fer, s'oxydent très facilement, ce qui conduit à une réduction de leur conductivité effective. Ce n'est pas le cas pour les particules d'acier inoxydable ou du nickel, qui possèdent une très bonne résistance aux oxydations mais avec un coût beaucoup plus élevé [29].

Les particules isolantes métallisées représentent une alternative aux particules purement métalliques, le matériau isolant sert de support au revêtement métallique, ce qui va permettre d'apporter un gain de poids considérable à la particule. L'emploi de fibre de verre pour la fabrication des particules isolantes, est souvent utilisé, cela dans le but d'offrir un renforcement mécanique à la structure de l'interface.

Il existe aussi des particules à base de carbone, celle-ci sont produites par la décomposition à la chaleur de matériaux carbonés. Les particules de chargement possèdent un diamètre compris entre 2 et 25 μm, offrant ainsi la possibilité de moduler la valeur de la conductivité thermique de l'interface [30].

On trouve généralement la conductivité thermique de ces « IT » comprise entre $0,5$ W/m.K et une dizaine voir plus de W/m.K, et donc toujours supérieur à celle de l'air qui elle est égale à $0,026$ W/m.K. Par contre, une pression appliquée sur ces interfaces thermiques (fixation sur les modules électroniques par exemple) peut diminuer la résistance thermique [31, 29, 32].

Les fabricants de matériaux pour interface thermique offrent une large gamme de produits pour répondre aux exigences de nombreuses applications de gestion thermique différentes. Ces matériaux peuvent varier de manière importante en terme

de performance (c'est-à-dire les propriétés thermiques, électriques et physiques), d'apparence générale et de modes d'application.

Parmi les classes de matériaux pour interface thermique les plus couramment utilisés, on trouve : graisses thermiques, composés de traitement thermiquement conducteurs, plaques élastomériques de remplissage thermiquement conductrices, bandes adhésives thermiquement conductrices et matériaux à changement de phase. Ces éléments sont décrits brièvement ci-dessous.

Graisses thermiques

Composée de charges de céramique thermiquement conductrices dans des huiles de silicone ou d'hydrocarbures, une graisse thermique est une pâte qui est appliquée sur l'une des deux surfaces de contact. Lorsque les surfaces sont pressées l'une contre l'autre, la graisse s'étale pour remplir le vide. Pendant la compression, l'excès de graisse s'échappe des surfaces mises en contact. Une certaine forme d'attache ou d'autre matériel de fixation est nécessaire pour fixer solidement le joint. Bien qu'elle soit relativement bon marché et efficace thermiquement, la graisse thermique n'est pas un bon isolant électrique. Un autre inconvénient est qu'elle peut ne pas être très pratique à disposer et à appliquer et qu'elle nécessite un nettoyage afin d'éviter les problèmes de contamination.

(a) Sous forme de pot.

(b) Sous forme de seringue.

FIGURE 5.2.1 – Graisse thermique de chez RS.

Composés de traitement thermiquement conducteurs

Un composé thermiquement conducteur renferme également des charges de céramique thermiquement conductrices. Toutefois, à la différence des graisses thermiques, le liant est un matériau en caoutchouc. Lorsqu'il est tout d'abord appliqué, le composé ayant la consistance d'une pâte s'écoule dans les interstices entre les surfaces de contact. Ensuite, lorsqu'il est soumis à la chaleur, il se polymérise en un film sec de caoutchouc. Outre ses propriétés thermiques, ce film sert également d'adhésif, ce qui permet un joint serré, exempt de vides, sans nécessiter de pièces de fixation supplémentaires. Les composés thermiquement conducteurs peuvent

remplir de manière efficace des espaces plus importants dans les situations où les graisses thermiques risqueraient de suinter du joint. Bien que leur application et leurs performances soient semblables à celle de la graisse thermique, le nettoyage est plus simple, impliquant simplement l'élimination de l'excès de film de caoutchouc polymérisé [32].

Plaques élastomériques de remplissage thermiquement conductrices

Une plaque élastomérique thermiquement conductrice se compose d'un élastomère en silicone chargé de particules de céramique thermiquement conductrices et peut comporter un renforcement en fibres de verre tissées avec un film diélectrique. Ayant généralement une épaisseur comprise entre $0,1$ et 5 mm et une dureté Shore A allant de 5 à 85, ces plaquettes fournissent à la fois une isolation électrique et une conductivité thermique, ce qui les rend utiles dans les applications nécessitant une isolation électrique. Des plaques plus épaisses s'avèrent utiles lorsqu'il est nécessaire de remplir des espaces importants. Pendant l'application, les plaques sont comprimées entre les surfaces de contact afin qu'elles puissent se conformer aux irrégularités des surfaces. La pression de montage doit être réglée en fonction de la dureté de l'élastomère pour s'assurer que les vides sont remplis. Un dispositif de fixation mécanique est absolument nécessaire pour maintenir le joint une fois qu'il est assemblé [32].

FIGURE 5.2.2 – Plaques élastomériques ou « PAD » - Image du fabricant Stacem.

Bandes adhésives thermiquement conductrices

Une bande adhésive thermiquement conductrice est un film adhésif double face sensible à la pression chargée d'une poudre de céramique thermiquement conductrice. Pour faciliter la manipulation, une feuille d'aluminium ou un film de polyamide peut supporter la bande ; ce dernier matériau fournit également une isolation électrique. Lorsqu'elle est appliquée entre les surfaces de contact, la bande doit être soumise à une pression afin de se conformer aux surfaces. Une fois que le joint est réalisé, la partie adhésive le maintient de manière permanente, ce qui élimine le besoin de recourir à des pièces de fixation supplémentaires. Aucun durcissement de la

liaison n'est nécessaire. L'une des limites des bandes thermiquement conductrices est qu'elles ne peuvent pas remplir de gros espaces entre les surfaces de contact aussi bien que les liquides : c'est pourquoi, l'utilisateur doit adopter un compromis entre le côté pratique du montage de la bande et un petit sacrifice au niveau des performances thermiques [32].

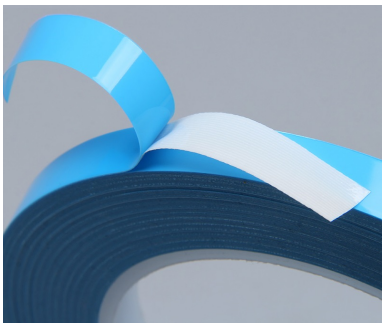


FIGURE 5.2.3 – Bandes adhésives thermiquement conductrices.

Matériaux à changement de phase

Solides à température ambiante, les matériaux à changement de phase sont fondus (c'est-à-dire qu'ils subissent un changement de phase) au fur et à mesure que la température s'élève dans une plage de 40°C à 70°C. Cela rend le matériau ($0,13$ mm d'épaisseur sous sa forme de film sec) aussi facile à manipuler qu'une plaque, tout en garantissant que, lorsqu'il sera soumis à la chaleur au cours du processus d'assemblage, il s'écoulera dans les vides entre les surfaces de contact de manière aussi efficace qu'avec une graisse thermique. D'habitude, la mise sous tension des composants électroniques apporte la chaleur nécessaire pour que le changement de phase se produise, ce qui établit un joint thermique stable. Ces matériaux se composent de liants organiques (c'est-à-dire un polymère et un composant cristallin à faible point de fusion, tel qu'une cire), des charges de céramique thermiquement conductrices et, si nécessaire, un substrat de support tel qu'une feuille d'aluminium ou un filet en fibres de verre tissées [33].

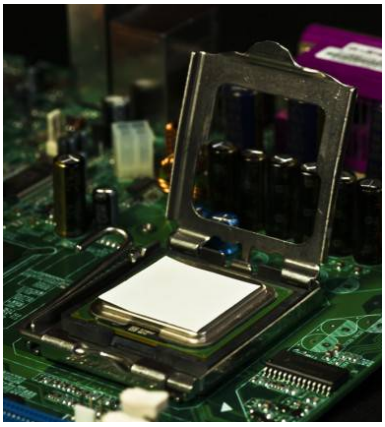


FIGURE 5.2.4 – Matériau à changement de phase - Image du fabricant Stacem.

Comme évoqué plus haut, le but de cette étude est de faire en sorte que l'interface thermique « PAD » choisie résiste à l'environnement dans lequel il va être exposé, c'est-à-dire au sein de l'expérience LHCb dans un environnement radioactif. Les « PADs » devront résister à l'irradiation aux neutrons, et donc ne pas perdre leur première fonction, celle du transfert de chaleur. Dans d'autres expériences du CERN, des problèmes de résistance du matériau d'interface thermique se sont présentés sous la forme d'une dégradation physique du matériau en créant une huile visqueuse qui s'est étalée sur l'électronique. Cette huile n'étant pas conductrice électriquement, l'électronique n'a pas eu de problème. Par contre, le rôle de l'interface thermique n'était plus aussi efficace et le contact entre les surfaces n'était plus assuré. Ce problème s'est produit en présence d'échauffement des composants électroniques et d'irradiation aux différentes particules exposées dans ces expériences.

5.3 Les interfaces thermiques utilisées

Dans le tableau 5.1, on trouve les différentes interfaces thermiques utilisées dans cette étude (figure 5.3.1). Comme évoqué plus haut, le choix se porte sur les interfaces élastomériques conductrices thermiquement, ou autrement appelées les PADs thermiques et cela pour leur caractérisation spécifique qui représente l'élasticité du matériau, qui permet de reprendre sa forme initiale après écrasement.

La conductivité thermique de ces dernières varie entre $1,5$ et 5 W/m.K. Parmi ces interfaces, on en trouve une qui possède une autre caractéristique dite « Putty » qui n'est pas élastique contrairement aux autres, et qui est déformable. La conductivité thermique de ce PAD, nommé « PUTTY T013P » possède une valeur donnée par le fabricant de 13 W/m.K. Plus de détails dans les chapitres qui suivent.

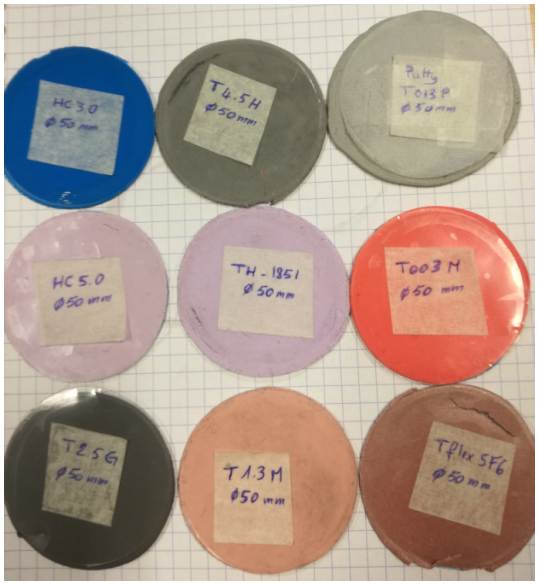


FIGURE 5.3.1 – PADs Thermiques utilisés dans cette étude.

Parmi les différentes méthodes d'estimations des propriétés thermophysiques des matériaux, qu'on peut trouver dans l'Annexe C, il apparaît que l'une des méthodes les plus adaptées pour mesurer cette conductivité thermique est celle de la barre en régime permanent qui suit le principe de la plaque chaude graduée (cf. Ref. C.1.2.1), puisqu'elle permet la mise en pression de l'interface. Cette méthode a fait d'ailleurs l'objet d'une normalisation et est plus connue sous le nom générique d'ASTM D5470. C'est cette méthode qui a été choisie et qui sera mise en œuvre.

L'expérience que nous allons présenter est portée sur les méthodes d'estimation des paramètres thermiques permettant de caractériser les matériaux d'interfaces thermiques et d'en suivre l'évolution dans les conditions de notre application (elle est effectuée dans des conditions proches des conditions réelles d'utilisation qui implique l'irradiation aux neutrons). Le but est donc d'évaluer les conséquences et les taux de dégradations au niveau des propriétés mécaniques et physiques des interfaces thermiques avant et après irradiation, dans le but de déterminer la meilleure pâte thermique qui pourra résister au mieux dans notre expérience.

Type de matériau	Élastomère								
Dénomination	Gap Pad HC 3.0	Gap Pad HC 5.0	Pad T1.3M	Pad T2.5G	Pad T003M	Pad T4.5H	Putty T013P	Pad TH-1851	TFLEX SF6
Fabriquant	Bergquist	Bergquist	Compelma	Compelma	Compelma	Compelma	Compelma	Stacem	Laird
Composition	Élastomère souple renforcé par des fibres de verre	Élastomère souple renforcé par des fibres de verre	Silicone polymère, Aluminium hydroxyde 40-50%, Aluminium oxyde 30-40 %, Diiron trioxyde <0.1%, Additive	Silicone polymère 5-10%, Aluminium hydroxyde 25-35%, Aluminium oxyde 55-65 %, Magnétite <1%, Additive <0.1%	Élastomère souple renforcé par des fibres de verre sur des feuilles d'aluminium	Silicone polymère 5-10%, Aluminium oxyde 90-95%, Magnétite <0.5%, Additive	Élastomère souple renforcé par des fibres de verre sur des feuilles d'aluminium	Élastomère souple renforcé par des fibres de verre sur des feuilles d'aluminium	Élastomère souple renforcé par des fibres de verre sur des feuilles d'aluminium

TABLE 5.1 – Interfaces thermiques utilisées pour l'étude de la conductivité thermique.

5.4 Méthode d'essai standard ASTM D5470

5.4.1 Explication générale de la norme ASTM D5470

Cette méthode est idéale pour des mesures de conductivité thermique pour des échantillons d'interfaces thermiques tels que ceux qu'on va utiliser. Le principe est d'avoir un banc de mesures qui, dans l'ensemble, possède deux barres perpendiculaires l'une par rapport à l'autre, de la même longueur, et bien isotherme, séparées par un échantillon d'interface thermique d'une épaisseur uniforme.

L'ensemble est traversé par un flux thermique généré par une source chaude qui est une résistance électrique, qui dissipe une puissance thermique bien définie. Le gradient thermique imposé à l'échantillon par la différence de température, va nous aider à mesurer le flux traversant l'échantillon, qui représente un flux perpendiculaire aux surfaces d'essais et uniforme si on considère cela sans pertes thermiques sur les surfaces latérales.

Une source froide est installée au-dessous de l'ensemble, qui représente un refroidisseur à base d'un circuit d'eau, qui va permettre l'évacuation de la puissance générée par la source chaude et donc garder une certaine stabilité et homogénéité du banc de mesures.

Les mesures requises pour cette méthode sont les suivantes :
- La température la plus chaude de la barre chaude (K),
- La température la plus froide de la barre chaude (K),
- La température la plus chaude de la barre froide (K),
- La température la plus froide de la barre froide (K),
- La surface de l'échantillon testé (m^2),
- L'épaisseur de l'échantillon testé (m).

Les mesures sont ensuite évaluées à l'aide des paramètres suivants :
- TC : La température de contact de la barre chaude (K),
- TF : La température de contact de la barre froide (K),
- Q : Le flux de chaleur moyen (W),
- θ : L'impédance thermique, qui représente la différence de température entre les deux surfaces des barres isothermes, divisée par le flux de chaleur qui les traverse ($K.m^2/W$),
- λ : La conductivité thermique (W/m.K), qui peut aussi être calculée en fonction de l'impédance thermique d'un panel d'un même type d'échantillon possédant plusieurs épaisseurs.

Une résistance thermique existe entre l'échantillon et les surfaces du banc de mesures, elle sera très variable car elle dépendra de la nature de la surface de

l'échantillon et de la pression mécanique appliquée. La pression de serrage appliquée à l'échantillon doit donc être mesurée et enregistrée comme une mesure secondaire requise pour la méthode, sauf dans le cas des échantillons fluidiques où la pression appliquée est insignifiante.

Le calcul de la conductivité thermique nécessite une détermination précise de l'épaisseur de l'échantillon à tester. Différents moyens peuvent être utilisés pour contrôler, surveiller et mesurer l'épaisseur de l'échantillon en fonction du type de matériau grâce à des cales ou des butées mécaniques si la dimension de l'échantillon peut changer au cours du test. Une méthode normalisée existe aussi pour contrôler l'épaisseur de l'échantillon qui est la norme D 374 « Méthode C ».

5.4.2 Éléments nécessaires pour la constitution du banc de mesures

Les caractéristiques générales d'un banc de mesures répondant aux exigences de cette norme sont représentées sur la figure 5.4.1. Ce banc impose les conditions d'essais requises et va nous permettre de réaliser les mesures nécessaires.

Le banc expérimental doit contenir :

— La source de chaleur, peut-être un radiateur électrique, qui peut être fabriqué grâce à l'intégration de cartouches chauffantes noyées dans un bloc métallique hautement conducteur, ou bien un circulateur de fluide à température contrôlée.

— Une isolation thermique de haute qualité est nécessaire dans ce banc, afin de limiter les fuites de chaleur.

— Les barres de chaleur peuvent être construites à partir d'un matériau qui possède une haute conductivité thermique (plus de 50 W/m.K), afin d'obtenir un bon flux de chaleur et pouvoir prendre des mesures précises.

— Une garde thermique peut être ajoutée. Constituée d'un « bouclier » chauffant autour de la source chaude, elle a le rôle d'éliminer les fuites de chaleur dans l'environnement en l'isolant. Elle peut aussi maintenir une température de plus 60°C, dans le but d'annuler les différences de température à travers l'isolant. On peut aussi ne pas utiliser la garde thermique et les isolations qui vont avec. Dans ce cas, le flux de chaleur à travers l'échantillon est calculé comme étant le flux de chaleur moyen à travers les deux barres de mesures.

— Les barres de chaleur peuvent également nous aider à déterminer la température des surfaces de l'échantillon, cela en faisant une extrapolation linéaire des températures des deux barres, barre chaude et barre froide. Les températures de la surface étudiée peuvent également être mesurées grâce à des thermocouples placés à proximité immédiates des surfaces, mais cela risque d'être mécaniquement difficile.

— Pour la conception de la source froide, un bloc en métal refroidi par un fluide circulant à température contrôlée est suffisant. La pression de contact sur l'échantillon peut être contrôlée et maintenue de diverses façons, tels qu'un système à vis, un actionneur linéaire, ou encore un système pneumatique ou hydraulique.

— La gamme de forces souhaitée doit être appliquée au banc de mesures dans une direction perpendiculaire aux surfaces de l'échantillon et qui maintient le parallélisme et l'alignement des surfaces.

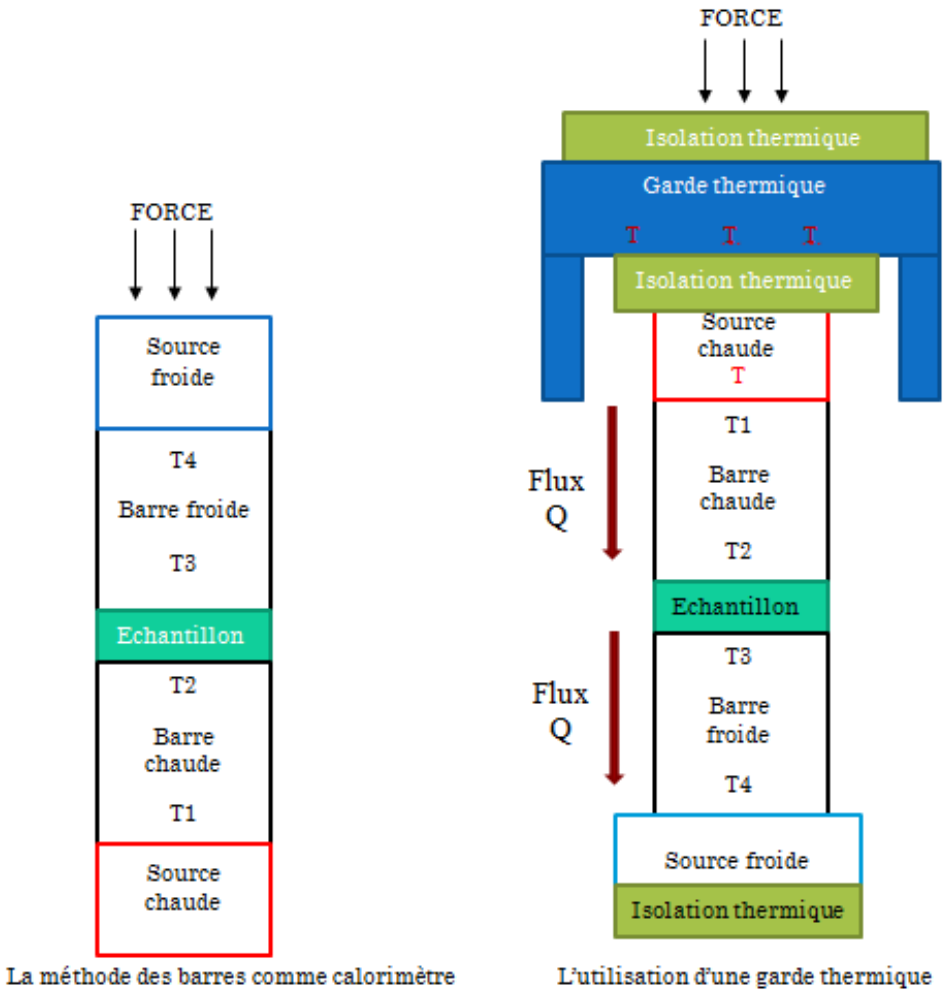


FIGURE 5.4.1 – Représentation graphique de la norme ASTM D5470.

5.4.3 Application de la norme ASTM D5470 à notre étude

Comme évoqué plus haut, la mesure de la conductivité thermique des interfaces thermiques repose sur la norme ASTM D5470, qui se base sur une propagation de chaleur entre deux surfaces parallèles et isothermes entre lesquelles est insérée l'interface thermique étudiée d'épaisseur uniforme. L'une des surfaces est en contact avec une source froide, dans notre cas un refroidisseur dont le rôle est d'évacuer le flux thermique traversant l'interface, et l'autre surface est en contact avec une source chaude de manière à produire un gradient thermique uniforme perpendiculaire aux surfaces, comme présenté sur la figure 5.4.2.

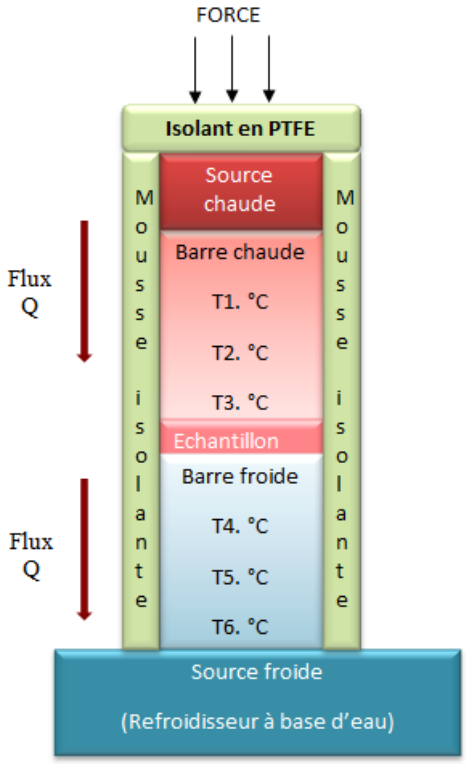


FIGURE 5.4.2 – Application de la norme ASTM D5470 à notre étude.

La mesure de températures réparties dans les cylindres en aluminium va permettre de tracer la distribution discrète le long de la ligne médiane de ces derniers. Dans un cas idéal, on considère le système adiabatique, l'interface thermique est traversée par la totalité du flux de chaleur de manière uniforme. En pratique, les pertes de chaleur doivent être évaluées car elles peuvent avoir un impact sur les distributions de température des cylindres en aluminium. Les expressions sont données par les relations 5.4.1 et la figure 5.4.3 représente cette distribution.[34]

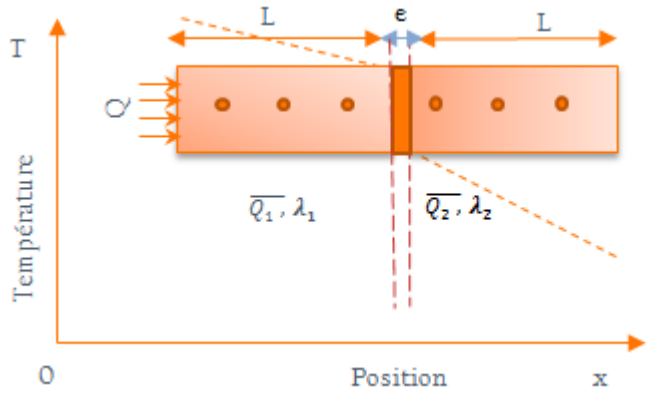


FIGURE 5.4.3 – Méthode de caractérisation des interfaces thermiques.

$$(\frac{\partial \bar{T}}{\partial x})_1 \approx -\frac{\bar{Q}_1}{\lambda_1.S} \; et \; (\frac{\partial \bar{T}}{\partial x})_2 \approx -\frac{\bar{Q}_2}{\lambda_2.S} \tag{5.4.1}$$

Avec :

$\left(\bar{Q}_1\right)$ et $\left(\bar{Q}_2\right)$: Les quantités de chaleur moyennes qui traversent les cylindres en aluminium supérieur et inférieur, en (W),

$\lambda_{1,2}$: Les conductivités thermiques pour chaque cylindre qui sont $\lambda_{Al} \approx \lambda_1 \approx \lambda_2$, en (W/m.K),

S : La section des cylindres en aluminium et des interfaces thermiques, en (m^2).

La quantité de chaleur moyenne est donc calculée grâce à la formule 5.4.2 :

$$\bar{Q} = \frac{\bar{Q}_1 + \bar{Q}_2}{2} \tag{5.4.2}$$

Si on pouvait considérer les pertes thermiques comme nulles sur les surfaces latérales, nous aurions : $Q = \bar{Q} = \bar{Q}_1 = \bar{Q}_2$, où Q est la chaleur transmise par la source chaude vers la source froide.

En sachant que le calcul du flux thermique $\bar{Q}_1$se fait grâce à la formule 5.4.3 suivante :

$$\bar{Q}_1 = \frac{\lambda_{Al} \times S}{d} \times \triangle T_{Cylindre-en-Aluminium} \tag{5.4.3}$$

Avec :

$\bar{Q}_1$: La quantité de chaleur moyenne (flux moyen) qui traverse le cylindre en aluminium supérieur, en (W),

λ_{Al} : La conductivité thermique du matériau du cylindre (aluminium), en (W/m.K).

S : La section du cylindre d'aluminium, en (m^2),

d : La distance qui se trouve entre les deux points de mesures des thermocouples (T_{max} et T_{min}) du cylindre supérieur, en (m).

$\Delta T_{Cylindre-en-Aluminium}$: La différence de température du cylindre supérieur (T_{max} et T_{min} mesurées par les thermocouples), en (K).

On fait la même procédure pour déterminer la quantité de chaleur (flux thermique) qui traverse le cylindre inférieur « $\bar{Q}_2$ ».

L'interface thermique qu'on introduit, va créer une discontinuité dans la distribution du flux de chaleur entre les deux blocs, donc on obtiendra un « $\triangle T$ » qui sera dû à la résistance thermique totale de l'interface. Cette résistance est fonction du contact thermique entre les deux surfaces (supérieur et inférieur du PAD) des cylindres en aluminium.

Afin de parvenir à de bons résultats, il aurait fallu tester une même référence d'interfaces thermiques qui possède différentes épaisseurs. Malheureusement, dans notre cas on possède qu'une seule épaisseur pour chaque interface thermique, ce qui rend impossible l'extraction des valeurs de résistance de contact.

Le moyen utilisé pour évaluer ce paramètre, est la résistance thermique globale. Sachant que pour cette solution, on peut juste utiliser une conductivité thermique effective ou globale de l'interface qui prend en compte les contacts. Ce qui nous mène au calcul de l'impédance de chaque interface donnée par l'équation 5.4.4 :

$$\theta = \frac{S}{Q} \times \triangle T \tag{5.4.4}$$

Avec :
Q : Le flux thermique (W),
S : La section de l'interface (m^2),
$\triangle T$: La différence de température qui se trouve entre la partie chaude et la partie froide du banc de mesures (K).

Cela nous mène au calcul de la conductivité thermique grâce à l'expression 5.4.5 :

$$\lambda = \frac{Q.e}{\triangle T.S} \tag{5.4.5}$$

Avec :
Q : Le flux thermique à travers l'interface (W),
e : L'épaisseur de l'interface thermique (m),
$\triangle T$: La différence de température entre les deux blocs d'aluminium (K),
S : La section de l'interface (m^2).

Pour concrétiser cela, la fabrication d'un banc expérimental est nécessaire pour cette étude.

Pour définir la valeur de l'épaisseur de l'échantillon testé, on a fait un calcul de dilatation thermique sur le banc de mesures comme on peut le voir dans le chapitre suivant, section 6.3.2.

5.5 Conclusion

Dans ce chapitre, on a pu présenter la méthode de caractérisation des propriétés thermophysiques des interfaces thermiques que l'on va utiliser. Cette méthode est l'objet d'une normalisation et est plus connue sous le nom générique d'ASTM D5470.

Elle consiste en général à définir la quantité de chaleur moyenne qui traverse notre échantillon testé (formule 5.4.2), qui à son tour nous aide à définir la valeur de l'impédance thermique, qui se calcule en fonction de la section de l'échantillon ainsi qu'à la différence de température qui se trouve dans la partie supérieure et inférieure du banc de mesures (cylindre supérieur et inférieur) comme on peut le voir d'après la formule 5.4.4.

Une fois ces paramètres définis, on calcule la conductivité thermique grâce à la formule 5.4.5.

Afin de pouvoir poursuivre une telle étude, il est nécessaire de fabriquer un banc de mesures. D'après la méthode ASTM D5470, le banc se compose principalement d'une source chaude, d'une source froide et de deux barres permettant d'assurer le transfert de chaleur, comme dans la méthode de la barre (cf. Annexe. C.1.2.1), le positionnement de l'échantillon à tester est entre ces deux barres. L'isolation du banc est primordiale pour la précision des mesures.

Dans le chapitre suivant, nous allons effectuer une présentation complète de la conception et réalisation de ce banc de mesures ainsi que sa caractérisation, et finir par une application de la norme sur un échantillon de référence.

Rappelons-le, le but de cette caractérisation est de suivre l'évolution et les performances des interfaces thermiques avant et après leur exposition au différentes sources radioactives dans lesquelles elles seront exposées dans l'expérience LHCb.

Chapitre 6

Conception, fabrication et caractérisation du banc de mesures de la conductivité thermique « λ »

6.1 Introduction

Après avoir présenté la méthode de caractérisation la plus appropriée pour les interfaces thermiques sous pression et qui est basée sur la norme ASTM D5470, nous allons passer à la fabrication du banc de mesures qui va nous permettre d'appliquer cette méthode.

Pour commencer, nous allons présenter le banc expérimental et cela en exposant les choix effectués pour chaque élément qui le compose. Une fois les paramètres nécessaires définis, on passe à la conception sur le logiciel mécanique CATIA. Une fois validée, on passe à la fabrication du banc expérimental (paragraphe 6.2).

Les différents outils nécessaires à la prise de mesure et leurs étalonnages sont aussi présentés dans ce chapitre (paragraphe 6.2.4). La caractérisation du banc de mesures et les incertitudes de mesures sur les différents paramètres du banc sont représentés dans le paragraphe 6.2.5.

Des mesures initiales de l'épaisseur ainsi que de la dureté des interfaces thermiques sont faites avant les tests de caractérisation thermique. Cela va nous permettre de faire une évaluation physique après les différents tests d'irradiations.

La méthode de caractérisation de l'épaisseur est expliquée dans le paragraphe 6.3.2.

Pour finir, nous allons présenter les premiers résultats obtenus pour un échantillon de référence, T1.3M, mesuré plusieurs fois, il va nous permettre de vérifier la fiabilité et stabilité du banc de mesures (paragraphe 6.3).

6.2 Conception du banc expérimental

6.2.1 Calcul et conception du banc de mesures

a) Estimation de la surface d'échange nécessaire :

La conception du banc de mesures de la conductivité thermique était au départ basée sur une estimation de dissipation thermique totale de 300 W, car on est partie sur le choix d'utiliser deux cartouches chauffantes, qui vont représenter la source chaude (150 W/ cartouche chauffante). Le choix s'est basé en fonction des dimensions de ces dernières ainsi que de leur puissance dissipée, car un flux important de chaleur permet d'avoir des mesures plus correctes qu'un faible flux.

D'après ces paramètres de départ, on a commencé par estimer la surface d'échange qu'il fallait pour évacuer cette puissance. Grâce à la formule de convection thermique 3.4.2, avec un coefficient de convection fixé à $h = 800$, et un $\triangle T = 2°C$, on obtient une surface d'échange estimée de $S = 0,1875$ m². Ceci nous donne une estimation du circuit d'eau au sein du refroidisseur, qui possèdera donc une longueur d'environ 2 m.

b) Estimation du débit d'eau :

D'après les formules de transfert thermique 3.4.1, on obtient un débit volumique estimé à $3,58 \times 10^{-4}$m^3/s, donc ce qui nous donne une valeur de $2,15$ l/min.

c) Calcul de la vitesse d'écoulement dans le circuit d'eau :

On utilise la formule 6.2.1 :

$$V = \frac{Qv}{s} \tag{6.2.1}$$

Avec :
V : La vitesse d'écoulement (m/s).
Qv : Débit volumique (m^3/s).
s : La section (m²).
On calcule la section du canal d'eau grâce à un diamètre fixé à 30 mm (cette valeur est choisie de manière à obtenir la surface d'échange estimée précédemment).
Donc on a : $s = \pi \times R^2 = 3,14 \times (15)^2 = 706,5\,mm^2 = 7,06 \times 10^{-4}$ m².
On obtient une vitesse d'écoulement de $0,50$ m/s.

d) Calcul du nombre de Reynolds :

Avec la formule de Reynolds 3.4.3, et avec un diamètre « D » pour une section circulaire de $0,03$ m. On a une valeur estimée à 2400.

La nature du régime d'eau est intermédiaire, avec : $2000 < Re = 2400 < 3000$.

6.2.2 Structure du banc de mesures

Après avoir estimé les paramètres nécessaires pour la réalisation du banc expérimental, on passe au dimensionnement et à la conception des pièces qui le constituent.

Le banc de mesures est composé de deux cylindres en aluminium entre lesquels est insérée l'interface thermique étudiée, d'une source chaude en cuivre qui se trouve sur la partie supérieure du montage et d'une source froide dans la partie inférieure. Le positionnement des différents éléments suit la norme ASTM D 5470.

Les deux cylindres en aluminium possèdent une longueur de 150 mm et un diamètre de 50 mm. Ils sont réalisés dans le même barreau de matière, qui est de l'aluminium de nuance 2017A Duralumin.

Ce matériau a été choisi pour ses bonnes propriétés physiques données dans le tableau 6.1, ainsi que pour son coût.

Masse volumique [g.cm^{-3}]	2.79
Coefficient de dilatation thermique linéaire [10^{-6}.K^{-1}]	23.6
Capacité thermique massique [J.kg^{-1}.K^{-1}]	920
Conductivité thermique [W/m.K]	134
Limite à la rupture (min/max) [MPa]	390/425
Limite d'élasticité à [MPa]	260
Allongement à la rupture [%]	13 à 15
Module d'élasticité [k.N.mm^{-2}]	69

Table 6.1 – Caractéristiques physiques de l'Aluminium 2017A.

La figure 6.2.1 montre le banc expérimental conçu.

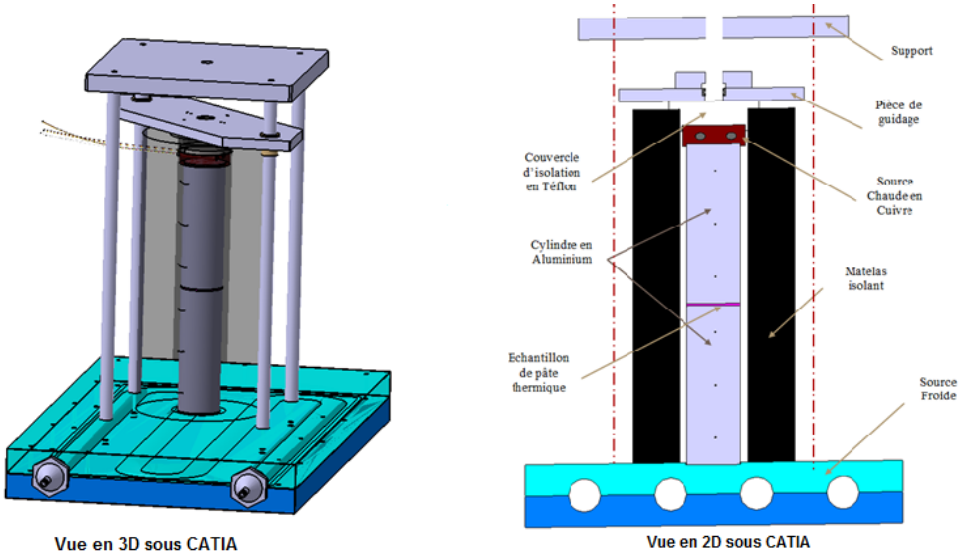


FIGURE 6.2.1 – Banc de mesures de la conductivité thermique.

La solution la plus adaptée pour évacuer le flux thermique au niveau du refroidisseur est un système à convection forcée hydraulique utilisant l'eau comme fluide caloporteur, les propriétés thermiques de l'eau étant bien meilleures que celles de l'air. Avec cette solution on pourra augmenter le coefficient d'échange « h » et donc la puissance évacuée.

Le refroidisseur est conçu grâce à deux plaques de 30 mm d'épaisseur et de section de 650 mm par 350 mm, où est logée sur les deux parties une canalisation d'eau sous forme de serpentin en « M » de 200 mm de longueur et de diamètre $30,4$ mm (figure 6.2.2). Ces dimensions ont été choisies à la base afin de loger un tuyau en PVC à l'intérieur du refroidisseur mais après réflexion on s'est aperçu que le contact entre ces deux derniers serait très mauvais, donc la solution finale est de faire circuler directement de l'eau dans le serpentin. Cette solution demande une bonne étanchéité afin d'éviter des fuites d'eau, le choix s'est vite fait pour l'utilisation d'une pâte à joint du type Bardahl 4875 en silicone noir. L'application était un peu délicate mais l'efficacité était au rendez-vous mis à part une micro-fuite qui n'a pas duré longtemps, le montage n'as pas eu de fuite au cours des tests.

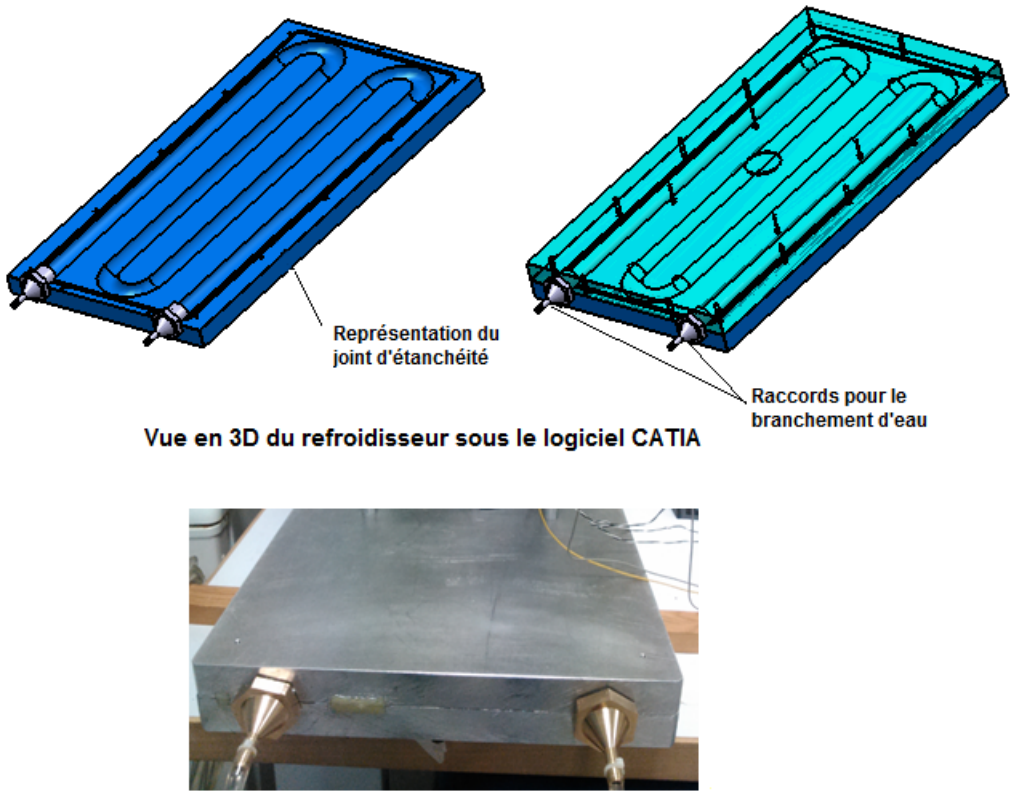


FIGURE 6.2.2 – La source froide « Refroidisseur ».

6.2.3 Le flux de chaleur

Dans cette expérience, l'objectif est de pouvoir faire des mesures de la conductivité thermique, afin d'y parvenir un flux de chaleur homogène est nécessaire. La source chaude est composée d'un cylindre de 60 mm de diamètre et d'une épaisseur de 20 mm, comme on peut le voir sur la figure 6.2.3, où viennent se loger deux cartouches chauffantes de $6,5$ mm de diamètre et d'une longueur de 47 mm. Le matériau utilisé pour la fabrication de la source chaude est le cuivre, dans le tableau 6.2 on retrouve ces caractéristiques physiques. La génération du flux vient d'un générateur de tension alternative de type ATOMS avec une gamme de mesure à pleine échelle de ($U = 0$ à 250 V et $I = 4$ A). Les mesures du courant et de la tension sont effectuées par deux multimètres de type FLUKE modèle 179 qui possèdent une précision de mesure de $\pm(1{,}0\ \% + 3)$ pour la tension mesurée, et $\pm(1{,}5\ \% + 3)$ pour le courant mesuré.

Masse volumique [g.cm^{-3}]	8.9
Coefficient de dilatation thermique linéaire [10^{-6}.K^{-1}]	16.8
Capacité thermique massique [J.kg^{-1}.K^{-1}]	386
Conductivité thermique [W/m.K]	388
Limite à la rupture (min/max) [MPa]	395
Limite d'élasticité à [MPa]	365
Allongement à la rupture [%]	5
Module d'élasticité [k.N.mm^{-2}]	124

TABLE 6.2 – Caractéristiques physiques du cuivre CW004A.

FIGURE 6.2.3 – Modélisation de la source chaude sous le logiciel CATIA .

Pour éviter les pertes de chaleur vers la partie supérieure et les faces latérale du montage, une isolation thermique est nécessaire.

Pour l'isolation vers la partie supérieure, un couvercle en téflon PTFE est prévu avec un diamètre intérieur de 60 mm qui vient se poser sur la surface supérieure de la source chaude et une hauteur de 20 mm, on a un deuxième diamètre de 85 mm et d'une épaisseur de 8 mm qui va recouvrir le tout et qui sera en contact avec notre deuxième isolant, la mousse élastomère qui vient envelopper les deux cylindres en aluminium, qu'on peut voir dans la figure 6.2.4. Sur le couvercle en téflon, on a rajouté un écran pareflamme WELDTEAM de 200 × 250 mm à la base qu'on a découpé. Composé de fibre céramique sur un support aluminium fin et ultra-flexible, il possède une résistance de chaleur jusqu'à 1200°C.

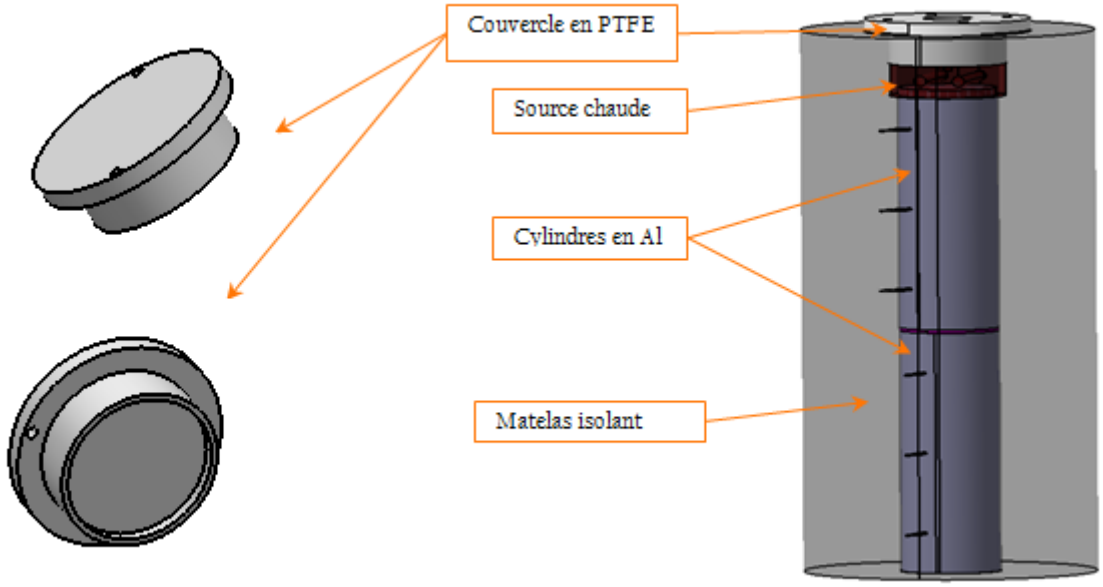


FIGURE 6.2.4 – Montage de l'isolation sur le banc de mesures.

Les propriétés thermiques du téflon « PTFE » se composent d'une excellente résistance thermique, avec une conductivité thermique de 0.25 W/m.K à 23°C. Sa gamme d'utilisation est l'une des plus larges parmi celles des polymères thermoplastiques, elle s'étend de −150°C à 260°C avec un point de fusion situé à 327°C.

Le matelas isolant FMI 500 de l'entreprise d'isolations thermiques « elit », est la solution choisie pour l'isolation du banc de mesures, grâce à sa conception sur mesure il viendra entourer le montage, il se compose d'une laine de roche souple avec liant spécial, revêtu d'aluminium pur (20 µm) renforcé sur une face. Sa masse volumique est de 80 kg/m^3 et sa température limite d'utilisation est de 750°C (80°C pour le revêtement d'aluminium), il est considéré aussi comme incombustible. On trouve ces propriétés thermiques dans le tableau 6.3.

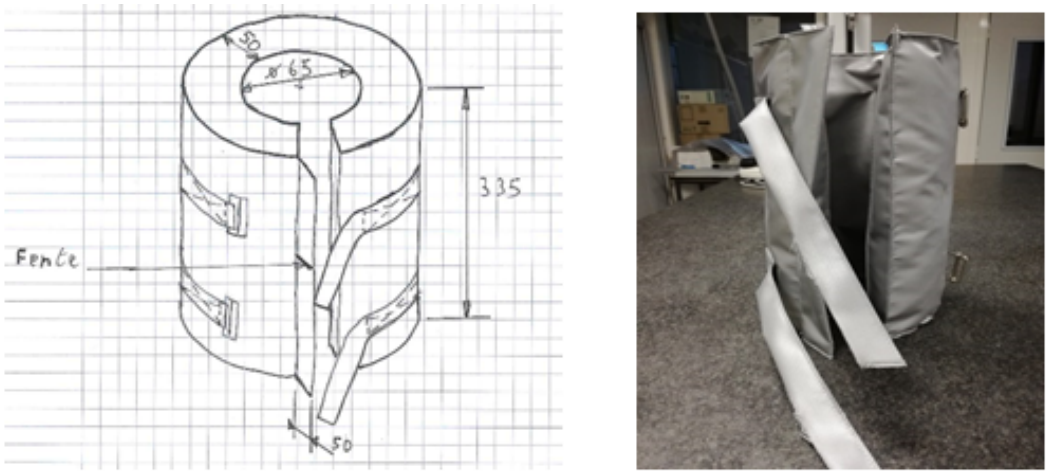


FIGURE 6.2.5 – Matelas isolant elit.

Conductivité thermique aux températures moyennes	100°C	0,048 W/m.K
	200°C	0,068 W/m.K
	300°C	0,095 W/m.K
	400°C	0,135 W/m.K
	500°C	0,192 W/m.K
Chaleur massique	0,23 J/kg.K	

TABLE 6.3 – Caractéristiques thermiques du matelas isolant elit.

Comme cité plus haut, la source chaude est munie de deux cartouches chauffantes (figure 6.2.6) de type hautes charges CCHC de diamètre $6,5$ mm et d'une longueur de 50 mm, elles dissipent chacune d'elle une puissance maximum de 150 W.

FIGURE 6.2.6 – Source chaude avec cartouches chauffantes.

Au court des premiers tests de régulation des cartouches chauffantes, on s'est rendu compte que l'utilisation d'une seule cartouche est plus que suffisante dans l'application voulue. Donc on a stabilisé le banc avec une tension fixe de 200 V et un courant de $0,54$ A qui nous donne grâce à la formule fournie par le fabricant 6.2.2, une puissance injectée d'environ $113,5$ W.

$$P_{out} = \left(\frac{Tension_{Mesurée}}{Tension_{Pleine\,échelle\,de\,la\,cartouche}}\right)^2 \times Puissance_{max\,de\,la\,cartouche} \tag{6.2.2}$$

La température est contrôlée grâce à une carte d'acquisition électronique modèle Arduino, qui nous permet d'automatiser le banc et réguler les mesures, ce qui rend notre banc stable.

Dans cette application la température de consigne est entre 200 et 210°C. Dans le schéma 6.2.7, on peut voir le principe de fonctionnement de la carte d'acquisition Arduino.

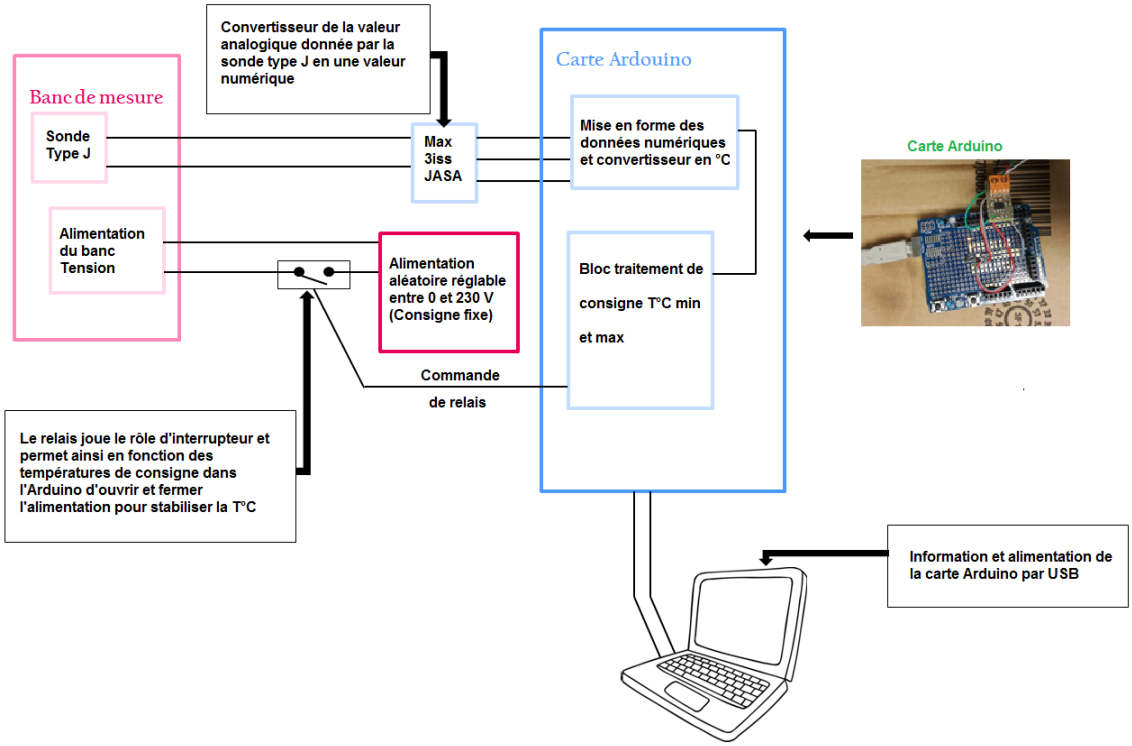


FIGURE 6.2.7 – Schéma de fonctionnement de la carte Arduino qui sert de régulateur de température pour les cartouches chauffantes.

Il faut savoir que quelques modifications ont été nécessaires sur le banc de mesures, tels que la suppression d'une vis de serrage prévue au départ dans le but

d'appliquer une pression sur les interfaces thermiques. Cette idée a été abandonnée pour laisser un libre déplacement au mouvement de dilatation (on a un $\triangle T$ d'environ 180°C, calcul de dilatation en Annexe D) tout en assurant une certaine pression sur les ITs qui est appliquée par le poids des pièces empilées sur l'échantillon d'interface testé, est donc constante qui représente une valeur de $0,041$ N/mm², qui est mesurée grâce un capteur de force « FUTEK » de chez Mecmesin.

La mesure de compression est donc plus compliquée à maîtriser dans ce cas, l'utilisation d'un comparateur numérique était nécessaire, on a fait des mesures d'épaisseur de chaque PAD après chaque cycle de chauffe et c'est cette valeur qui va être utilisée pour le calcul de la conductivité thermique.

La figure 6.2.8 représente la maquette du banc de mesures de conductivité thermique.

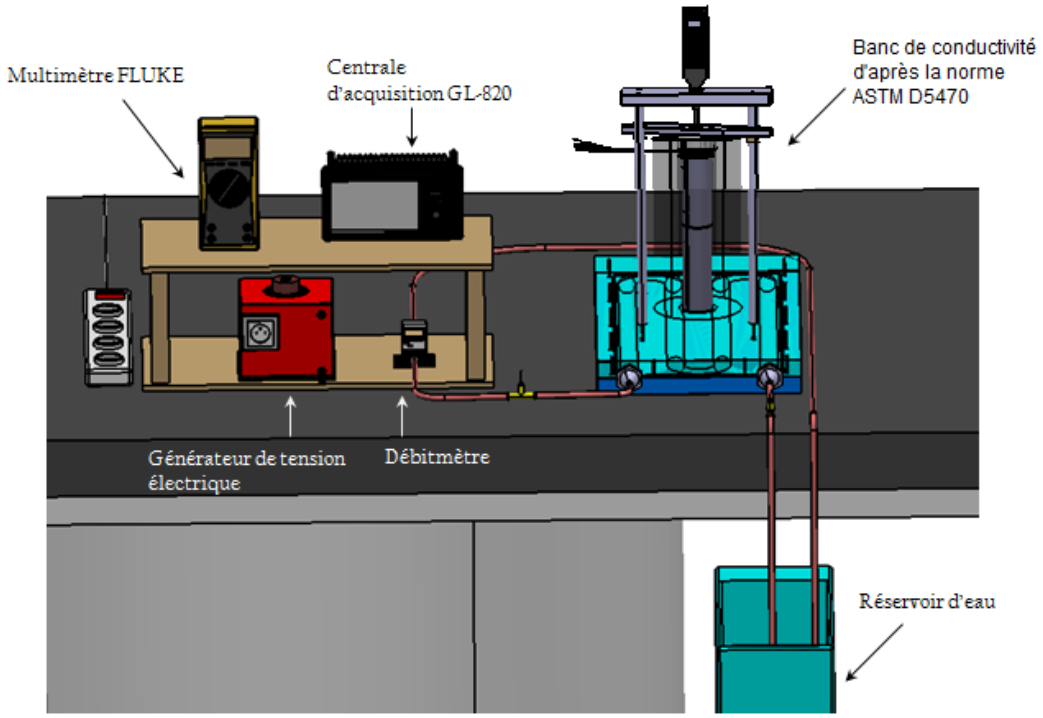


FIGURE 6.2.8 – Maquette sous CATIA du banc de mesures de conductivité thermique.

6.2.4 Instrumentation du banc expérimental

6.2.4.1 Mesure des températures

a) Choix des capteurs de températures

Pour l'instrumentation, dans chacun des deux blocs cylindriques d'aluminium, sont percés trois trous, de diamètre $1,2$ mm sur une profondeur de 25 mm, régulièrement espacés dans le sens vertical afin d'y insérer des thermocouples de type T-classe 1 de diamètre 1 mm.

Deux thermocouples de type K-classe 1 sont utilisés au niveau des sources chaudes pour effectuer la régulation de température et sont connectés à la carte d'acquisition Arduino pour y vérifier la température et respecter les consignes introduites.

Les thermocouples qui ont été utilisés pour la mesure de température à l'entrée et à la sortie d'eau du refroidisseur, sont de type T chemisé - classe 1 de diamètre $1,5$ mm et de longueur 150 mm qui ont été assemblés dans un « Té » à embrochement femelle TFS en inox 316L qui sont isolés thermiquement par un joint en téflon sur gaine repositionnable pour éviter toute déperdition de chaleur. Ces sondes servent à mesurer la température d'échange de la source froide (ΔT_{eau}) et à évaluer ainsi les pertes de chaleur du système en comparant la quantité de chaleur injectée par la source chaude avec celle évacuée par le liquide de refroidissement. Ce choix a été fait pour leur précision suffisante pour une faible différence de température (environ $0,5$ °C) apparaissant entre l'entrée et la sortie du fluide au niveau du refroidisseur.

La plage de température, à laquelle est soumis le montage entre la source chaude et la source froide, est comprise entre 18 et 210 °C, ce qui correspond respectivement à la température du fluide de refroidissement utilisé et à la température maximum régulée par la carte Arduino pour la cartouche chauffante dans la source chaude. Les mesures de températures sont effectuées grâce à des thermocouples de type T classe 1 et de diamètre 1 mm, ils sont choisis en fonction de leur faible encombrement, et aussi car ils permettent de faire des mesures localisées, vu que c'est seule l'extrémité du thermocouple qui est sensible à la température mesurée.

Le principe de mesure de la température par thermocouple est expliqué en Annexe A. La normalisation effectuée par la National Institut of Standards and Technology (NIST), classe les thermocouples selon la rareté des métaux qui les composent, métaux précieux (platine, platine-rhodium) ou métaux communs (nickel-chrome [chromel], nickel-aluminium [alumel], cuivre, fer, cuivre-nickel [constantan], nickel-chrome-silicium [nicrosil], nickel-silicium [nisil]). Le classement et les principales caractéristiques de ces thermocouples sont regroupés dans le tableau A.1 en Annexe A.

b) Erreur de mesure du gradient de température par référence des thermocouples

Pour minimiser l'erreur effectuée sur la mesure de température du gradient thermique $\triangle T$ au niveau de l'interface thermique testée, il est nécessaire de réduire l'erreur de mesure existante entre les différents thermocouples utilisés. C'est pourquoi l'utilisation d'un thermocouple étalonné de référence était nécessaire, et grâce auquel on a pu régler le reste des thermocouples. La détermination de l'erreur est réalisée par une mesure de la température de tous les thermocouples dans un bain-thermostaté, pour une gamme de température variant de 18°C à 95 °C (figure 6.2.9).

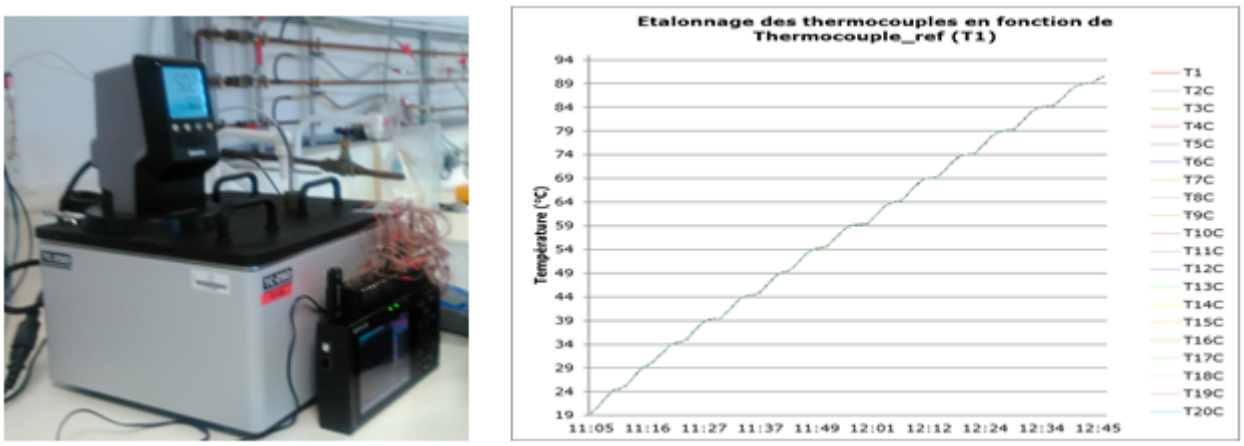


FIGURE 6.2.9 – Montage et profil de température pour l'étalonnage des thermocouples dans un bain-thermostaté et la détermination de l'erreur de mesure.

Dans le tableau 6.4, on retrouve les erreurs de mesure des thermocouples obtenues lors d'une campagne de contrôle en bain-thermostaté des dix thermocouples utilisés dans le banc de mesures. Ces erreurs sont indiquées par rapport au thermocouple de référence « T_1 » dans une plage de température entre 18 et 95 °C. Les mesures sont effectuées au bout de trois minutes après chaque changement de consigne de température.

Er T_2 [°C]	Er T_3 [°C]	Er T_4 [°C]	Er T_5 [°C]	Er T_6 [°C]	Er T_7 [°C]	Er T_8 [°C]	Er T_9 [°C]	Er T_{10} [°C]
0,013	0,010	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,03

TABLE 6.4 – Erreurs des différents thermocouples par rapport au thermocouple de référence T_1.

Cette opération permet d'éliminer les erreurs de mesures entre les différents thermocouples, ainsi que leur dérive naturelle lors du remplacement de tout thermocouple lorsque celui-ci est endommagé.

L'acquisition des données est faite sur une centrale de mesure de la marque Graphtec modèle GL-820. Pour la lecture de mesure des thermocouples de type T, on a une précision de mesures de ±(0,1% de la valeur lue $+0,5$°C) pour la gamme de mesure de $-100°C \leq TS \leq 400$°C. Et pour les thermocouples de type J on a une précision de ±(0,05% de la valeur lue +1°C) pour la gamme de mesures de $100°C < TS \leq 1100$ °C. On a aussi une précision de la tension à pleine échelle de 0,1%.

Ces précisions sont soumises aux conditions d'utilisation suivantes :

— Température ambiante de 23 ± 5°C .
— 30 minutes ou plus doivent être écoulées après la mise sous tension.
— L'intervalle d'échantillonnage doit être sur 1s avec 10 voies.
— Convertisseur Analogique/Numérique de 16 bits.

6.2.5 Contrôle et calcul des incertitudes de mesures des paramètres de la mesure

En général, les mesures sont entachées d'erreurs dont on estime l'intensité par l'intermédiaire des incertitudes. Lorsqu'une mesure est utilisée pour obtenir la valeur d'une autre grandeur par l'intermédiaire d'une formule, outre le calcul de la valeur estimée de cette grandeur, il faut savoir déterminer l'incertitude induite sur le résultat de la formule. On parle de propagation d'incertitude, ou encore, improprement, de propagation d'erreur.

C'est pourquoi, grâce à la formule générale de la propagation 6.2.3, on va effectuer les mesures d'incertitude pour chaque paramètre utilisé dans ce banc de mesures.

$$\partial Y = \sqrt{\left(\frac{\partial f(\overline{x_1}, \overline{x_2})}{\partial X_1}\right)^2 (\partial X_1)^2 + \left(\frac{\partial f(\overline{x_1}, \overline{x_2})}{\partial X_2}\right)^2 (\partial X_2)^2} \tag{6.2.3}$$

6.2.5.1 Résistance thermique et conductivité thermique

Le but de notre étude, est de déterminer la résistance thermique et la conductivité des interfaces thermiques. Les formules suivantes de la résistance thermique 6.2.4, et de la conductivité thermique 6.2.5, sont donc indispensables pour nos calculs, ainsi que les formules d'incertitudes qui les représentent. Sur la figure 6.2.10, on a une représentation schématique des différents paramètres mesurés et calculés dans cette section.

$$R_{int} = \frac{\triangle T_{int}}{Q} \tag{6.2.4}$$

Avec :
R_{int} : Résistance thermique de l'interface (m².K/W).
ΔT_{int} : Différence de température au niveau de l'interface (K).
Q : Flux de chaleur qui traverse l'interface étudiée (W).

$$\lambda_{int} = \frac{e_{int}.Q}{S.\triangle T_{int}} \tag{6.2.5}$$

Avec :
λ_{int} : Conductivité thermique de l'interface (W/m.K)
e_{int} : Épaisseur de l'interface (m).
Q : Flux de chaleur qui traverse l'interface étudiée (W).
S : Surface de l'interface (m²).
ΔT_{int} : Différence de température au niveau de l'interface (K).

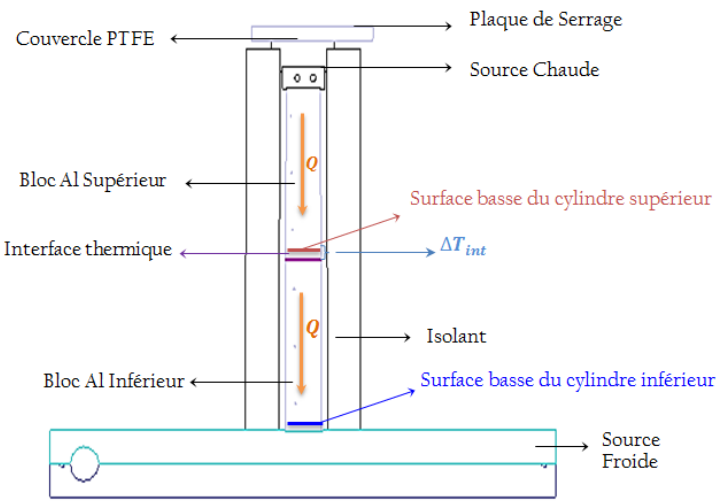


FIGURE 6.2.10 – Schéma 2D du banc de mesures et les différents paramètres nécessaires qui le complète.

a) Incertitude de la résistance thermique

D'après la formule de propagation d'incertitude, on obtient :

$$\delta R_{int}^2 = \left|\frac{\partial R_{int}}{Q}\right|^2 .\partial Q^2 + \left|\frac{\partial R_{int}}{\partial \triangle T_{int}}\right|^2 .\partial \triangle T_{int}^2 \tag{6.2.6}$$

Soit :

$$\delta R_{int} = \sqrt{\left(\frac{\triangle T_{int}}{Q^2}\right)^2 .\delta Q^2 + \left(\frac{1}{Q}\right)^2 .\delta \triangle T_{int}^2} \tag{6.2.7}$$

Avec :
δQ : Incertitude sur la mesure de la puissance électrique moyenne (W).
$\delta \Delta T_{int}$: Incertitude sur la différence de température au niveau de l'interface (°C).

b) Incertitude de la conductivité thermique

On obtient de la formule de propagation des incertitudes indépendantes, l'incertitude de la mesure de la conductivité thermique $\delta \lambda_{int}$:

$$\delta \lambda_{int}^2 = \left|\frac{\partial \lambda_{int}}{\partial e}\right|^2 .\partial e^2 + \left|\frac{\partial \lambda_{int}}{\partial Q}\right|^2 .\partial Q^2 + \left|\frac{\partial \lambda_{int}}{\partial \triangle T_{int}}\right|^2 .\partial \triangle T_{int}^2 \tag{6.2.8}$$

Soit :

$$\delta \lambda_{int} = \sqrt{\left(\frac{Q}{S.\triangle T_{int}}\right)^2 .\delta e^2 + \left(\frac{e_{int}}{S.\triangle T_{int}}\right)^2 .\delta Q^2 + \left(\frac{e_{int}.Q}{S.\triangle T_{int}^2}\right)^2 .\delta \triangle T_{int}^2} \tag{6.2.9}$$

Note : l'incertitude sur la section de l'interface n'est pas prise en compte dans les calculs qui suivent.

D'après les expressions (6.2.7) et (6.2.9), la détermination de l'incertitude sur la résistance et la conductivité thermique passe toutes deux par celle de l'épaisseur δe, de l'incertitude du flux thermique δQ ainsi que sur la différence de température au niveau de l'interface $\delta \Delta T_{int}$.

c) Incertitude sur la mesure d'épaisseur

L'obtention de la valeur de l'épaisseur des interfaces thermiques lors de la caractérisation de la conductivité thermique vient d'un calcul de dilatation qui est expliqué plus bas (section 6.3.2). Afin d'obtenir l'épaisseur de l'échantillon testé, on a utilisé un comparateur numérique modèle Mitutoyo IDU 25 qui mesure la dilatation de notre banc expérimental au cours de la caractérisation thermique. L'incertitude du comparateur donnée par le fabricant est de $\pm(0,01/\sqrt{12})$ qui nous donne une valeur de $\pm 2,886 \times 10^{-3}$ mm. Cette valeur est négligeable. Par contre, on a effectué une mesure avec le comparateur sans interface thermique entre les blocs cylindrique, et nous avons obtenu une valeur de dilatation totale du banc expérimental de 1,35 mm pour une intervalle de température comprise entre

[38°C - 200°C] (ref. Annexe D). Le calcul de dilatation effectué pour nos tests, nous donne une valeur supérieure à celle mesurée à vide de $\pm 0,2$ mm ce qui nous mène à considérer cette valeur comme étant l'erreur systématique sur la mesure de l'épaisseur.

d) Incertitude sur la discontinuité de température de l'interface et des mesures de températures

La discontinuité de température ΔT_{int} au niveau de l'interface étant déduite des mesures de température par thermocouple prise le long des blocs cylindriques, son incertitude $\delta\Delta T_{int}$ doit prendre en compte celle des capteurs de température. L'incertitude sur la température mesurée par thermocouple inclut toutes les quotes-parts individuelles de la chaîne de mesure de température, à savoir le thermocouple, le convertisseur de mesure et l'enregistreur de données. En négligeant les incertitudes sur la connexion des thermocouples avec les blocs cylindriques, l'incertitude sur la mesure de température δT_{Txi}, en une position x_i et mesurée par un thermocouple de type T, est donnée par l'expression suivante :

$$\delta T_{Txi} = \delta T_T + \delta Graphtec_{température} \tag{6.2.10}$$

Où :

δT_T : L'incertitude sur le thermocouple de type T de classe 1,

$\delta Graphtec_température$: L'incertitude sur la voie d'enregistrement de la mesure de température de l'enregistreur de données Graphtec.

Comme cité plus haut, la centrale d'acquisition possède une précision de mesures de ±(0,1% de la valeur lue $+0,5$°C) pour la gamme de mesure de $-100°C \leq TS \leq 400°C$. Pour les thermocouples T1, T3 et T4, T6, la plage retenue s'étend de 0 à 200°C.

La tolérance de mesure sur le thermocouple T1 (thermocouple de référence) qui est étalonné, est de $\pm 0,3$°C. D'après la formule 6.2.10, l'incertitude sur la mesure de températures faites par les thermocouples localisés sur le bloc cylindrique d'aluminium supérieur ainsi que par les thermocouples du bloc cylindrique inférieur vaut $\pm 0,7$°C.

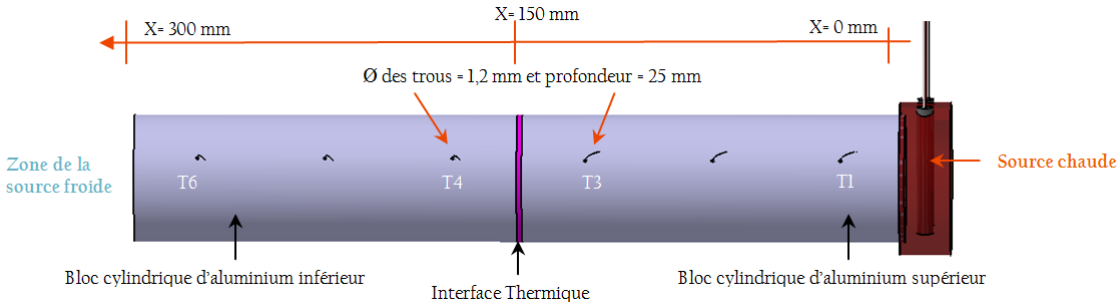


FIGURE 6.2.11 – Positionnement et dénomination des thermocouples T sur le banc de test.

Il ne reste plus qu'à déterminer l'incertitude de mesure $\delta\Delta T_{int}$ sur la discontinuité de température au niveau de l'interface pour pouvoir obtenir celles de la résistance thermique et de la conductivité thermique, cette méthode est expliquée dans la section 6.3.3.

e) Incertitude sur le flux

Le calcul du flux de chaleur moyen est effectué grâce à la formule 6.2.11.

$$Q = \frac{Q_1 + Q_2}{2} \tag{6.2.11}$$

Et d'après l'expression 5.4.1, on obtient :

$$Q = \frac{\lambda_{Al}.S}{2.d} \times (\triangle T_1 + \triangle T_2) \tag{6.2.12}$$

D'après cette expression 6.2.12, la détermination de l'incertitude sur la quantité de chaleur passe par celle de l'incertitude sur la différence de température dans le bloc cylindrique supérieur $\delta\triangle T_1$ et l'incertitude sur la différence de température dans le bloc cylindrique inférieur $\delta\triangle T_2$, qui dépendent de celle de la température prise par les thermocouples δT_{Txi}. Ce qui nous donne :

$$\delta T_T = \sqrt{\delta T_{xa}^2 + \delta T_{xb}^2} \tag{6.2.13}$$

Avec : $\delta T_{xa} = ((T_{xa} \times 0,1)/100 + 0,5)$ et $\delta T_{xb} = ((T_{xb} \times 0,1)/100 + 0,5)$. Où T_{xa} et T_{xb} représentent les thermocouples utilisés pour chaque valeur de température mesurée.

Note : La valeur de la conductivité thermique de l'aluminium est donnée par le fabricant avec la pièce mais sans incertitude. L'incertitude sur cette grandeur n'est pas considérée dans ces calculs.

6.3 Validation du banc de mesures de la conductivité thermique

6.3.1 Protocole des mesures de la conductivité thermique

Dans ce chapitre, nous allons tester une seule référence d'interface thermique, T1.3M qui va nous servir de référence pour la définition de la fiabilité du banc de mesures.

Les démarches de caractérisation de la conductivité thermique sont :

1. Mesure de la dureté Shore avant positionnement de l'interface dans le banc de mesures, grâce au Duromètre Shore 00 qui suit la norme ASTM D2240,
2. Mesure de l'épaisseur de l'interface thermique sous empilement et donc un serrage de $0,41$ bar à température ambiante,
3. Branchement du système de refroidissement avec une température d'entrée d'eau d'environ 18°C avec un débit d'environ 2 l/min,
4. Empilement de l'interface thermique au milieu des deux blocs cylindriques en aluminium,
5. Placement du couvercle isolant en PTFE au-dessus de la source chaude qui contient une cartouche chauffante, qui sera pilotée de sorte que la température soit stable aux alentours de $210°C$,
6. Placement des thermocouples type T dans les trous qui se trouvent dans les blocs cylindriques.
7. Mise en place de l'isolant thermique (matelas isolant), qui se trouve autour des blocs cylindriques en aluminium,
8. Placement du comparateur numérique en position 0 afin de pouvoir mesurer le déplacement total effectué tout le long des mesures,
9. Création d'un flux de chaleur régulé en température, grâce au système de régulation effectuée par la carte électronique Arduino,
10. Mesure de la puissance électrique, thermique et de la distribution des températures du montage lorsque le régime stationnaire et la stabilisation des températures sont atteints,
11. Lancement des mesures. La stabilisation de la température est faite au bout de 4h de mesure pour chaque échantillon,
12. Mesure de l'épaisseur de l'interface thermique après le test de caractérisation, à température ambiante, avec une colonne de mesures,
13. Mesure de la dureté Shore de l'interface, après caractérisation thermique, avec un duromètre Shore 00.

Une fois les mesures effectuées, il nous reste plus qu'à définir la conductivité thermique grâce à la méthode de calcul (cf.Eq. 5.4.4 et 5.4.5).

A noter que pour l'échantillon T1.3M, plusieurs mesures ont été réalisées pour être sûr de la caractérisation du banc de mesures.

Dans la figure 6.3.1, on a la représentation du banc expérimental de caractérisation de la conductivité thermique des interfaces.

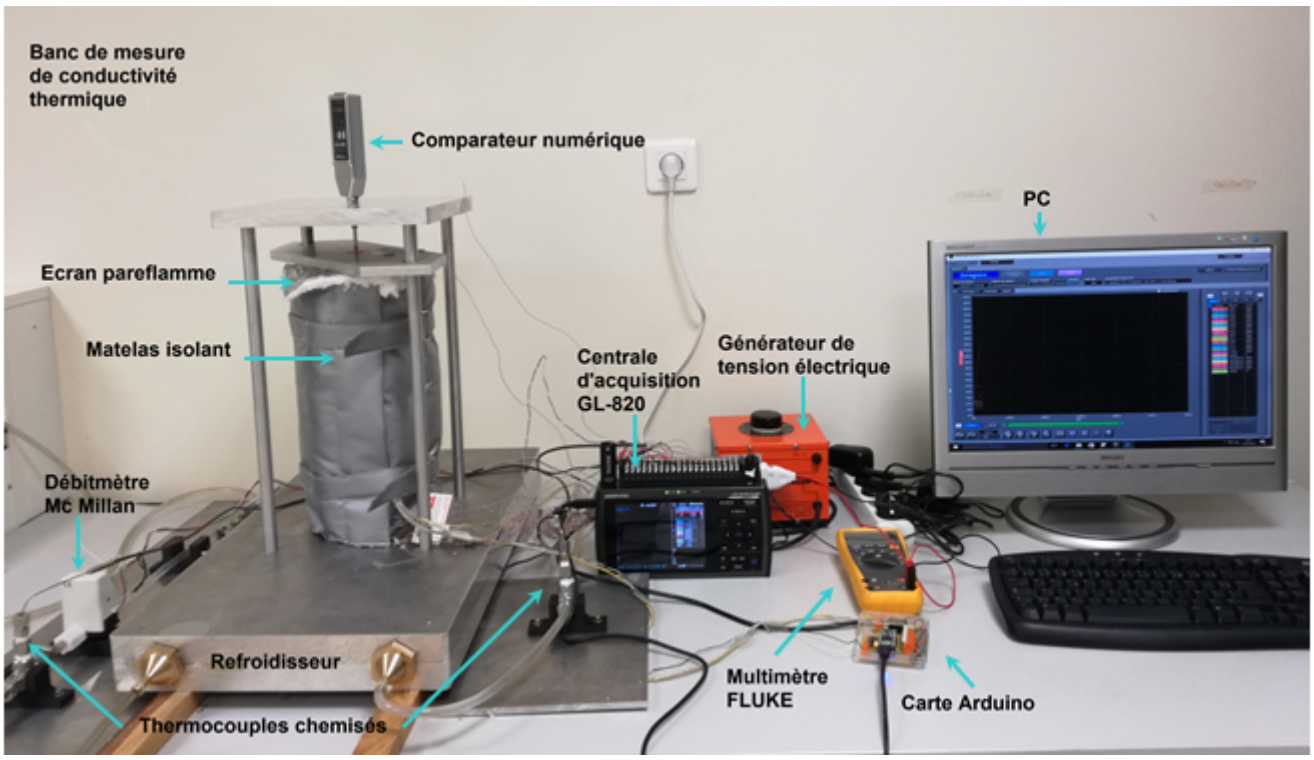


FIGURE 6.3.1 – Banc expérimental de caractérisation de la conductivité thermique des interfaces.

6.3.2 Calcul de l'épaisseur de l'interface thermique sous pression et en cycle de chauffe

Afin de pouvoir définir l'épaisseur exacte de l'interface thermique lors du cycle de chauffe et sous pression des différentes pièces qui compose le banc de mesures, nous avons effectué un calcul de dilatation thermique en fonction de chaque matériau du banc de mesures. La méthode de calcul est expliquée ci-dessous pour l'échantillon de référence T1.3M :

On a commencé par définir la dilatation de chaque matériau qui compose chaque pièce du banc, le couvercle d'isolation (en téflon), la source chaude (en cuivre) et

les deux cylindres (en aluminium).

Les paramètres importants pour ce calcul de dilatation sont représentés sur la figure 6.3.2.

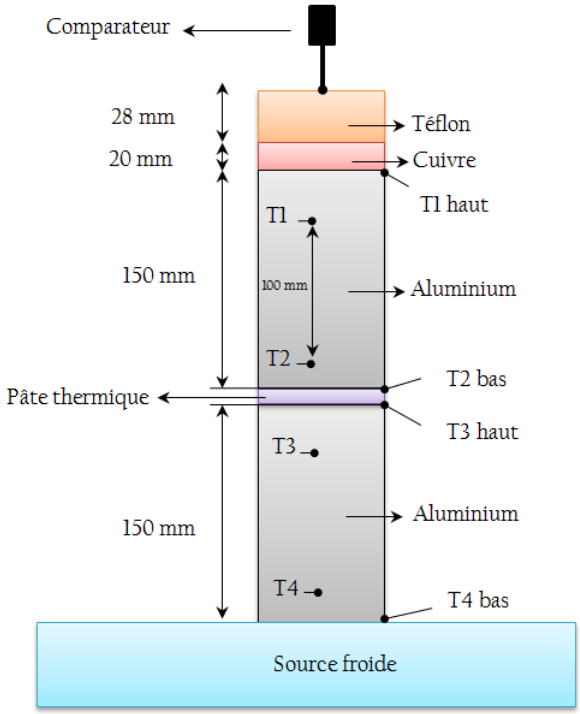


FIGURE 6.3.2 – Schéma de positionnement des paramètres à calculer pour la dilatation des matériaux du banc de mesures.

Pour le couvercle en téflon

Le coefficient de dilatation du téflon à 25 °C est de 130×10^{-6}/°C.

L'épaisseur totale du couvercle en téflon est de 28 mm.

La formule d'allongement suivante :

$$\Delta L = L_0 \times [1 + \alpha.\Delta T] \tag{6.3.1}$$

Avec :

ΔL : La longueur du matériau allongé en fonction de la température (m).

L_0 : La longueur du matériau initiale en fonction de la température (m).

α : Coefficient de dilatation du matériau à 25°C (1/K).

$\triangle T$: La différence de température à laquelle le matériau est soumis (°C).

En appliquant la formule 6.3.1 et pour une variation de température entre 25 et 205°C, on obtient une dilatation du couvercle en téflon de +0,6552 mm .

Pour la source chaude en cuivre

Le coefficient de dilatation du cuivre à 25 °C est de $17 \times 10^{-6}/°C$.
L'épaisseur totale de la pièce chauffante en cuivre est de 20 mm.
En appliquant la formule 6.3.1 et pour une variation de température entre 25 et 205°C, on obtient une dilatation de la source chaude de + 0,0612 mm.

Pour le cylindre haut en aluminium

Le coefficient de dilatation de l'aluminium est de $23 \times 10^{-6}/°C$.
On doit calculer la température moyenne du cylindre, pour cela on a besoin de la température des deux surfaces haute et basse du cylindre qui représente le T_1haut et T_2bas sur le schéma 6.3.2. Pour cela, on va extrapoler les valeurs en fonction des mesures de températures obtenues et de leur distance. Donc on obtient :
T_1haut = 197,725°C.
T_2bas = 181,975°C.
T_{moy}= 189,85°C.
Ce qui nous donne une dilatation du cylindre haut d'aluminium de +0,568 mm, pour une variation de température entre 25 et 189,85°C.

Pour le cylindre bas en aluminium

On refait une extrapolation pour définir les deux températures de la surface haute et basse du cylindre bas en aluminium (T_3haut et T_4bas), on obtient :
T_3haut = 148,05°C.
T_4bas = 135,75°C.
T_{moy}= 141,9°C.
Ce qui nous donne une dilatation du cylindre bas d'aluminium de +0,403 mm, pour une variation de température entre 25 et 141,9°C.

Dilatation totale du banc

D'après ces calculs, on peut définir l'allongement total effectué sur ces éléments grâce à la formule suivante :

$$Allongement\ global = \sum L_{finales} - \sum L_{initiales} \tag{6.3.2}$$

On obtient donc un allongement total sur le banc de mesures (en négligeant l'épaisseur de la pâte thermique sous pression qui est de 1,80 mm) d'une valeur de +1,6875 mm.

La valeur obtenue est soustraite de la valeur de l'allongement mesurée par le comparateur qui est de + 1,67 mm, ce qui nous donne un $\triangle L_{finale-pâte-thermique} =$

$0,017$ mm, qui représente la valeur absorbée par l'échantillon. L'épaisseur finale de la pâte thermique sous pression et au moment du cycle de chauffage est donc calculée en soustrayant le $\triangle L_{finale-pâte-thermique}$ de l'épaisseur initiale mesurée sous pression de la pâte thermique, qui nous donne une valeur de 1,7824 mm.

Ce modèle de calcul est effectué pour chaque échantillon testé pour les mesures de caractérisation de la conductivité thermique.

6.3.3 Mesure de la discontinuité de température au niveau des interfaces thermiques

Après évaluation expérimentale des erreurs de mesures entre les différents thermocouples, on passe au protocole de caractérisation de la résistance et de la conductivité thermique des échantillons. Dans la figure 6.3.3, on représente la distribution de température dans le montage avec l'interface thermique de référence T1.3M de chez Compelma, échantillon n°4 test n°1 d'une épaisseur de $1,7632$ mm serrée à $0,041$ N/mm^2. Les autres paramètres expérimentaux sont un débit d'eau de 2 l/min, une température ambiante d'environ $25°C$, une température d'entrée d'eau pour le refroidisseur de $15,8°C$ et une température de consigne entre 200 et $210°C$ nécessitant une puissance de $113,42$ W et un courant de $0,57A$.

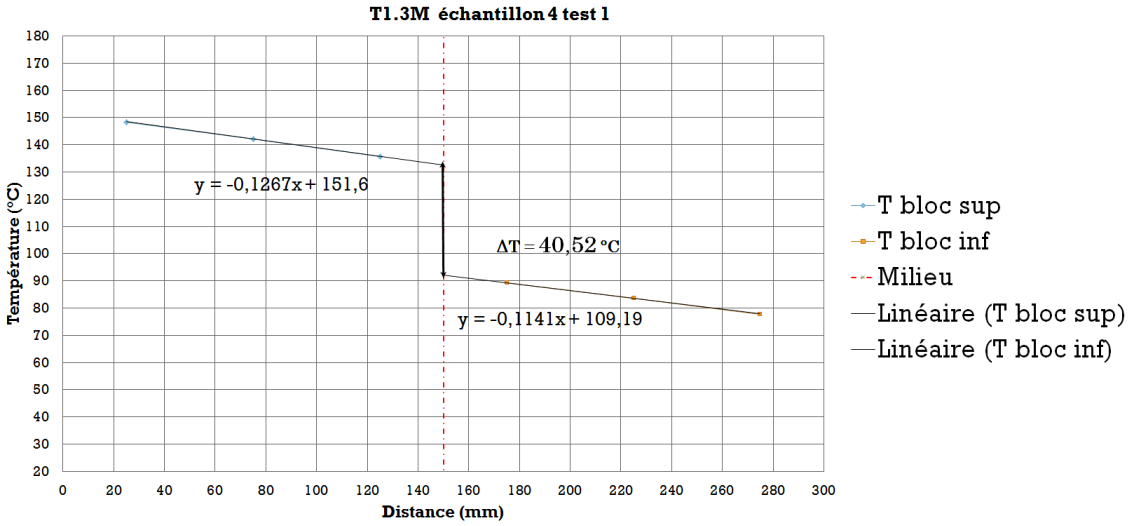


FIGURE 6.3.3 – Distribution de température avec l'interface thermique Compelma T1.3M échantillon n°4 test n°1 d'épaisseur 1,771 mm.

Plusieurs tracés par cylindre d'aluminium sont représentés sur la figure 6.3.3. Le tracé noir correspond à l'extrapolation linaire de la distribution de température mesurée avec les trois thermocouples distincts corrigée respectivement pour

le cylindre supérieur et inférieur. La détermination de l'incertitude sur les températures mesurées est détaillée en Annexe B. La discontinuité thermique $\triangle T$ au niveau de l'interface est déterminée par extrapolation des courbes de distribution de températures corrigées. Pour cet exemple, la valeur de $\triangle T$ obtenue par cette méthode pour l'interface T1.3M échantillon n°4 test n°1, est de $40,52$°C ($\pm 0,7$°C) qui est plus précise que la valeur déduite directement par la différence entre le bloc cylindrique supérieur « chaud » et le bloc cylindrique inférieur « froid » qui est de 40,54°C ($\pm 0,7$°C). De ce dernier, et connaissant le flux, l'épaisseur et la section de l'interface, il est possible de déterminer la valeur de la conductivité thermique de cette interface. Cette valeur de conductivité pourra être comparée à celle donnée par le fabricant, et surtout à celle qu'on obtiendra de cette même interface, après les tests d'irradiations.

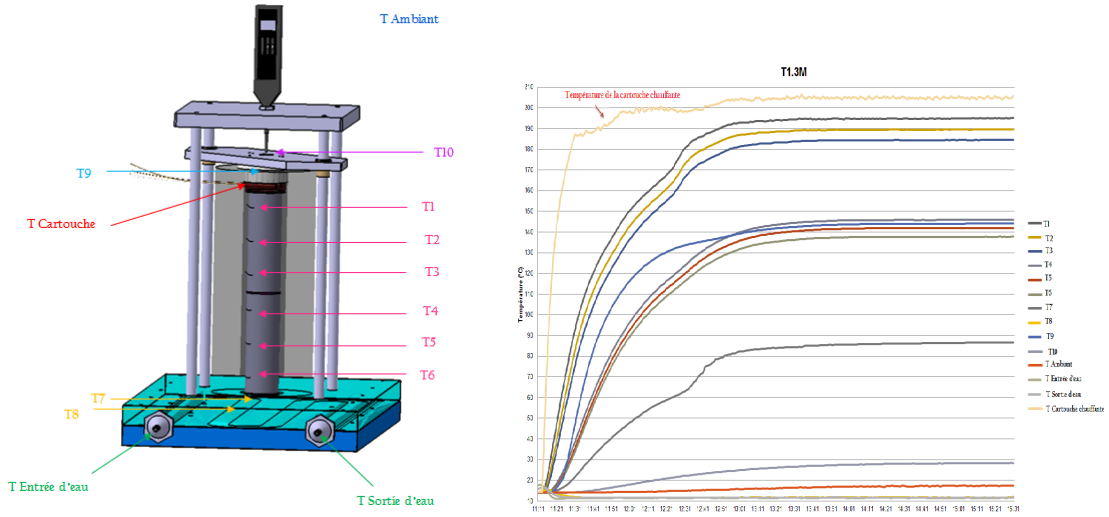
6.3.4 Résultats obtenus pour un échantillon de référence d'interface thermique « T1.3M »

Après évaluation expérimentale des erreurs de mesures entre les différents thermocouples, on passe aux résultats obtenus de caractérisation de la résistance et de la conductivité thermique de l'échantillon T1.3M qui possède une conductivité thermique de 1,3 W/m.K pour une épaisseur de 2 mm, donnée par le fabricant Compelma.

Dans ces mesures référentielles, nous avons testé cette référence d'interface thermique plusieurs fois afin de déterminer la fiabilité du banc de mesures. Donc on a 4 échantillons de la même référence T1.3M :

1. Le premier échantillon a subi une première mesure de caractérisation de la conductivité thermique, on obtient pour une épaisseur de 1,7824 mm une conductivité thermique de 0,66 W/m.K
2. Le deuxième échantillon, lui a subi deux fois une stabilisation de température pour le test de conductivité thermique (2 cycles de chauffe). Avec une épaisseur de 1,7321 mm, on a une conductivité thermique de 0,71 W/m.K. Pour une épaisseur de 1,7142 mm, on obtient une conductivité thermique de 0,71 W/m.K.
3. Le troisième échantillon possède une épaisseur de 1,7432 mm, ce qui nous donne une conductivité thermique de 0,71 W/m.K.
4. Et le quatrième échantillon, testé 3 fois (3 cycles de chauffe), pour la première stabilisation on a une épaisseur de 1,76 mm, on obtient une conductivité thermique de 0,70 W/m.K. Pour la seconde stabilisation, on a une épaisseur de 1,61 mm, on a une conductivité thermique de 0,72 W/m.K. Et pour la troisième stabilisation de température, pour une épaisseur de 1,71 mm on a une conductivité thermique de 0,71 W/m.K.

Le reste des courbes représente respectivement en partant du haut, les trois thermocouples se trouvant dans la « partie chaude » T1, T2 et T3 dans le cylindre haut du banc, ensuite on a T4, T5 et T6, les trois thermocouples se trouvant dans la deuxième partie cylindrique du banc « partie froide » comme représenté clairement sur la figure 6.3.4b.



(a) Positionnement des différents thermocouples sur le banc expérimental.

(b) Courbe de stabilisation de température de l'échantillon n°1 T1.3M.

FIGURE 6.3.4 – Positionnement des thermocouples sur le banc de mesures et courbes de stabilisation de température.

Comparaison des résultats du Pad T1.3M

Dans le tableau 6.5, on a une comparaison complète des différents paramètres entre les échantillons testés du pad T1.3M. Et sur la figure 6.3.5, on a la différence de températures de chaque mesure de caractérisation pour ce même échantillon.

	Échantillon n°1	Échantillon n°2	Échantillon n°3	Échantillon n°4
Nb de tests	1	2	1	3
T départ (°C)	14	16 / 15	16	21 / 22 / 21
T max (°C) de stabilisation	195	167 / 185	186	148 / 155/ 151
Pression (N/mm²)	0,041	0,041	0,041	0,041
Flux Q (W)	24,70	31,39 / 32,73	30,09	31,62 / 33,99/ 30,18
Ep_{int}(mm)	1,78	1,73 / 1,71	1,75	1,76 / 1,61/ 1,71
$\triangle T_{int}$ [1](°C)	33,82	39,07 / 40	37,90	40,54 / 38,89 /37,22
λ_{int}(W/m.K)	0,66	0,71 / 0,71	0,71	0,70 / 0,71 /0,72

$\triangle T_{int}$: Différence de température entre la partie chaude et la partie froide dans les cylindres en Aluminium issue de la méthode de la norme.

sources d'incertitudes	Échantillon n°1	Échantillon n°2	Échantillon n°3	Échantillon n°4
δ *Epaisseur* (mm)	0,073	0,080 / 0,080	0,080	0,079 / 0,080 / 0,081
δ *Flux* (W)	0,071	0,058 / 0,057	0,061	0,056 / 0,053 / 0,060
$\delta \triangle T$	0,018	0,016 / 0,016	0,017	0,014 / 0,015 / 0,016
Incertitude totale	0,10	0,10 / 0,10	0,10	0,10 / 0,10/ 0,10

TABLE 6.5 – Comparaison des différents paramètres du pad T1.3M.

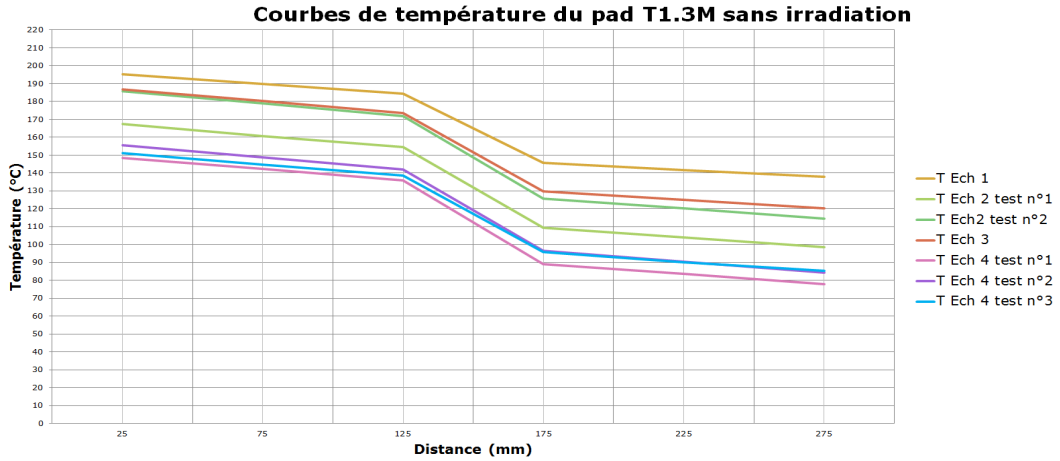


FIGURE 6.3.5 – Courbes de comparaison de température des différents échantillons T1.3M.

Observations

- La stabilisation de température n'est pas forcement au même degré à chaque mesure, cela vient des paramètres extérieurs (température de l'ambiant, température de départ ...) qui sont des paramètres un peu compliqués à maitrîser.
- La résistance thermique des interfaces dépend fortement de l'écrasement de l'échantillon testé.
- L'échantillon n°1 est monté plus haut en température, jusqu'à 195°C, et nous donne une conductivité thermique de 0,66 W/m.K pour une épaisseur de 1,77 mm.
- L'échantillon n°2 testé deux fois, a bien la même conductivité thermique (vers les 0,71 W/m.K) dans les deux tests.
- L'échantillon n°3, respecte la valeur trouvé sur l'échantillon n°2, avec une valeur de 0,71 W/m.K
- L'échantillon n°4 possède une valeur de conductivité thermique qui rejoint à $\pm 0,1$ W/m.K la valeur de l'échantillon n°2 et n°3, avec des valeurs pour les trois tests de 0,70, 0,71 et 0,72 W/m.K. On peut dire que la conductivité de cet échantillon par rapport aux trois tests est stable.
- La conductivité de l'échantillon n°1 est la plus faible, on suppose que cela est dû au flux de chaleur qui est bien inférieur que celui des autres échantillons.
- Les conductivités thermiques mesurées pour le pad T1.3M restent éloignées de la valeur donnée par le fabricant d'environ $\pm 0,5$, qui est de 1,3 W/m.K.
- Pas de graisse « visqueuse » sur les interfaces thermiques lors des mesures.
- Dureté Shore inchangé par rapport aux mesures initiales de 45 Shore 00, par contre elles sont différentes des valeurs données dans les datasheets, qui est de 25 Shore 00.
- Dégradation de l'état de surface du cylindre supérieur en aluminium en contact avec les échantillons testés (voir figure 6.3.6).

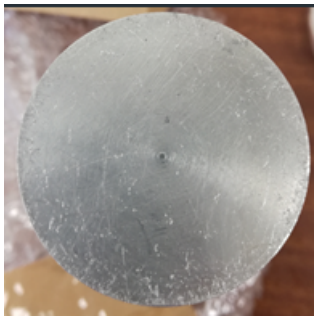


FIGURE 6.3.6 – Dégradation de la surface du bloc cylindrique supérieur en contact avec l'interface thermique.

6.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le banc expérimental qui permet d'effectuer les mesures nécessaires à la caractérisation des paramètres thermiques des interfaces. Il possède un cycle thermique d'environ 20°C à 200°C.

Une pression est nécessaire sur les interfaces afin de maintenir une homogénéité sur les surfaces ce qui rend les mesures plus précises. D'ailleurs la difficulté était à ce niveau-là, car on a une dilatation globale du banc de mesures qui provient de la différence de températures dans les blocs cylindriques qui possède un $\Delta T = 180$°C, cela risque d'augmenter la pression et d'écraser les interfaces thermiques. Pour remédier à ce problème, nous avons pris le choix de laisser le poids des différentes pièces empilées l'une sur l'autre faire pression sur les ITs ($4,1 \times 10^{-2}$MPa), ce qui permet d'avoir une plus grande liberté de déplacement au niveau de la dilatation.

On obtient des premiers résultats qui représentent la valeur d'un échantillon de pad T1.3M de chez Compelma, les valeurs de la conductivité thermique obtenues, qui sont pour l'échantillon n°1 de 0,66 W/m.K ($\pm 0,10$), pour l'échantillon n°2 de 0,71 W/m.K ($\pm 0,10$), pour l'échantillon n°3 de 0,71 W/m.K ($\pm 0,10$) et pour l'échantillon n°4 de 0,71 W/m.K ($\pm 0,10$), restent loin de la valeur donnée par le fabricant qui est de $1,3$ W/m.K, cette dernière nous est donnée par rapport à un « cas idéal », ce qui implique plusieurs paramètres nécessaires à la caractérisation de la conductivité thermique tels que la température, l'écrasement, la pression et la force appliquée pour les mesures ce qui nous laisse sans plus de précision pour reproduire les mêmes mesures, et donc de retrouver les mêmes résultats.

L'ensemble des mesures conduisent à une valeur moyenne de la conductivité thermique pour l'échantillon T1.3M, qui est de (0,70 $\pm 0,10$) W/m.K. On a pu voir aussi que les interfaces thermiques ne changent pas en dureté Shore après les mesures de conductivité.

Quelques points peuvent être améliorés sur le banc de mesures, sans changement fondamental sur le fond, mais pouvant apporter notamment une plus grande précision sur les mesures (tels que l'isolation thermique du banc, l'utilisation d'un matériels plus précis, etc.) et réduire ainsi les incertitudes sur la résistance et la conductivité thermique.

Les résultats expérimentaux des neuf échantillons testés sont présentés dans le chapitre suivant, ainsi que le protocole et les résultats des tests d'irradiations aux rayons X et aux neutrons. Cela va nous permettre de faire le choix du matériau le plus résistant aux radiations et efficace en terme de transfert thermique, pour le refroidissement des cartes électroniques FE.

Chapitre 7

Caractérisation des interfaces thermiques

7.1 Introduction

Dans ce chapitre on va présenter les résultats expérimentaux obtenus lors de la caractérisation de la conductivité thermique pour les neuf échantillons testés, avec lesquels on va pouvoir comparer les valeurs entre celles obtenues et celles des spécifications techniques des fabricants.

Ensuite, on va exposer le protocole du déroulement des deux tests d'irradiations, aux rayons X et aux neutrons, qui se sont déroulés respectivement sur la plateforme PAVIRMA, au Campus des Cézeaux à Clermont-Ferrand, et à CHARM qui se trouve au CERN. Une présentation des deux sites est aussi donnée dans les paragraphes 7.3.1 et 7.3.3.

Les résultats des mesures de caractérisation de la conductivité thermique des neufs échantillons après les tests d'irradiations sont par la suite exposés, pour commencer celles exposés aux rayons X, qui ont été effectués dans le but d'analyser la réaction de ces matériaux face à des rayonnements aux photons à forte dose, vu que les tests ont été effectués à 500 Gy. Ainsi qu'aux rayonnements aux neutrons qui correspondent à l'environnement où se trouve l'expérience LHCb, dans lequel les cartes électroniques FE seront exposées durant plusieurs années avec une dose de 350 Gy.

Un comparatif final sera exposé à la fin de ce dernier chapitre, qui va permettre de définir l'interface thermique choisie pour ce projet et pour le refroidissement des cartes électroniques FE de l'expérience LHCb.

7.2 Observations et mesures sur les échantillons avant irradiations

Dans cette section, nous allons présenter les résultats expérimentaux obtenus lors de caractérisations thermiques des interfaces effectuées avec la méthode statique qui s'appuie sur la norme ASTM D5470.

Comme cité dans le chapitre précédent, avant d'effectuer les mesures, nous avons procédé aux mesures initiales de chaque pâte thermique au niveau de l'épaisseur et de la dureté Shore. Afin de comparer les différentes valeurs obtenues avec celles mesurées avant et après l'irradiation ainsi que celles du test de conductivité thermique.

a) Mesure de la dureté SHORE

La dureté est mesurée avant la réalisation des tests, cela va nous permettre de contrôler l'aspect mécanique des interfaces thermiques, avant et après les tests d'irradiation. Les mesures sont effectuées grâce à un duromètre qui mesure selon la norme ASTM D2240, la dureté Shore.

Les caractéristiques de la dureté d'un matériau se constatent à l'aide d'un appareil qui définit la résistance qu'oppose une surface de l'échantillon à la pénétration, de la bille ou la pointe d'un duromètre (Shore).

Dans notre cas, on possède un duromètre Shore mécanique avec aiguille témoin (figure 7.2.1), le cadran est gradué en degrés SHORE de 0 à 100, de mou à dur. Il possède une précision de $0,5$ unité de dureté, sur une plage de mesure comprise entre 10 et 90, et une limite d'erreur de $\pm 0,5$.

FIGURE 7.2.1 – Duromètre Shore 00.

Interface thermique	Valeur donnée Shore 00	Valeur mesurée Shore 00 avant caractérisation	Valeur mesurée Shore 00 après mesures de « λ »
HC 3.0	15	78	78
HC 5.0	30	76	76
T1.3M	25	40	40
T2.5G	50	58	58
T003 M	30	65	65
T4.5H	45	60	60
P.T013P	75	67	68
TH - 1851	25	67	68
TFLEX SF6	80	80	77

Table 7.1 – Valeurs données, et mesurées de la dureté Shore des ITs.

D'après le tableau 7.1, on remarque que les valeurs données par les fabricants sont bien différentes que celles mesurées avec le durométre Shore. On suppose que cette différence est dûe aux conditions dans lesquelles les mesures ont été effectuées (température ambiante, appareil de mesure, etc.).

b) Observations visuelles

Un contrôle visuel est fait avant les tests, qui va nous permettre de caractériser nos échantillons, et voir si un changement physique est effectué après les mesures de conductivité thermique. Dans le tableau 7.2, on retrouve les différentes observations notées après les mesures de caractérisation de la conductivité thermique des interfaces.

.

Interface thermique	Observations après mesures de « λ »
HC 3.0	- Pas de graisse - Colle bien - Revient vite à son état initial
HC 5.0	- Pas de graisse - Se frite - Se déchire
T1.3M	- Pas de graisse - Colle bien - Très souple
T2.5G	- Pas de graisse - Colle bien - Souple
T003 M	- Pas de graisse - Colle bien - Revient vite à son état initial - Souple
T4.5H	- Pas de graisse - Colle bien - Très souple
T013P Putty	- Pas de graisse - Laisse un film « gris » sur le bloc d'aluminium - Pas souple - Apparition de craquelures
TH - 1851	- Pas de graisse - Colle trop - Extrêmement souple (se déchire facilement)
TFLEX SF6	- Pas de graisse - Ne colle pas bien - Pas souple - Se déchire facilement

TABLE 7.2 – Observations visuelles des interfaces thermiques.

c) Mesure de la conductivité thermique

c - 1) Mesure de l'épaisseur des interfaces thermiques

La détermination de la conductivité thermique passe par une mesure de l'épaisseur (cf. Eq. 5.4.5). La valeur de l'épaisseur de l'interface thermique qui devrait être prise en compte, est celle obtenue lors de l'injection de puissance.

Dans le tableau 7.3, on retrouve l'épaisseur des interfaces thermiques donnée par les fabricants, celle mesurée à température ambiante grâce à une colonne de mesure type Digimar 817 CLM de la marque Mahr qui possède une limite d'erreur à $20°C$, selon DIN 876/0 de ($1,8\ \mu m + L/600\ \mu$m, L en mm) si les mesures sont faites à une longueur de course de 600 mm, ce qui n'est pas notre cas, donc l'erreur sur l'épaisseur est négligeable sur cette mesure. Ainsi que celle mesurée avec le comparateur sous pression lorsque le banc est en arrêt, et celle qu'on retrouve grâce à la méthode expliquée précédemment dans la section 6.3.2, qui prend en compte l'épaisseur de l'échantillon lors de la caractérisation thermique (en chauffe).

Interface thermique	Valeur donnée (mm)	Valeur mesurée à vide (mm)	Valeur mesurée sous pression du banc (mm) « Ep sous pression »	Valeur déduite sous pression du banc et en chauffe (mm)
HC 3.0	1	0,99	0,98	0,9623
HC 5.0	1	1,08	0,97	0,9594
T1.3M	2	1,90	1,80	1,7824
T2.5G	2	1,95	1,86	1,8400
T003 M	2	2,03	1,99	1,9699
T4.5H	2	2,07	1,98	1,9609
P.T013P	2	1,88	1,97	1,9629
TH - 1851	1	0,87	0,97	0,9549
TFLEX SF6	1	1,06	0,98	0,9617

Table 7.3 – Valeurs données, et mesurées de l'épaisseur des ITs.

c - 2) Caractérisation d'un panel d'interfaces thermiques

Pour le projet LHCb Upgrade, et pour sélectionner l'interface thermique dédiée à la tenue d'irradiation dans laquelle elle sera exposée, nous avons caractérisé un

ensemble d'interfaces thermiques compatibles aux critères du projet, c'est-à-dire, qu'elles soient spécialement de nature élastomère et élastique de préférence. Les interfaces, dont les caractérisations sont réalisées en utilisant la méthode décrite précédemment, sont répertoriées ci-dessous :

— Élastomère Gap Pad HC3.0 et HC5.0, de chez Bergquist,
— Élastomère Pad T1.3M, T2.5G, T4.5H, de chez Compelma,
— Élastomère élastique T003M et Pad Putty T013, de chez Compelma,
— Élastomère Pad TH-1851, de chez Stacem,
— Élastomère TFLEX SF640DF, de chez Laid Technologies.

Dans les figures 7.2.3, 7.2.4 et 7.2.5, on peut voir la distribution de température pour les neuf échantillons testés avant irradiations. Le tableau 7.4, représente les différents résultats obtenus pour la caractérisation de la conductivité thermique des échantillons.

Le tableau 7.5 donne les incertitudes de chaque grandeur mesurée.

Dans le la figure 7.2.2, on a l'histogramme qui représente le rapport entre les valeurs mesurées lors de la caractérisation de la conductivité thermique et celles données par le fabricant.

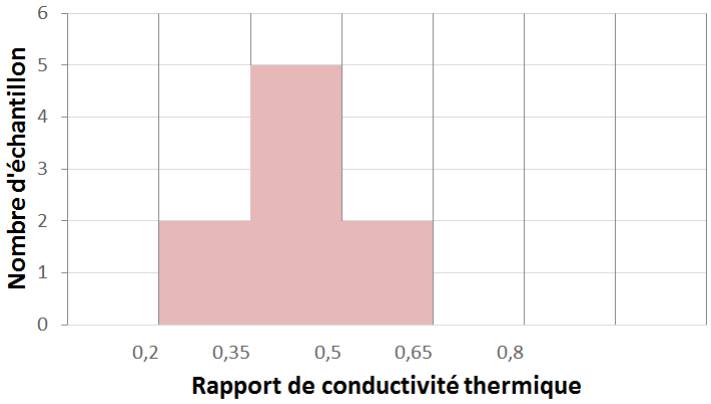


FIGURE 7.2.2 – Histogramme pour le rapport entre la conductivité mesurée et celle donnée par le fabricant.

D'après cet histogramme, on remarque que le rapport le plus haut est celui de l'interface thermique T4.5H, qui représente une grande différence entre la valeur donnée par les fabricants et celle mesurée. La plus part des interfaces thermiques se trouvent dans une intervalle entre 0,35 et 0,5. Les interfaces thermiques qui possèdent le plus faible rapport sont celles de Bergquist.

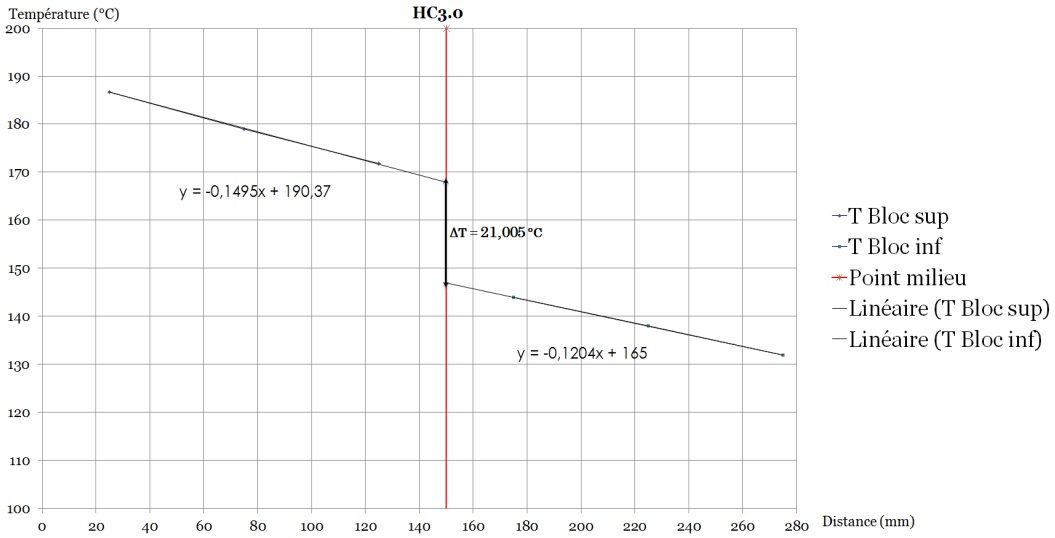
	HC3.0	HC5.0	T1.3M[1]	T2.5G	T003M	T4.5H	Putty T013	TH-1851	TFLEX
λ_{int} fabricant (W/m.K)	3	5	1,3	2,5	3	4,5	13	3	3
ΔT_{int} (°C)	21	13,94	-	21,92	27,82	14,35	6,19	13,35	15,82
λ_{int} (W/m.K)	0,83	1,40	0,70	1,21	1,25	2,87	5,55	1,23	1,09
Incertitude sur λ_{int} (W/m.K)	0,18	0,30	0,10	0,15	0,16	0,37	0,97	0,28	0,24
λ_{int} mesuré $/\lambda_{int}$ fabricant	0,27	0,28	0,54	0,48	0,42	0,62	0,39	0,41	0,36
Erreur λ_{int} mesuré $/\lambda_{int}$ fabricant	0,060	0,061	0,069	0,063	0,054	0,083	0,071	0,093	0,080

T1.3M[1] : Les valeurs de l'échantillon T1.3M représenté dans le tableau sont la moyenne de la conductivité thermique et de l'incertitude trouvée pour cet échantillon.

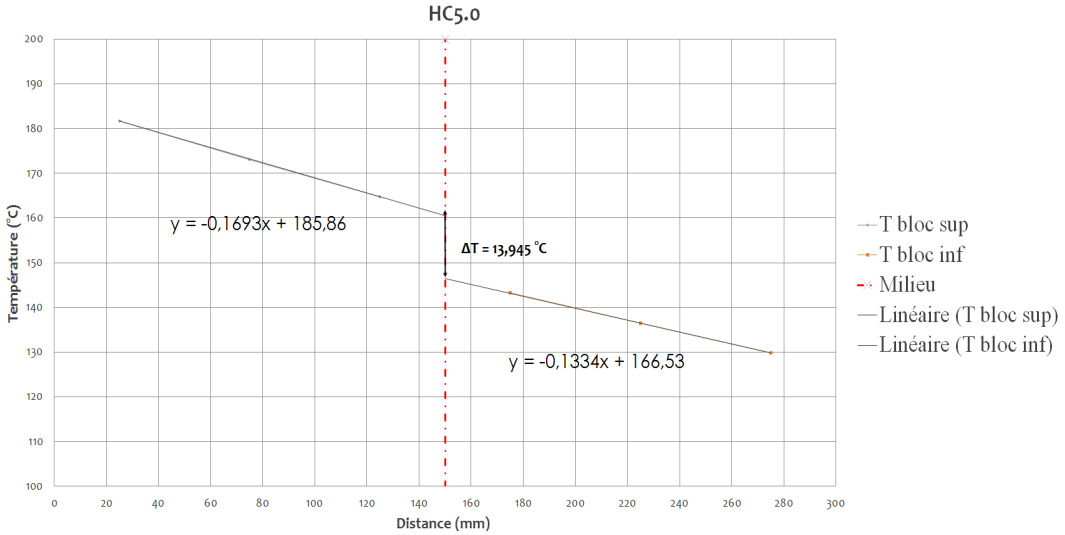
Table 7.4 – Résultats obtenus de la caractérisation thermique des neuf interfaces thermiques.

sources d'incertitudes	HC3.0	HC5.0	T1.3M	T2.5G	T003M	T4.5H	Putty T013	TH-1851	TFLEX
$\delta\, Epaisseur$ (mm)	0,168	0,286	-	0,129	0,125	0,280	0,509	0,252	0,228
$\delta\, Flux$ (W)	0,061	0,060	-	0,075	0,094	0,177	0,381	0,093	0,078
$\delta \triangle T$	0,036	0,091	-	0,052	0,041	0,174	0,672	0,081	0,058
Incertitude totale	0,18	0,31	0,10	0,16	0,16	0,38	0,98	0,28	0,24

Table 7.5 – Incertitudes sur les paramètres mesurées.

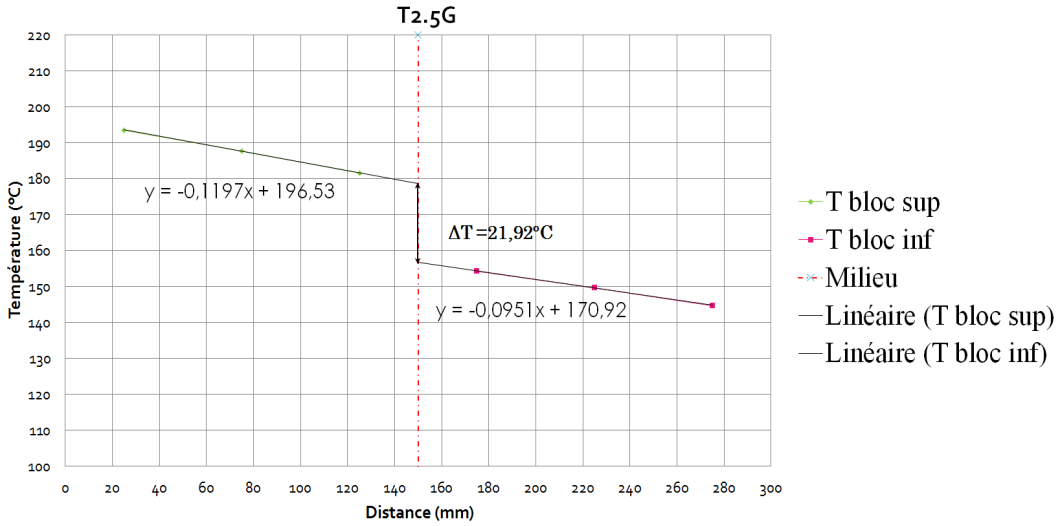


(a) HC 3.0

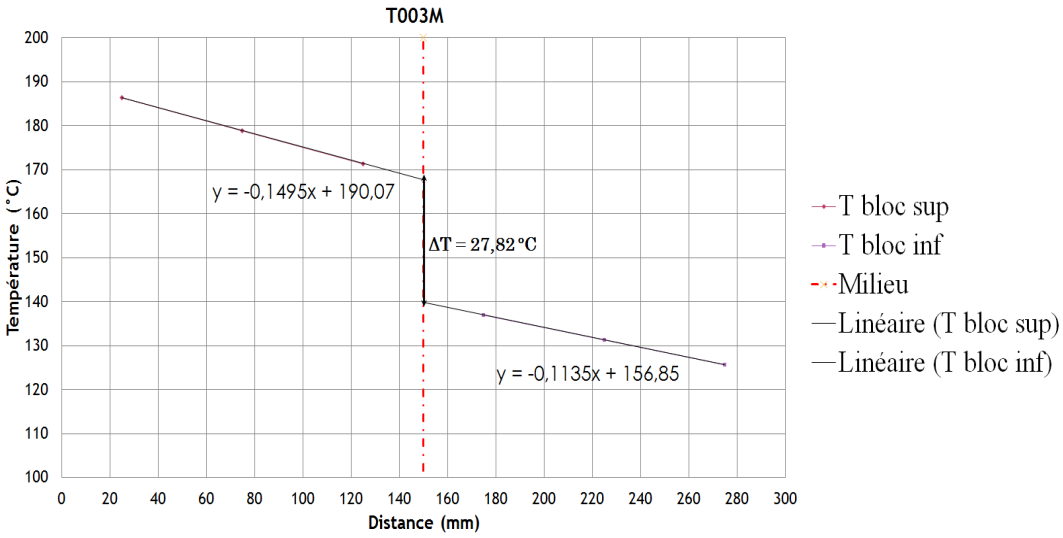


(b) HC 5.0

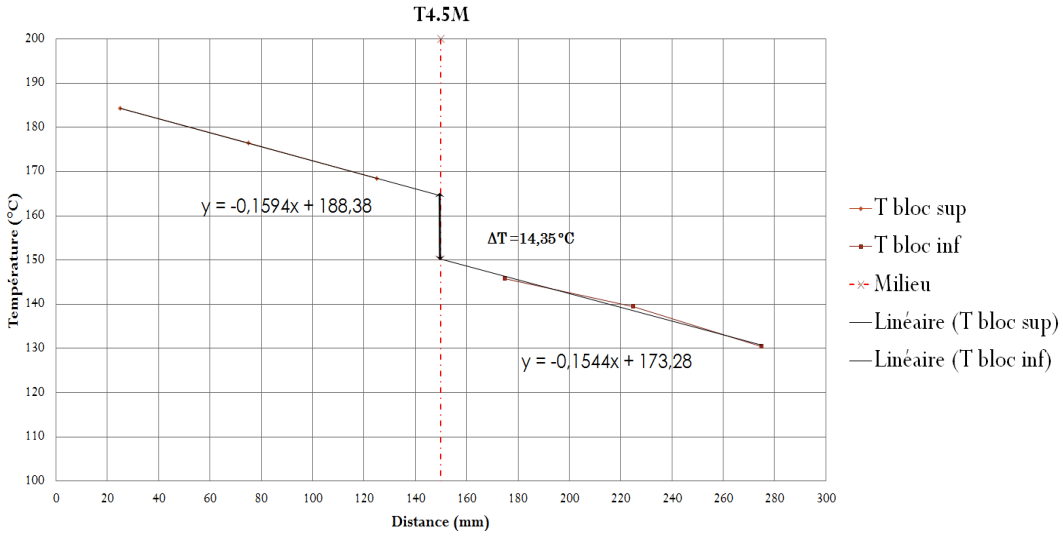
FIGURE 7.2.3 – Distribution de température des échantillons HC3.0 et HC5.0 testés lors de la caractérisation thermique avant tests d'irradiations.



(a) T2.5G

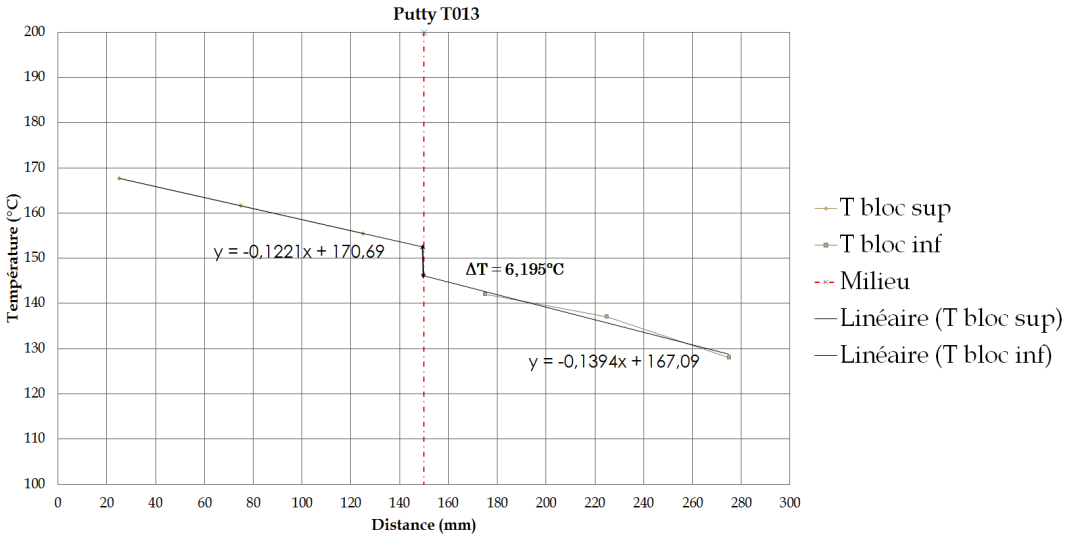


(b) T003M

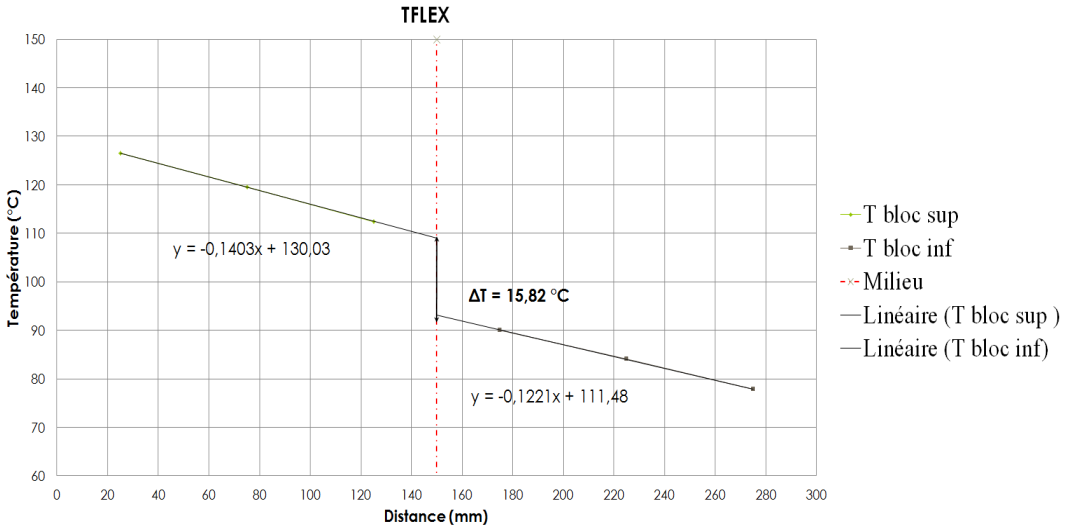


(c) T4.5M

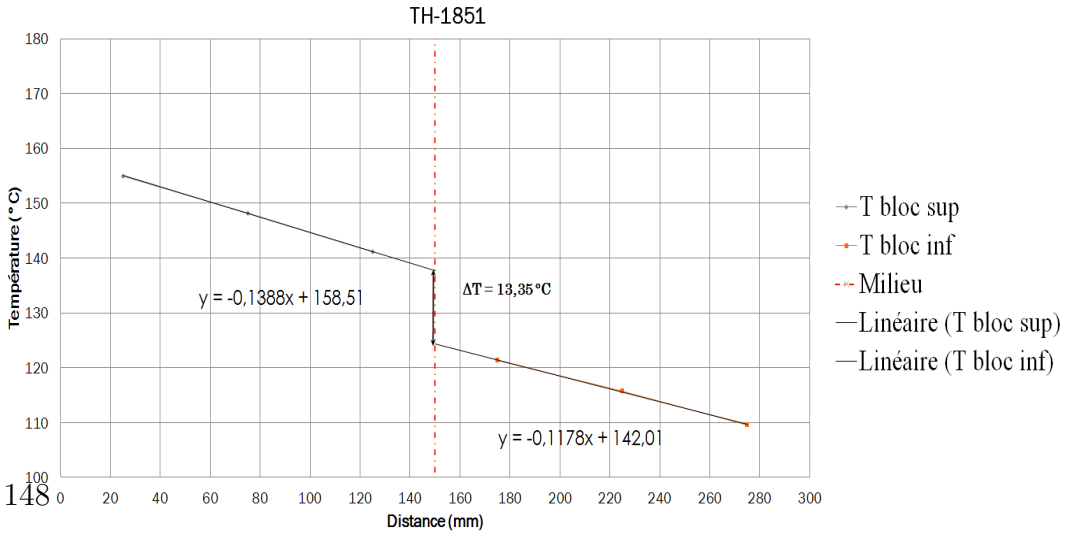
FIGURE 7.2.4 – Distribution de température des échantillons T2.5G, T003M et T4.5M testés lors de la caractérisation thermique avant tests d'irradiations.



(a) Putty T013



(b) TFLEX



(c) TH-1851

FIGURE 7.2.5 – Distribution de température des échantillons Putty T013, TFLEX et TH-1851 testés lors de la caractérisation thermique avant tests d'irradiations.

7.3 Protocole d'irradiation des interfaces et résultats de caractérisations obtenus

Après avoir effectué les différentes mesures de conductivité thermique, la prochaine étape consiste à faire irradier ces interfaces thermiques pour les plonger dans l'environnement dans lequel elles vont être confrontées lors de l'expérience LHCb dans le but de choisir l'interface thermique la plus adaptée pour ce genre de contrainte et qui résistera le mieux tout le long de l'expérience.

7.3.1 Conditions d'irradiation aux rayons X

Présentation du plateau technique PAVIRMA

PAVIRMA est un plateau technique qui se trouve au sein de l'université de Clermont et qui permet de faire des tests d'irradiations de certaines particules. Il est équipé d'un irradiateur à rayons X opérationnel, comprenant également les équipements d'un laboratoire de biologie dont la longueur des ondes est comprise entre 0,001 et 10 nanomètre (10^{-12} et 10^{-8}m).

Ces applications correspondent à plusieurs domaines d'études, tels que d'irradier des échantillons biologiques (cellules cancéreuses, bactérie, végétaux, animaux,...), ou autre préparation biologiques (alimentaires, pharmaceutiques,...), ainsi qu'a des échantillons non biologiques, tels que les polymères, et les composants électroniques.

Équipement

la plate-forme PAVIRMA se compose d'un irradiateur X de $0,1$ Gy à 300 Gy qui représente une chambre d'irradiation de 40×40 cm comme on peut le voir dans la figure 7.3.1. On trouve aussi une hotte à flux laminaire, un incubateur thermostaté à injection de CO2, une centrifugeuse réfrigérée, un microscope direct et microscope inversé, ainsi qu'un bloc froid [35].

FIGURE 7.3.1 – Irradiateur à rayons X de la plate-forme PAVIRMA.

Test des interfaces thermiques aux rayons X

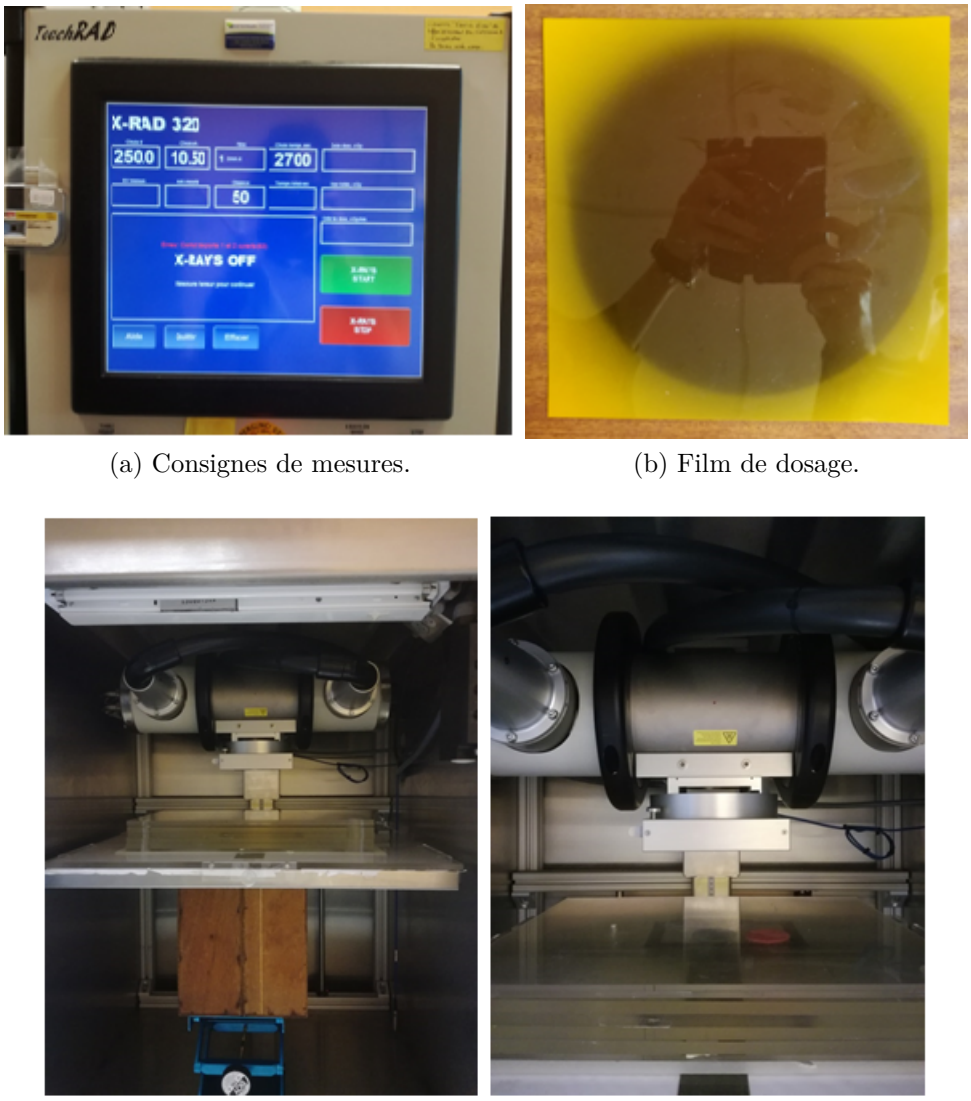
L'irradiation des interfaces thermiques aux rayons X a été faite dans le but d'évaluer des éventuelles dégradations sur ces dernières. Vu que les interfaces thermiques vont être exposés dans un milieu radioactif composé de plusieurs particules (destructrices ou pas), la première accessibilité à un faisceau de particule a été saisie. Les paramètres du test sont :

- Doses : 500 Grays.
- Durée : 45 min /test.
- Nombre de tests : 3.
- Zone de diamétre uniforme est égale à 12 cm.
- Donc on a la possibilité d'irradier 4 pastilles à la fois en rajoutant une plaque de PMMA au-dessus des échantillons, afin d'obtenir l'équilibre électronique, c'est-à-dire, une égalité entre l'énergie cinétique déposée par unité de masse « ou KERMA », et la dose absorbée [37].

Les consignes sont :

- Tension = 205 kV.
- Intensité du courant = $10,50$ mA.
- Distance entre les plaques et le faisceau de projection de 24 mm.

— Une plaque de 1 mm pour uniformiser la projection.
— Temps 2700 sec = 45 min.



(a) Consignes de mesures.

(b) Film de dosage.

FIGURE 7.3.2 – Faisceau d'irradiation aux rayons X de PAVIRMA.

7.3.2 Résultats et observations après irradiation aux rayons X

Une deuxième série de mesures est effectuée après les tests d'irradiations aux rayons X. Ces mesures vont nous permettre de comparer les résultats obtenus avant et après irradiation, afin d'identifier l'interface thermique la mieux adaptée pour notre application.

a) Mesures dureté SHORE

Comme effectuée avant irradiation, on refait des mesures de dureté Shore pour vérifier un éventuelle changement. Dans le tableau 7.6, on trouve les mesures de la dureté Shore après irradiations des échantillons.

Interface thermique	Valeur donnée Shore 00	Valeur mesurée Shore 00 avant caractérisation	Valeur Mesurée Shore 00 après irradiations aux RX
HC 3.0	15	78	80
HC 5.0	30	76	76
T1.3M	25	40	40
T2.5G	50	58	62
T003 M	30	65	62
T4.5H	45	60	60
P.T013P	75	67	75
TH - 1851	25	67	63
TFLEX SF6	80	80	73

Table 7.6 – Valeurs données, et mesurées de la dureté Shore des ITs, ainsi que celles mesurées avant et après irradiations aux rayons X.

b) Observations visuelles

Comme pour les premières mesures, nous avons effectué un contrôle visuel avant les tests. Pour cette deuxième série de mesure, nous avons remarqué les même observations que celles effectuées pour la première série de mesures qu'on peut retrouver dans le tableau 7.2.

c) Conductivité thermique

c - 1) Épaisseur des échantillons

On refait les mesures de l'épaisseur de chaque échantillon après les tests d'irradiations aux rayons X afin de pouvoir déterminer la conductivité thermique. Dans le tableau 7.7, on retrouve l'épaisseur mesurée des interfaces thermiques après irradiations ainsi que les valeurs précédentes (avant irradiations). Ces mesures sont effectuées à température ambiante avec la colonne de mesure.

Interface thermique	Valeur donnée (mm)	Valeur mesurée à vide (mm)	Valeur mesurée sous pression du banc (mm) « Ep sous pression »	Valeur déduite sous pression du banc et en chauffe (mm)
HC 3.0	1	0,99	0,92	0,8825
HC 5.0	1	1,08	0,95	0,7021
T1.3M	2	1,90	1,78	1,6700
T2.5G	2	1,95	1,84	1,7041
T003 M	2	2,03	1,97	1,8134
T4.5H	2	2,07	1,98	1,7422
P.T013P	2	1,88	1,96	1,7416
TH - 1851	1	0,87	0,97	0,9200
TFLEX SF6	1	1,06	0,96	0,7706

Table 7.7 – Valeurs données, et mesurées de l'épaisseur des ITs après irradiations aux rayons X.

c - 2) Caractérisation d'un panel d'interfaces thermiques

Dans les figures 7.3.4, 7.3.5 et 7.3.6, on peut voir la distribution de températures pour les neuf échantillons testés après irradiations. Le tableau 7.8, représente les différents résultats obtenus. Le tableau 7.9, les incertitudes de chaque grandeur mesurée.

	HC3.0	HC5.0	T1.3M	T2.5G	T003M	T4.5H	Putty T013	TH-1851	TFLEX
λ_{int} fabricant (W/m.K)	3	5	1,3	2,5	3	4,5	13	3	3
ΔT_{int}après RX (°C)	17,72	8,80	35,17	22,95	24,67	6,28	18,15	13,21	12,26
λ_{int}après RX (W/m.K)	0,81	1,36	0,70	1,10	1,20	2,92	1,26	0,20	1,05
Incertit-sur λ_{int}après RX (W/m.K)	0,19	0,33	0,10	0,16	0,16	0,48	0,19	0,27	0,25
λ_{int}après /λ_{int}avant RX	0,99	0,97	1,00	0,91	0,95	1,00	0,25	0,97	1,00
Erreur λ_{int}après /λ_{int}avant RX	0,13	0,15	0,11	0,10	0,12	0,17	0,05	0,14	0,14

TABLE 7.8 – Résultats obtenus de la caractérisation thermique après irradiations aux rayons X des neuf interfaces thermiques.

sources d'incertitudes	HC3.0	HC5.0	T1.3M	T2.5G	T003M	T4.5H	Putty T013	TH-1851	TFLEX
$\delta\, Epaisseur$ (mm)	0,176	0,284	0,078	0,119	0,121	0,279	0,128	0,244	0,222
$\delta\, Flux$ (W)	0,065	0,104	0,062	0,098	0,096	0,157	0,130	0,090	0,078
$\delta \triangle T$	0,040	0,137	0,017	0,043	0,043	0,364	0,066	0,078	0,058
Incertitude totale	0,192	0,333	0,101	0,161	0,160	0,485	0,195	0,272	0,247

TABLE 7.9 – Incertitudes sur les paramètres mesurées pour les tests après irradiation.

Dans la figure 7.3.3, on a l'histogramme qui représente le rapport entre les valeurs mesurées lors de la caractérisation de la conductivité thermique et celles mesurées après exposition aux rayons X.

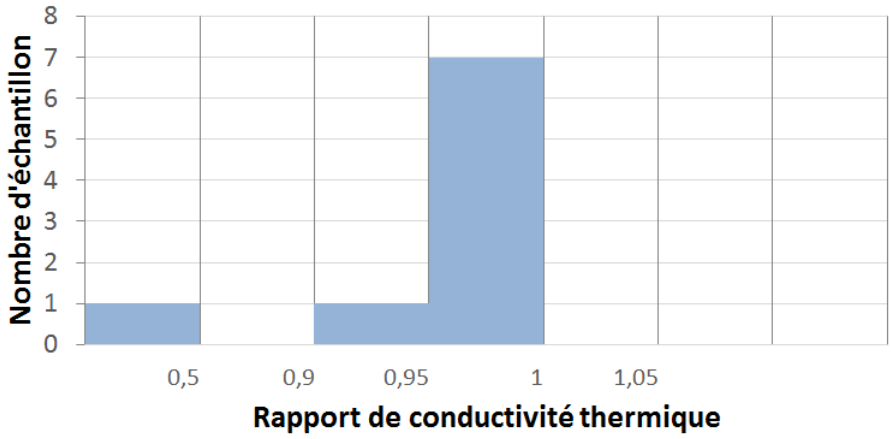
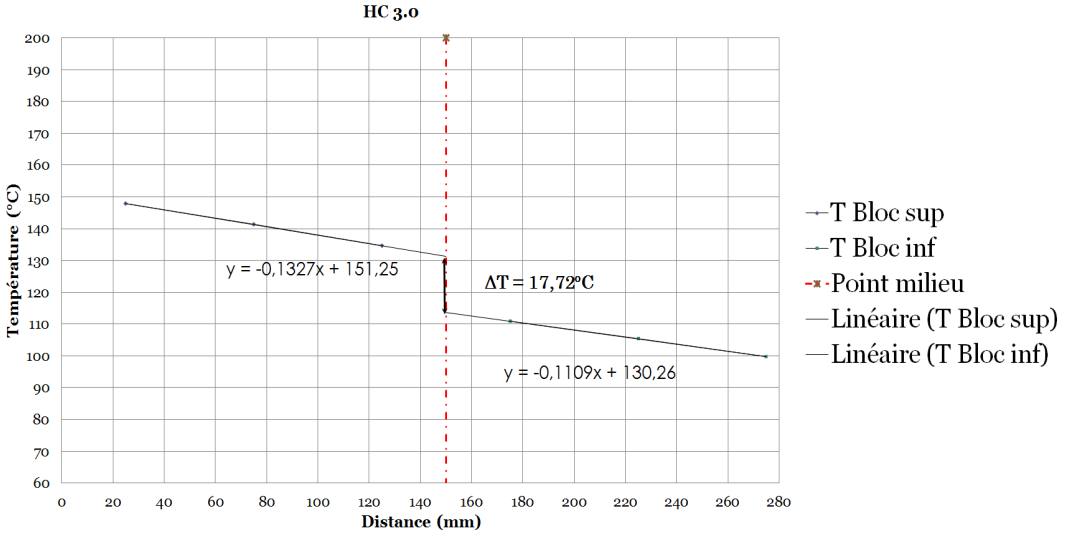
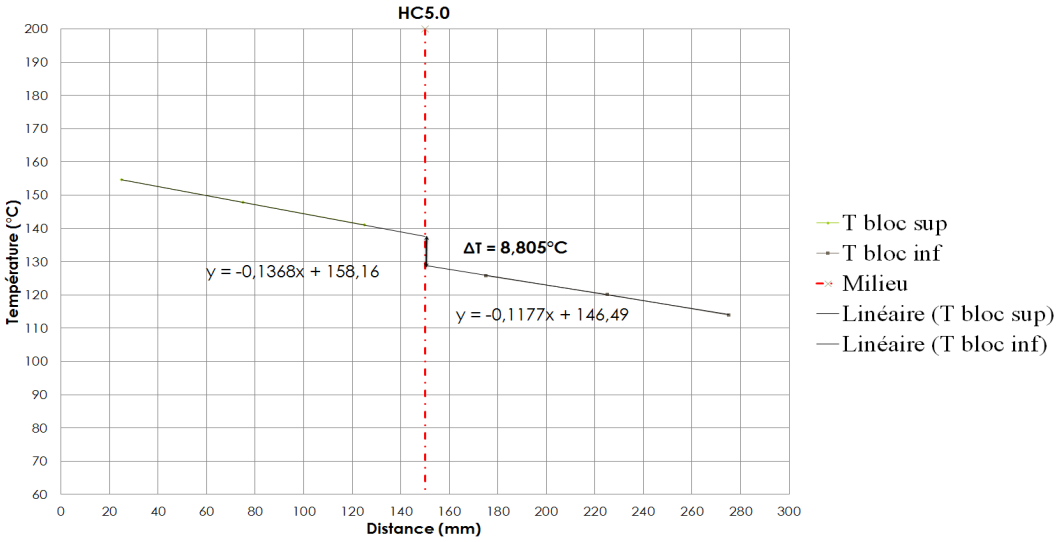


FIGURE 7.3.3 – Histogramme pour le rapport entre la conductivité mesurée après et avant irradiation.

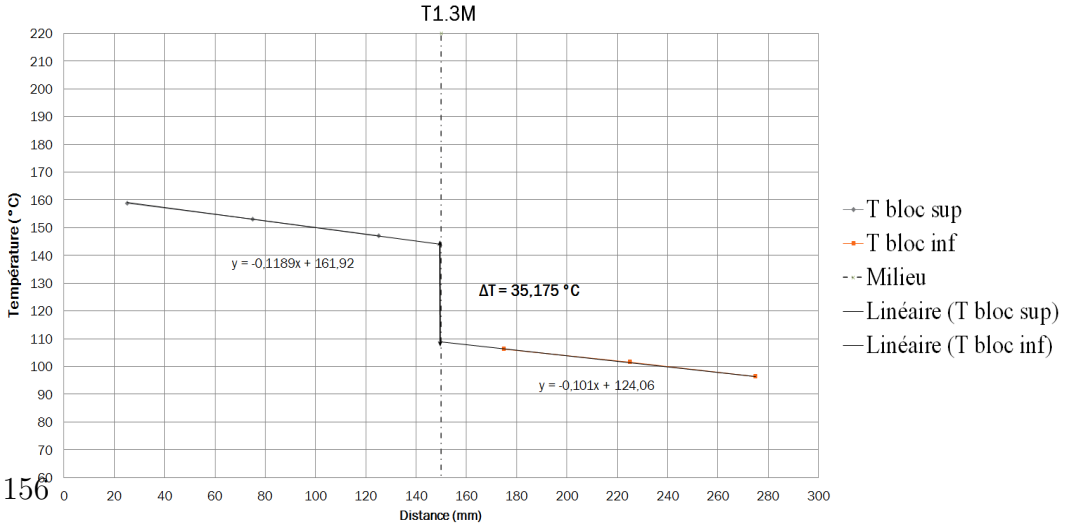
D'après cet histogramme, on remarque que les valeurs de conductivité thermique sont très proches avant et après exposition aux rayons X. On peut en déduire que le rayonnement n'affecte pas la conductivité thermique de la plupart des échantillons. Ceci n'est pas le cas pour l'interface thermique Putty T013 qui est d'une composition différente et qui représente une grande différence entre la valeur mesurée avant et après irradiation, c'est l'interface qui a subi le plus d'endommagement face aux rayonnements.



(a) HC 3.0 après RX.

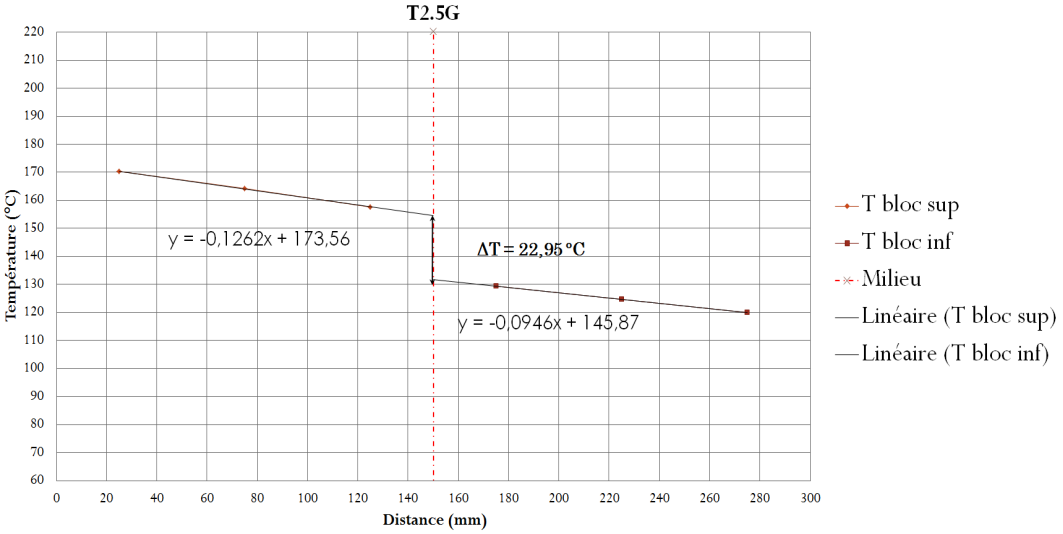


(b) HC 5.0 après RX.

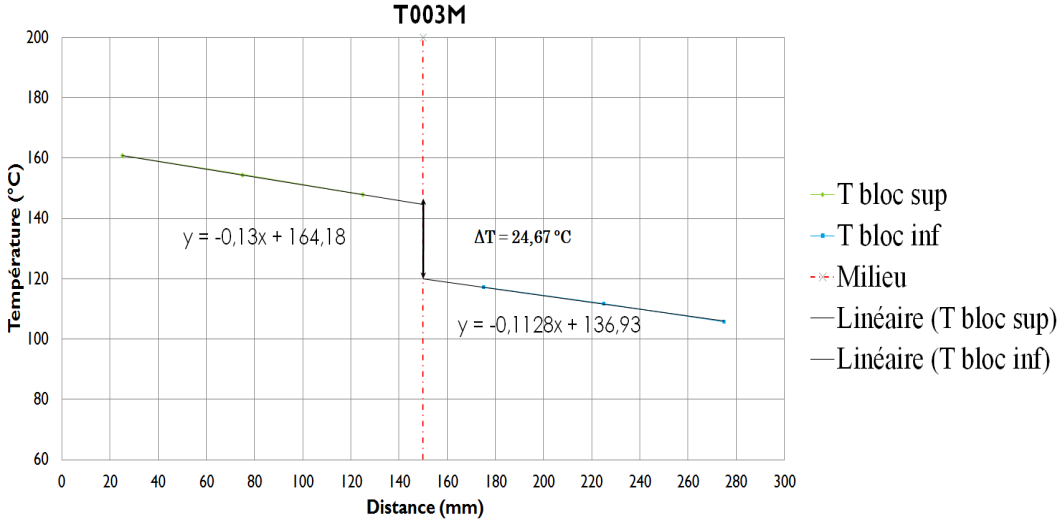


(c) T1.3M après RX.

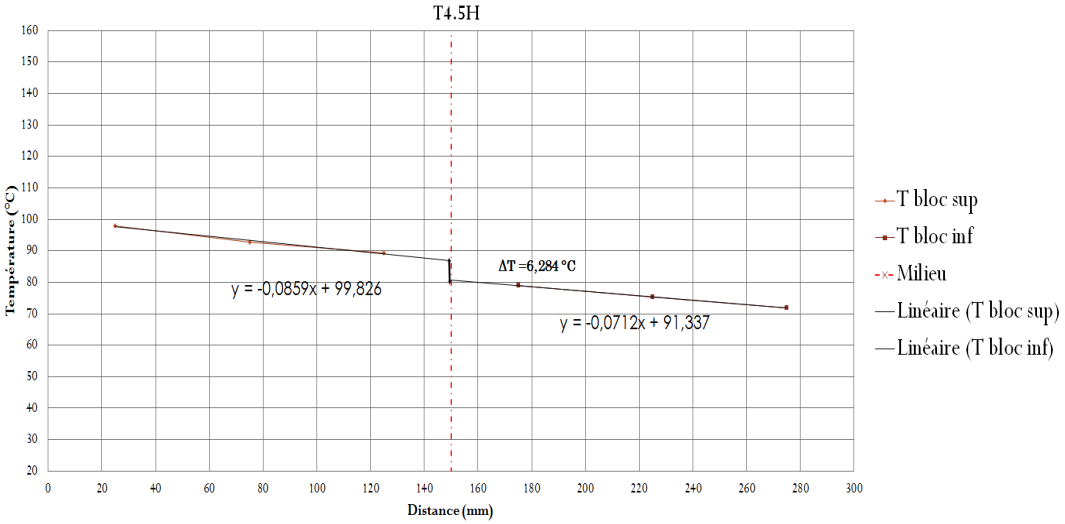
FIGURE 7.3.4 – Distribution de température des échantillons HC3.0, HC 5.0 et T1.3M testés lors de la caractérisation thermique après test d'irradiations aux rayon X.



(a) T2.5G après RX.

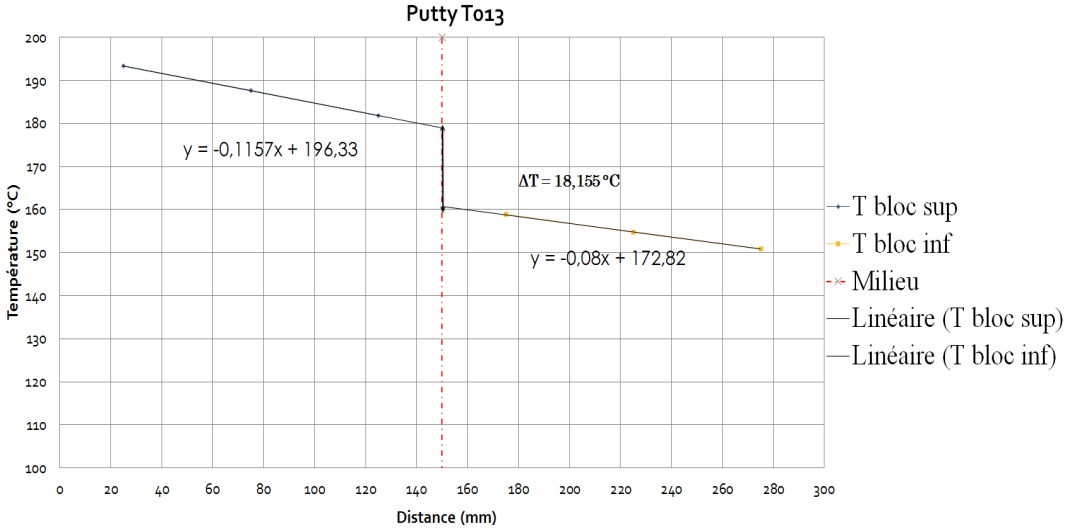


(b) T003M après RX.

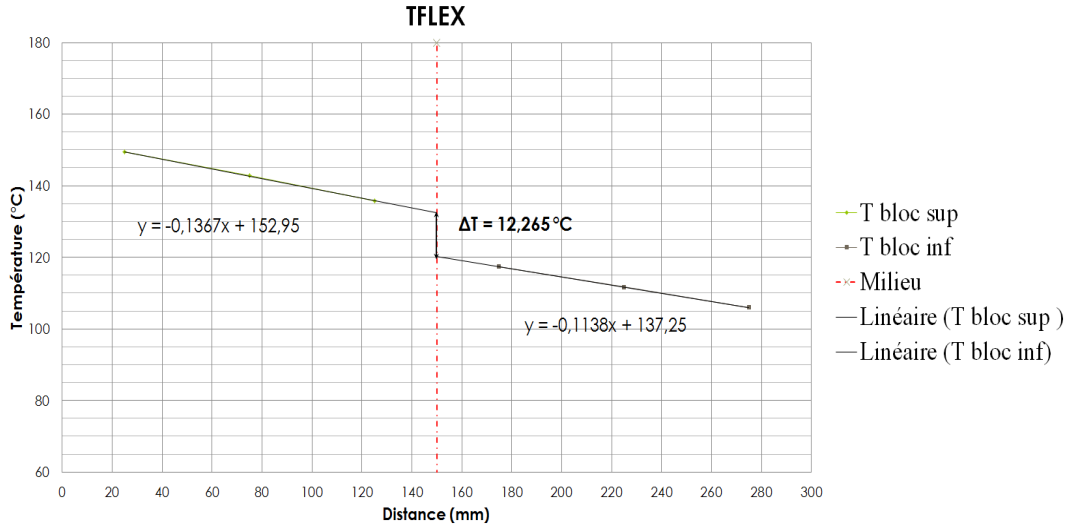


(c) T4.5H après RX.

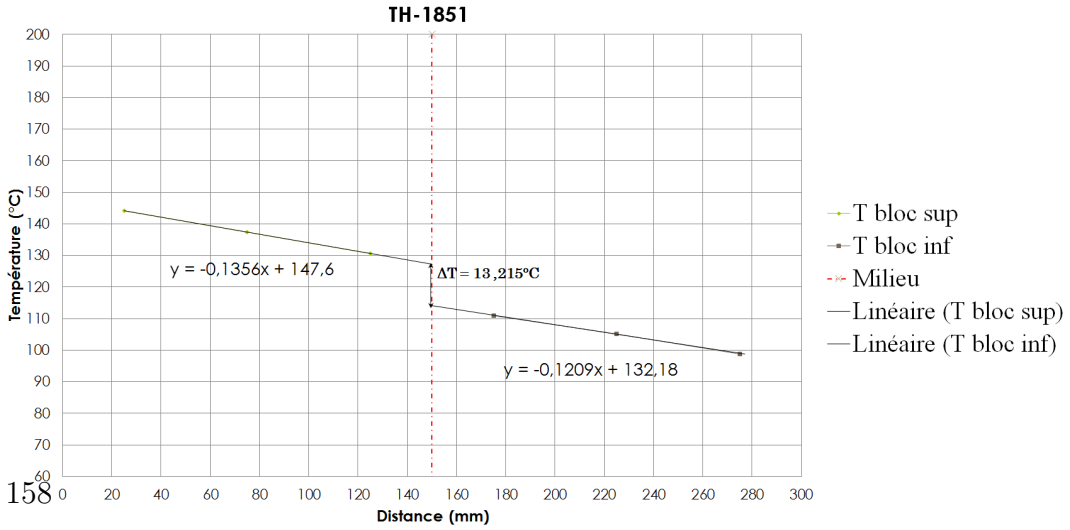
FIGURE 7.3.5 – Distribution de température des échantillons T2.5G, T003M et T4.5H testés lors de la caractérisation thermique après test d'irradiations aux rayon X.



(a) Putty T013 après RX.



(b) TFLEX après RX.



(c) TH-1851 après RX.

FIGURE 7.3.6 – Distribution de température des échantillons Putty T013, TFLEX et TH-1851 testés lors de la caractérisation thermique après test d'irradiations aux rayon X.

Observations entre avant et après tests d'irradiation aux rayons X

- Pas de graisse sur les interfaces thermiques,
- Dureté Shore00 inchangé après l'irradiation aux rayons X par rapport aux mesures initiales, par contre elles sont différentes des valeurs données par les fabricants.
- La conductivité thermique mesurée est inférieure aux valeurs données par les fabricants,
- Pas de dégradation de la conductivité thermique après irradiation aux rayons X pour les interfaces élastiques,
- Dégradation de l'interface Putty T013 au niveau de la conductivité thermique, qui était d'environ 8 W/m.K avant irradiations, contre une valeur d'environ 2 W/m.K. Ce changement est dû à un nombre infini d'interaction entre les différents composants, une centaine de combinaison possible chimiquement peut être la cause de cette détérioration qu'on pourra malheureusement pas résoudre. Elle s'est aussi dégradée au niveau de la dureté et de l'aspect physique, elle est devenue rigide, sans flexibilité et souplesse, et complètement cassante.

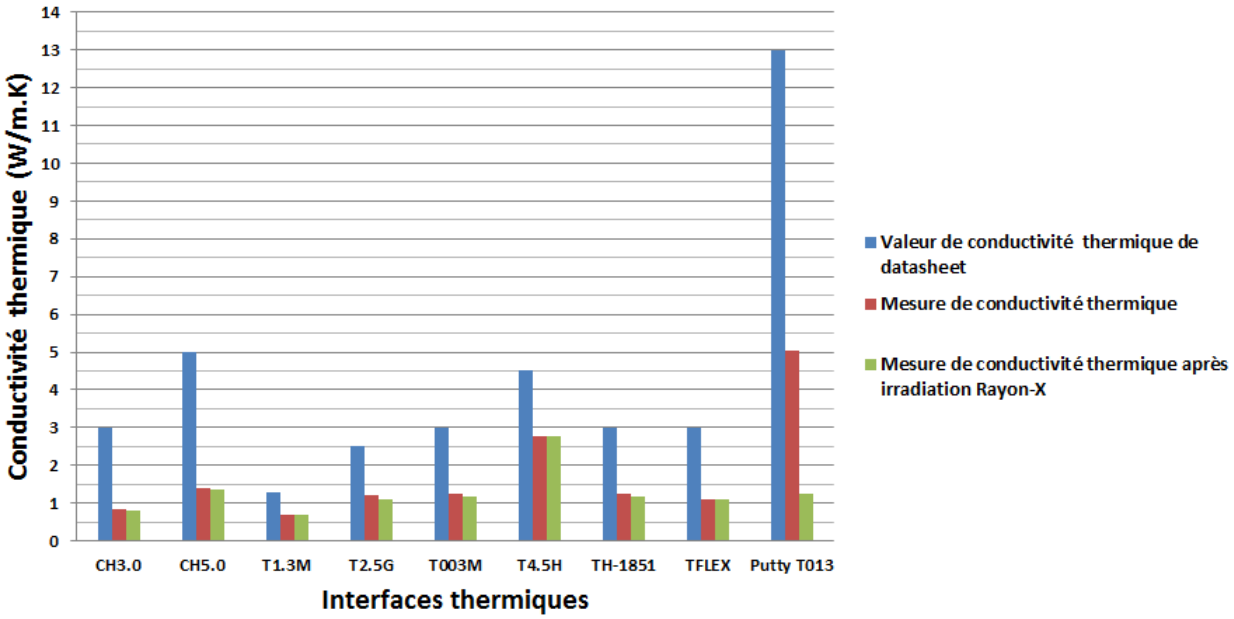


FIGURE 7.3.7 – Histogramme des différents résultats obtenus lors de la caractérisation de la conductivité thermiques des échantillons testées.

7.3.3 Conditions d'irradiation aux neutrons

FIGURE 7.3.8 – Cern High-energy AcceleRator test facility (CHARM).

Les tests d'irradiations aux neutrons ont été effectués au CERN grâce à l'installation CHARM, qu'on peut voir sur la figure 7.3.8.

CHARM (**C**ern **H**igh-energy **A**ccele**R**ator test facility), est une installation de tests de rayonnements au CERN née dans le cadre du projet R2E (**R**adiation to **E**lectronics). Située dans la région Est du CERN, CHARM fournit aux équipes un lieu pour tester leur équipement dans des environnements à rayonnements similaires à ceux de LHC. Le champ de rayonnement est généré par l'interaction d'un faisceau de protons de 24 GeV/c contre une cible métallique fixe (tampon en cuivre ou en aluminium). L'environnement appelé « champ-mixte » qui le compose, ressemble à celui qui se trouve à proximité de l'accélérateur à haute énergie (LHC) et peut être adapté aux conditions d'application en sélectionnant différentes configurations de test (plus de 140 configurations possibles)[36, 38, 39].

Test des interfaces thermiques aux neutrons

L'irradiation des interfaces thermiques aux neutrons a été faite dans le but de déterminer d'éventuelles dégradations, vu qu'elles vont être exposées à l'environnement radioactif de LHCb. Les paramètres du test sont regroupés dans le tableau 7.10.

Les spectres de léthargie des particules obtenus par la simulation FLUKA sont présentés ci-dessous, cela concerne la configuration CuOOOO testée dans la position 10 (figure 7.3.9).

Séance d'irradiation	2
Dose/séance (Gy)	100 Gy
Cible	Cuivre (CU OOOO)
Blindage	Sans

TABLE 7.10 – Paramètres du test d'irradiation aux neutrons des interfaces thermiques.

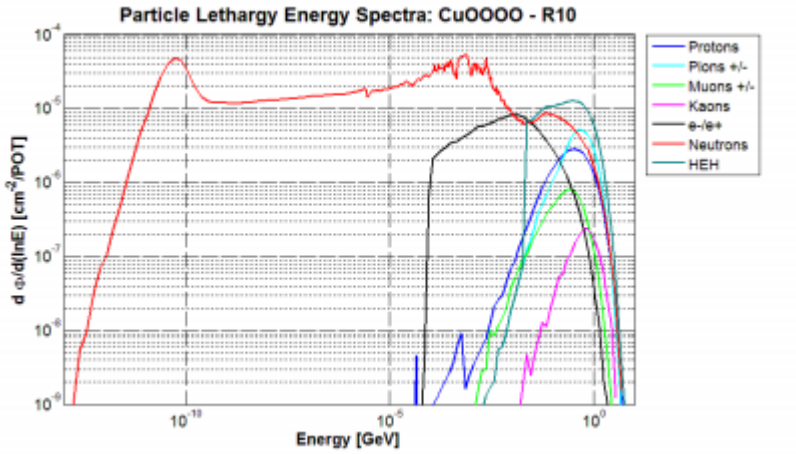


FIGURE 7.3.9 – Courbes FLUKA des tests d'irradiations pour la configuration CuOOOO.

Équipement et installation

Une image des échantillons testés à CHARM, installés sur le rack, est indiquée ci-dessous à la figure 7.3.10. Au cours des essais I et II, deux utilisateurs différents ont été testés en position 10. Les échantillons LHCb sont placés sur le RACK numéro 2 (comme indiqué sur la figure 7.3.10).

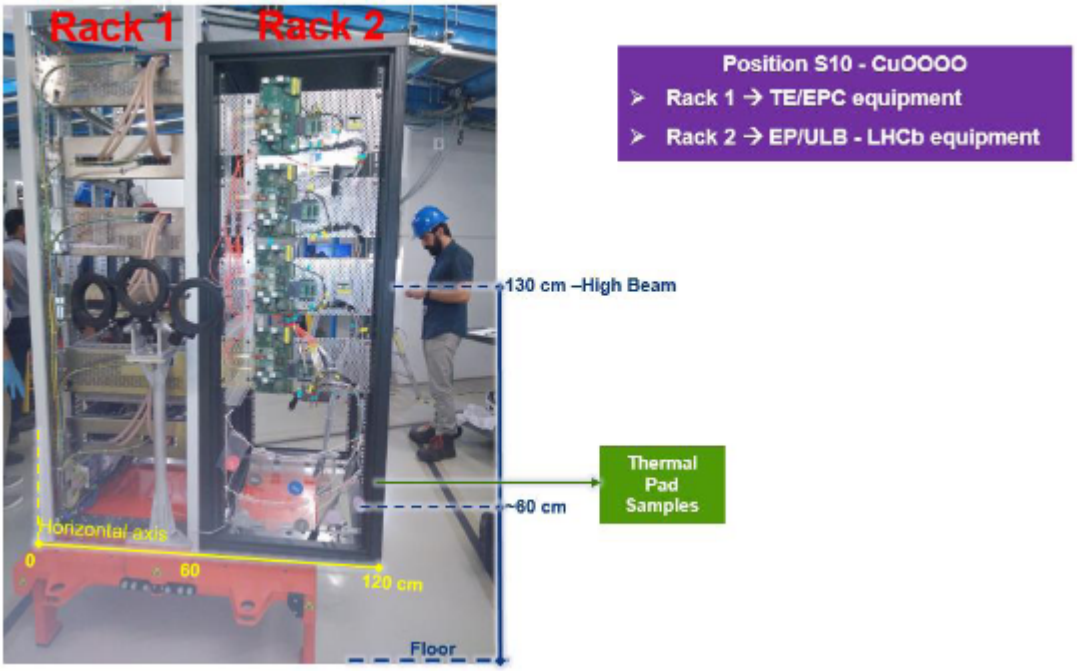


FIGURE 7.3.10 – Installation des interfaces thermiques pour les tests d'irradiations à CHARM.

Niveau de rayonnement délivré

L'évaluation de la dose et de la fluidité est obtenue par un étalonnage détaillé effectué par l'équipe CHARM en utilisant le système Radmon [40]. De plus, afin de vérifier les mesures d'étalonnage, lorsque cela est possible, la dose et les fluences sur l'équipement de l'utilisateur sont surveillées au cours de l'essai.

Le gradient de niveaux de rayonnement sur l'axe vertical du rack a été évalué pendant la course d'étalonnage et aucune différence significative n'a été observée.

Le tableau 7.11 suivant indique les niveaux de rayonnement atteints lors des deux séances d'irradiation :

Position R10 - CuOOOO		
Radiation Level	Run I	Run II
	Target inside 02-08-2017 14:40	Target inside 09-08-2017 17:08
	Target removed 07-08-2017 15:42	Target removed 15-08-2017 09:21
Dose (Gy)	143.7	199.0
1MeV eq. fluence (cm^{-2})	1.40E+12	1.94E+12
HEH fluence (cm^{-2})	4.47E+11	6.18E11
R factor	0.69	0.69
Total POT*	1.20E+16	1.66E+16

*POT is the total number of protons hitting the target.
** No gradient is observed on the side A of the rack.

Table 7.11 – Niveau de rayonnement délivré pour les interfaces thermiques à CHARM.

Une incertitude globale de 35% est estimée en tenant compte de l'erreur résultant des incertitudes de la dosimétrie de la SEC (chambre d'émission secondaire) et du Radiomètre.

7.3.4 Résultats et observations après irradiations aux neutrons

Une troisième série de mesures est effectuée après les tests d'irradiations aux neutrons. Ces mesures vont nous permettre de comparer les résultats obtenus avant et après irradiations, et définir l'interface thermique qui résistera le mieux dans l'environnement de l'expérience LHCb.

a) Mesures dureté SHORE

Pour cette nouvelle séries de mesures effectuées après les tests d'irradiations aux neutrons, on ne remarque aucun changement du côté de la dureté Shore des interfaces thermiques, à part des valeurs complètement différente que celles données par les fabricants on peut dire que la dureté n'est pas affecté par l'irradiation.

b) Observations visuelle

Pour cette troisième série de mesure, nous avons remarqué les mêmes observations que celles effectuées pour la première et deuxième série de mesures qu'on peut retrouver dans le tableau 7.2.

c) Conductivité thermique

c - 1) Épaisseur des échantillons

Dans le tableau 7.12, on retrouve l'épaisseur mesurée des interfaces thermiques après irradiations aux neutrons, ainsi que les valeurs précédentes, ces mesures sont faites à température ambiante.

Interface thermique	Valeur donnée (mm)	Valeur mesurée sous pression (mm)	Valeur déduite en chauffe après irradiation aux Neutrons (mm)
HC 3.0	1	0,98	0,892
HC 5.0	1	0,97	0,762
T1.3M	2	1,97	1,626
T2.5G	2	1,97	1,556
T003 M	2	1,98	1,595
T4.5H	2	1,97	1,898
P.T013P	2	1,96	1,822
TH - 1851	1	0,98	0,974
TFLEX SF6	1	0,96	0,918

Table 7.12 – Valeurs données de l'épaisseur des ITs, ainsi que celles mesurées avant et après irradiations aux neutrons.

c - 2) Caractérisation d'un panel d'interfaces thermiques

Après irradiation aux neutrons on retrouve dans le tableau 7.13 les différents résultats obtenus de la caractérisation de la conductivité thermique des neuf échantillons testés. Le tableau 7.14, représente les incertitudes de chaque grandeur mesurée.

	HC3.0	HC5.0	T1.3M	T2.5G	T003M	T4.5H	Putty T013	TH-1851	TFLEX
λ_{int} fabricant (W/m.K)	3	5	1,3	2,5	3	4,5	13	3	3
ΔT_{int} après neutrons (°C)	19,94	9,60	44,28	23,95	21,19	10,93	9,02	7,50	13,99
λ_{int} après neutrons (W/m.K)	0,81	1,32	0,70	1,07	1,19	2,40	3,72	1,09	1,07
Incertit- sur λ_{int} après neutrons (W/m.K)	0,18	0,30	0,10	0,15	0,16	0,39	0,60	0,30	0,25
λ_{int} après $/\lambda_{int}$ avant neutrons	0,99	0,95	1,00	0,89	0,95	0,86	0,74	0,88	0,99
Erreur λ_{int} après $/\lambda_{int}$ avant neutrons	0,12	0,12	0,09	0,10	0,19	0,13	0,14	0,18	0,13

TABLE 7.13 – Résultats obtenus de la caractérisation thermique après irradiations aux neutrons des neuf interfaces thermiques.

sources d'incertitudes	HC3.0	HC5.0	T1.3M	T2.5G	T003M	T4.5H	Putty T013	TH-1851	TFLEX
$\delta\, Epaisseur$ (mm)	0,16	0,27	0,09	0,12	0,12	0,25	0,40	0,22	0,22
$\delta\, Flux$ (W)	0,06	0,06	0,05	0,08	0,10	0,23	0,26	0,17	0,08
$\delta \triangle T$	0,03	0,12	0,02	0,04	0,05	0,20	0,36	0,12	0,07
Incertitude totale	0,18	0,30	0,10	0,15	0,16	0,39	0,60	0,30	0,25

TABLE 7.14 – Incertitudes sur les paramètres mesurées pour les tests après irradiation aux neutrons.

Observations entre avant et après tests d'irradiation aux neutrons

Après les tests d'irradiation aux neutrons, on remarque que :

- Les interfaces thermiques sont toujours dans le même état initial (sans graisse huileuse, ni autre dégradation physique),
- Dureté Shore00 inchangé après l'irradiation par rapport aux mesures initiales,
- La conductivité thermique mesurée est inférieure aux valeurs données par les fabricants,
- Pas de dégradation de la conductivité thermique après irradiation aux neutrons pour les interfaces élastiques,
- L'interface Putty T013 nous donne une valeur de conductivité thermique bien meilleur que celle obtenue après irradiation aux rayons X, avec une valeur de 3,72 $\pm 0,6$ W/m.K, on a quand même une valeur inférieure à celle mesurée initialement qui est de 5,02 $\pm 0,92$ W/m.K. Ce changement peut provenir du fait que les neutrons avec une dose de 350 Gy n'ont pas une grande influence sur ce matériau contrairement à l'irradiation aux rayons X qui avait une dose plus importante de 500 Gy. La dégradation au niveau de l'aspect physique est aussi remarquée après ces tests, elle est devenue sans flexibilité et sèche, et complètement cassante.

Dans l'histogramme 7.3.11, on voit le rapport entre après et avant irradiation des interfaces thermique aux neutrons.

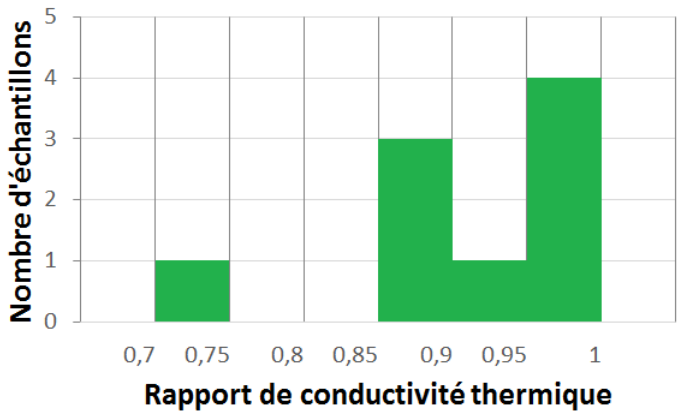


FIGURE 7.3.11 – Histogramme pour le rapport entre la conductivité mesurée après et avant irradiation aux neutrons.

Dans l'histogramme 7.3.12, on a le résumé de toutes les mesures effectuées sur les interfaces thermiques et qui nous montre la dégradation de certaines interfaces face aux tests d'irradiations.

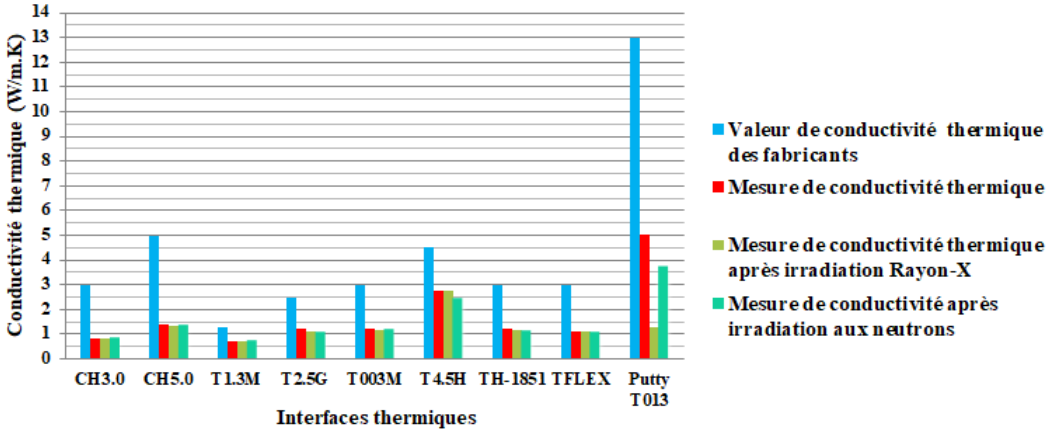


FIGURE 7.3.12 – Histogramme des différents résultats obtenus lors de la caractérisation de la conductivité thermique des échantillons testées avant et après irradiations.

7.4 Conclusion

Dans ce dernier chapitre, nous avons soumis neuf échantillons à un cycle de température entre 18 et 210 °C. Il s'agit des interfaces thermiques de type élastomères de chez Bergquist, Stacem et Compelma, de différentes épaisseurs (1 et 2 mm) et de différentes valeurs de conductivité thermique (de 1,5 à 4,5 W/m.K). Ainsi qu'un autre type d'interface nommée Putty de chez Compelma, qui n'est pas élastique mais qui possède une bien plus grande valeur de conductivité thermique, 13 W/m.K. Les moyens de tests et de caractérisations ont été également présentés.

Les différents tests d'irradiations aux rayons X et aux neutrons ont été aussi présentés, avec les démarches et les lieux des tests. La dose d'irradiation des interfaces thermiques aux rayons X effectuée sur le plateau PAVIRMA, était de 500 Gy une valeur maximum pour cette expérience, dans le but de faire réagir ces matériaux d'interfaces. Quant à l'irradiation des neutrons, l'expérience a été effectuée au CERN à CHARM, avec une dose d'environ 350 Gy et un flux de neutrons important de l'ordre de $35 \times 10^{11}\, n_{eq}/\text{cm}^2$. Cette expérience été plus que nécessaire car elle représente l'environnement dans lequel les interfaces thermiques seront confrontées lors de leur emplacement dans le système de refroidissement des cartes électroniques des FE-Box dans l'expérience LHCb, soit une dose de 200 Gy et un flux de neutrons très important de l'ordre de $10 \times 10^{11}\, n_{eq}/\text{cm}^2$.

Les résultats obtenus lors des tests de caractérisation thermique, nous ont montrés que les valeurs données par les fabricants étaient bien optimistes par rapport aux vraies mesures de conductivité effectuées avec le banc de caractérisation de

la conductivité thermique. Quant aux mesures faites après irradiations aux rayons X, on remarque bien que la conductivité thermique n'est pas atteinte par le rayonnement aux rayons X. Sauf pour l'interface Putty T013 de nature non-élastique, qui a subi une grande dégradation au niveau de la conductivité thermique et de l'aspect physique, en devenant plus dure et cassante.

Quant à l'irradiation aux neutrons, on remarque que les interfaces thermiques ne sont pas atteintes par ce rayonnement et que même la valeur de l'interface non-élastique « Putty T013 » est plus proche de sa valeur de conductivité initiale mesurée, que celle obtenue après irradiation aux rayons X. On suppose que ce changement provient du fait que la dose d'irradiation aux neutrons est moins importante que celle aux rayons X. Néanmoins les valeurs restent au-dessous de celles données par les fabricants.

A l'avenir , afin de mieux comprendre les processus physico-chimiques qui se produisent au cours de l'irradiation aux différentes particules qui peuvent interagir et qui conduisent à une dégradation des structures et des caractéristiques des interfaces thermiques, les travaux de recherche menés sur les analyses des matériaux devront être renforcés et approfondis, et pourquoi pas en collaborant avec des chimistes ou des partenaires travaillant sur les matériaux thermiques.

Au vu des conductivités thermiques obtenues, les interfaces Compelma semblent être des bons candidats. Celles-ci possèdent aussi une facilité de manipulation, ce qui est important vu l'emplacement et le montage qu'il va falloir effectuer dans les FE-Box. Elles résistent parfaitement à l'irradiation aux rayons X et aux neutrons, et la référence T4.5H semble ne pas trop changer de valeur de conductivité thermique avec $2,87$ W/m.K $\pm(0,37)$, et cela même après irradiations au rayons X avec une valeur de $2,92$ W/m.K $\pm(0,48)$ et aux neutrons avec une valeur de $2,4$ W/m.K $\pm(0,4)$ qui reste la valeur la plus élevée par rapport aux autres interfaces thermiques.

Deux apports innovants ont été intégrés dans le cadre de cette réalisation. Le premier est la conception et la réalisation d'un banc de mesures spécifique et original qui permet d'effectuer la caractérisation thermique suivant la norme ASTM D5470. Le deuxième apport concerne les tests d'irradiations complètements innovant dans cette étude et qui permettent de voir l'évolution de ces matériaux face à des particules radioactives.

Conclusion et perspectives

Le présent travail exposé dans ce mémoire est effectué dans le cadre du développement et de la construction d'un nouveau trajectographe à fibres scintillantes « SciFi », un des principaux projets du programme de mise à niveau de l'expérience LHCb. Ce détecteur lu avec des Photomultiplicateurs Silicium « SiPM » nécessite le développement d'une nouvelle électronique fonctionnant à 40 MHz, la vitesse de fonctionnement de LHC. Cette électronique est située sur le détecteur, au plus près des SiPM et doit être refroidie pour fonctionner correctement. C'est pourquoi dans la première partie de ce mémoire, nous avons exposé une étude thermique de ces cartes électroniques, ainsi que la conception d'un système permettant de les refroidir. L'étude thermique de la carte électronique associée à des simulations des différentes solutions envisagées pour son refroidissement et aux tests réalisés avec plusieurs prototypes ont permis d'optimiser le design du système de refroidissement de l'électronique en fonction des nombreuses contraintes venant principalement du système de refroidissement des SiPM localisé à proximité. Une des difficultés rencontrées provient du fait que l'électronique du SciFi est en cours de conception. Deux prototypes avec des tailles et des consommations différentes ont été conçus. Le deuxième n'est pas encore disponible pour effectuer des tests et des cartes d'essais ont été fabriquées pour réaliser localement les tests de refroidissement. Simulations et tests montrent des résultats comparables. Selon le système de refroidissement envisagé la température maximale de la carte varie entre 40°C et 50°C ce qui montre bien l'importance d'un bon système de refroidissement. Les principales conclusions de nos études sont :

- Les contraintes imposées par le système de refroidissement des SiPM ne permettent pas d'avoir un contact entre toute la surface du dissipateur du système de refroidissement des cartes FE et les blocs de refroidissement, mais la surface d'échange entre les deux doit être maximisée.

- S'il n'est pas possible d'avoir un serpentin occupant toute la surface sur le bloc froid pour les mêmes contraintes de place et d'accès du système de refroidissement des SiPM, un serpentin en forme de "U" à l'intérieur des blocs froids permet de se rapprocher de cette solution idéale et de diminuer de l'ordre de 5°C la température maximale de la carte par rapport à une solution en forme de "I" dans laquelle le

tuyau traverse simplement les blocs froids.

- La température maximale obtenue sur une carte dépend directement de la température d'entrée de l'eau. Il est donc important de minimiser le nombre de FE-Box refroidies par un même circuit d'eau. Avoir un maximum de 6 FE-Box servies par une même rampe est un bon compromis. Pour les mêmes raisons, il est important de minimiser la différence de température entre l'entrée et la sortie de l'eau dans le système de refroidissement d'une carte ce qui nécessite d'utiliser un débit entre 1,5 et 2,5 l/mn pour avoir une différence entre les deux dans la gamme de 1°C à 0,5°C.

- Si pour des raisons d'activation des matériaux dans l'environnement radioactif de la caverne de LHCb dans les conditions de fonctionnement prévues pour son évolution l'utilisation de cuivre pour les blocs froids est à proscrire, l'aluminium permet d'obtenir des performances voisines et bien meilleures que celles obtenues avec de l'inox.

- L'utilisation d'interfaces thermiques est requise pour éliminer les espaces d'air entre les cartes d'électroniques et le dissipateur et permettre un meilleur refroidissement de la carte. La tenue aux radiations de ces interfaces dans l'environnement de LHCb est une question importante.

La seconde partie de ce mémoire, s'est focalisée sur l'étude des interfaces thermiques. En effet, comme leur rôle principal est de faciliter le passage du flux de chaleur du composant vers le dissipateur, leur usage est indispensable et ceci bien qu'elles soient responsables de la plus grande partie de la résistance thermique globale du système thermique. Après avoir proposé une revue des différentes interfaces thermiques, principalement du même type élastomère et élastique, un comparatif de leur conductivité thermique a été élaboré. En se référant à l'étude bibliographique sur les méthodes d'estimation des propriétés thermophysiques des matériaux, nous avons vu que la méthode la plus adaptée pour mesurer cette résistance thermique apparente dans des conditions proches de celles de l'application, c'est-à-dire sous pression, est celle de la barre en régime permanent. C'est cette méthode, d'ailleurs normalisée (ASTM D5470), qui a été sélectionnée pour être mise en œuvre à l'aide d'un banc de mesure que nous avons conçu.

Les cartes électroniques du détecteur SciFi de LHCb vont devoir fonctionner dans un environnement radioactif. Une question importante est le comportement des interfaces thermiques lorsqu'elles sont soumises à des radiations. Le point novateur de cette thèse a donc consisté à effectuer une caractérisation de la conductivité thermique de différentes interfaces thermiques avant et après irradiations, dans le but de pouvoir définir celle qui sera la mieux adaptée à notre application.

Les différents tests d'irradiations aux rayons X et aux neutrons ont été aussi présentés, avec les démarches et les lieux des tests. La dose d'irradiation des interfaces thermiques aux rayons X effectuée sur le plateau PAVIRMA, était de 500 Gy

une valeur maximum pour cette expérience, dans le but de faire réagir ces matériaux d'interfaces. Quant à l'irradiation aux neutrons, l'expérience a été effectuée au CERN avec l'installation CHARM, avec une dose d'environ 350 Gy et un flux de 34×10^{11} neq/cm^2. Cette expérience représente l'environnement dans lequel les interfaces thermiques seront confrontées à leur emplacement dans le système de refroidissement des cartes électroniques des FE-Box dans l'expérience LHCb.

Nous avons donc présenté la démarche de caractérisation de la résistance thermique de neuf échantillons soumis à un cycle de température entre 18 °C et 210 °C. Il s'agit des interfaces de type polymère ou élastomère de nature élastique pour CH3.0 et CH5.0 de chez Bergquist, T1.3M, T2.5G, T003M, et T4.5H de chez Compelma, et TH-1851 de chez Stacem et TFLEX SF6 de chez Laid Technologies, ainsi qu'une interface thermique non élastique Putty-T013 de chez Compelma.

Les résultats obtenus lors des mesures de conductivité thermique, nous ont montré que les valeurs données par les fabricants étaient bien optimistes par rapport aux mesures de conductivité effectuées avec notre banc de caractérisation de la conductivité thermique. Quant aux mesures faites après irradiations aux rayons X et aux neutrons, on remarque bien que la conductivité thermique n'est pas atteinte par ces deux rayonnements. Sauf pour l'interface Putty T013 de nature non-élastique, qui a subi une grande dégradation au niveau de la conductivité thermique et de l'aspect physique, en devenant plus dure et cassante après l'irradiation aux rayons X.

Au vu des conductivités thermiques obtenues, les interfaces Compelma semblent être de bonnes candidates. Elles sont faciles à manipuler, ce qui est important vu l'emplacement et le montage qu'il va falloir effectuer dans les FE-Box. Elles résistent bien à l'irradiation aux rayons X, et la référence T4.5H a une valeur de conductivité thermique parmi les plus élevées de celles mesurées et ne souffre pas des radiations avec une mesure de 2,87 ± 0,37 W/m.K avant radiation et 2,92 ± 0,48 W/m.K après irradiations au rayons X.

A l'avenir, afin de mieux comprendre les processus physico-chimiques qui se produisent au cours de l'irradiation aux différentes particules qui peuvent interagir et qui conduisent à une dégradation des structures et des caractéristiques des interfaces thermiques, les travaux de recherche menés sur les analyses des matériaux devront être renforcés et approfondis, et pourquoi pas en collaborant avec des chimistes ou des partenaires travaillant sur les matériaux thermiques. Il est à noter que ces travaux menés sur la caractérisation de la conductivité thermique des interfaces thermiques sont très peu exposés dans la bibliographie, et ce pour des raisons qui tiennent essentiellement à la difficulté de réalisation du moyen de test. Ainsi, à notre connaissance, ces travaux figurent probablement parmi les premiers dans leur genre, ou tout du moins parmi les premiers publiés dans la littérature scientifique.

Annexes

« Il n'existe que deux choses infinies, l'univers et la bêtise humaine... mais pour l'univers, je n'ai pas de certitude absolue »

(Albert Einstein)

Annexe A

Mesures de température par thermocouple

Notion de température et de chaleur :

Il est très courant de confondre la chaleur et la température, et bien que ces notions soient liées, elles sont à distinguer. La chaleur se définie comme en étant la quantité d'énergie thermique contenue dans un corps et qui peut être extraire, en thermodynamique, la chaleur signifie simplement le transfert d'énergie. La température, quant à elle est considérée comme la quantité physique qui caractérise la quantité de chaleur contenu dans un cops. C'est l'agitation de l'atome la vitesse de vibration au sein de la structure solide qui la contient, ou bien sa vitesse de déplacement dans un gaz.

Dans le cadre de la mesure thermique par thermocouple, les phénomènes de transport de chaleur et d'électricité dans les conducteurs donnent lieu à des différentes manifestations connues sous le nom d'effet thermoélectrique. Trois effets thermoélectriques ont été établis expérimentalement : l'effet Seebeck en 1821, l'effet Peltier en 1834 [41] et l'effet Thomson en 1847 [42].

Pour cette étude nous allons plus nous concentrer sur l'effet Seebeck. Qui est un phénomène physique qui correspond à l'apparition d'une tension produite par une différence de température entre les jonctions de plusieurs corps conducteurs. La tension qui apparaît sous l'effet Seebeck dépend de la différence de température, bien évidemment, mais également des propriétés des matériaux employés. Principe de l'effet thermoélectrique Seebeck : On considère deux matériaux différents, notés A et B comme on peut le voir dans le schéma ci-dessous (figure A.1).

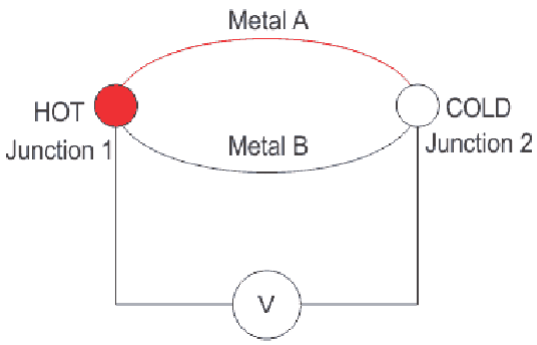


FIGURE A.1 – Montage illustrant l'effet Seebeck.

Lorsque les jonctions J_1et J_2 entre les deux matériaux sont à des températures différentes, une différence de potentiel ΔV apparait aux extrémités de l'assemblage. Celle-ci ne dépend que de la nature des conducteurs en contact et des températures des deux jonctions.

Il est connu que la tension générée entre les deux conducteurs est directement proportionnel au gradient de température qui les traverse. La constante de proportionnalité est appelée le coefficient Seebeck S_{AB}. En d'autre terme celui-ci se définie comme le rapport de tension ΔV à l'écart de température ΔT. Il est donné par la relation suivante

$$S_{AB} = \frac{\triangle V}{\triangle T} \tag{A.0.1}$$

Mesure du coefficient de Seebeck :

La mesure du coefficient de Seebeck ne peut se faire que pour un couple de matériaux, il est donc nécessaire d'avoir une référence. Et cela grâce aux propriétés des matériaux supraconducteurs d'avoir un coefficient Seebeck S nul.

Dispositif expérimental :

Le principe de la détermination du coefficient Seebeck repose sur la détermination d'une référence de potentiel induite par une différence de température connue.

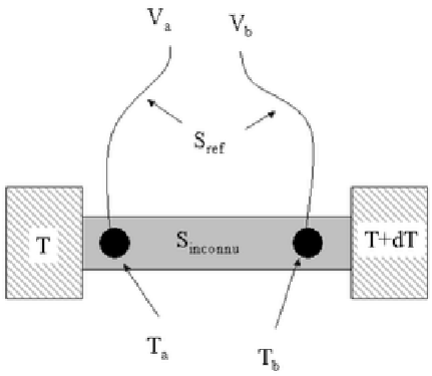


FIGURE A.2 – Exemple de dispositif de mesure de coefficient Seebeck.

Un échantillon dont le coefficient de Seebeck est inconnu ($S_{inconnu}$) est fixé entre un bain thermique à la température T qui évacue de la chaleur, et une chaufferette à la température $T + dT$ qui fournit de la chaleur à l'échantillon. Celui-ci est donc soumis à un gradient de température et une différence de potentiel apparaît.

$$S_{inconnu} = S_{ref} - \frac{\triangle V}{\triangle T} \tag{A.0.2}$$

Les thermocouples les plus courants :

Type	Métal A(+)	Métal B(-)	Limites théoriques de température	Gamme de tension	Coefficient Seebeck S (µV/°C) à T°C	Erreur standard	Erreur Mini	Tolérance ASTM E-230 – Classe 1
B	Platine 30% Rhodium	Platine 6% Rhodium	0 / 1820°C	0/13.820 mV	5,96 µv / 600°C	0,5%	0,25%	±0,25%lect (870/ 1700°C)
E	Nickel 10% Chrome	Constantan	-270 / 1000°C	-9.835/76.373 mV	58,67 µV / 0°C	1,7% /0,5%	1% / 0,4%	±1,5°C (-40 à 375°C) ±0,4% lect (375 à 800°C)
J	Fer	Constantan	-210 / 1200°C	-8.095/69.553 mV	50,38 µV / 0°C	2,2% /0,75%	1,1% / 0,4%	±1,5°C (-40 à 375°C) ±0,4% lect (375 à 750°C)
K	Chromel	Alumel	-270 / 1372°C	-6.458/54.886 mV	39,45 µV/ 0°C	2,2% / 0,75%	1,1% / 0,2%	±1,5°C (-40 à 375°C) ±0,4% lect (375 à 1000°C)
N	Nicrosil	Nisil	-270 / 1300°C	-4.345/32.371 mV	25,93 µV / 0°C	2,2% /0,75%	1,1%/ 0,4%	±1,5°C (-40 à 375°C) ±0,4% lect (375 à 1000°C)
R	Platine 13% Rhodium	Platine	-50 / 1768°C	-0.226/21.101 mV	11,36 µV /600°C	1,5%/ 0,25%	0,6% / 0,1%	±1°C (0 à 1100°C) ±[1+0,3%.(lect -1100)]°C
S	Platine 10% Rhodium	Platine	-50 /1768°C	-0.236/18.693 mV	10,21 µV / 600°C	1,5% /0,25%	0,6% / 0,1%	±1°C (0 à 1100°C) ±[1+0,3%.(lect -1100)]°C
T	**Cuivre**	**Constantan**	**-270 / 400°C**	**-6.258/20.872 mV**	**38,75 µV / 0°C**	**1% / 0,75%**	**0,5% /0,4%**	**±0,5°C (-40 à 125°C)** **±0,4% lect (125 à 350°C)**

TABLE A.1 – Classement et principales caractéristiques des thermocouples normalisés.

Mesure de la tension produite par un thermocouple :

Vu qu'un thermocouple génère une tension dont la valeur est en fonction de la température et du coefficient de Seebeck (S) de la jonction des deux métaux dissemblables, il ne reste plus qu'à mesurer celle-ci à l'aide d'un voltmètre puis d'exprimer par calcul, la tension mesurée en température.

Pour un thermocouple de Type T (Cuivre/Constantan) on a un coefficient de Seebeck (S) = 38,75 µV/°C.

En connectant le thermocouple type T sur les borne du Graphtec (centrale de mesure), nous avons créé une nouvelle jonction métallique J_3, jonction cuivre sur cuivre qui ne crée pas de tension thermoélectrique et J_2 qui, étant constitué de deux différents métaux (Cuivre / Constantan) génère une tension thermoélectrique (V_2) qui vient en opposition avec la tension V_1 que nous voulions mesurer. La tension résultante mesurée par le Graphtec est égale à $V_1 - V_2$, c'est-à-dire qu'elle est proportionnelle à la différence de température entre J_1et J_2.

Pour trouver la température de J_1 on doit connaitre celle de , et pour cela on a besoin d'une jonction. La température de la jonction de J_2 est celle de référence qui sera égale à 0°C (273.15 K) ce qui nous laisse considérer J_2 comme la jonction

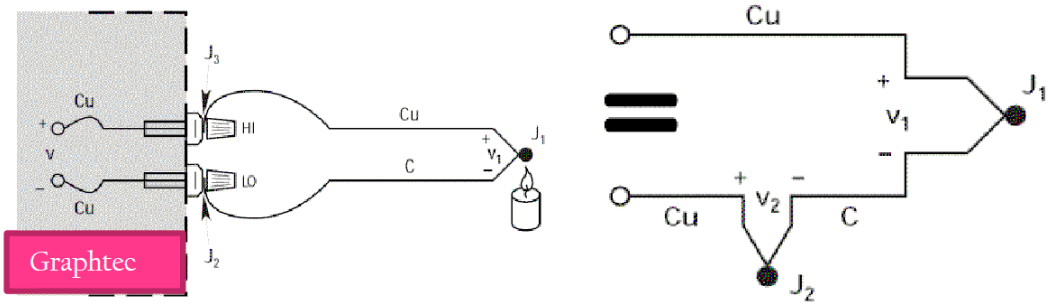


FIGURE A.3 – Schéma de connexion entre un thermocouple type T et une centrale de mesure numérique.

de référence.

Le schéma a donc maintenant une référence 0 °C sur de J_2.

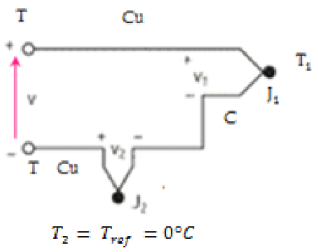


FIGURE A.4 – Schéma d'un thermocouple.

La tension V devient :

$$V = (V_1 - V_2) = S_{Cu.C}.(T_1 - T_{ref}) \tag{A.0.3}$$

Convertir la tension en température :

Afin d'obtenir une jonction de référence à 0°C, on doit convertir la tension V en température.

Malheureusement, les relations entre tension et température des thermocouples ne sont pas linéaires.

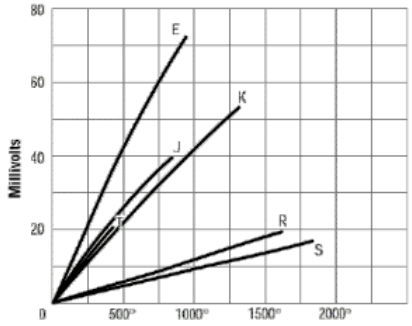


FIGURE A.5 – Tension des thermocouples en fonction de la température.

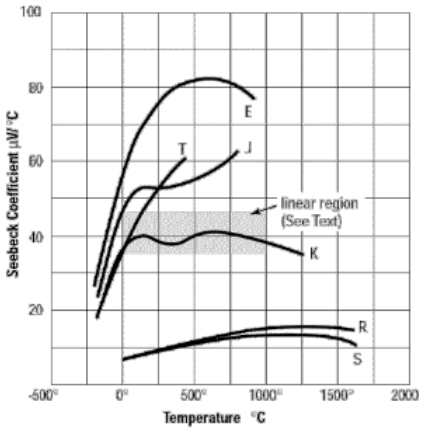


FIGURE A.6 – Coefficient de Seebeck (S) en fonction de la température.

Il est possible de calculer la température à partir de la tension thermoélectrique en ayant recours à une équation polynomiale :

$$T = c_0 + c_1.V + c_2.V^2 + c_3.V^3 + \cdots + c_n.V^n \tag{A.0.4}$$

Dans cette équation, T, V, c et n sont respectivement la température au niveau de la jonction du thermocouple, la tension thermoélectrique au niveau de cette jonction, les coefficients polynomiaux spécifiques à chaque thermocouple et l'ordre du polynôme.

La température d'un thermocouple se détermine avec la température de référence, la mesure de la tension aux bornes du circuit le constituant, et par l'utilisation de la relation tension-température donnée par la table de référence.

Table de référence de tension thermoélectrique pour thermocouple de type T :

	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
-300							-6.258	-6.248	-6.232	-6.209
-250	-6.180	-6.146	-6.105	-6.059	-6.007	-5.950	-5.888	-5.823	-5.753	-5.680
-200	-5.603	-5.523	-5.439	-5.351	-5.261	-5.167	-5.070	-4.969	-4.865	-4.759
-150	-4.648	-4.535	-4.419	-4.300	-4.177	-4.052	-3.923	-3.791	-3.657	-3.519
-100	-3.379	-3.235	-3.089	-2.940	-2.788	-2.633	-2.476	-2.316	-2.153	-1.987
-50	-1.819	-1.648	-1.475	-1.299	-1.121	-0.940	-0.757	-0.571	-0.383	-0.193
0	0.000	0.195	0.391	0.589	0.790	0.992	1.196	1.403	1.612	1.823
50	2.036	2.251	2.468	2.687	2.909	3.132	3.358	3.585	3.814	4.046
100	4.279	4.513	4.750	4.988	5.228	5.470	5.714	5.959	6.206	6.454
150	6.704	6.956	7.209	7.463	7.720	7.977	8.237	8.497	8.759	9.023
200	9.288	9.555	9.822	10.092	10.362	10.634	10.907	11.182	11.458	11.735
250	12.013	12.293	12.574	12.856	13.139	13.423	13.709	13.995	14.283	14.572
300	14.862	15.153	15.445	15.738	16.032	16.327	16.624	16.921	17.219	17.518
350	17.819	18.120	18.422	18.725	19.030	19.335	19.641	19.947	20.255	20.563
400	20.872									

Annexe B

Incertitude sur la mesure de température en fonction des thermocouples

Une méthode graphique a été utilisée pour estimer l'incertitude des valeurs de température. On a commencer par corriger nos thermocouples utilisées en référence avec le thermocouple étalonné par le fabriquant (il faut savoir que les thermocouples achetés ont subi un étalonnage en fonction du thermocouple de référence qui possède une tolérance d'erreur de $\pm 0.3°C$), ce qui nous a donnée un écart entre les deux thermocouples, cet écart a été corrigé ensuite grâce à une équation polynomiale de degré 2, comme on peut le voir dans la figure B.1.Garce à la formule obtenue , on corrige l'écart entre les deux thermocouples, afin de pouvoir extraire grâce à une extrapolation linéaire, la formule qui va nous permettre de corriger notre deuxième thermocouple en fonction de l'écart corrigé entre les deux thermocouples. On obtient une correction de tous les thermocouples utilisés en fonction du thermocouple de référence T1, dans le but d'avoir par la suite la même incertitude de mesures de $\pm 0,3°C$ pour tous les thermocouples.

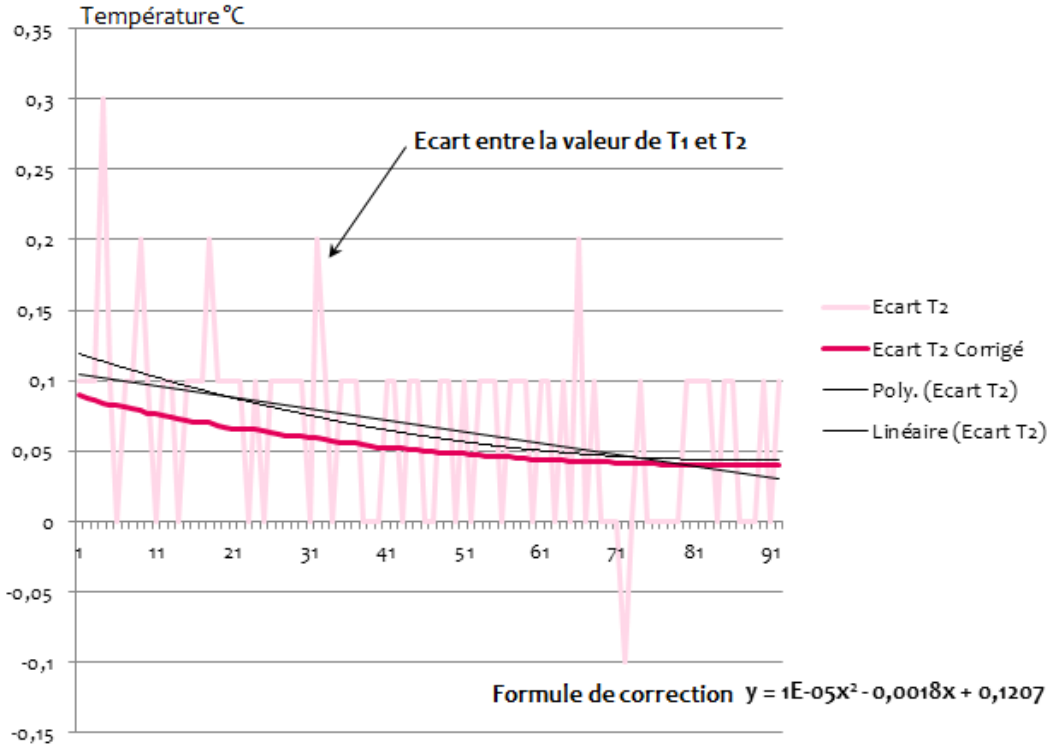


FIGURE B.1 – Principe de détermination de la formule de correction par rapport au thermocouple de référence T1, pour le thermocouple T2.

On obtient une courbe de température pour le thermocouple T2 très proche du thermocouple de référence T1 (voir figure B.2).

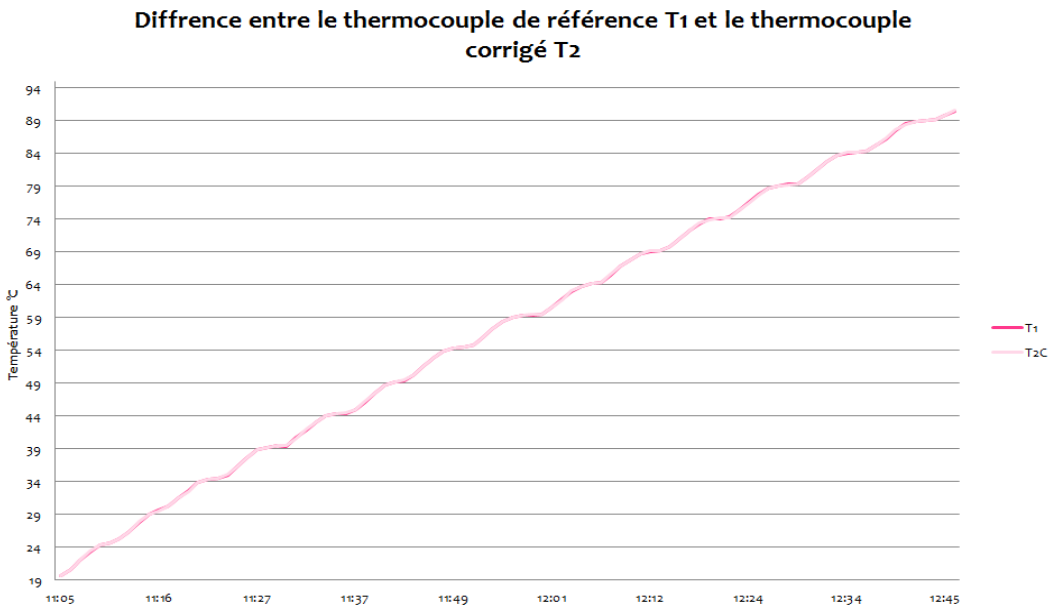


FIGURE B.2 – Correction du thermocouple T2 en fonction du thermocouple de référence T1.

Annexe C

Métrologie thermique

C.1 Métrologie thermique

C.1.1 Introduction

Les applications de la connaissance des propriétés thermiques des matériaux, et donc leurs mesures, couvrent la quasi-totalité de l'activité industrielle : génie des procédés de matériaux (modification des structures et des formes), métallurgie, génie climatique et bâtiment (stockage et isolation du chaud ou de froid), mécanique (résistance des matériaux soumis à des variations ou gradients de température), aérospatial et aéronautique(protection thermique), électronique (propriétés de conduction, protection des composants, capteur, nano et microélectronique)... [43].

La connaissance des propriétés thermiques des matériaux permet de modéliser les transferts thermiques dans des systèmes complexes et de prédire leurs comportements thermiques. L'établissement du bilan thermique permet de dimensionner les systèmes d'évacuation de la chaleur (système climatique) ou les dispositifs d'isolations pour limiter les pertes d'énergie, de calculer au plus juste l'énergie à apporter à un système pour la transformation des matériaux, d'améliorer la qualité et la sécurité des produits par la maitrise des processus de fabrication...

Les équations (expressions mathématiques des grandeurs mises en jeu dans les phénomènes thermiques) reposent principalement sur le principe de la conservation de l'énergie appelée « bilan énergétique », qui se reposent principalement sur les différents flux de chaleur qui influent sur le système étudié.

$$\varphi_e + \varphi_g = \varphi_s + \varphi_{st} \tag{C.1.1}$$

Avec :

φ_{st} : Flux de chaleur stocké,

φ_g : Flux de chaleur généré,
φ_e : Flux de chaleur entrant,
φ_s : Flux de chaleur sortant.

Comme dans tous les domaines de la physique, pour résoudre un problème, il est essentiel d'en faire une analyse pratique qui conduira à des équations adaptées. Cette analyse permet aussi de poser des hypothèses simplificatrices afin de dégager des éléments sur l'influence de différents paramètres. Pour les échanges thermiques, il convient de s'interroger sur :

— Le type de régimes (permanent ou transitoire) de température ou de flux thermique,
— Les échanges aux frontières (entre les différents constituants du système étudié) et les équations qui découlent,
— Les symétries du système.

La qualité de l'analyse pratique dépend souvent de l'expérience et des compétences des thermiciens mais, de plus en plus, les équations sont résolues de manière complètement analytique et la modélisation numérique est utilisée pour mettre en évidence l'influence des différents paramètres.

C.1.2 Classification des méthodes de caractérisation thermique

La classification des méthodes de caractérisation thermique peut être effectuée de plusieurs manières différentes (régime, type de mesure, géométrie...etc.) [44].

Dans notre cas, on choisit une classification par régime car elle caractérise la phase temporelle pendant laquelle la réponse du système est exploitée, elle peut être de différentes formes.

1. Permanent : seules les mesures de l'état final du système sont considérées. La méthode de la plaque chaude gardée ou celle de la mini-plaque chaude s'exercent en régime permanent, la conductivité thermique et la seule propriété accessible par ces méthodes.
2. Quasi-établi : les mesures sont réalisées aux temps longs sans tenir compte de la phase transitoire sans pour autant que le système ne soit en régime établi. Les méthodes comme le fil chaud ou le plan chaud s'appliquent en régime quasi-établi.
3. Transitoire : les mesures sont généralement relevée aux temps courts ou sur tout l'intervalle de mesure en partant de l'instant initial. Les méthodes de type flash [45] ou celle de la tri-couche sont des méthodes transitoires.
4. Périodique établi : la réponse du matériau est observée sous forme d'oscillations périodiques. Les méthodes de type 3ωsont des méthodes exploitant le régime périodique établi [46].

C.1.2.1 Méthode en régime permanent

Cette méthode se base sur un modèle unidirectionnel et stationnaire à travers l'échantillon d'épaisseur « e », et par la mesure simultanée d'un flux de chaleur « Φ » constant traversant l'échantillon de section « S » et par celle du gradient de température « ΔT » qu'il génère. Figure C.1.

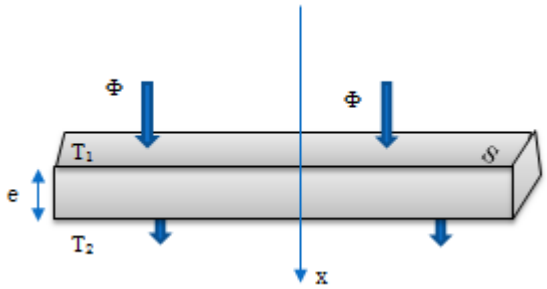


FIGURE C.1 – Principe de mesure en régime permanent.

On a deux techniques de mesures :

La technique dite de la plaque chaude gradée, pour les matériaux isolants ayant une conductivité thermique inférieure à $0,3\,W/m.K$. Cette méthode est utilisée pour caractériser des échantillons de grande taille comme ceux que l'on rencontre dans le domaine de l'isolation des bâtiments. Son schéma de principe est donné dans la figure C.2 [47].

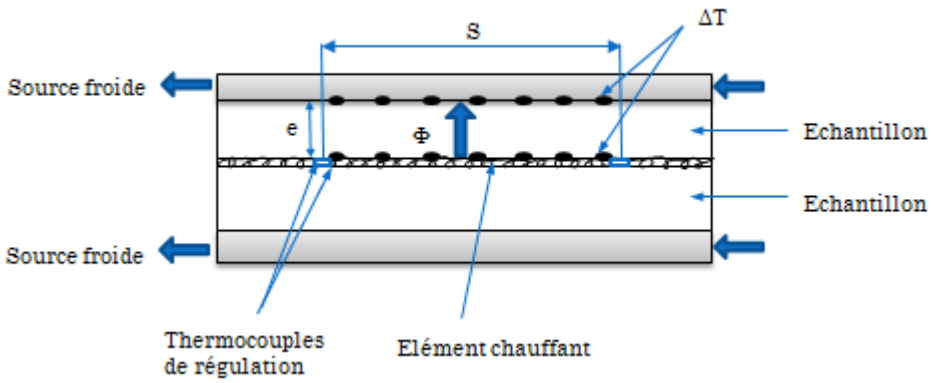


FIGURE C.2 – Principe de la plaque chaude gardée.

On impose à un échantillon plan un flux de chaleur unidirectionnel « Φ », assuré par un écoulement résistif, et on mesure la différence de température « ΔT » aux bornes du matériau étudié. Cette méthode repose sur l'utilisation d'une plaque de

faible épaisseur, comparée aux dimensions transverses de l'échantillon, ainsi que sur la mise en place d'une garde active pour minimiser les pertes latérales aux extrémités du matériau.

La technique dite de la barre pour les matériaux ayant une conductivité thermique supérieure à $0,3\,W/m.K$ (schéma de principe Fig C.3). La barre possédant une géométrie pour laquelle l'épaisseur est plus grande que les dimensions traverses, les pertes thermiques latérales ne peuvent être négligées et doivent apparaitre dans le modèle thermocinétique, en prenant comme hypothèse l'uniformité de la température sur la section droite [48].

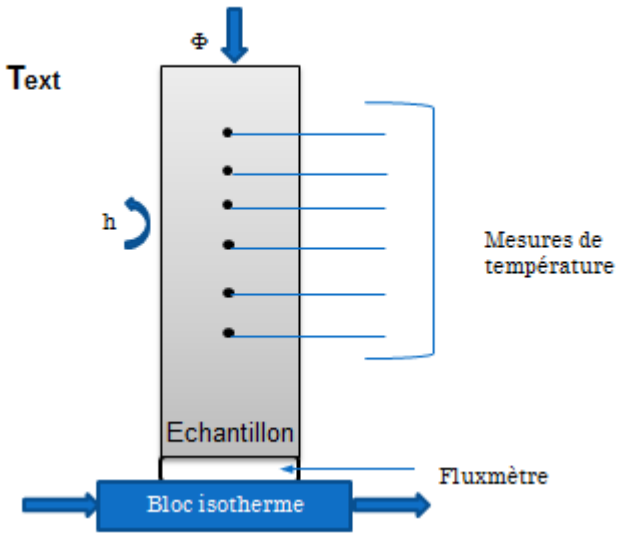


FIGURE C.3 – Principe de la méthode de la barre.

C.1.2.2 Méthode en régime quasi-établi

Cette méthode se caractérise par la mesure simultanée d'un flux de chaleur de puissance constante traversant l'échantillon et d'une température variant avec le temps.

Pour accéder aux paramètres thermophysiques, il faut effectuer les mesures sur des temps longs. La mesure de la variation de température se fait, soit par couple thermocinétique, appelé méthode du croisillon, soit par la mesure directe de la résistance électrique de l'élément chauffant.

Cette méthode regroupe plusieurs techniques de mesure dont l'emploi dépend de la géométrie du matériau testé. On a la méthode du plan chaud, du ruban chaud, des disques chauds, des sondes à choc et celle du fil chaud.

La méthode du fil chaud (ISO 8894) est la plus connue et la plus utilisée par le monde industriel. A l'origine cette méthode a été développée pour mesurer la conductivité thermique des liquides, puis étendue aux solides isolants à haute température (céramiques en particulier) [49].

Cette méthode est basée sur un modèle idéalisé d'écoulement de chaleur radial unidimensionnel dont le principe expérimental est schématisé dans la figure C.4. L'installation de mesure est particulièrement simple, un fil métallique fin est pris en sandwich entre deux blocs du matériau à mesurer (une rainure est pratiquée dans l'un des blocs pour un bon contact thermique entre les blocs). A l'instant pris pour origine, on délivre une puissance constante (P0) que l'on mesure simultanément, on relève la variation de température du fil, soit par un couple thermoélectrique soudé sur le fil (méthode du croisillon), soit directement par la mesure de la résistance du fil.

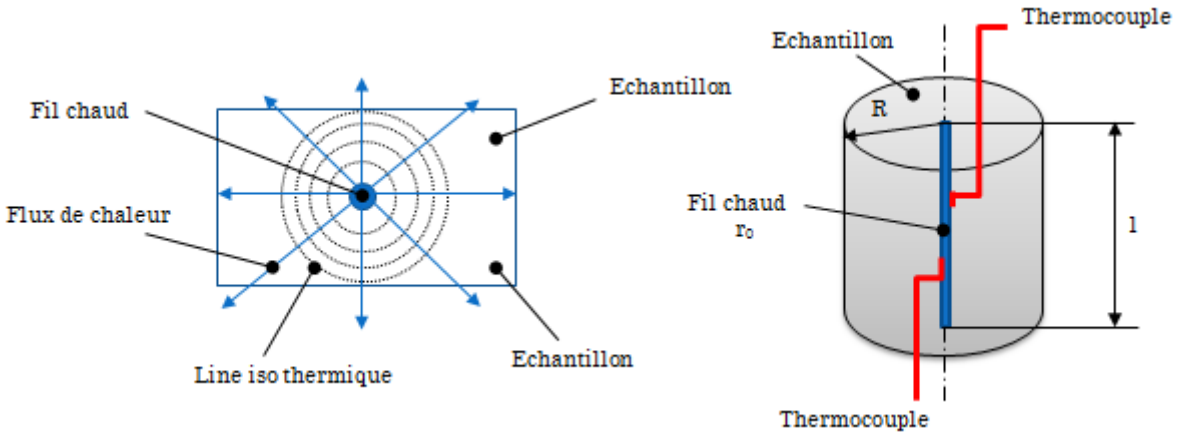


FIGURE C.4 – Principe de la méthode du fil chaud.

Cette dernière méthode (méthode de résistance) qui parait apriori plus simple et plus précise est difficile à mettre en œuvre (un étalonnage très précis du fil chaud est nécessaire) et, de plus, elle mesure une température moyenne du fil, qui est plus sensible aux effets bidimensionnels que la température ponctuelle au milieu du fil. Pour la méthode du croisillon, la difficulté provient de l'alignement des soudures **P** et **N** qui doit être parfait, sous peine de mesurer une différence de potentiel provenant du passage du courant de chauffage [50].

C.1.2.3 Méthode en régime transitoire

Cette méthode se caractérise par la mesure d'une seule température (quelque fois deux) rapidement variable avec le temps. Elle permet d'atteindre la diffusivité

thermique, la mesure est simple mais la méthode et le modèle d'identification sont généralement complexes.

La perturbation thermique est du type Dirac et l'identification s'effectue plutôt aux temps courts.

On trouve dans la littérature plusieurs techniques de mesures pour déterminer la diffusivité thermique d'une couche mince suivant le mode de perturbation thermique choisi :

Méthode flash, photo-acoustique, méthode de photo-réflectance, de l'effet mirage... parmi ces méthodes, on a choisie d'expliquer plus en détail la méthode flash (figure C.5), étant donné que c'est la méthode la plus utilisée chez les fabricants de matériaux d'interfaces thermiques.

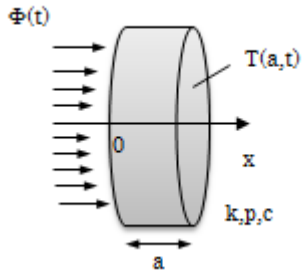


FIGURE C.5 – Principe de la méthode flash arrière.

C'est une expérience en régime transitoire pour mesurer la diffusivité thermique des matériaux solides où on a un échantillon thermiquement isolé, de la forme d'un disque mince, qui absorbe par une de ses deux faces une certaine quantité d'énergie radiante impulsionnelle.

Formule de Parker : $\alpha = 1.38.\frac{a^2}{\pi^2 t_{1/2}}$

Avec :

a : Épaisseur en (m).

$t_{1/2}$: Temps de demi-montée de la température sur l'autre face de l'échantillon.

Dans le tableau C.1, on retrouve les méthodes conseillées pour la détermination des paramètres thermiques. Avec :

- Diffusivité thermique « a ».
- Capacité thermique « c ».
- Conductivité thermique « λ ».
- Masse volumique « ρc ».

Gamme de conductivité (W/m.K)	Méthodes conseillées	Grandeurs mesurées
$\lambda > 5$	- Flash - Calorimétrie différentielle - Fil chaud	a c λ
$5 > \lambda > 0.5$	- Plan chaud centré - Flash - Calorimétrie différentielle - Fil chaud - Hot disk	λ,ρc a c λ λ,a
$0.5 > \lambda > 0.05$	- Plan chaud - Ruban chaud permanent - Calorimétrie différentielle - Plaque chaude gradée - Mini-plaque chaude - Flash - Fil chaud Hot disk	λ,ρc λ c λ λ a λ λ, a
$\lambda > 0.05$	Calorimétrie différentielle Plaque chaude gradée Plan chaud centré Ruban chaud permanent Tri-couche Fil chaud Hot disk	c λ λ,ρc λ λ,ρc λ λ, a

TABLE C.1 – Tableau des choix d'une méthode d'après la gamme de conductivité thermique.

Annexe D

Calcul de dilatation du banc de mesures de la conductivité thermique

Calcul théorique général

Pour calculer la dilatation thermique dans notre banc de mesure, on va utiliser la formule suivante :

$$\Delta L = L_0 \times \alpha \times \Delta T \tag{D.0.1}$$

Ou on a :
L_0 : La longueur initiale de l'élément (mm),
α : Le coefficient de dilatations (ppm/°C),
ΔT : La différence de température (°C).

Mesure de la dilatation du banc de mesures

Les mesures ont été réalisées grâce à un comparateur numérique avec intervalle de mesure entre 0.01 à 25 mm qui est vissé directement sur le support haut de notre banc de test (comme on peut le voir dans la figure D.1).

FIGURE D.1 – Comparateur numérique.

Mesure :

— Débit = 2,04 l/min
— Tension = 190 V
— T départ = 38 °C
— Consigne de température = 200 - 210 °C

On obtient une dilatation réelle de 1.35 mm.

Temps	18h05
T Cartouche (°C)	210
T1 (°C)	200
Dilatation (mm)	1,35
T Départ (°C)	38

TABLE D.1 – Mesure de la dilatation thermique grâce au comparateur numérique.

Calcul théorique :

Éléments	Source chaude	Couvercle d'isolation	Cylindre haut	Cylindre bas
Matière	Cuivre	Téflon	Aluminium	Aluminium
Coefficient de dilatation α (/°C)	17×10^{-6}	13×10^{-5}	23×10^{-6}	23×10^{-6}
Longueur initiale (mm)	20	28	150	150
$\triangle T$ (°C)	38 - 205	38 - 205	38 - 189,71	38 - 135,76
Dilatation (mm)	0,058	0,626	0,568	0,402
Dilatation totale du banc (mm)	1,65			

FIGURE D.2 – Calcul de dilatation du banc sans interface thermique.

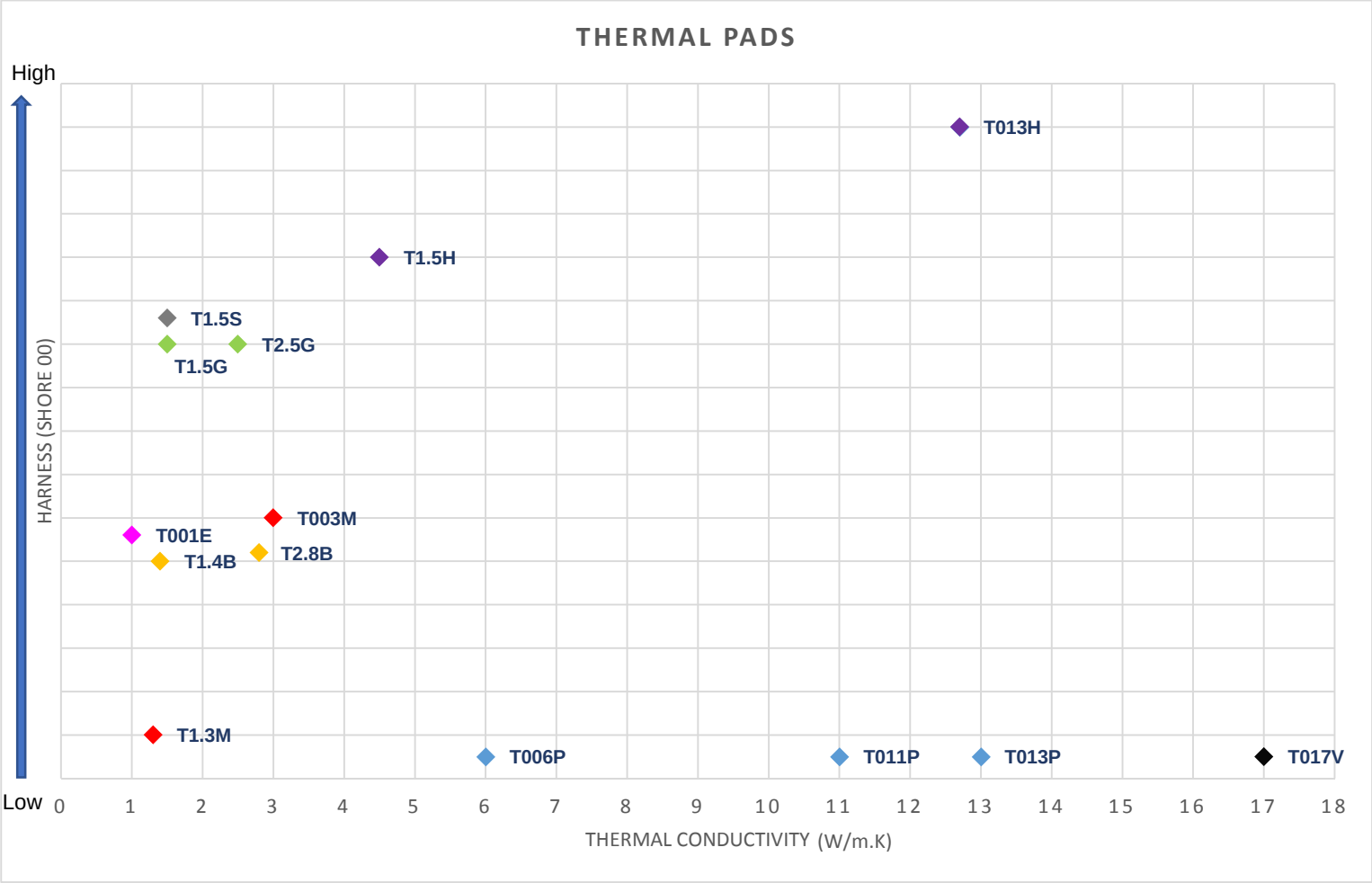
THERMAL PADS

COMPELMA specialized in Thermal Management since more than 15 years.

Thermal pads answer problems of thermal waste by compensating for the irregularities between your electronic and your frame to favor the heat transfer and minimize the thermal resistance.

They are naturally sticky and available in different sizes and versions. Here, we propose to you some of our high runners, but our range of products is wider.

For any questions, please contact us at ***info@compelma.com.***



Short Legend:

- (P) Putty Type
- (V) Putty Ultra-Thin Type
- (H) High Performance Type
- (M) Soft Type
- (B) Ultra-Soft Type
- (E) Electromagnetic Waves & Absorbers Type
- (S) Silicone Free Type
- (G) Standard Type

DATASHEET

Family	Ref.	Thermal Conductivity (W/m-K)	Thickness (mm)	Hardness	Flame rating
P Putty Thermal Pads	T006P	6.0 by Hot Wire 4.5 by Hot Disk	1.5 → 2.5	Low Modulus Shore 00	V0
	T011P	11.0 by Hot Wire 6.0 by Hot Disk	1.0 → 2.0	Low Modulus Shore 00	V0
	T013P	13.0 by Hot Wire 8.0 by Hot Disk	0.5 → 2.0	Low modulus Shore 00	V0
V Putty Ultra-Thin Thermal Pads	T017V	17.0 by Hot Wire 11.0 by Hot Disk	0.22 → 0.50	Low Modulus Shore 00	V0
H High Performance Thermal Pads	T4.5H	6.0 by Hot Wire 4.5 by Hot Disk	0.5 → 5.0	60 (<1.5 Thick) 45 (≥1.5 Thick) Shore 00	V0 equivalent
	T013H	12.7 by Hot Wire 8.0 by Hot Disk	1.0 → 3.0	75 Shore 00	V0
M Soft Thermal Pads	T1.3M	1.3	0.5 → 5.0	5 Shore 00	V0
	T003M	3.0	1 → 10	30 Shore 00	V0
B Ultra-Soft Thermal Pads	T1.4B	1.6 by Hot Wire 1.4 by Hot Disk	0.5 → 5.0	25 Shore 00	V0
	B	2.8 by Hot Wire 2.5 by Hot Disk	1.0 → 5.0	26 Shore 00	V0
E Electromagnetic Waves Absorbers & Thermal Conductive Pads	T001E	1.0	0.5 → 3.0	28 Shore 00	V0
S Silicone Free Thermal Pads	T1.5S	1.5	0.5 → 2.0	53 Shore 00	V0
G Standard Thermal Pads	T1.5G	1.5	0.5 → 10	50 Shore 00	-
	T2.5G	2.5	0.5 → 5.0	50 Shore 00	V0
K Kapton Thermal Pads	T0.8K	0.8	0.15	98 Shore 00	-
	T1.3K	1.3	0.15	99 Shore 00	-
T Thin Thermal Pads	T2.9T	2.9	0.20-0.30-0.45-0.85	90-90-90-88 Shore A	V0
	T003T	3.0	0.2-0.3-0.45	80-87-87 Shore 00	V0

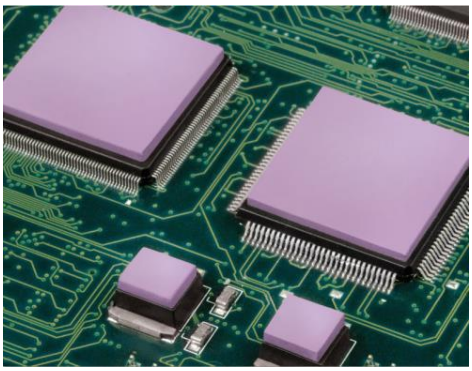
To have complete datasheets, please contact us at:* ***info@compelma.com*

Gap Pad HC 5.0

Highly Conformable, Thermally Conductive, Low Modulus Material

Preliminary 04.27.2015

- Thermal Conductivity: 5.0 W/m-K
- Highly-compliant, low compression low compression stress
- Fiberglass reinforced for shear and tear resistance



Gap Pad HC 5.0 is a soft and compliant gap filling material with a thermal conductivity of 5.0 W/m-K. The material offers exceptional thermal performance at low pressures due to a unique 5.0 W/m-K filler package and low-modulus resin formulation. The enhanced material is ideal for applications requiring low stress on components and boards during assembly. Gap Pad HC 5.0 maintains a conformable nature that allows for excellent interfacing and wet-out characteristics, even to surfaces with high roughness and/or topography.

Gap Pad HC 5.0 is offered with natural inherent tack on both sides of the material, eliminating the need for thermally-impeding adhesive layers. The top side has minimal tack for ease of handling. Gap Pad HC 5.0 is supplied with protective liners on both sides.

Typical Properties of Gap Pad HC 5.0

PROPERTY	Imperial Value	Metric Value	Test Method
PHYSICAL			
Color	Violet	Violet	Visual
Reinforcement Carrier	Fiberglass	Fiberglass	—
Thickness (inch) / (mm)	0.020 to 0.125	0.508 to 3.175	ASTM D374
Inherent Surface Tack (Sides)	2	2	—
Density (Bulk Rubber) (g/cc)	3.2	3.2	ASTM D792
Heat Capacity (J/g-K)	1.0	1.0	ASTM E1269
Hardness (Bulk Rubber) Shore 00 (3)	30	30	ASTM 2240
Young's Modulus (psi) / (kPa) (1)	15	104	ASTM D575
Continuous Use Temp (°F) / (°C)	-76 to 392	-60 to 200	—
ELECTRICAL			
Dielectric Breakdown Voltage (Vac) (4)	5000	5000	ASTM D149
Dielectric Constant (1000 Hz)	7.5	7.5	ASTM D150
Volume Resistivity (Ohm-meter)	10^9	10^9	ASTM D257
Flame Rating	In progress	In progress	U.L.94
THERMAL			
Thermal Conductivity (W/mK)	5.0	5.0	ASTM D5470
Thermal Performance vs Strain			
Deflection (% strain)	10	20	30
Thermal Impedance (°C-in^2/W) (2)	0.39	0.32	0.28

(1) Young's Modulus, calculated using 0.01 in/min. step rate of strain with a sample size of 0.79 inch^2 after 5 minutes of compression at 10% strain on a 3.1mm (125 mil) thickness material.

(2) The ASTM D5470 test fixture was used. The recorded value includes interfacial thermal resistance. These values are provided for reference only. Actual application performance is directly related to the surface roughness, flatness and pressure applied. Based on 40 mil material.

(3) Thirty second delay value on Shore 00 hardness scale based on rubber bulk hardness.

(4) Minimum value at 20 mil

Preliminary data for reference only. Bergquist will update pending on further results.

BERGQUIST

www.bergquistcompany.com

The Bergquist Company
North American Headquarters
18930 West 78th Street
Chanhassen, MN 55317
Tel: 1-800-347-4572
Fax: 952-835-0430

The Netherlands
European Headquarters
Tel:31-35-5380684
Fax: 31-35-5380295

Hong Kong
Asian Headquarters
Tel: 852-2690-9296
Fax: 852-2690-3408

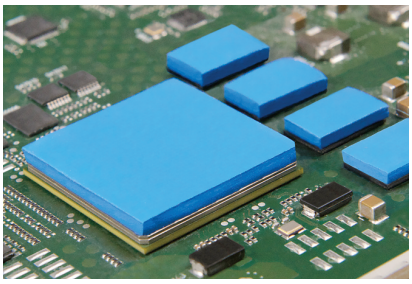
All statements, technical information and recommendations herein are based on tests we believe to be reliable, and THE FOLLOWING IS MADE IN LIEU OF ALL WARRANTIES, EXPRESSED OR IMPLIED, INCLUDING THE IMPLIED WARRANTIES OF MARKETABILITY AND FITNESS FOR PURPOSE. Sellers' and manufacturers' only obligation shall be to replace such quantity of the product proved to be defective. Before using, user shall determine the suitability of the product for its intended use, and the user assumes all risks and liability whatsoever in connection therewith. NEITHER SELLER NOR MANUFACTURER SHALL BE LIABLE EITHER IN TORT OR IN CONTRACT FOR ANY LOSS OR DAMAGE, DIRECT, INCIDENTAL, OR CONSEQUENTIAL, INCLUDING LOSS OF PROFITS OR REVENUE ARISING OUT OF THE USE OR THE INABILITY TO USE A PRODUCT. No statement, purchase order or recommendations by seller or purchaser not contained herein shall have any force or effect unless in an agreement signed by the officers of the seller and manufacturer.

Gap Pad® HC 3.0

High-Compliance, Thermally Conductive, Low Modulus Material

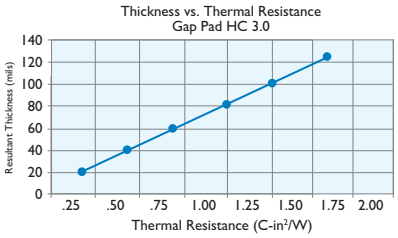
Features and Benefits

- Thermal Conductivity: 3.0 W/m-K
- High-compliance, low compression stress
- Fiberglass reinforced for shear and tear resistance



Gap Pad® HC 3.0 is a soft and compliant gap filling material with a thermal conductivity of 3.0 W/m-K. The material offers exceptional thermal performance at low pressures due to a unique 3.0 W/m-K filler package and low-modulus resin formulation. The enhanced material is ideal for applications requiring low stress on components and boards during assembly. Gap Pad® HC 3.0 maintains a conformable nature that allows for quick recovery and excellent wet-out characteristics, even to surfaces with high roughness and/or topography.

Gap Pad® HC 3.0 is offered with natural inherent tack on both sides of the material, eliminating the need for thermally-impeding adhesive layers. The top side has minimal tack for ease of handling. Gap Pad® HC 3.0 is supplied with protective liners on both sides.



TYPICAL PROPERTIES OF GAP PAD HC 3.0

PROPERTY	IMPERIAL VALUE	METRIC VALUE	TEST METHOD
Color	Blue	Blue	Visual
Reinforcement Carrier	Fiberglass	Fiberglass	—
Thickness (inch) / (mm)	0.020 to 0.125	0.508 to 3.175	ASTM D374
Inherent Surface Tack	2	2	—
Density (Bulk Rubber) (g/cc)	3.1	3.1	ASTM D792
Heat Capacity (J/g-K)	1.0	1.0	ASTM E1269
Hardness (Bulk Rubber) (Shore 00) (4)	15	15	ASTM D2240
Young's Modulus (psi) / (kPa) (1)	16	110	ASTM D575
Continuous Use Temp (°F) / (°C)	-76 to 392	-60 to 200	—
ELECTRICAL			
Dielectric Breakdown Voltage (Vac) (3)	>5000	>5000	ASTM D149
Dielectric Constant (1000 Hz)	6.5	6.5	ASTM D150
Volume Resistivity (Ohm-meter)	10^{10}	10^{10}	ASTM D257
Flame Rating	V-O	V-O	U.L. 94
THERMAL			
Thermal Conductivity (W/m-K) (2)	3.0	3.0	ASTM D5470

THERMAL PERFORMANCE vs. STRAIN

Deflection (% strain)	10	20	30
Thermal Impedance (°C-in²/W) 0.040" (2)	0.57	0.49	0.44

1) Young's Modulus, calculated using 0.01 in/min. step rate of strain with a sample size of 0.79 inch² after 5 minutes of compression at 10% strain on a 1mm thickness material.
2) The ASTM D5470 test fixture was used. The recorded value includes interfacial thermal resistance. These values are provided for reference only. Actual application performance is directly related to the surface roughness, flatness and pressure applied.
3) Minimum value at 20 mil.
4) Thirty second delay value on Shore 00 hardness scale.

Typical Applications Include:

- Telecommunications
- Consumer electronics
- ASICs and DSPs
- Thermal modules to heat sinks

Configurations Available:

- Sheet form and die-cut parts

Building a Part Number

GPHC3.0 – 0.020 – 02 – 0816 – NA

- Section A: GPHC3.0
- Section B: 0.020
- Section C: 02
- Section D: 0816
- Section E: NA

Standard Options

example

NA = Selected standard option. If not selecting a standard option, insert company name, drawing number, and revision level.

0816 = Standard sheet size 8" x 16", or
00 = custom configuration

02 = Natural tack, both sides (With Fiberglass)

Standard thicknesses available: 0.020", 0.040", 0.060", 0.080", 0.100", 0.125"

GPHC3.0 = Gap Pad HC 3.0 Material with fiberglass

Note: To build a part number, visit our website at www.bergquistcompany.com.

THE BERGQUIST COMPANY

www.bergquistcompany.com

The Bergquist Company - North American Headquarters
18930 West 78th Street
Chanhassen, MN 55317
Phone: 800-347-4572
Fax: 952-835-0430

The Bergquist Company - European Headquarters
Netherlands
Phone: 31-35-5380684
Fax: 31-35-5380295

The Bergquist Company - Asia Headquarters
Hong Kong
Ph: 852-2690-9296
Fax: 852-2690-3408

All statements, technical information and recommendations herein are based on tests we believe to be reliable, and THE FOLLOWING IS MADE IN LIEU OF ALL WARRANTIES, EXPRESSED OR IMPLIED, INCLUDING THE IMPLIED WARRANTIES OF MARKETABILITY AND FITNESS FOR PURPOSE. Sellers' and manufacturers' only obligation shall be to replace such quantity of the product proved to be defective. Before using, user shall determine the suitability of the product for its intended use, and the user assumes all risks and liability whatsoever in connection therewith. NEITHER SELLER NOR MANUFACTURER SHALL BE LIABLE EITHER IN TORT OR IN CONTRACT FOR ANY LOSS OR DAMAGE, DIRECT, INCIDENTAL, OR CONSEQUENTIAL, INCLUDING LOSS OF PROFITS OR REVENUE ARISING OUT OF THE USE OR THE INABILITY TO USE A PRODUCT. No statement, purchase order or recommendations by seller or purchaser not contained herein shall have any force or effect unless in an agreement signed by the officers of the seller and manufacturer.

PDS_GP_HC3_0714

Le TH-1851 offre à la fois une très bonne conductivité thermique et une très grande conformabilité. Cette particularité lui permet de compenser de grandes irrégularités de surface en limitant la force de compression. Il est isolant électrique et naturellement adhérent.

Exemples d'applications :

- Informatique
- Disque dur, lecteur
- Caloducs
- Ecran LCD

Avantages :

- Isolant électrique
- Naturellement adhésif
- UL94-V0 et Rohs

Options :

- Découpe sur mesure
- Renfort en fibre de verre conseillé sur ép. ≤ 0.76mm

Propriétés	TH-1851	Test
Conduction thermique (W/mK)	3	ASTM D5470
Dureté (Shore 00)	25	ASTM D2240
Résistivité volumique (ohm-cm)	8×10^{13}	ASTM D257
Densité (g/cm³)	2.98	-
Tension de claquage (KV)	>6 (ép. ≤1mm) >10 (ép. ≥1.27mm)	ASTM D149
Plage de température (°C)	-40°C à +200°C	
Epaisseur disponible (mm)	0.508 à 5.08 (incréments 0.254)	-
Dimensions de feuille (mm)	304.8 x 406.4	-
Couleur	Violet	-
Rohs	Oui	-
UL94	V0	E313523

Exemple de référence :

TH 1 851 xxxx x

- Option : 1 : avec renfort fibre verre
  2 : sur feuille d'aluminium
- Epaisseur en mm : 2.54mm = 0254 (Incréments 0.254mm)
- 851 : Modèle
- 1 : PAD Thermique
- TH : Thermique

Ces essais ont été effectués en conditions de laboratoire et non représentatifs des conditions de service.

Bibliographie

[1] LHCb Collaboration “LHCb Tracker Upgrade Technical Design Report”, CERN-LHCB-TDR-015, 2014.

[2] R. Arink et al. “Performance of the LHCb Outer Tracker”, JINST 9 P01002, 2014.

[3] C. Elsasser et al. “The LHCb Silicon Tracker”, CERN-LHCb-PROC-2013-056, 2013.

[4] M. Tobin, LHCb Silicon Tracker Group “The LHCb Silicon Tracker”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research section A : Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 732, P. 168-172, 2013.

[5] J-P. Cachemiche, P-Y. Duval, F. Hachon, R. Le Gac and F. Réthoré “Readout board specifications for the LHCb upgrade”, CERN-EDMS-1251709, 2012.

[6] G. Battistoni et al. “The FLUKA code : Description and benchmarking”, CERN- SLAC-REPRINT-2007-184, 2007.

[7] A. Ferrari et al. “FLUKA : A multi-particle transport code (program version 2005)”, CERN-SLAC-R-773, 2005.

[8] N. Lopez March and M. Karacson “Radiation studies for the LHCb tracker upgrade”, CERN-LHCb-PUB-2014-022, 2014.

[9] D. Maillet, Y. Jarny, D. Petit “Problèmes inverses en diffusion thermique. Modèles diffusifs, mesures, sensibilités”, Techniques de l’ingénieur, dossier BE8265 v1, 2010.

[10] Y. Jannot and C. Moyne “Transferts thermiques : cours et 55 exercices corrigés”, ISBN 978-2-332-83699-1, 2016.

[11] AREELIS Technologies and LUSAC “Dissipation thermique dans les composants/systèmes électroniques”, NAE-1214-01-R1A, 2015.

[12] E. Saatdjian “Les bases de la mécanique des fluides et transferts de chaleur et de masse pour l’ingénieur”, ISBN 978-2-911761-85-0, 2009.

[13] J-P. Petit “Dissipation thermique dans les systèmes électroniques”, Techniques de l’ingénieur, dossier E3952 v2, 2001.

[14] F. Bernot “Composants de l’électronique de puissance”, Techniques de l’ingénieur, dossier E3960 v1, 2000.

[15] C. A. Harper “Passive Electronic Component Handbook”, ISBN 978-0070266988, 1997.

[16] D. Kahng and M. Hill “A historical perspective on the development of MOS transistors and related devices”, IEEE Transactions on Electron Devices, Volume 23, Issue 7, P. 655-657, 1976.

[17] J-M. Dorkel “Semi-conducteurs de puissance- Problèmes thermiques (partie 2) ”, Techniques de l’ingénieur, dossier D3113 v1, 2003.

[18] J-P. Perez and A. Romulus “Thermodynamique : Fondements et applications, avec exercices et problèmes résolus”, ISBN 978-2225842658, 1993.

[19] J. Fourier “Théorie analytique de la chaleur”, ISBN 978-2-876-47046-0, 1988.

[20] D. Scansen “Thermoelectric Energy Harvesting”, Digi-Key Electronics, 2011-10-26.

[21] Energie Plus “L’échangeur à caloduc”, https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=10863

[22] S. Chaudourne “Echangeurs à caloducs pour la récupération de chaleur dans les processus industriels”, Revue de Physique Appliquée, Volume 17, Numéro 9, P. 625-632, jpa-00245040, 1982.

[23] L. Boyer, C. Barre et G. Lelogeais “Réfrigération par convection à partir de l’azote liquide sur l’intervalle - 20 °C- - 100 °C”, Revue de Physique Appliquée, Volume 5, Numéro 4, P. 633-638, jpa-00243437, 1970.

[24] C. Gasq “Thermal Calculation of Boards and Cooling Prototype”, LPC Clermont-Ferrand, 2017.

[25] ASTM International, “Standard Test Method for Thermal Transmission Properties of Thermally Conductive Electrical Insulation Materials”, ASTM D 5470, 2012.

[26] P. Schelling, L. Shi and K. Goodson “Managing heat for electronics”, Materials Today, Volume 8, Issue 6, P. 30-35, 2005.

[27] R. Viswanath, V. Wakharkar, A. Watwe and V. Lebonheur “Thermal Performance Challenges from Silicon to Systems”, Intel Technology Journal Q3, 2000.

[28] R. Linderman, T. Brunschwiler, B. Smith and B. Michel “High-performance thermal interface technology overview”, EDA Publishing, P.129-134, hal-00202548, 2007.

[29] R. Prasher “Thermal Interface Materials : Historical Perspective, Status, and Future Directions” Proceedings of the IEEE, Volume 94, Issue 8, P. 1571-1586, INSPEC 9107466, 2006.

[30] J. Accorsi "The impact of carbon black morphology and dispersion on the weatherability of polyethylene", Chimica oggi, volume 18, 2000.

[31] J. Gwinn and R. Webb "Performance and testing of thermal interface materials", Microelectronics Journal, Volume 34, Issue 3, P. 215-222, 2003.

[32] M. De Sorgo "Thermal Interface Materials", Electronics cooling, Volume 2, Number 3, 1996.

[33] M. De Sorgo "Understanding Phase Change Materials", Electronics cooling, Volume 8, Number 2, 2002.

[34] J-P. Ousten, L. Menager, Z. Khatir and L Dupont "Etude d'interfaces thermiques pour le management thermique des modules de puissance", 10th European Power Electronics Conference, 5p, hal-01704057, 2010.

[35] Université d'Auvergne, "Plateau technique Pavirma", http://start.univ-bpclermont.fr/rubrique17.html

[36] CERN, "CERN High Energy Accelerator Mixed Field Facility", http://charm.web.cern.ch/.

[37] S. Cartier "Equilibre électronique", Docplayer,https://docplayer.fr/42426057-Equilibre-electronique.html

[38] J. Mekki et al. "CHARM : A Mixed Field Facility at CERN for Radiation Tests in Ground, Atmospheric, Space and Accelerator Representative Environments", IEEE Transactions on Nuclear Science, Volume 63, Issue 4, P. 2106-2114, 2016.

[39] IMHOTEP, "Properties of Materials under Irradiation", http://imhotep.rl.ac.uk/cgi-bin/imhquery.pl

[40] G. Spiezia et al. "A New RadMon Version for the LHC and its Injection Lines", IEEE Transactions on Nuclear Science, Volume 61, Issue 6, P. 3424-3431, 2014.

[41] G. Fraisse, J-Y. Serrat, C. Goupil and M. Lazard "Etude du comportement d'un élément thermoélectrique grâce à l'analogie électrique", Réunion du GDR Thermoélectricité de Montpellier, 2008. http://gdr-thermoelectricite.cnrs.fr/GDR2007-2010/Contributions-Montpellier2008/Fraisse.pdf

[42] Karl Joachim Euler, "Effet Thomson", Energie-Direktumwandlung, http://quanthomme.free.fr/qhsuite/2008News/imagenews08/Thermolectricite.pdf

[43] P. Andersson "Thermal conductivity of some rubbers under pressure by the transient hot-wire method", Journal of Applied Physics, Volume 47, Issue 6, P. 2424-2426, 2008.

[44] A. Degiovanni "Conductivité et diffusivité thermique des solides", Techniques de l'ingénieur, dossier R2850 v1, 1994.

[45] ASTM International, “Standard Test Method for Thermal Diffusivity of Solids by the Flash Method”, ASTM E1461-01, 2001.

[46] S. Gauthier “Caractérisation thermique de la matière par la méthode 3ω”, Univesrité Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, hal-Id tel-00826953, 2012.

[47] Y. Jannot “Théorie et pratique de la métrologie thermique”, Laboratoire d’Energétique et de Mécanique Théorique et Appliquée (LEMTA), 2011. http://www.thermique55.com/principal/metrologiethermique.pdf

[48] H. Bouquerel “Mesure de la conductivité thermique des roches par la méthode de la barre divisée, principe théorique de la méthode”, Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP), 2012.http://www.ipgp.fr/∼bouquerel/downloads/Principe%20barre%20divisee.pdf

[49] Organisation internationale de normalisation “Matériaux réfractaires - Détermination de la conductivité thermique - Partie 1 : Méthodes du fil chaud ("croisillon" et "thermomètre à résistance")”, NF EN ISO 8894-1, 2010.

[50] Y. Jannot and A. Degiovanni “Une nouvelle méthode de mesure des propriétés thermophysiques de super-isolants”, Société Française de Physique, 2008. Une nouvelle méthode de mesure des propriétés thermophysiques.pdf

Résumé

Dans le cadre de l'évolution du plus grand accélérateur circulaire de particules « LHC », un important programme de mise à niveau sur l'ensemble des détecteurs qui le constitue a été lancé. Parmi eux, on retrouve la mise à niveau du détecteur LHCb qui comprend le remplacement complet de plusieurs sous-détecteurs. La fréquence de lecture élevée de 40MHz, sans précédent dans une expérience de physique des particules, et l'environnement de rayonnement sévère lié à l'augmentation de l'intensité du LHC, sont les principaux défis à relever par les nouveaux sous-détecteurs. Le travail présenté dans ce manuscrit, décrit une petite partie de l'évolution du détecteur LHCb. Le développement et la construction d'un nouveau trajectographe à grande échelle, basé sur une nouvelle technologie à fibres scintillantes «SciFi», lues avec des photomultiplicateurs au silicium «SiPM», est l'un des projets clés du programme de mise à niveau de LHCb. La première partie, consiste à étudier les échanges thermiques et à concevoir un système de refroidissement pour chaque Read-Out Box « ROB » qui contient deux cartes électroniques frontales « FE », et qui permettent de lire les données du détecteur. Ces dernières possèdent une dissipation thermique d'environ 110W. Pour assurer le bon fonctionnement des composants électroniques, il est obligatoire de mettre en place un refroidisseur. Des contraintes importantes sont prisent en compte dans cette étude, la première représente l'espace limité en regard du besoin du système de refroidissement, des interfaces électroniques et mécanique, la seconde concerne les SiPM. Reliés à l'électronique par des câbles flexibles, elles sont situées à proximité de l'électronique « FE » et leur température de fonctionnement doit être parfaitement réglée autour des -40°C. Des travaux de simulations numériques sur les logiciels FloTHERM et ANSYS ont été menés sur le banc expérimental réalisé au sein du laboratoire, et qui nous ont permis de déterminer la solution de refroidissement la mieux adaptée. Cette étude nous a aussi montré qu'il est plus que nécessaire d'intégrer des interfaces thermiques « IT» telles que des pâtes thermiques afin d'assurer un meilleur transfert de chaleur entre les composants électroniques et le refroidisseur.

La deuxième partie, représente une étude approfondie sur les interfaces thermiques qui sont un point délicat de transfert de chaleur, car elles peuvent avoir plusieurs dizaines de pour cent de la résistance thermique globale. Pour garantir une utilisation adéquate et durable de ces matériaux, plusieurs paramètres ont été vérifiés, en particulier la dureté, la consistance (pas de production de graisse ou d'huile) et la conductivité thermique, grâce à un banc de mesures adapté d'après la méthode normalisé ASTM D5470, grâce auquel on a pu mesurer le flux de chaleur qui traverse l'échantillon d'interface thermique testé et qui est généré par une source chaude et un source froide qui sont montées aux extrémités de notre banc. Grâce à l'installation CHARME (CERN) et à la plate-forme PAVIRMA (Campus des Cézeaux), une série de mesure d'irradiations aux neutrons et aux rayons X sont également effectuées, correspondant à l'environnement dans lequel elles seront exposées dans l'expérience, d'un côté pour identifier les dégradations et changements possibles sur les résistances thermiques par l'analyse de l'impédance thermique, de l'autre pour identifier l'interface thermique qui convient le mieux à notre application et qui permet d'assurer un excellent échange thermique et donc un bon refroidissement de l'électronique frontale au sein du trajectographe du détecteur LHCb. .

Mots-clés: Étude Thermique, Simulation Thermique, Système de Refroidissement, Conductivité Thermique, Dégradation des Matériaux d'Interfaces, Tenus aux Radiations des Interfaces Thermiques.

Étude des échanges thermiques et conception d'un système de refroidissement pour le système de lecture du trajectographe SciFi de LHCb

Abstract

In the context of the evolution of the biggest circular accelerator of particles «LHC», an important program of upgrade on all the detectors which establishes itself was thrown. Among them, we find the upgrade of the detector LHCb which includes the complete replacement of several sub-detectors. The frequency of high reading of 40MHz, an unprecedented in an experiment of physical appearance of particles, and the environment of severe radiation bound to the increase of the intensity of the LHC, are the main challenges by the new sub-detectors. The work presented in this manuscript, described as a small part of the evolution of the LHCb detector. The development and the construction of a new wide-scale tracker, based on a new technology with scintillating fiber «SciFi», read with photomultipliers to the silicon «SiPM», is one of the key projects of the LHCb upgrade program. The first part, consists in studying the thermal exchanges and designing a cooling system for every Read-Out Box «ROB» which contains two electronic front-end « FE », and which allow to read the data of the detector. The latter has a thermal dissipation about 110W. To ensure the smooth running of electronic components, it is compulsory to set up a cooler. Important constraints are taken into account in this study, the first one represents the space limited compared to the need for the cooling system, the electronic interfaces and mechanical, the second concerns the SiPM. Connected with the electronics by flexible cables, they are located near the electronics «FE» and their temperature of operation is perfectly settled around -40 ° C. Works of digital simulations on the software FloTHERM and ANSYS were led on the experimental bench realized within the laboratory, and which allowed us to determine the best adapted solution of cooling. This study also showed to us that he is more than necessity to integrate thermal interfaces «IT» such as thermal pastas to assure a better transfer of heat between electronic components and cooler.

The second part, represents an in-depth study on the thermal interfaces which are a delicate point of transfer of heat, because they can have dozens percent of the global thermal resistance. To guarantee an adequate and sustainable use of these materials, several parameters were verified, in particular hardness, consistency (no production of fat or oil) and the thermal conductivity, thanks to a bench of measures adapted according to the method normalized ASTM D5470, with this bench we could measure the flow of heat through the tested thermal interface sample and which is generated by a hot source and a cold source that are mounted at the ends of our bench. With the installation CHARME (CERN) and PAVIRMA (Cézeaux), a series of measure of irradiations at the neutrons and the X-rays are also made, corresponding to the environment in which they will be exposed in the experience, on one side to identify the damages and the possible changes on the thermal resistances by the analysis of the thermal impedance, the other one to identify the thermal interface which suits best our application and which allows to assure an excellent thermal exchange and thus a good cooling of the frontal electronics within the trajectographe of the detector LHCb.

Keywords: Thermal Study, Thermal Simulation, Cooling System, Water Cooling, Thermal Interface, Thermal Conductivity , Radiation Interfaces of Thermal Interfaces.