



HAL
open science

Développements Instrumentaux pour la Physique Expérimentale

Adnan Ghribi

► **To cite this version:**

Adnan Ghribi. Développements Instrumentaux pour la Physique Expérimentale. Cosmologie et astrophysique extra-galactique [astro-ph.CO]. Université de Caen Normandie, 2021. tel-03342795

HAL Id: tel-03342795

<https://hal.science/tel-03342795>

Submitted on 13 Sep 2021

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.

Développements Instrumentaux pour la Physique Expérimentale

Habilitation à Diriger les Recherches

Soutenue le 12 juillet 2021 devant la commission d'examen
Université de Caen Normandie

par

Adnan Ghribi

Composition du jury

Rapporteurs	Pr. Christophe Goupil (Président)	Université de Paris
	Dr. Alessandro Monfardini	Institut Néel
	Dr. Guillaume Patanchon	Université de Paris
Examineurs	Pr. Michel Piat	Université de Paris
	Dr. Marek Lewitowicz	Grand Accélérateur National d'Ions Lourds
	Dr. Jean-Luc Biarotte	Laboratoire Irène Joliot-Curie



1

1. « Au nom du tout rayonnant d'amour, du très rayonnant d'amour » Ouverture traditionnelle dans les anciens manuscrits scientifiques arabes aussi utilisée comme calligraphie des contemplations cosmogoniques : déploiement du monde des concepts (mathématiques) vers le monde des éléments (physique).

A la mémoire de mon père

A l'olivier qui n'est plus

A la terre qui m'a vu naître

A mon soleil de minuit

A l'aube de mes trois astres



.

Résumé

1 Résumé (Français)

Le présent manuscrit est une rétrospective des douze dernières années de recherche. Elles m'ont mené à travers différentes thématiques dans différents projets, différents laboratoires, différents contextes ... Comme il fallait bien donner une cohérence, j'ai choisi de le diviser en trois parties distinctes. La première se concentre sur la cosmologie observationnelle. Elle s'appuie sur des projets et instruments astrophysiques. La deuxième est spécifique aux micro et nanotechnologies clés pour ces instruments. La dernière se détache quelque peu du reste et se place dans un contexte différent, celui des accélérateurs d'ions lourds. Elle est en apparence bornée à la cryogénie des accélérateurs. En réalité, elle concerne la modélisation multi-physique et les méthodes d'optimisations multi-paramétriques. Elle s'ouvre volontiers de la cryogénie vers la radiofréquence, le faisceau ou le diagnostique. Cette page n'est donc pas encore complètement écrite. Du moins l'encrier n'est-il pas encore fermé.

2 Abstract (English)

Going forward and looking back go aside. In my case, it is difficult to find a unique line that the research activities I have been involved in during the last twelve years would follow. Instead, it follows three different branches. The first is the one of the eye that looks into the sky and, while feet in the mud, tries to make the best of what it has to make sense of what it sees. The second, is the one of tiny hands, building tiny things to make big stuff work. The third steps back with regard to the primary curiosity motives. Yet it takes the game's complexity to a whole new level. Perhaps, multi physics modelling, control and trying to open up to other fields and disciplines could be one guide line. In this retrospective report, the three branches go by the names of experimental cosmology, nanotechnology and cryogenics for accelerators. If I was asked to make a rule from it, it would be "don't ever let the ink go dry".

Avant propos

Ce document est une histoire qui continue de s'écrire. Une histoire qui se narre aussi, certes, grâce au temps qui passe mais qui est surtout le fruit des rencontres, des efforts collectifs et de la convergence des idées pour faire face à quelques-uns des défis de ce siècle. Impulsion primitive ou instinct de survie ? De la quête des origines aux défis énergétiques, nos avancées nous poussent à aller encore plus loin dans notre compréhension du monde macroscopique et microscopique, pour peut-être un jour le voir ... différemment.

Comment imaginer qu'observer les ailes d'un papillon ou l'oreille humaine permettrait de mieux se jouer des photons fossiles ou comment la physique du solide et la thermodynamique nous permettent de mimer sur terre des phénomènes astrophysiques ? Le monde qui nous entoure ; l'Univers n'est-il pas ce laboratoire fascinant et incompréhensible à la fois que nous peinons à comprendre ? Les accélérateurs de particules, eux, sont notre lot de consolation : pyramides des civilisations modernes, des laboratoires que nous comprenons mais que nous peinons à dompter. De même que les méthodes impliquant les concepts d'impédance généralisée peuvent s'avérer utiles dans la lutte contre la précarité énergétique, les algorithmes derrière les futurs grands réseaux énergétiques intelligents peuvent s'avérer d'une aide précieuse dans l'optimisation des grands instruments de demain. Étonnant l'est encore ce constat que les instruments de la cosmologie moderne et les accélérateurs supraconducteurs utilisent, à des échelles différentes, des technologies similaires, pour guider des photons pour l'une et des particules pour l'autre, vers leur ultime destin.

Dans ce paysage scientifique et humain, les disciplines s'effacent pour laisser place à ces jumelles inséparables : la science et la technique.

Table des matières

Résumé	v
1 Résumé (Français)	v
2 Abstract (English)	v
Avant propos	vii
I Dossier Personnel	1
Curriculum Vitae	3
Activités d'enseignement et d'encadrement	5
Publications & Communications	9
II Activités de Recherche	13
1 Cosmologie Expérimentale	15
1 Introduction à la cosmologie expérimentale	15
1.1 L'histoire de l'Univers : Une épopée humaine	15
1.2 Les paramètres cosmologiques	17
1.3 Les observables du CMB	18
1.4 Modes B et contraintes d'observation	23
2 Architectures Intelligentes et Technologies avancées	25
2.1 La traque des ondes gravitationnelles primordiales	25
2.2 Architectures de détection intelligentes	27
2.3 Technologies de détection	31
3 Participation aux projets et expériences d'observation	31
3.1 De BRAIN à QUBIC	31
3.2 PolarBear	34
3.3 Autres projets	39
3.4 Les instruments spatiaux	40
4 Publication choisie	42
2 Technologies de détection supraconductrices	49
1 Introduction	49
2 Bancs de tests cryogéniques	52
2.1 Objectifs	52
2.2 Montages et géométries	53
2.3 Extraction des paramètres d'intérêt	56
3 Optimisation des processus de micro-fabrication	57
3.1 PolarBear	58
3.2 PolarBear 2	60
3.3 QUBIC	60
4 Plans focaux multi-chroïques	63
5 Commutateurs et déphaseurs à état solide	68
6 Participation aux programmes de R&D	71
6.1 DCMB	71

6.2	COS2	71
6.3	BSD	71
6.4	COSMOS	71
6.5	ESA AO/1-7393/12/NL/MH	71
7	Publication choisie	73
3	La cryogénie au service des accélérateurs	83
1	Introduction	83
2	Résumé des participations aux projets et aux programmes de R&D	86
2.1	SPIRAL2	86
2.2	S3	87
2.3	NewGain	87
2.4	GRAAL	89
2.5	NGCryo	90
2.6	NGTACryo	91
2.7	EuroLabs	91
3	La cryogénie de SPIRAL2	92
3.1	Présentation du système	92
3.2	Un peu d'histoire : Mise en place et réception du système	95
3.3	Optimisation et opération du système	100
3.4	Investigation de la problématique de CM ^A ₁₁	109
3.5	Evolutions futures du système	111
3.6	La thermo-acoustique cryogénique de SPIRAL2	115
4	Publications choisies	116
4.1	Publication 1	116
4.2	Publication 2	127
4	Perspectives	133
1	QUBIC, l'aventure continue	133
2	Micro-composants pour la cosmologie	133
3	SPIRAL2	133
3.1	Vers une meilleure compréhension de la thermo-acoustique cryogénique	134
3.2	Développements pour un contrôle et un diagnostique intelligent	134
3.3	Expériences en accélérateur pour l'astrophysique nucléaire et la physique des particules	134
III	Annexes	135
		137
1	PolarBear Process Sheet	137
2	EuroLabs	142
3	P&ID Production	145
4	P&ID Exploitation	146
5	Grafcet cryomodule	147
	Glossaire	155
	Acronymes	159

Table des figures

1.1	A gauche : mesure du spectre du corps noir du CMB par COBE/FIRAS[Mat+94]. A droite : Mesure des anisotropies de température du CMB avec COBE/DMR avec la galaxie au centre.[Smoot et al., ApJ (1994)]	16
1.2	Cartes du ciel mesurées par l'instrument COBE/DMR. A gauche : le monopole ou le corps noir. Au milieu : le dipôle. A droite : les anisotropies de température et la galaxie.	18
1.3	Spectre de puissance angulaire C_ℓ^{TT} des anisotropies de température du Cosmic Microwave Background ou Fond Diffus Cosmologique (CMB) mesuré par l'instrument HFI du satellite Planck [Col+15a].	20
1.4	Température de brillance des anisotropies de température (à gauche) et de polarisation (à droite) du CMB en fonction de la fréquence avec les masques d'émission des avant-plans obtenus d'après les données de février 2015 de Planck HFI [Col+15b]. Les masques sont représentés pour des couvertures du ciel de 81% à 93% pour la température et de 73% à 93% pour la polarisation.	23
1.5	Carte de l'intensité des anisotropies de température du fond diffus cosmologique à une résolution de 5' à partir de l'analyse combinée des données de Planck High Frequency Instrument (HFI) 2015 et du satellite WMAP [Col+15b].	24
1.6	Spectres de puissances C_ℓ^{EE} (à gauche) et C_ℓ^{TE} (à droite) du CMB avec fit théorique (partie haute - rouge) et résiduels (partie basse) à partir des données de Planck HFI 2015 [Col+15b].	24
1.7	A gauche : Contours de limite sur r (avec 68% et 95% de confiance) à partir du fit du spectre C_ℓ^{BB} avec le modèle lentillage+ Λ CDM+poussière provenant des données combinées de Planck HFI (217GHz et 353GHz), de Keck Array (150GHz) et de BICEP2 (150GHz). La couleur noire montre le cas principal avec données combinées Planck+BICEP2+Keck. La couleur rouge représente Planck+Keck. La couleur bleue représente Planck+BICEP2. A droite : Spectre de puissance C_ℓ^{BB} avant et après soustraction de l'effet de la poussière à partir des données polarisées de Planck 2015 [Ade+15].	25
1.8	Carte du ciel filtrée à 5' de la polarisation du fond diffus cosmologique mesurée par l'instrument HFI du satellite Planck. Les couleurs représentent la température du CMB. Les motifs sont obtenus par technique LIC. Ils représentent la direction de polarisation, dominés ici par les modes E [Col+15b].	26
1.9	Exemples d'architectures de détection évoluées. Les détails de l'optique et du filtrage sont omis par souci de simplification. (a) Interférométrie multiplicative (classique); (b) Interférométrie additive (incohérente); (c) Imageur à polarimétrie fixe; (d) Imageur à polarimétrie variable.	28
1.10	Coupe de l'instrument montrant les différents sous-systèmes dans leur configuration réelle [Ham+20]	32
1.11	Photo du télescope HTT pendant le déploiement de PolarBear au Chili en 2012.	34
1.12	Cryostat de PolarBear avec les différents éléments optiques.	35
1.13	(a) Photo d'une matrice de détecteur monolithique partiellement assemblée avec un agrandissement sur un pixel unitaire sensible à la polarisation et un deuxième agrandissement au microscope électronique à balayage montrant la structure du thermostat du bolomètre supraconducteur. (b) Plan focal entièrement assemblé montrant l'ensemble des matrices de détecteurs avec leurs micro-lentilles.	35
1.14	A droite : Différence entre les profondeurs des points mesurées par photogrammétrie avant et après correction du stress de la surface du miroir primaire. A gauche : Différence entre la surface théorique et la surface réelle du miroir primaire mesurée par photogrammétrie. Chaque point représente une cible réfléchive collée sur la surface.	37
1.15	Mesures d'inclinaison à l'aide de l'inclinomètre D711-2A avant et après correction de la base du télescope.	39
1.16	A gauche : spectre de puissance C_l^{BB} des modes B de polarisation du fond diffus cosmologique de différentes expériences incluant PolarBear selon [Chi+20]. La courbe noire représente le spectre théorique selon le modèle Λ CDM. A droite : Spectre de puissance C_l^{EE} des modes E de polarisation du fond diffus cosmologique issu de plusieurs expériences incluant PolarBear selon [Ada+20].	40

2.1	Comparaison des détectivités de plusieurs technologies de détecteurs dans le millimétrique et l'infrarouge. Cas des Transition Edge Sensors (TESs) et des Kinetic Inductance Detectors (KIDs) calculés pour PRISM. Cas des radiomètres (4,2 K), des Hot Electron Bolometers (HEBs) et des photoconducteurs à partir de [Rog17].	51
2.2	A gauche : principe de fonctionnement d'un bolomètre. A droite : variation de la résistance en fonction de la température pour différents types de thermomètres.	52
2.3	Résumé des principales technologies de lignes de transmission planaires utilisées.	52
2.4	Arborescence des technologies couramment utilisées dans les expériences de CMB pour acheminer le signal astrophysique du ciel aux détecteurs.	53
2.5	Réponse fréquentielle d'un pixel de PolarBear 2 mesurée à l'aide d'un spectromètre à transformée de Fourier.	54
2.6	Photo des microprobes montés dans le cryostat de test et en contact avec une ligne micro-ruban en Nb sur substrat de SiO_x	54
2.7	Montage type "flipchip" avec trois connecteurs coax à micro-ruban montés. Les lignes micro-rubans sont structurées sur un support en Kapton. Une pièce en G10 assure la pression nécessaire au contact entre les lignes micro-rubans et les lignes coplanaires sur Silicium.	55
2.8	Mesure de l'amplitude des paramètres de diffusion S21 (transmission) et S11 (réflexion) / Mesures 2 ports de la transition coax (gore flex) à micro-ruban (sur Kapton) à ligne coplaire sur Silicium (contact direct flip chip).	55
2.9	Structures d'extraction d'impédance caractéristique.	56
2.10	Simulation de la transmission d'un résonateur à stub radial avec et sans une surcouche de $0,5 \mu m$ de SiO_2 . La ligne micro-ruban a une largeur de $6 \mu m$ et le diélectrique considéré est du SiO_2 de $0,5 \mu m$ d'épaisseur.	57
2.11	Pertes diélectriques en fonction de la fréquence, de la longueur des lignes et de $\tan \delta$ pour $\epsilon_e = 2,91$	58
2.12	Schéma de principe du montage des micro-lentilles sur le substrat en Silicium montrant : (a) Lentille hémisphérique; (b) Substrat Silicium; (c) Plan de masse en Nb ; (d) Couche de SiO_2 ; (e) Couche de Niobium structurée; (f) Agrandissement d'un pixel de PolarBear montrant une antenne à fente sensible à la polarisation, 4 filtres micro-rubans et deux bolomètres. L'ensemble des nanostructures n'est pas représenté sur ce schéma.	59
2.13	Resumé des étapes de micro-fabrication d'un pixel du plan focal de PolarBear.	59
2.14	Passage d'un substrat de 3" à un substrat de 6" dans la fabrication de matrices de détecteurs et gains en nombre de détecteurs.	61
2.15	Photos des dommages les plus courants pendant le développement du procédé de fabrication des matrices de détecteurs de Q and U Bolometric Interferometer for Cosmology (QUBIC).	62
2.16	Evolution du yield électrique pendant le développement du procédé de micro-fabrication des matrices de QUBIC.	62
2.17	Resumé des étapes de micro-fabrication d'un pixel du plan focal de QUBIC	63
2.18	Un des plans focaux dimensionnés pour la proposition de satellite Core dans le cadre du projet B-mode Superconducting Detectors (BSD) pour un fonctionnement entre 60 GHz et 600 GHz.	64
2.19	A gauche : pixel bi-chroïque d'un polarimètre intégré réalisé pour PolarBear 2a [Suz+12]. Au milieu : pixel avec une banque de filtres permettant de séparer 7 bandes de fréquences. Les deux pixels fonctionnent entre 70 GHz et 220 GHz. A droite : photographie d'une antenne sinus log-périodique à 11 cellules avec $\alpha = 45^\circ$, $\delta = 22,5^\circ$, $\tau = 1,3$ et $R_1 = 24 \mu m$ [Suz13].	65
2.20	Diviseurs de spectre à deux canaux : (a) Filtre à stubs. (b) Filtre à structure hybride à éléments localisés. (b) Diviseur de spectres à 7 canaux fonctionnant entre 70 GHz et 220 GHz. Les composants sont en Nb sur $0,4 \mu m$ de SiO_x [Suz+12].	66
2.21	A droite : Isocontours théoriques d'une lentille semi-ellipsoïdale conçue pour une antenne sinus logpériodique fonctionnant autour de 90 GHz. A gauche : Résultat de l'optique transformative de la lentille semi-ellipsoïdale en lentille plane à trous. $\Delta\phi$ est ici le déphasage que subit l'onde incidente dans la structure de la lentille.	67
2.22	Démonstration de la fabrication d'un revêtement anti-réfléctif à deux couches dans le cadre du projet AO/1-7393/12/NL/MH.	67
2.23	A gauche, résultats de mesures 4 pointes de résistivité Van der Pauw. A droite : Mesure de la tension aux bornes du micro-pont montrant une constante de temps τ de $0,5 \mu s$ [Bor14].	69
2.24	Figure de concept d'un spectromètre à transformée de Fourier planaire utilisant 10 déphaseurs à inductance cinétique en série.	70
2.25	A gauche : micro-pont supraconducteur fabriqué dans le cadre du projet BSD (crédit D. Camilleri). A droite : coupleur hybride à matériaux mains gauches fabriqué dans le cadre de la collaboration COSMOS (crédit A. Sidibé).	70

3.1	A gauche : Energie et courant moyen des faisceaux de différents accélérateurs. SPIRAL2 figure parmi les accélérateurs ciblant les noyaux rares et exotiques [Wei+ 14]. A droite : charte des isotopes montrant plus de 3000 éléments découverts en laboratoire (en bleu) et le territoire encore inconnu (en rouge). Les deux figures proviennent de [Wei19].	85
3.2	Différents composants de l'accélérateurs SPIRAL2.	85
3.3	Evolution des ressources humaines dans l'équipe cryogénie du GANIL au fil du temps. Les ressources temporaires sont aussi incluses.	87
3.4	Vue 3D de l'installation cryogénique du spectromètre S3 [Crédit : F. Lutton].	88
3.5	Vue 3D de l'installation cryogénique de Système de Production d'Ions RAdioactifs en Ligne de 2e génération (SPIRAL2) [Crédit : M. Clément].	91
3.6	Principe de fonctionnement de la partie production de l'installation cryogénique SPIRAL2. En Rouge : cycle principal en réfrigération Dewar. En vert : extension du cycle principal vers la réfrigération du LINear Accelerator (LINAC) SPIRAL2. En bleu : gestion et stockage du retour d'hélium impur et son épuration en vue de sa ré-injection dans le cycle principal. Dans notre cas, la pression du cycle de haute pression a été fixée à 14,7 bars absolus.	92
3.7	Diagramme TS (température-entropie) et P&ID associé de la boîte froide SPIRAL2.	93
3.8	Schéma de l'installation cryogénique dite d'exploitation du LINAC SPIRAL2.	94
3.9	Vue 3D et P&ID simplifiés des cryomodules SPIRAL2. (a) système d'accord en fréquence CM^B ; (b) écrans magnétiques CM^B ; (c) écrans thermiques CM^B ; (d) coupleurs radiofréquences cavités B; (e) réservoir de garde CM^B ; (2) écrans thermiques CM^A ; (3) bain LHe CM^A ; (4) cavité accélératrice CM^A ; (5) système d'accord en fréquence CM^A ; (6) thermo-siphon CM^A ; (7) coupleur radiofréquence CM^A	96
3.10	Les différents systèmes de contrôle commande de la cryogénie SPIRAL2 et leur organisation.	97
3.11	Ligne de temps des différents jalons de la mise en place et de la réception de la cryogénie de SPIRAL2.	97
3.12	Photographies du LINAC entre 2014 et 2017 montrant la mise en place graduelle des différents éléments qui le composent.	98
3.13	Deux des résultats de la mise en froid partielle du LINAC SPIRAL2 de juillet 2016. A gauche : apparition puis élimination d'oscillations thermo-acoustiques dans le dewar aux moments de la connexion de la boîte froide au dewar et à l'activation de la vanne de la capacité tampon. A droite : pression des bains LHe des cryomodules CM^A_{03} et CM^B_{07}	99
3.14	Deux des résultats de la mise en froid partielle du LINAC SPIRAL2 de décembre 2016 pour $CM^A_{01,02}$ et CM^B_{07} . A gauche : Descente en froid des cavités et remplissage de leurs séparateurs de phase en LHe. A droite : Pression des bains des cavités.	99
3.15	A gauche : Pressions des bains LHe des cavités du LINAC et compteur de déviation associé. A droite : Modulation de la différence d'amplitude entre la puissance radiofréquence transmise P_t et incidente P_i	100
3.16	Mesures des charges statiques des cryomodules du LINAC SPIRAL2 pour les années 2018, 2019 et 2020.	101
3.17	Evolution du $Q_{dcou\text{nt}}$ entre la première mise en froid en 2017 et la dernière mise en froid en 2020.	102
3.18	Etapes d'une mise en froid typique d'une cavité SPIRAL2 (ici CM^A_{03}). A gauche : descente contrôlée de la température de la cavité. A droite : Remplissage et régulation du bain LHe.	103
3.19	A gauche : Equilibrage du débit hélium du LINAC avec mise en évidence des différentes contributions. A droite : Mesures et fits des charges thermiques du LINAC en fonction du champ accélérateur.	105
3.20	A gauche : heatmap de la mesure de la charge thermique du LINAC en fonction du champ accélérateur. A droite : heatmap de la compensation automatique de charge LINAC en fonction du champ accélérateur.	106
3.21	A gauche : corrélation croisée LINAC des variations de niveau d'hélium liquide. A droite : corrélation croisée LINAC des variations de pression de bain LHe. Pour les deux figures, le triangle supérieur représente les anti-corrélations tandis que le triangle inférieur représente les corrélations.	109
3.22	A gauche : corrélations internes entre les variations de niveau et de pression de bain LHe. A droite : Compteur de déviation montrant le nombre de dépassements et leurs amplitudes pour une consigne de $\Delta P = \pm 5 \text{ mbar}$	109
3.23	A gauche : compteur de déviation de pression avec $\Delta(P) = \pm 5 \text{ mbars}$. A droite : compteur de déviation de pression avec $\Delta(P) = \pm 2 \text{ mbars}$	110
3.24	Distributions statistiques de différentes mesures de vannes, pressions, niveaux LHe pendant une procédure de réglage.	111
3.25	A gauche : mesures des températures du fond de la cavité CM^A_{11} à l'IRFU et au GANIL. A droite : Mesures de charges thermiques, de BLM et de température de fond de cavité.	112
3.26	A gauche : fit à deux régions des mesures de charge thermique de CM^A_{11} . A droite : Calcul de Q_0 à partir des mesures de charge thermique de CM^A_{11}	112

3.27 Mesure et estimation de la charge thermique en utilisant le filtre de Kalman étendu et le modèle thermodynamique des cryomodules.	113
3.28 Proposition d'interface de diagnostique et de suivi de paramètres.	115

Liste des tableaux

1.1	Récapitulatif des principales expériences encore dans la course pour la détection des modes B de polarisation du CMB. Le tableau retrace les différentes architectures et technologies de détection associées ainsi que l'objectif rapport tenseur sur scalaire.	27
1.2	Bruit équivalent en puissance (NEP) et constante de temps requis pour les détecteurs de PRISM en fonction de la fréquence et de la technologie des détecteurs.	41
2.1	Exemple de détails de fabrication extraits de la base de données mise en place à UC Berkeley. . . .	60
3.1	Spécifications principales des faisceaux de SPIRAL2.	85
3.2	Résumé des propriétés communes et des différences des cavités accélératrices SPIRAL2.	95
3.3	Modes des essais de réception de l'usine cryogénique SPIRAL2 : Spécifications et mesures.	98
3.4	Résumé des principales perturbations qui peuvent affecter la régulation RF des cavités SPIRAL2. .	103
3.5	Sensibilité à la pression des cavités SPIRAL2 et contrainte de régulation de la pression des bains pour $\delta\phi = \pi/12$ et $Q_L \sim 10^6$	104
3.6	Paramètres de compensation dynamique de charge du LINAC SPIRAL2 (données 2020).	107

Première partie

Dossier Personnel

Curriculum Vitae

Affectation et carrière

Organisme	Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS)
Institut	Institut national de physique nucléaire et de physique des particules (IN2P3)
Laboratoire	Grand Accélérateur National d'Ions Lourds (GANIL)
Section CNU	29 ^{ème} section
Affectation depuis le	12 décembre 2014

Adresse professionnelle

Grand Accélérateur National d'Ions Lourds
Boulevard Henri Becquerel
14000, Caen
Tel : +33 (0)2 31 45 46 80
adnan.ghribi@ganil.fr

Expérience de recherche

Dec. 2014 Aujourd'hui	Grand Accélérateur National d'Ions Lourds Ingénieur de recherche	Caen, France Centre National de la Recherche Scientifique
Oct. 2012 Dec. 2014	Laboratoire AstroParticule et Cosmologie Chercheur contractuel	Paris, France Centre National de la Recherche Scientifique
Mai 2010 Oct. 2012	University of California Berkeley Chercheur postdoctorant	Berkeley CA, USA Financement NASA
Nov. 2009 Mai 2010	Laboratoire AstroParticule et Cosmologie Ingénieur de recherche	Paris, France Financement ANR

Projets

Astrophysique	QUBIC ; PolarBear ; PolarBear II ; GroundBird LiteBird (JAXA) ; PRISM (ESA) DCMB (CNES) ; BSD (CNES) ; COSMOS (ANR) DEFI (CNRS) ; COS2 (ANR) ; ITT (ESA) ; MFP (NSF/NASA)	Instruments sol Projets de satellites R&D
Nucléaire	SPIRAL2 (CEA/CNRS) S3 (CEA/CNRS, DOE)	Accélérateur d'Ions Lourds Spectromètre de masse
Cryogénie	GRAAL (CNRS, CEA), Responsable scientifique NGTACryo (APC, GANIL, IJCLab) NGCryo (APC, GANIL, IJCLab)	Grande Réfrigération Next Generation ThermoAcoustic Cryogenic Next Generation Cryogenic systems

Formation académique

2006 – 2009	Doctorat Astronomie et Astrophysique Laboratoire AstroParticule et Cosmologie Université Paris 7 Denis Diderot
Sujet	Composants RF planaires supraconducteurs pour la mesure de la polarisation du fond diffus cosmologique et application à l'interférométrie bolométrique.
Jury	P. Binetruy ; G. Alquié ; M. Giard ; J-M. Lamarre ; A. Navarrini ; M. Piat (directeur)
2004 – 2006	Master Instrumentation et Techniques Spatiales Université Paul Sabatier, Toulouse

Activités d'enseignement et d'encadrement

Résumé

Travaux pratiques	Master 2 instrumentation spatiale	2008-2009-2012-2013-2014
Stages	M2/ingénieur – 3 encadrements	2020-2016-2008
	Alternance – 1 encadrement	2018 à 2021
	L3/M1 – 7 encadrements	2021-2016-2014-2013-2012-2011-2008
Thèses de doctorat	1 co-encadrement 50% (Projet GRAAL)	2016 à 2019
	1 co-encadrement 15%	2014

Encadrement

Niveau	Stage M1
Ecole	INP-ENSE3
Etudiant	Julien Ceszowski jceszkowski@gmail.com
Taux	50%
Date	Mai 2021 – Aout 2021
Sujet	Etude et mise en place d'un observateur de charge virtuel
Détails	Ce stage s'inscrit dans le cadre de la continuité des travaux de la collaboration GRAAL et du commissioning de l'installation cryogénique Spiral 2.

Niveau	Stage ingénieur de fin d'études
Ecole	INP-ENSE3
Etudiant	Clarisse Poupon-Pourchot clarisse.poupon-pourchot@grenoble-inp.org
Taux	50%
Date	Mars 2020 – Aout 2020
Sujet	Fiabilisation d'un système de contrôle avancé à base de modèle pour le système cryogénique d'un accélérateur d'ions lourds supraconducteur.
Détails	Ce stage s'inscrit dans le cadre de la continuité des travaux de la collaboration GRAAL et du commissioning de l'installation cryogénique Spiral 2.

Niveau	Alternant ingénieur
Ecole	Mines ParisTech
Etudiant	Yoann Beaumont yoann.beaumont@ganil.fr
Taux	50%
Date	Nov. 2018 – Aout 2021
Détails	Exploitation et optimisation des grandes installations cryogéniques pour les accélérateurs.

Niveau **Doctorat**
Université Université de Caen
Etudiant Adrien Vassal adrien.vassal@ganil.fr
Directeur Marek Lewitowicz marek.lewitowicz@ganil.fr
Taux 50%
Date Oct. 2016 – Nov. 2019
Sujet Etude d'un système cryogénique multi-clients pour SPIRAL2
Détails Cette thèse s'inscrit dans le cadre du projet GRAAL ; une collaboration entre le SBT/INAC/CEA et le GANIL. L'objectif est d'optimiser l'installation cryogénique SPIRAL 2 tout en levant les verrous technologiques pour la régulation des futurs accélérateurs supraconducteurs.

Niveau **Stage ingénieur de fin d'études**
Ecole UTBM
Etudiant Yoann Bert yoann1771@gmail.com
Taux 100%
Date Jan. 2016 – Juin 2016
Sujet Recherche de la meilleure stratégie de mise en froid pour les cryomodules du LINAC SPIRAL 2
Détails Modélisation du système cryogénique de SPIRAL2 et étude des différentes stratégies de mise en froid de l'accélérateur.

Niveau **Stage DUT**
Ecole IUT Grenoble 1
Etudiant Anne Solenne Leynac as-leygnac@outlook.fr
Taux 100%
Date Avril 2016 – Juin 2016
Sujet Optimisation de la procédure de maintenance du système cryogénique d'un accélérateur d'ions lourds
Détails Etablissement d'une base de données pour le suivi de la maintenance des équipements de l'usine cryogénique Spiral 2.

Niveau **Doctorat**
Université Université Paris Diderot
Etudiant Camille Perbost camille.perbost@apc.univ-paris7.fr
Directeur Michel Piat piat@apc.univ-paris7.fr
Taux 15%
Date Oct. 2013 – Dec. 2014
Sujet Matrices de bolomètres supra-conducteurs pour la mesure de la polarisation du fond diffus cosmologique
Détails Cette thèse se concentre sur la fabrication et la caractérisation des matrices de bolomètres supraconducteurs pour l'instrument QUBIC dans la continuité des travaux entrepris précédemment sur les parties RF, détecteurs individuels et électronique de lecture.

Niveau	Stage ingénieur 1ère année
Université	Université Paris Diderot
Etudiant	Reda El Mekkaoui elmekkaouireda@gmail.com
Taux	100%
Date	Juillet 2014 – Aout 2014
Sujet	Simulations électromagnétiques
Détails	Familiarisation avec le logiciel CST MWS et simulations d'antennes sinus log-périodiques.
Niveau	Mastrer 2
Université	Université Paris Diderot
Etudiant	Camille Perbost camille.perbost@apc.univ-paris7.fr
Taux	50%
Date	Mars 2013 – Juin 2013
Sujet	Matrices de détecteurs pour QUBIC
Détails	Contribution aux tests du quart de plan focal de l'instrument QUBIC.
Niveau	Undergraduate
Université	University of California Berkeley
Etudiant	Andrew Dunsworth andrewdunzy@gmail.com
Taux	100%
Date	Mars 2012 – Avril 2012
Sujet	Système de micro-positionnement cryogénique
Détails	A l'université de Berkeley, les étudiants participent assez tôt dans leur cursus à la vie des laboratoires à travers des petits projets. Andrew a participé à un travail pour la mise en place d'un système de micro-positionnement cryogénique X-Y.
Niveau	Graduate
Université	Keio University
Etudiant	Hanako Hoshiro sf.fk.o.vl@a7.keio.jp
Taux	100%
Date	Juillet 2012 – Aout 2012
Sujet	Micro-électronique supraconductrice
Détails	Ce stage a eu lieu dans le cadre d'échanges entre les deux groupes de cosmologie de l'université de Berkeley aux Etats Unis et KEK au Japon. Il visait à former et à familiariser une étudiante japonaise à la micro-électronique supraconductrice et aux simulations électromagnétiques.
Niveau	Stage ingénieur de fin d'étude
Ecole	ENSEA
Etudiant	Guillaume Bordier proxy42@gmail.com
Taux	100%
Date	Fev. 2009 – Juin 2009
Sujet	Développement de composants micro-ondes pour l'observation de la polarisation du fond diffus cosmologique
Détails	Ce travail de stage s'est concentré autour de l'étude des filtres à fréquences sélectives, de simulations électromagnétiques et des mesures vectorielles associées sur banc quasi-optique.

Niveau	Master 2	
Université	Observatoire de Paris	
Etudiant	Silvia Galli	linua6@hotmail.com
Taux	50%	
Date	Avril 2007 – Juin 2007	
Sujet	Bolometric interferometry demonstrator to measure the Cosmic Microwave Background polarization	
Détails	Ce travail de stage s'inscrit dans le cadre d'une campagne de tests vectoriels pour la validation d'un démonstrateur d'interférométrie bolométrique.	

Enseignement

Formation	M2 photodétection	Université Paris Diderot
Responsable	Michel Piat	piat@apc.univ-paris7.fr
Module	Instrumentation bas bruit	
Type	Travaux Pratiques	
Dates	2008 – 2009 – 2013 – 2014	
Description	Ces travaux pratiques visent à familiariser les étudiants avec des systèmes de détection à 4 Kelvin sur banc de test optique.	

Formation	M2 photodétection	Université Paris Diderot
Responsable	Michel Piat	piat@apc.univ-paris7.fr
Module	Penzias et Wilson @ APC	
Type	Travaux Pratiques	
Dates	2014	
Description	Et si, avec 100€ seulement, il était possible d'observer un signal vieux de 13,7 milliards d'années à partir d'un toit Parisien. C'est ce que Michel Piat a mis en place avec des étudiants de M2 dans le cadre de travaux pratiques assez novateurs.	

Publications & Communications

Publications dans des revues internationales à comité de lecture

Périodiques

- [1] Adnan Ghribi et al. « First full cool down of the SPIRAL 2 superconducting LINAC ». In : Cryogenics 110 (sept. 2020). issn : 00112275. doi : [10.1016/j.cryogenics.2020.103126](https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2020.103126).
- [2] A Ghribi et al. « Status of the SPIRAL 2 LINAC cryogenic system ». In : Cryogenics 85 (2017), p. 44-50.
- [3] G. Bordier et al. « Superconducting Coplanar Switch and Phase Shifter for CMB Applications ». In : Journal of Low Temperature Physics 184 (août 2016), p. 547-552. doi : [10.1007/s10909-016-1567-z](https://doi.org/10.1007/s10909-016-1567-z).
- [4] A. Tartari et al. « QUBIC : A Fizeau Interferometer Targeting Primordial B-Modes ». In : Journal of Low Temperature Physics 184 (août 2016), p. 739-745. doi : [10.1007/s10909-015-1398-3](https://doi.org/10.1007/s10909-015-1398-3).
- [5] P. André et al. « PRISM (Polarized Radiation Imaging and Spectroscopy Mission) : an extended white paper ». In : Journal of Cosmology and Astroparticle Physics 2, 006 (fév. 2014), p. 006. doi : [10.1088/1475-7516/2014/02/006](https://doi.org/10.1088/1475-7516/2014/02/006). arXiv : [1310.1554](https://arxiv.org/abs/1310.1554).
- [6] Philippe André et al. « PRISM (Polarized Radiation Imaging and Spectroscopy Mission) : an extended white paper ». In : Journal of Cosmology and Astroparticle Physics 2014.02 (fév. 2014), p. 006-006. doi : [10.1088/1475-7516/2014/02/006](https://doi.org/10.1088/1475-7516/2014/02/006). url : <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2014/02/006>.
- [7] D. Barron et al. « The POLARBEAR Cosmic Microwave Background Polarization Experiment ». In : Journal of Low Temperature Physics 176 (sept. 2014), p. 726-732. doi : [10.1007/s10909-013-1065-5](https://doi.org/10.1007/s10909-013-1065-5).
- [8] G. Bordier et al. « Superconducting NbN Coplanar Switch Driven by DC Current for CMB Instruments ». In : Journal of Low Temperature Physics 176 (sept. 2014), p. 663-669. doi : [10.1007/s10909-014-1103-y](https://doi.org/10.1007/s10909-014-1103-y).
- [9] A. Ghribi et al. « Latest Progress on the QUBIC Instrument ». In : Journal of Low Temperature Physics 176 (sept. 2014), p. 698-704. doi : [10.1007/s10909-013-1024-1](https://doi.org/10.1007/s10909-013-1024-1). arXiv : [1307.5701](https://arxiv.org/abs/1307.5701) [[astro-ph.IM](https://arxiv.org/abs/1307.5701)].
- [10] J. Martino et al. « Complementary Measurement of Thermal Architecture of NbSi TES with Alpha Particle and Complex Impedance ». In : Journal of Low Temperature Physics 176 (août 2014), p. 350-355. doi : [10.1007/s10909-013-1053-9](https://doi.org/10.1007/s10909-013-1053-9).
- [11] T. Matsumura et al. « Mission Design of LiteBIRD ». In : Journal of Low Temperature Physics 176 (sept. 2014), p. 733-740. doi : [10.1007/s10909-013-0996-1](https://doi.org/10.1007/s10909-013-0996-1). arXiv : [1311.2847](https://arxiv.org/abs/1311.2847) [[astro-ph.IM](https://arxiv.org/abs/1311.2847)].
- [12] A. Sidibe et al. « Conception of a 90-GHz metamaterial-based coupler for astrophysical applications ». In : Applied Physics A : Materials Science & Processing (sept. 2014). doi : [10.1007/s00339-014-8696-5](https://doi.org/10.1007/s00339-014-8696-5).
- [13] Aritoki Suzuki et al. « Multi-chroic dual-polarization bolometric detectors for studies of the cosmic microwave background ». In : Journal of Low Temperature Physics 176.5-6 (2014), p. 650-656.
- [14] G. Bordier et al. « W-Band Superconducting Planar Orthogonal Mode Transducer Characterisation ». In : Journal of Low Temperature Physics 167 (mai 2012), p. 491-496. doi : [10.1007/s10909-012-0513-y](https://doi.org/10.1007/s10909-012-0513-y).
- [15] M. Piat et al. « QUBIC : the Q and U Bolometric Interferometer for Cosmology ». In : Journal of Low Temperature Physics 167 (juin 2012), p. 872-878. doi : [10.1007/s10909-012-0522-x](https://doi.org/10.1007/s10909-012-0522-x).
- [16] A. Suzuki et al. « Multi-chroic Dual-Polarization Bolometric Focal Plane for Studies of the Cosmic Microwave Background ». In : Journal of Low Temperature Physics 167 (juin 2012), p. 852-858. doi : [10.1007/s10909-012-0602-y](https://doi.org/10.1007/s10909-012-0602-y). arXiv : [1210.8256](https://arxiv.org/abs/1210.8256) [[astro-ph.IM](https://arxiv.org/abs/1210.8256)].
- [17] Qubic Collaboration et al. « QUBIC : The QU bolometric interferometer for cosmology ». In : Astroparticle Physics 34 (avr. 2011), p. 705-716. doi : [10.1016/j.astropartphys.2011.01.012](https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2011.01.012). arXiv : [1010.0645](https://arxiv.org/abs/1010.0645) [[astro-ph.IM](https://arxiv.org/abs/1010.0645)].
- [18] A. Ghribi et al. « Experimental Study of an Adding Interferometer at Millimeter Waves ». In : Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, Volume 31, Issue 1, pp.88-99 31 (jan. 2010), p. 88-99. doi : [10.1007/s10762-009-9562-y](https://doi.org/10.1007/s10762-009-9562-y).

- [19] R. Charlassier et al. « An efficient phase-shifting scheme for bolometric additive interferometry ». In : *Astronomy & Astrophysics* 497 (avr. 2009), p. 963-971. doi : [10.1051/0004-6361/200810306](https://doi.org/10.1051/0004-6361/200810306). arXiv : [0806.0380](https://arxiv.org/abs/0806.0380).

Proceedings et éditions spéciales

- [1] Adnan Ghribi et al. « Cryogenic Tests of the SPIRAL2 LINAC Systems ». In : 10th Int. Particle Accelerator Conf.(IPAC'19), Melbourne, Australia, 19-24 May 2019. JACOW Publishing, Geneva, Switzerland. 2019, p. 1240-1243.
- [2] A Vassal et al. « Dynamic modeling and control of the SPIRAL2 cryomodules ». In : IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. T. 502. 1. IOP Publishing. 2019, p. 012111.
- [3] A. Ghribi et al. « First partial cool down of the SPIRAL2 superconducting LINAC ». In : Journal of Physics : Conference Series. T. 969. IOP Publishing, mars 2018, p. 011001.
- [4] N Trappe et al. « Next generation sub-millimetre wave focal plane array coupling concepts : an ESA TRP project to develop multichroic focal plane pixels for future CMB polarisation experiments ». In : Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy IX. Sous la dir. de Jonas Zmuidzinas et Jian-Rong Gao. T. 10708. International Society for Optics et Photonics. SPIE, 2018, p. 343-350. doi : [10.1117/12.2313480](https://doi.org/10.1117/12.2313480). url : <https://doi.org/10.1117/12.2313480>.
- [5] Adrien Vassal et al. « SPIRAL2 Cryogenic System Thermodynamic Behavior Prediction Through Dynamic Modeling ». In : 29th Linear Accelerator Conf.(LINAC'18), Beijing, China, 16-21 September 2018. JACOW Publishing, Geneva, Switzerland. 2018, p. 366-369.
- [6] R. Ferdinand et al. « Commissioning of SPIRAL 2 CW RFQ and LINAC ». In : Journal of Physics : Conference Series. T. Proceedings, 8th International Particle Accelerator Conference. 2017.
- [7] A Ghribi et al. « Spiral 2 Cryogenic System for The Superconducting LINAC ». In : IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. T. 171. 1. 2017, p. 012115. url : <http://stacks.iop.org/1757-899X/171/i=1/a=012115>.
- [8] Aniello Mennella et al. « QUBIC - the Q&U Bolometric Interferometer for Cosmology ». In : 2017 European Physical Society Conference on High Energy Physics. T. EPS-HEP2017. Venice, Italy, juill. 2017, p. 044. doi : [10.22323/1.314.0044](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02058492). url : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02058492>.
- [9] S. Scully et al. « Optical design and modelling of the QUBIC instrument, a next-generation quasi-optical bolometric interferometer for cosmology ». In : Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series. T. 9914. Proceedings of SPIE. Juill. 2016, 99142S, 99142S. doi : [10.1117/12.2231717](https://doi.org/10.1117/12.2231717).
- [10] N. Trappe et al. « Next generation sub-millimeter wave focal plane array coupling concepts : an ESA TRP project to develop multichroic focal plane pixels for future CMB polarization experiments ». In : Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series. T. 9914. Proceedings of SPIE. Juill. 2016, 991412, p. 991412. doi : [10.1117/12.2231267](https://doi.org/10.1117/12.2231267).
- [11] H. Nishino et al. « POLARBEAR CMB Polarization Experiment ». In : JPS Conference Proceedings. T. 1. 1. 2014, 013107, p. 013107. doi : [10.7566/JSPSC.1.013107](https://doi.org/10.7566/JSPSC.1.013107).
- [12] Masaya Hasegawa et al. « Cosmology and particle physics with POLARBEAR ». In : ICHEP2012 - 36th International Conference for High Energy Physics. 2013, p. 440. doi : [10.22323/1.174.0440](https://doi.org/10.22323/1.174.0440).
- [13] A Sidibe et al. « Robustness of the behavior of microstrip lines loaded with disordered complementary split ring resonators ». In : 2013 Loughborough Antennas & Propagation Conference (LAPC). IEEE. 2013, p. 530-533.
- [14] K. Arnold et al. « The bolometric focal plane array of the POLARBEAR CMB experiment ». In : Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy VI. T. 8452. Proceedings of SPIE. Sept. 2012, 84521D, p. 84521D. doi : [10.1117/12.927057](https://doi.org/10.1117/12.927057). arXiv : [1210.7877](https://arxiv.org/abs/1210.7877) [astro-ph.IM].
- [15] M. Hazumi et al. « LiteBIRD : a small satellite for the study of B-mode polarization and inflation from cosmic background radiation detection ». In : Space Telescopes and Instrumentation 2012 : Optical, Infrared, and Millimeter Wave. T. 8442. Proceedings of SPIE. Sept. 2012, 844219, p. 844219. doi : [10.1117/12.926743](https://doi.org/10.1117/12.926743).
- [16] Z. D. Kermish et al. « The POLARBEAR experiment ». In : Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy VI. T. 8452. Proceedings of SPIE. Sept. 2012, 84521C, p. 84521C. doi : [10.1117/12.926354](https://doi.org/10.1117/12.926354). arXiv : [1210.7768](https://arxiv.org/abs/1210.7768) [astro-ph.IM].
- [17] T. Matsumura et al. « POLARBEAR-2 optical and polarimeter designs ». In : Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy VI. T. 8452. Proceedings of SPIE. Sept. 2012, 84523E, 84523E. doi : [10.1117/12.926770](https://doi.org/10.1117/12.926770).
- [18] Aritoki Suzuki et al. « Multichroic dual-polarization bolometric detectors for studies of the cosmic microwave background ». In : Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy VI. Sous la dir. de Wayne S. Holland. T. 8452. International Society for Optics et Photonics. SPIE, 2012, p. 1038-1047. doi : [10.1117/12.924869](https://doi.org/10.1117/12.924869). url : <https://doi.org/10.1117/12.924869>.

- [19] T. Tomaru et al. « The POLARBEAR-2 experiment ». In : Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy VI. T. 8452. Proceedings of SPIE. Sept. 2012, 84521H, 84521H. doi : [10.1117/12.926158](https://doi.org/10.1117/12.926158).
- [20] K. Arnold et al. « The POLARBEAR CMB polarization experiment ». In : Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy V. T. 7741. Proceedings of SPIE. Juill. 2010, 77411E-77411E-11, 77411E-77411E-11. doi : [10.1117/12.858314](https://doi.org/10.1117/12.858314).
- [21] A. Ghribi et al. « Superconducting Planar Devices for Cosmology ». In : American Institute of Physics Conference Series. Sous la dir. de B. Young, B. Cabrera et A. Miller. T. 1185. American Institute of Physics Conference Series. Déc. 2009, p. 506-510. doi : [10.1063/1.3292390](https://doi.org/10.1063/1.3292390).
- [22] A. Tartari et al. « BRAIN/MBI : a bolometric interferometer dedicated to the CMB polarization ». In : 5th ESA Workshop on Millimetre Wave Technology and Applications & 31st ESA Antenna Workshop. Mai 2009.

Conférences et Congrès Internationaux ¹

Communications orales

- [1] A. Ghribi (invité). « In situ dynamic heat load measurements of the SPIRAL2 LINAC superconducting cavities ». In : Tesla Technology Collaboration. 2021.
- [2] A Vassal et al. « Dynamic modeling and control of the SPIRAL2 cryomodules ». In : The 28th International Cryogenic Engineering Conference and International Cryogenic Materials Conference. 2019.
- [3] A. Ghribi. « Spiral 2 Cryogenic System for The Superconducting LINAC ». In : 26th International Cryogenic Engineering Conference. 2016.
- [4] A. Ghribi (invité). « Dispositifs de Détection supraconductrice à couche mince pour la mesure des ondes gravitationnelles primordiales ». In : Trends in Microsystems - JASMINA 6. 2016.
- [5] A. Ghribi (invité). « Installation Cryogénique SPIRAL 2 ». In : Journées Liquéfacteurs. 2015.
- [6] A. Ghribi. « Progress on the QUBIC Instrument 2013 ». In : 15th International Workshop on Low Temperature Physics. 2013.
- [7] A Tartari et al.. « BRAIN/MBI : A bolometric Interferometer Dedicated to the CMB Polarization ». In : 5th ESA Workshop on Millimeter Wave Technology and Applications & 31st ESA Antenna Workshop. 2009.
- [8] A Ghribi et al. « Millimeter Wave Planar Orthomode Transducer for Cosmology ». In : 5th ESA Workshop on Millimeter Wave Technology and Applications & 31st ESA Antenna Workshop. 2009.
- [9] A Ghribi. « Orthogonal Mode Transducer and Possible Planar Solution for Bolometric Interferometry ». In : Workshop on Bolometric Interferometry for the B-mode Search. 2008.

Communications par affiche

- [1] A. Ghribi et al. « Cryogenic Tests of the SPIRAL2 LINAC Systems ». In : 10th International Particle Accelerator Conference. Melbourne, Australia, mai 2019, TUPMP006. doi : [10.18429/JACoW-IPAC2019-TUPMP006](https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2019-TUPMP006). url : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02198346>.
- [2] A Vassal et al. « SPIRAL2 Cryogenic System Thermodynamic Behavior Prediction Through Dynamic Modeling ». In : 29th International Linear Accelerator Conference. Beijing, China, sept. 2018, TUPO019. doi : [10.18429/JACoW-LINAC2018-TUP0019](https://doi.org/10.18429/JACoW-LINAC2018-TUP0019). url : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02008862>.
- [3] A. Ghribi et al. « First partial cool down of the SPIRAL 2 LINAC ». In : Poster. Août 2017. url : <http://hal.in2p3.fr/in2p3-01569768>.
- [4] A. Ghribi. « Superconducting planar devices ». In : 13th International Workshop on Low Temperature Physics. 2009.
- [5] A. Ghribi. « Advanced Detection Architecture and Bolometric Interferometry for the CMB Polarization Measurement ». In : A New Generation of Ultra-sensitive Detectors for Dark Energy and Cosmology Experiments. 2008.
- [6] A. Ghribi. « Detection Architecture for the CMB Polarization Measurement ». In : European Summer School on New Trends in Terahertz Imaging. 2007.
- [7] A. Ghribi. « La quête des Origines ». In : Doctoriales Dourdan. 2007.

Séminaires

- [1] A. Ghribi. « SPIRAL2 Cryogenic System : Lessons learned ». In : CEA-INAC-DSBT, Grenoble. 2018.

1. Auteur présentant les travaux sous-ligné

- [2] A. Ghribi. « Cosmic Microwave Background : stakes and challenges ». In : Grand Accélérateur National d'Ions Lourds, Caen-France. 2017.
- [3] A. Ghribi. « SPIRAL2 Cryogenic System : lessons learned ». In : European Spallation Source, Lund-Sweden. 2017.
- [4] A. Ghribi. « Polarimétrie du Fond Diffus Cosmologique - Enjeux et Avenir ». In : Centre de Physique des Particules de Marseille, Marseille-France. 2014.
- [5] A. Ghribi. « Technologies de détection millimétrique pour la cosmologie ». In : Institut de Nanophotonique de Lyon, Lyon-France. 2014.
- [6] A. Ghribi. « Développement instrumentaux pour la cosmologie observationnelle ». In : Institut d'Electronique Fondamentale, Orsay-France. 2011.
- [7] A. Ghribi. « From the origin of the universe to a better word ». In : Meeting of IITK, San Francisco-USA. 2011.
- [8] A. Ghribi. « Overview of modulators for cosmology ». In : University of California Berkeley, Berkeley-USA. 2010.
- [9] A. Ghribi. « DIBO : A demonstrator for bolometric interferometry ». In : Laboratoire AstroParticule et Cosmologie, Paris-France. 2007.

Livres

- [1] A. Ghribi (Editor). Advances in Modern Cosmology. InTech, 2011. isbn : 9789533074238.
- [2] A. Ghribi. Composants Millimétriques Supra-Conducteurs. Editions Européennes, 2010. isbn : 9786131550188.

Brevets

- [1] A Ghribi et al. « Procédés de détermination en temps réel du facteur de qualité d'une cavité accélératrice supraconductrice ». In : Brevet d'invention BD18781 (2018).

Autres publications

- [1] Adnan Ghribi et al. Cryogenic thermo-acoustic oscillations highlight and study in the SPIRAL2 superconducting LINAC. 2021. arXiv : [2101.10768 \[physics.acc-ph\]](#).
- [2] Adrien Vassal et al. SPIRAL2 Cryomodules Models : a Gateway to Process Control and Machine Learning. 2021. arXiv : [2103.10299 \[physics.acc-ph\]](#).
- [3] A Ghribi. « SPIRAL 2 superconducting LINAC ». In : Cold Facts Magazine (2018).
- [4] A. Mennella et al. QUBIC - The Q&U Bolometric Interferometer for Cosmology - A novel way to look at the polarized Cosmic Microwave Background. 2018. arXiv : [1801.03730 \[astro-ph.IM\]](#).
- [5] J. Aumont et al. QUBIC Technical Design Report. 2017. arXiv : [1609.04372 \[astro-ph.IM\]](#).
- [6] J. Aumont et al. « QUBIC Technological Design Report ». In : ArXiv e-prints (sept. 2016). arXiv : [1609.04372 \[astro-ph.IM\]](#).
- [7] P. André et al. « The Polarized Radiation Imaging and Spectroscopy Mission ». In : ArXiv e-prints (oct. 2013). arXiv : [1310.1554 \[astro-ph.CO\]](#).
- [8] PRISM Collaboration et al. « PRISM (Polarized Radiation Imaging and Spectroscopy Mission) : A White Paper on the Ultimate Polarimetric Spectro-Imaging of the Microwave and Far-Infrared Sky ». In : ArXiv e-prints (juin 2013). arXiv : [1306.2259 \[astro-ph.CO\]](#).
- [9] TP Collaboration et al. The new generation CMB B-mode polarization experiment : POLARBEAR. 2010.
- [10] The Polarbear Collaboration et al. « The new generation CMB B-mode polarization experiment : POLARBEAR ». In : ArXiv e-prints (nov. 2010). arXiv : [1011.0763 \[astro-ph.IM\]](#).
- [11] The QUBIC Collaboration. « QUBIC : The QU Bolometric Interferometer for Cosmology ». 2009arXiv1010.0645T. 2010.
- [12] A. Ghribi et al. « A Demonstrator for Bolometric Interferometry ». 2009arXiv0902.0385G. 2009.
- [13] Adnan GHRIBI. « Controlable phase shifter design ». In : (2008). Sous la dir. d'Université Paris 7.
- [14] G. Polenta et al. « The Brain Experiment ». In : The Eleventh Marcel Grossmann Meeting On Recent Developments in Theoretical and Experimental General Relativity, Gravitation and Relativistic Field Theories. Sous la dir. de H. Kleinert, R. T. Jantzen et R. Ruffini. Sept. 2008, p. 1680-1688. doi : [10.1142/9789812834300_0226](#).

Deuxième partie

Activités de Recherche

Chapitre 1

Cosmologie Expérimentale

Tyger! Tyger! burning bright
In the forests of the night,
What immortal hand or eye
Could frame thy fearful symmetry?

William Blake

Sommaire

1	Introduction à la cosmologie expérimentale	15
1.1	L'histoire de l'Univers : Une épopée humaine	15
1.2	Les paramètres cosmologiques	17
1.3	Les observables du CMB	18
1.4	Modes B et contraintes d'observation	23
2	Architectures Intelligentes et Technologies avancées	25
2.1	La traque des ondes gravitationnelles primordiales	25
2.2	Architectures de détection intelligentes	27
2.3	Technologies de détection	31
3	Participation aux projets et expériences d'observation	31
3.1	De BRAIN à QUBIC	31
3.2	PolarBear	34
3.3	Autres projets	39
3.4	Les instruments spatiaux	40
4	Publication choisie	42

1 Introduction à la cosmologie expérimentale

1.1 L'histoire de l'Univers : Une épopée humaine

"C'est l'épopée humaine, âpre, immense – écroulée" ¹. Cette épopée, que je raccourcirai volontiers à moins d'un siècle, a vu la cosmologie éclore de son cocon métaphysique pour s'élever au rang de science. Nul doute que l'ombre de quelques illustres mortels plane au dessus de cette histoire de plus de 13 milliards d'années.

L'histoire, telle que j'aimerais la décrire, commence en 1907 avec les prémisses de ce qui deviendra, avec l'aide de Marcel Grossmann et de David Hilbert, la relativité générale d'Albert Einstein [Ein16]. Le premier modèle cosmologique voit le jour. Il subsiste une petite question... de taille : L'Univers est-il vraiment statique ? Einstein fait le pari de dire oui. Il introduit alors sa constante cosmologique, qu'il qualifiera plus tard comme la plus grande erreur de sa vie. Ce sera pourtant cette constante cosmologique qui sauvera l'Univers.

En 1927, Monseigneur Georges Lemaître établit un modèle cosmologique avec un univers en expansion. Ce modèle est conforté, dans la version française de sa publication [Lem27], par les données compilées de Vesto Melvin Slipher sur l'éloignement des galaxies. La traduction de 1931 retiendra néanmoins les travaux d'Edwin

1. La Légende des Siècles (1859-1883) – Victor Hugo

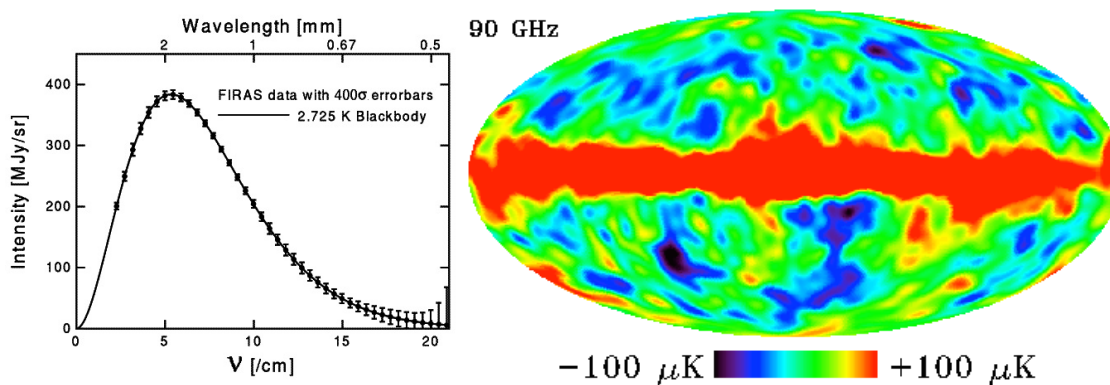


Figure 1.1 – A gauche : mesure du spectre du corps noir du CMB par COBE/FIRAS[Mat+94]. A droite : Mesure des anisotropies de température du CMB avec COBE/DMR avec la galaxie au centre.[Smoot et al., ApJ (1994)]

Hubble pour l'éloignement des galaxies² [Hub29]. Nous assistons alors à la naissance du modèle standard de la cosmologie, appelé en ce temps par ses détractaires : Théorie du Big-Bang.

Revenons pour l'instant en 1929. L'annonce de cette nouvelle théorie du Big-Bang fait beaucoup de bruit mais il faudra attendre 20 ans pour voir émerger des travaux de George Gamow et de son étudiant Ralph Asher Alpher une description de l'enfance de l'Univers et une explication de l'abondance des éléments [ABG48]. C'est ensuite Alpher et Robert Herman qui prédisent que la rémanence de cet état primordial de l'Univers devrait avoir refroidi autour de 5 K [Alp48]. Cette rémanence se manifesterait sous la forme d'un rayonnement de corps noir, aussi appelé CMB ou fond diffus cosmologique. La course est maintenant ouverte pour la détection de ce rayonnement.

Tous les outils théoriques sont maintenant présents pour le développement de la cosmologie. Le frein est maintenant purement technologique. Dès 1946, Robert Henry Dicke conçoit un radiomètre micro-onde dont le but est la détection du CMB [Dic46]. Mais l'équipe de Dicke n'aura pas le privilège de faire la première détection du fond diffus cosmologique. Le mérite reviendra à Arno Allan Penzias et Robert Woodrow Wilson qui feront accidentellement la découverte en travaillant sur un nouveau type d'antenne aux laboratoires Bell [PW65]. James Peebles, l'équipe de Dicke (composée de Dicke, Roll et Wilkinson) et Penzias et Wilson sont les pionniers avec la première détection du CMB en 1964 et l'interprétation des résultats [Dic+65; Pen79]. Penzias et Wilson recevront le prix Nobel de physique en 1978.

Nous entrons maintenant dans l'ère de la cosmologie observationnelle. Les différentes équipes font la course pour la mesure précise du spectre du CMB. En 1992, la première mesure sur le ciel par l'instrument FIRAS³ du satellite COBE⁴ montrera que le fond diffus cosmologique est en effet le corps noir le plus parfait jamais mesuré [Mat+94]. L'Univers est bien isotrope (voir équation 1.1, figure 1.1).

$$T_{CMB} = 2,725 K \pm \Delta(T)_{DMR} ; \Delta(T)_{DMR} \simeq 0,01 K \quad (1.1)$$

L'instrument DMR⁵ du même satellite livre la première photographie de l'univers alors âgé de 380 000 ans [Smo+94] (voir figure 1.1). L'univers semble bien homogène sur les grandes échelles angulaires. On observe aussi, pour la première fois, des anisotropies de température de l'ordre de $\frac{\Delta(T)}{T} = 10^{-5}$.

Les théoriciens, eux, s'efforcent de résoudre tous les paradoxes que la théorie du Big-Bang présente : Homogénéité, platitude, horizon⁶. C'est dans ce but qu'Allan Guth propose en 1979 une ère inflationnaire de 10^{-35} à 10^{-33} sec. où l'Univers aurait soudainement connu une phase d'expansion accélérée [Gut81]. La théorie est ensuite complétée en 1982 par Linde [Lin82], Albrecht et Steinhardt [AS82]. Il reste maintenant à le prouver. La famille de modèles que nous appellerons "inflationnaires" prédisent que les fluctuations quantiques des premiers moments de l'Univers se seraient étendues durant cette phase d'inflation à des échelles cosmologiques. Les perturbations d'espace temps causées par les ondes gravitationnelles primordiales auraient laissé une trace indélébile dans la polarisation du fond diffus cosmologique. Cette trace, qui à ce jour n'a pas été détectée, est la clé du modèle standard et l'ultime preuve de la relativité générale. Les partisans du modèle standard, modèle dominant aujourd'hui, sont néanmoins confortés en 2001 par la détection des modes E de polarisation du CMB par l'instrument

2. Edwin Hubble établit en 1929, en collaboration avec Milton Humason, la relation entre la vitesse des galaxies et leur vitesse d'éloignement. Pour cela, il s'appuie sur les observations de James Edward Keeler et de Vesto Melvin Slipher

3. Far Infrared Absolute Spectrophotometer (FIRAS)

4. COsmic Background Explorer (COBE)

5. Differential Microwave Radiometer (DMR)

6. Pour plus de détails sur les limitations du modèle standard sans inflation, se reporter à [BP08].

DASI⁷ [Kov+02]. Ces modes de polarisation du **CMB** sont prédits par la théorie mais ne sont pas associés aux ondes gravitationnelles primordiales. La précision de la mesure des anisotropies (de température et de polarisation) du fond diffus cosmologique augmente régulièrement avec les progrès technologiques liés aux détecteurs et aux architectures de détection évoluées. La dernière carte (mesure sur le ciel du **CMB**) a été mesurée par l'instrument **HFI** du satellite Planck. Elle est, pour le moment, la référence (voir figure 1.5) [Col+15b].

Aujourd'hui, la recherche de la trace des ondes gravitationnelles primordiales fait l'objet de nombreux travaux de développement expérimentaux pour des instruments d'observation sols et spatiaux. C'est dans ce cadre que s'est articulée la majeure partie de mes travaux de recherche.

1.2 Les paramètres cosmologiques

Dans la section 1.1, à la naissance du modèle standard, nous avons omis de mentionner les travaux indépendants d'Alexander Friedmann, Howard Percy Robertson et Arthur Geoffrey Walker en plus de ceux de George Lemaître. L'histoire ne les oubliera pas. Elle retiendra la métrique **FRWL**⁸ qui décrit le mieux l'évolution de l'Univers aux grandes échelles :

$$ds^2 = dt^2 - a(t) \left[\frac{1}{1 - kr^2} + r^2 d\theta^2 \sin(\theta) d\phi^2 \right] \quad (1.2)$$

où le paramètre k dépend de la courbure spatiale de l'Univers (-1 : ouvert hyperbolique | 0 : plat euclidien | 1 : fermé sphérique). Le paramètre $a(t)$ est le facteur d'échelle dont la dépendance en temps traduit son expansion. Cette métrique est la clé pour la simplification des équations d'Einstein (que nous ne citerons pas ici). Elle permet, dans le cas d'un fluide parfait, d'obtenir les équations suivantes :

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G\rho}{3} - \frac{k}{a^2} + \frac{\Lambda}{3} \quad (1.3)$$

$$2\frac{\ddot{a}}{a} + \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{k}{a^2} = -8\pi Gp + \Lambda \quad (1.4)$$

où G est la constante de gravitation, Λ l'énergie sombre, p et ρ la pression et la densité, reliées par l'équation d'état $p = w\rho$. L'équation 1.3 décrit la dynamique de l'Univers. La quantité $\frac{\dot{a}}{a}$ définit le paramètre de Hubble, dont la valeur actuelle, notée H_0 , est appelée constante de Hubble.

$$\frac{\dot{a}}{a} = H(z) \quad (1.5)$$

avec le redshift $1 + z = \frac{a_0}{a}$ où l'indice 0 signifie aujourd'hui.

En combinant les équations 1.3 et 1.4, nous obtenons l'expression de l'accélération de l'expansion :

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} (\rho + 3p) + \frac{\Lambda}{3} \quad (1.6)$$

La Pression et la densité obéissent à l'équation de continuité qui s'applique aussi bien à la densité de matière ρ_M qu'à la densité de rayonnement ρ_r :

$$\dot{\rho} + 3\frac{\dot{a}}{a}(\rho + p) = 0 \quad (1.7)$$

Si l'on introduit la densité critique $\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G}$, l'équation 1.6 s'écrit :

$$H^2 = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = H^2 \left(\frac{\rho_M}{\rho_c} + \frac{\rho_r}{\rho_c} + \frac{k}{a^2 H^2} + \frac{\Lambda}{3H^2} \right) \quad (1.8)$$

7. Degree Angular Scale Interferometer (DASI)

8. Friedmann-Robertson-Walker-Lemaître (FRWL)

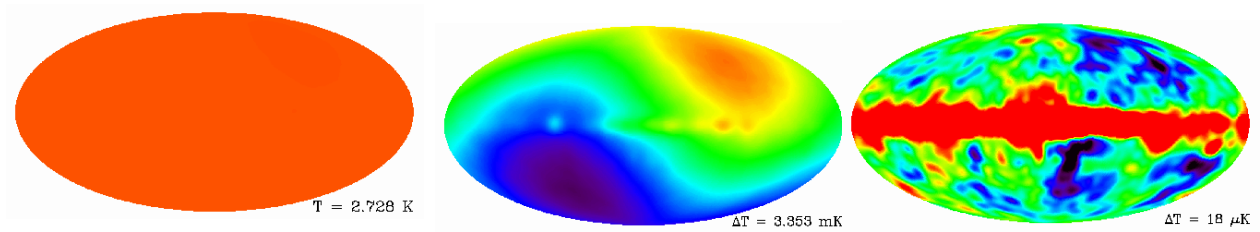


Figure 1.2 – Cartes du ciel mesurées par l'instrument COBE/DMR. A gauche : le monopole ou le corps noir. Au milieu : le dipôle. A droite : les anisotropies de température et la galaxie.

Nous pouvons alors extraire de l'équation 1.8 les paramètres cosmologiques qui correspondent respectivement à la matière, au rayonnement, à la courbure et à la constante cosmologique :

$$\Omega_M = \frac{\rho_M}{\rho_c} \quad (1.9)$$

$$\Omega_r = \frac{\rho_r}{\rho_c} \quad (1.10)$$

$$\Omega_k = \frac{k}{a^2 H^2} \quad (1.11)$$

$$\Omega_\Lambda = \frac{\Lambda}{3H^2} \quad (1.12)$$

L'équation 1.6 s'écrit donc simplement :

$$\Omega_k = \Omega_M + \Omega_r + \Omega_\Lambda - 1 \quad (1.13)$$

L'équation 1.13 résume l'enjeu de l'extraction des paramètres cosmologiques des différentes observables qui représentent l'Univers scruté à différentes échelles angulaires. Le CMB est la seule observable de l'Univers à très grande échelle. Il permet de contraindre, de manière significative, les paramètres cosmologiques et, par conséquence, les modèles cosmologiques.

1.3 Les observables du CMB

La théorie décrit une histoire assez précise de l'évolution de l'Univers entre le temps de Planck et la formation des premières structures⁹ :

$10^{-43} \text{sec.} \leq t \leq 10^{-35} \text{sec.}$	$T \simeq 10^{32} \text{K} \Rightarrow$	Découplage des forces fondamentales
$10^{-35} \text{sec.} \leq t \leq 10^{-32} \text{sec.}$	$T \simeq 10^{27} \text{K} \Rightarrow$	Inflation
$t \sim 10^{-12} \text{sec.}$	$T \simeq 10^{15} \text{K} \Rightarrow$	Brisure de symétrie électro-faible
$10^{-12} \text{sec.} \leq t \leq 10^6 \text{sec.}$	$T \simeq 10^{13} \text{K} \Rightarrow$	La transition quarks-hadrons
$10^{-6} \text{sec.} \leq t \leq 1 \text{sec.}$	$T \simeq 10^{10} \text{K} \Rightarrow$	L'émission du fond diffus de neutrinos
$3 \text{sec.} \leq t \leq 180 \text{sec.}$	$T \simeq 10^9 \text{K} \Rightarrow$	La nucléosynthèse primordiale
$t \sim 10^4 \text{ans}$	$T \simeq 10^4 \text{K} \Rightarrow$	La transition matière-rayonnement
$t \sim 380\,000$	$T \simeq 3000 \text{K} \Rightarrow$	Le découplage matière-rayonnement
$t \sim 10^9 \text{ans}$	$T \simeq 15 \text{K} \Rightarrow$	La formation des premières structures
$t \sim 13,7 \cdot 10^9$	$T = 2,725 \text{K} \Rightarrow$	Aujourd'hui

9. Pour plus de détail, se référer à [Wei08]

Après la phase inflationnaire, l'Univers serait une soupe de quarks-hadrons. Se forment par la suite protons, neutrons, électrons, neutrinos, photons et matière noire. Au bout de trois secondes, les premiers noyaux commencent à se former, c'est la nucléosynthèse primordiale. Ensuite, pendant environ 100 000 ans, se livre une lutte sans merci entre la matière et le rayonnement. Après avoir été dominée dans un premier temps par la radiation et une période d'égalité matière-rayonnement, la matière finit par l'emporter dans le bilan énergétique. Quelque temps après, les électrons se re-combinent aux noyaux. Les photons, n'interagissant plus avec la matière, voient leur libre parcours moyen augmenter. L'Univers devient alors transparent et le fond diffus cosmologique est émis. C'est cette image de la [Surface de Dernière Diffusion \(SDD\)](#) que nous observons aujourd'hui.

1.3.0.1 Le corps noir La première chose que l'on a observé est le que le rayonnement est un corps noir parfait à $T = 2,728 \text{ K}$. C'est celui qui a été découvert par Penzias et Wilson en 1964 et mesuré avec grande précision par l'instrument [FIRAS](#) du satellite [COBE](#) en 1992 (voir figure 1.1). La théorie nous dit que lorsque l'Univers était âgé de 10^{-12} sec. à 1 sec. , celui-ci était constitué d'un bain de photons, d'électrons et de baryons en équilibre thermodynamique. Les photons du CMB ont donc un spectre de corps noir dont l'intensité I_ν s'écrit :

$$I_\nu = \frac{4\pi h \hbar \nu^3}{c^2 \left[\exp\left(\frac{2\pi h \nu^3}{k_B T_{CMB}}\right) - 1 \right]} \quad (1.14)$$

où ν est la fréquence, c la vitesse de la lumière, T_{CMB} la température du CMB, k_B la constante de Boltzmann et $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ avec h la constante de Planck.

1.3.0.2 Le dipôle Après avoir soustrait la température moyenne du [CMB](#), apparaît à un niveau mille fois plus bas, un effet dipolaire (voir figure 1.2). Cet effet correspond à la vitesse relative de notre référentiel par rapport à la surface de dernière diffusion. Les photons subissent un effet Doppler et sont vus plus chauds ou plus froids par l'observateur terrestre suivant la direction d'observation du rayonnement.

1.3.0.3 Anisotropies Après soustraction du dipôle, apparaissent sur des échelles angulaires plus faibles d'autres anisotropies de température (voir figure 1.2). Nous pouvons différencier des anisotropies de deux natures différentes : 1. Les anisotropies primaires qui traduisent l'état local de l'Univers au moment de l'émission du CMB. 2. Les anisotropies secondaires qui résultent de la propagation des photons entre la surface de dernière diffusion et l'observateur. Nous nous intéresserons ici aux anisotropies primaires. Des anisotropies primaires, nous pouvons distinguer les anisotropies de température et les anisotropies de polarisation. Le spectre de puissance angulaire nous permet de mieux les décrire.

1.3.1 Le spectre de puissance angulaire

Le spectre de puissance angulaire est un outil très utile pour décrypter les différents phénomènes survenus dans l'Univers primordial. Il est aussi très sensible aux variations des paramètres cosmologiques. Il est obtenu grâce à la décomposition en harmoniques sphériques des anisotropies :

$$\frac{\Delta T(\theta, \phi)}{T_{CMB}} = \sum_{\ell=0}^{\infty} \sum_{m=-\ell}^{\ell} a_{\ell m} Y_{\ell m}(\theta, \phi) \quad (1.15)$$

avec

$$a_{\ell m} = \int \frac{\Delta(T)}{T}(\vec{n}) Y_{\ell m}^*(\vec{n}) d\vec{n} \quad (1.16)$$

La variable ℓ , appelée multipôle, est proportionnelle à l'inverse d'une échelle angulaire. On définit alors le spectre de puissance angulaire en température C_ℓ^{TT} par la relation :

$$C_\ell^{TT} = \langle |a_{\ell m}|^2 \rangle \quad (1.17)$$

qui renferme toute l'information sur l'Univers primordial dans l'hypothèse de fluctuations gaussiennes, homogènes et isotopes.

Toutefois, Il existe une incertitude théorique sur C_ℓ^{TT} liée à la variance cosmique dans le cas des observations d'un satellite et à la variance d'échantillonnage pour les expériences qui ne couvrent pas l'intégralité du ciel.

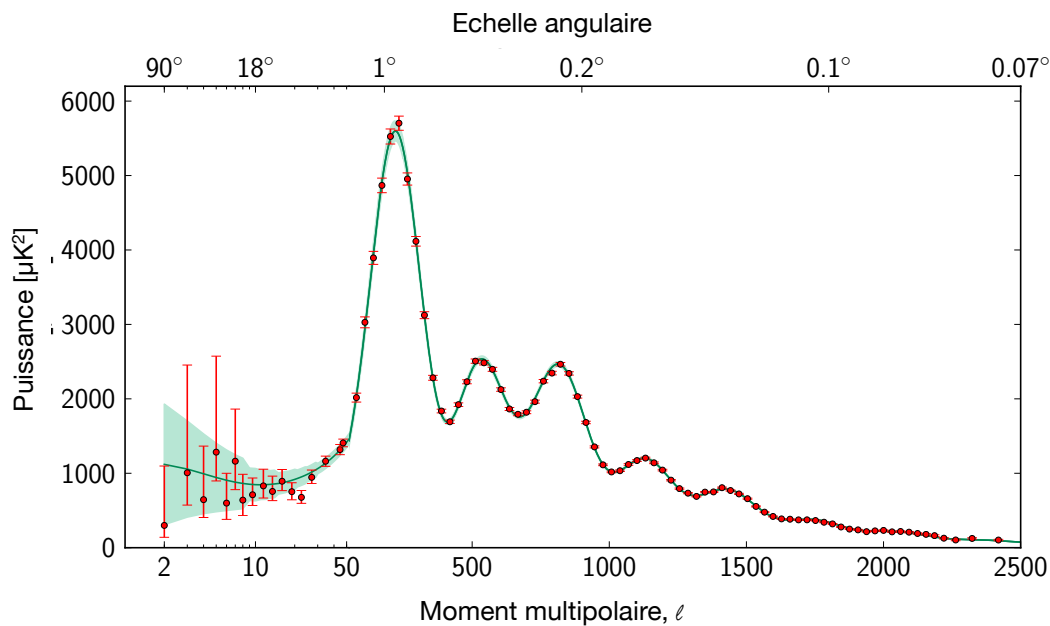


Figure 1.3 – Spectre de puissance angulaire C_ℓ^{TT} des anisotropies de température du CMB mesuré par l'instrument HFI du satellite Planck [Col+15a].

1.3.2 Les anisotropies de température

La figure 1.3 présente un spectre de puissance angulaire "type". L'observation de ce spectre permet de distinguer, à différentes échelles angulaires, différents effets à l'origine des anisotropies de température.

1.3.2.1 Le Plateau Sachs-Wolfe La première région que l'on observe est un plateau à $\ell \leq 50$. Il s'agit du plateau Sachs-Wolfe. Ces harmoniques supérieures du CMB auraient été générées principalement par des perturbations de densité de l'Univers primordial (grandes échelles angulaires¹⁰). Le spectre plat semble indiquer que le potentiel gravitationnel est quasiment invariant d'échelle.

1.3.2.2 Les pics Doppler Dans le modèle standard de cosmologie Λ CDM¹¹, les puits de potentiel gravitationnel tendent à compresser la matière alors que la radiation s'y oppose. On obtient alors une oscillation dans le plasma photons-baryons. Cette oscillation se traduit dans le spectre de puissance par les pics acoustiques ou pics Doppler (voir figure 1.3) visibles à $\ell \geq 100$. Dans la carte du CMB (voir figure 1.2, 1.3), les régions de compression correspondent alors à des zones froides. Les régions les moins denses correspondent, elles, à des zones plus chaudes.

1.3.2.3 L'amortissement Silk La couche de dernière diffusion n'est pas infiniment mince. De ce fait, lorsque les électrons se re-combinent aux noyaux ($t \sim 380\,000$ ans), les photons ont un libre parcours moyen non nul. Le couplage aux électrons n'est donc pas parfait. Cet effet implique l'existence d'une échelle à laquelle les anisotropies sont atténuées exponentiellement ($\ell \geq 500$ sur la figure 1.3).

1.3.3 Les anisotropies de polarisation

Au moment du découplage, lorsque les photons subissent la diffusion Thomson sur les électrons, seule la polarisation transverse à la direction de diffusion du photon est transmise. Si les électrons reçoivent un flux de photons non polarisés de forme quadrupolaire, alors le flux de photons émergent est polarisé linéairement. Dans le modèle Λ CDM, il y a trois types de perturbations de densité du fluide photons-baryons qui sont susceptibles de produire des flux de photons quadrupolaires, de sorte que le CMB soit polarisé :

Perturbations scalaires Elles sont issues des fluctuations de densité. Les électrons tombent dans les puits de potentiel correspondant à une sur-densité de matière d'autant plus rapidement qu'ils sont proches du centre. Le même raisonnement s'applique aux sous-densités de matière.

10. de taille supérieure à l'horizon au moment du découplage.

11. Cold Dark Matter (CDM)

Perturbations vectorielles Ces perturbations sont dues aux mouvements de vortex du fluide photons-baryons. Elles sont considérées comme négligeables dans la plupart des modèles d'Univers primordial.

Perturbations tensorielles Le passage d'une onde gravitationnelle primordiale à travers une fluctuation de densité déforme localement l'espace temps et modifie donc la forme du puits de potentiel. Les iso-contours de densité ne sont plus circulaires mais elliptiques, perdant ainsi leurs propriétés de symétrie.

Nous nous attendons alors à ce que le CMB soit polarisé linéairement à environ 5%. Cette polarisation est généralement exprimée en terme de paramètres de Stockes ¹² :

$$I = \langle |E_{\parallel}|^2 \rangle + \langle |E_{\perp}|^2 \rangle \quad (1.18)$$

$$Q = \langle |E_{\parallel}|^2 \rangle - \langle |E_{\perp}|^2 \rangle \quad (1.19)$$

$$U = \langle |E_{\parallel}E_{\perp}^*|^2 \rangle + \langle |E_{\parallel}^*E_{\perp}|^2 \rangle = 2 \operatorname{Re} \langle E_{\parallel}E_{\perp}^* \rangle \quad (1.20)$$

$$V = i \left(\langle |E_{\parallel}E_{\perp}^*|^2 \rangle + \langle |E_{\parallel}^*E_{\perp}|^2 \rangle \right) = 2 \operatorname{Im} \langle E_{\parallel}E_{\perp}^* \rangle \quad (1.21)$$

avec E_{\parallel} le champ électrique parallèle et E_{\perp} le champ électrique perpendiculaire à l'axe x pour un système de coordonnées choisi arbitrairement. Dans le cas du CMB, V est nul et I est scalaire. Q et U dépendent du référentiel et ne peuvent donc pas être développés sur la même base que I . Leur développement en harmonique sphérique de spin 2 donne :

$$Q(\vec{n}) \pm iU(\vec{n}) = \sum_{\ell m} a_{\pm 2\ell m} Y_{\ell}^m(\vec{n}) \quad (1.22)$$

Il devient alors possible de définir les quantités scalaires :

$$a_{\ell m}^E = -\frac{a_{2\ell m} + a_{-2\ell m}}{2} \quad (1.23)$$

$$a_{\ell m}^B = i\frac{a_{2\ell m} - a_{-2\ell m}}{2} \quad (1.24)$$

qui correspondent aux champs appelés E et B sur la sphère :

$$E(\vec{n}) = \sum_{\ell=0}^{\infty} \sum_{m=-\ell}^{\ell} a_{\ell m}^E Y_{\ell m}(\vec{n}) \quad (1.25)$$

$$B(\vec{n}) = \sum_{\ell=0}^{\infty} \sum_{m=-\ell}^{\ell} a_{\ell m}^B Y_{\ell m}(\vec{n}) \quad (1.26)$$

L'intérêt de la décomposition E/B est que les perturbations scalaires ne peuvent se traduire dans le champ E alors que les fluctuations tensorielles se reflètent dans les deux états. En plus de cela, ils présentent l'avantage d'être indépendants du repère choisi. Ceci rend le champ B l'indicateur direct de la présence des ondes gravitationnelles primordiales. Dans la suite et par abus de langage, nous parlerons de modes B et E de polarisation du fond diffus cosmologique.

Nous nous intéressons donc aux spectres de puissance angulaire dérivés des champs E et B . Par construction, E est un champ invariant par rotation et parité et B est un champ invariant par rotation [Zal01]. Nous pouvons alors définir les spectres polarisés C_{ℓ}^{EE} et C_{ℓ}^{BB} tels que :

$$C_{\ell}^{EE} = \frac{1}{2\ell + 1} \sum_{m=0}^{+\infty} |a_{\ell m}^E|^2 = \langle |a_{\ell m}^E|^2 \rangle \quad (1.27)$$

12. Pour les paramètres de Stockes I, Q, U et V, seuls Q et U expriment la polarisation linéaire. I exprime l'intensité et V la polarisation circulaire.

$$C_\ell^{BB} = \frac{1}{2\ell + 1} \sum_{m=0}^{+\infty} |a_{\ell m}^B|^2 = \langle |a_{\ell m}^B|^2 \rangle \quad (1.28)$$

Nous avons précédemment écrit que, dans le modèle standard, si le CMB est polarisé, alors il y a nécessairement eu des anisotropies quadrupolaires au moment du découplage. Ceci implique qu'il devrait y avoir une certaine corrélation entre les anisotropies de température et de polarisation. C'est la raison pour laquelle nous définissons les quantités suivantes, que l'on cherchera à détecter dans les données polarisée :

$$C_\ell^{TE} = \langle a_{\ell m}^T a_{\ell m}^{E*} \rangle \quad (1.29)$$

$$C_\ell^{TB} = \langle a_{\ell m}^T a_{\ell m}^{B*} \rangle \quad (1.30)$$

$$C_\ell^{EB} = \langle a_{\ell m}^E a_{\ell m}^{B*} \rangle \quad (1.31)$$

Pour des raisons de parité, les spectres C_ℓ^{TB} et C_ℓ^{EB} sont nuls. Leur mesure n'est cependant pas dénuée d'intérêt car elle permet un étalonnage intrinsèque de la mesure [KSY12]. Il nous reste donc les spectres C_ℓ^{TT} , C_ℓ^{EE} , C_ℓ^{BB} et C_ℓ^{TE} qui présentent un intérêt cosmologique.

1.3.4 Autres variables d'observation

De la mesure/détection de la polarisation du fond diffus cosmologique découlent plusieurs quantités d'une importance capitale. En effet, celles-ci soulignent les différentes motivations sous-jacentes à la recherche des modes B de polarisation du CMB. Pour les introduire, posons les spectres de puissance primordiaux $P_s(k)$ et $P_t(k)$ [Lan05]. Ces spectres quantifient respectivement les perturbations scalaires et tensorielles du champ et de la métrique avec $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ et λ la longueur d'onde de la perturbation. Définissons maintenant les trois quantités :

Le rapport tenseur sur scalaire r : Il s'agit de l'amplitude relative des perturbations scalaires et tensorielles ¹³.

$$r = \frac{P_s(k)}{P_t(k)} \quad (1.32)$$

L'indice spectral scalaire n_s : Il s'agit de la pente du spectre des perturbations scalaires.

$$n_s = \frac{\partial \ln P_s(k)}{\partial \ln k} + 1 \quad (1.33)$$

L'indice spectral tensoriel n_t : Il s'agit de la pente du spectre des perturbations tensorielles.

$$n_t = \frac{\partial \ln P_t(k)}{\partial \ln k} \quad (1.34)$$

La mesure des trois paramètres r , n_t et n_s permettrait de contraindre significativement les modèles inflationnaires. Cela permettrait, par exemple, de reconstruire directement le potentiel de l'inflaton ¹⁴, d'éliminer la majorité des modèles inflationnaires des supercordes ou encore de remettre sur le devant de la scène les défauts topologiques ¹⁵ comme source pour engendrer les structures observées dans l'Univers.

Notons aussi que la mesure de r donnerait directement l'échelle en énergie $V^{1/4}$ de l'inflation. En effet, la mesure des spectres des perturbations scalaires du CMB (via C_ℓ^{TT} , C_ℓ^{EE} et C_ℓ^{TE}) permet d'établir la relation suivante [BP08] :

$$V^{1/4} = 1.06 \times 10^{16} \left(\frac{r}{0.01} \right)^{1/4} \text{ GeV} \quad (1.35)$$

Par exemple, une mesure de $r = 0.01$ donnerait une énergie de l'ordre de 10^{16} GeV, ce qui serait compatible avec les théories de Grande Unification (GUT).

13. Cela correspond au niveau des modes B par rapport aux modes E de polarisation du CMB.

14. Pour plus de détails se référer à [BP08].

15. Il s'agit de sources de perturbations dans la métrique provenant de brisures spontanées de symétrie dans l'Univers primordial. Ces perturbations produisent des modes tenseurs et scalaires mais seule leur contribution aux modes B serait détectable [Urr+08].

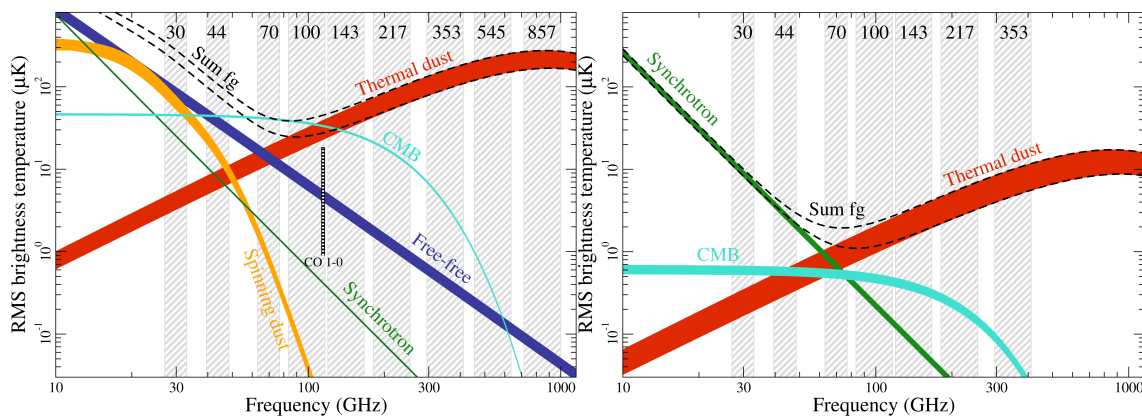


Figure 1.4 – Température de brillance des anisotropies de température (à gauche) et de polarisation (à droite) du CMB en fonction de la fréquence avec les masques d’émission des avant-plans obtenus d’après les données de février 2015 de Planck HFI [Col+15b]. Les masques sont représentés pour des couvertures du ciel de 81% à 93% pour la température et de 73% à 93% pour la polarisation.

1.4 Modes B et contraintes d'observation

1.4.1 Avant-plans

Observer ou même détecter les modes B est un défi de taille. Les contraintes d’observation sont en effet nombreuses. Les photons du CMB, dans leur voyage à partir de la surface de dernière diffusion, ont subi de nombreux effets. De ces effets, distinguons les effets systématiques auxquels s’ajoutent les avant plans. Les effets systématiques sont causés par l’atmosphère ou par l’instrumentation mise en place pour la détection. Ils seront abordés en section 2. Les avant-plans, eux, sont des phénomènes astrophysiques inévitables et avec lesquels nous devons composer. La séparation de composantes qui permet de soustraire ces effets devient alors vitale. Notons que ces phénomènes qui s’ajoutent et parfois dominent le signal cosmologique ne sont pas simplement un “bruit” mais présentent aussi un intérêt astrophysique. Nous pouvons en distinguer la nature suivant leur origine ou leur loi d’émission. En effet, celle-ci peut être galactique, extragalactique ou cosmologique.

Les processus d’émission galactique sont composés principalement de quatre phénomènes :

- Le rayonnement de freinage (Free-Free)
- Le rayonnement synchrotron
- L’émission thermique de la poussière (Thermal dust)
- L’émission anormale de la poussière (Spinning dust)

Le rayonnement dit “extragalactique” peut provenir de processus propres à chaque source ainsi que du fond infrarouge (Cosmic Infrared Background).

Le rayonnement qui doit être soustrait du CMB et qui présente aussi un intérêt cosmologique inclue :

- La réionisation
- L’effet [Sunyaev-Zel’dovich \(SZ\)](#)
- L’effet Vishniac
- L’effet de lentillage gravitationnel
- L’effet [Sachs–Wolfe intégré \(ISW\)](#)
- Les fluctuations non gaussiennes

Les lois d’émission des composantes galactiques sont représentées sur la figure 1.4. Cette figure est loin de représenter l’ensemble des modèles de masques des avant-plans galactiques. Elle montre néanmoins le lien étroit qu’entretient l’analyse des données avec la définition de l’instrumentation qui doit être mise en place pour la mesure précise du fond diffus cosmologique :

Large couverture spectrale Il s’agit d’avoir des composantes dont le comportement en fréquence est très large-bande sur toute la chaîne de détection.

Large couverture sur le ciel Il s’agit d’avoir une couverture sur le ciel la plus large possible. Bien que la mutualisation des données sur différents sites d’observation peut permettre une large couverture, seul un instrument spatial donne une couverture complète sur le ciel.

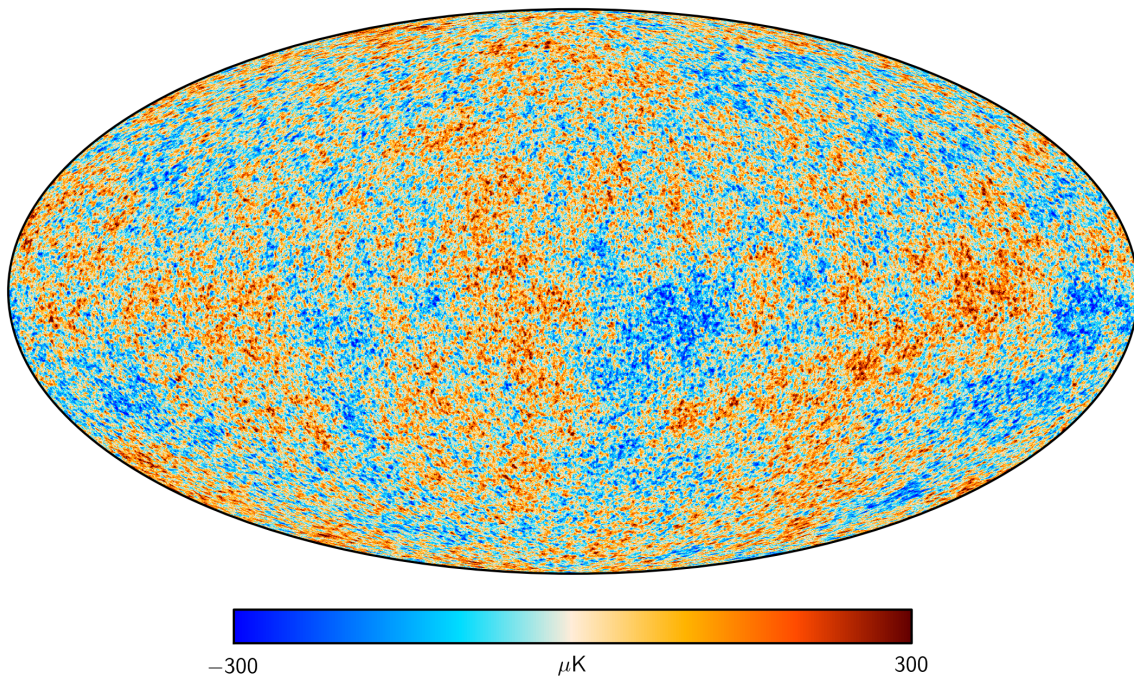


Figure 1.5 – Carte de l'intensité des anisotropies de température du fond diffus cosmologique à une résolution de 5' à partir de l'analyse combinée des données de Planck HFI 2015 et du satellite WMAP [Col+15b].

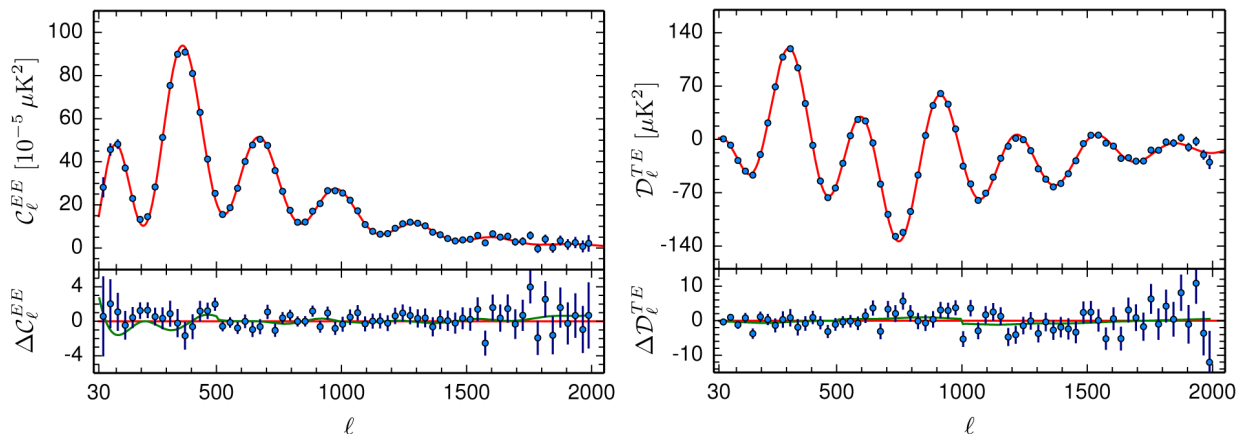


Figure 1.6 – Spectres de puissances C_ℓ^{EE} (à gauche) et C_ℓ^{TE} (à droite) du CMB avec fit théorique (partie haute-rouge) et résiduels (partie basse) à partir des données de Planck HFI 2015 [Col+15b].

La séparation de composantes est d'une importance capitale dans l'analyse des données. Elle revêt un poids et des détails qui, ne faisant pas l'objet de ce manuscrit, n'y seront pas explicités. Aussi, invitons-nous le lecteur à se reporter à [Ben+13] et [Ich14] pour plus de détails.

1.4.2 Derniers résultats

Le 14 mai 2009 est lancé le dernier satellite de cosmologie Planck [Pla+11a]. L'instrument HFI, embarqué à bord, y observera le ciel dans le millimétrique entre le 12 août 2009 et le 23 octobre 2013 [Pla+11b]. C'est en mars 2013 qu'est rendue publique la première image de l'Univers, alors âgé de 380 000 ans, issue de l'instrument HFI. La figure 1.5 montre cette image des anisotropies de température du CMB¹⁶. Les derniers spectres de puissance C_ℓ^{TT} , C_ℓ^{EE} et C_ℓ^{TE} sont eux visibles sur les figures 1.3 et 1.6.

Dans le même temps, la course aux modes B (primordiaux et secondaires) au sol continue. Elle s'articule autour du développement de la future technologie spatiale pour l'observation du CMB.

le 17 mars 2014, les quatre co-PI de l'instrument BICEP2¹⁷ font une annonce dans une conférence de presse

16. Mise à jour SMICA février 2015.

17. Background Imaging of Cosmic Extragalactic Polarization (BICEP)

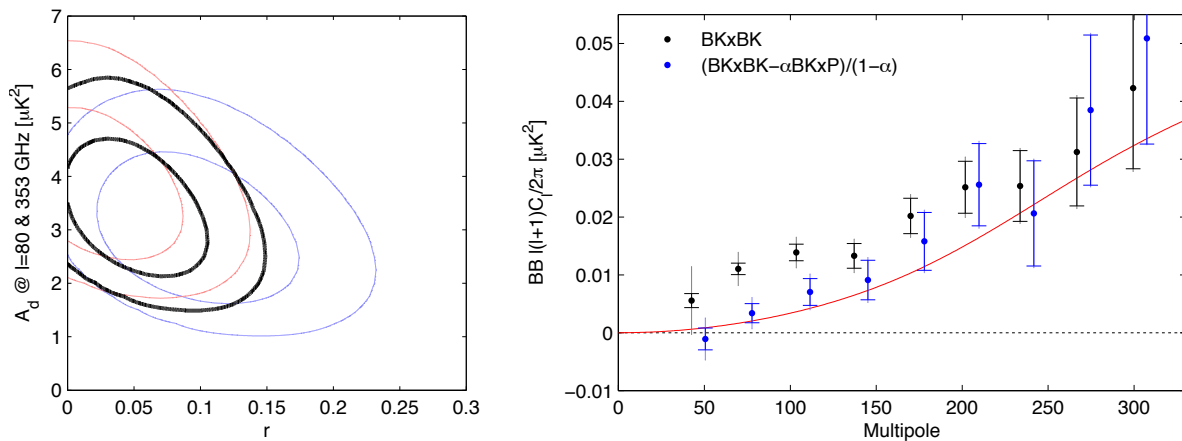


Figure 1.7 – A gauche : Contours de limite sur r (avec 68% et 95% de confiance) à partir du fit du spectre C_ℓ^{BB} avec le modèle lentillage+ Λ CDM+poussière provenant des données combinées de Planck HFI (217GHz et 353GHz), de Keck Array (150GHz) et de BICEP2 (150GHz). La couleur noire montre le cas principal avec données combinées Planck+BICEP2+Keck. La couleur rouge représente Planck+Keck. La couleur bleue représente Planck+BICEP2. A droite : Spectre de puissance C_ℓ^{BB} avant et après soustraction de l'effet de la poussière à partir des données polarisées de Planck 2015 [Ade+15].

qui bouleverse la communauté scientifique. Les modes B primordiaux auraient été détectés avec un niveau de $r = 0.2$ à $5,9 \sigma$ après soustraction des avant-plans. Il s'agit d'un niveau de détection incroyablement élevé par rapport aux prédictions mais toujours en accord avec la [Grand Unification Theory \(GUT\)](#). Dans les jours qui suivent, la base de données de arXiv est submergée d'articles relatant les conséquences que cela aurait sur les modèles cosmologiques. La pré-publication des résultats [Ade+14a] est disséquée par l'ensemble de la communauté. Il apparaît ensuite un désaccord sur la prédiction du niveau des modes B primordiaux. Le 5 février, la publication des résultats des données polarisées de Planck HFI [Col+15b] sur la même zone du ciel observée par BICEP2 confirme ces doutes. Il apparaît alors que le signal est dominé par la poussière de notre galaxie. Pour tirer cette histoire au clair, les équipes de BICEP2 et Planck HFI travaillent ensemble et déduisent une limite supérieure de $r < 0.12$ à un niveau de confiance de 95% [Ade+15]. La figure 1.7 résume ces conclusions : ce n'était finalement que de la poussière. La dernière carte de polarisation du CMB sur tout le ciel filtrée à 5' et dominée par la poussière¹⁸ est visible sur la figure 1.8.

Tout cela a fait passer au second plan l'apport considérable de la succession des instruments BICEP, BICEP2 et Keck Array sur les stratégies d'étalonnage [Ade+14b]. Ce sont ces mêmes stratégies qui ont permis à l'instrument PolarBear¹⁹ de mesurer les modes B, cette fois d'origine cosmologique, quelques mois après l'annonce des résultats de BICEP2. Cette mesure des Modes B issus du lentillage gravitationnel est passée presque inaperçue auprès du grand public.

A ce jour, aucune détection des modes B primordiaux n'a eu lieu. Si ceux-ci sont bien à des niveaux détectables, il y a de grandes chances pour qu'une des expériences dans la course fasse la première mesure indirecte des ondes gravitationnelles primordiales. Les architectures et technologies qui pourraient faire de cet objectif une réalité font l'objet de la section 2.

2 Architectures Intelligentes et Technologies avancées

2.1 La traque des ondes gravitationnelles primordiales

Depuis 30 ans, les modes B de polarisation du fond diffus cosmologique, empruntés des ondes gravitationnelles primordiales, font l'objet d'une véritable traque. Mais comment peut-on traquer ce que l'on n'a jamais vu ? La réponse à cette question n'est certainement pas simple. Tel un chasseur, l'instrumentaliste doit construire un piège efficace : un instrument capable de réussir cette fameuse détection. En conjonction avec les propriétés du signal que l'on cherche à mesurer, voici les propriétés qu'aurait cet instrument.

Polarimétrie Ce que nous cherchons est une combinaison particulière des états de polarisations linéaires de

18. données de Planck HFI février 2015

19. [Polarization B-Mode Experiment \(PolarBear\)](#)

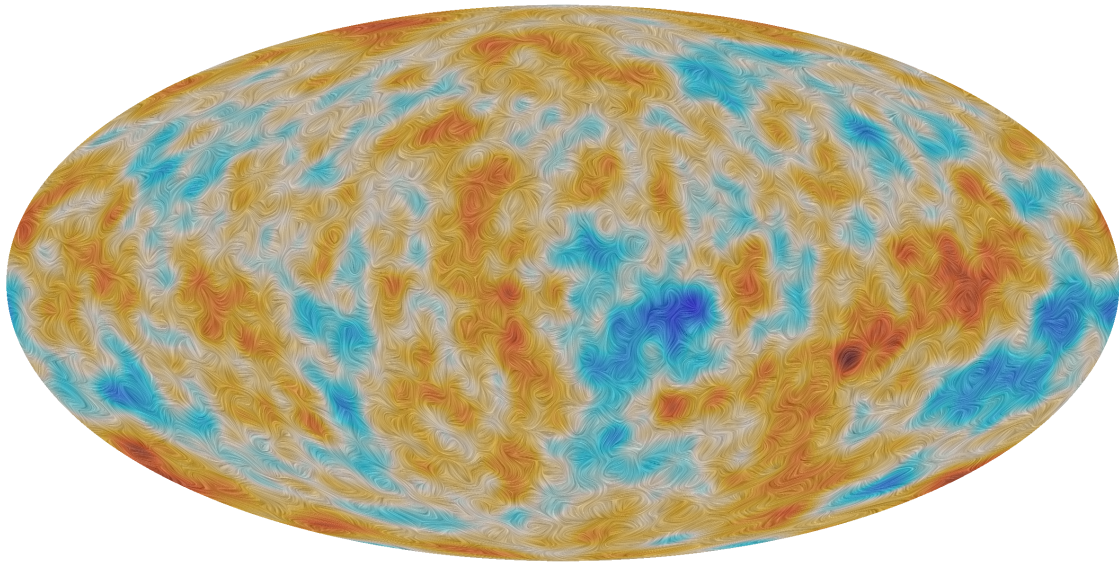


Figure 1.8 – Carte du ciel filtrée à 5' de la polarisation du fond diffus cosmologique mesurée par l'instrument HFI du satellite Planck. Les couleurs représentent la température du CMB. Les motifs sont obtenus par technique LIC. Ils représentent la direction de polarisation, dominés ici par les modes E [Col+15b].

quelques vieux photons.

⇒ Le piège doit être un polarimètre ; un instrument sensible à la polarisation linéaire de la lumière.

Couverture spectrale L'observable direct est le CMB ; un rayonnement fossile émis il y a plus de 13 milliards d'années. Il s'agit d'un rayonnement de corps noir refroidi aujourd'hui à 2,725 K. Sa loi de rayonnement nous dit que le maximum de signal est obtenu dans les longueurs d'onde millimétriques. C'est donc dans ces fréquences que l'instrument doit être le plus sensible. Un impératif pour pouvoir extraire le signal utile est la capacité à soustraire les avant-plans polarisés [Ich14]. Ceci nécessite une large couverture spectrale (voir Figure 1.4). D'autre part, observer depuis la terre nécessite de se placer dans des gammes de fréquences (toujours dans le millimétrique) où l'atmosphère est transparente. Il s'agit là d'un autre facteur limitant.

⇒ La sensibilité de détection doit être maximale aux longueurs d'onde millimétriques.

⇒ Les bandes de fréquences doivent être choisies en accord avec le type d'observation choisi (instrument sol ou spatial)

Sensibilité Le niveau estimé de la puissance angulaire des modes B est en dessous de $3 \cdot 10^{-8} K$ [Ade+15].

⇒ La majorité des instruments actuels choisissent, comme détecteurs, des bolomètres supraconducteurs. En effet, ces derniers ont l'avantage de donner une sensibilité dans le millimétrique limitée seulement par le bruit de photons²⁰.

Effets systématiques L'observation depuis la Terre ajoute des effets systématiques liés à l'atmosphère. C'est la raison pour laquelle des sites d'observation exceptionnellement propres sont choisis [Tre+12]. D'autres effets instrumentaux viennent s'y ajouter. En effet, chaque composant sur le chemin optique introduit des effets systématiques. Des composants aux propriétés exceptionnelles et un assemblage en architectures intelligentes devront être employés. De plus, il faudra utiliser des stratégies de mitigations d'effets systématiques et d'étalonnage évoluées pour pouvoir espérer, un jour, faire une détection.

⇒ Choix de sites d'observation propres.

⇒ Choix de composants propres.

⇒ Choix d'architectures intelligentes.

⇒ Utilisation de techniques d'étalonnage avancées.

Couverture angulaire Si nous observons depuis la Terre, du fait de champ d'observation réduit, la variance cosmique fait que nous ne pouvons pas faire une détection à très grande échelle angulaire [KL97]. D'autre part, La forme estimée des spectres angulaires des modes B primordiaux et issus du lentillage gravitationnel situe l'échelle angulaire idéale pour une éventuelle détection autour de $l \sim 100$.

⇒ Une mesure précise du spectre des modes B nécessitera un instrument spatial.

20. Statique des photons arrivant sur les détecteurs

Instrument	Type	Site	1 st light	Fin	r^a	Arch.	Détecteurs	Multiplexage	Modulation
Polarbear	Sol	Cerro Toco ^b	2011	2013	0,025	Imageur	TES ^c	Fréquentiel	HWP ^d
Polarbear 1.5	Sol	Cerro Toco	2013	2014	0,025	Imageur	TES	Fréquentiel	HWP
Polarbear 2	Sol	Cerro Toco	2014	2017	–	Imageur	TES	Fréquentiel	HWP
Simons Array	Sol	Cerro Toco	2016	2017	0,001	Imageur	TES	Fréquentiel	HWP
Groundbird	Sol	Cerro Toco	2015	–	0,0005	Imageur	MKID ^e	Fréquentiel	HWP
Litebird	Satellite	L2 ^f	2029	–	0,001	Imageur	TES	Fréquentiel	HWP
QUBIC	Sol	Alto Chorillos ^g	2022	2026	0,001	Interféromètre	TES	Fréquentiel	HWP
Keck Array	Sol	Pôle Sud	2010	–	–	Imageur	TES	Fréquentiel	HWP
BICEP 3	Sol	Pôle Sud	2015	–	–	Imageur	TES	Temporel	HWP
CLASS	Sol	Cerro Toco	2015	–	0,01	Imageur	TES	Fréquentiel	VPM ^h
ACT Pol	Sol	Cerro Toco	2015	–	–	Imageur	TES	Fréquentiel	HWP
EBEX	Ballon	Antarctique	2017	–	0,056	Imageur	TES	Fréquentiel	HWP
SPT Pol	Sol	Pôle Sud	–	–	–	Imageur	TES	Fréquentiel	VPM
LSPE	Ballon	Swalbard	2015	–	0,03	Imageur	Ampli./TES	Fréquentiel	HWP
PIPER	Ballon	Antarctique	2013	–	0,02	Imageur	TES	Temporel	HWP
SPIDER	Ballon	Antarctique	2015	2015	0,03	Imageur	TES	Fréquentiel	HWP
ABS	Sol	Cerro Toco	–	–	0,01	Imageur	TES	Temporel	HWP
SKIP	Ballon	Kiruna	2017	–	0,02	Imageur	LEKID ⁱ	Fréquentiel	HWP

a. Rapport tenseur sur scalaire

b. voir 3.2.1.3

c. TES

d. Half Wave Plate (HWP)

e. Microwave Kinetic Inductance Detector (MKID)

f. Point de Lagrange, Espace

g. voir 3.1.1.4

h. Variable-delay Polarisation Modulator (VPM)

i. Lumped Element Kinetic Inductance Detector (LEKID)

Table 1.1 – Récapitulatif des principales expériences encore dans la course pour la détection des modes B de polarisation du CMB. Le tableau retrace les différentes architectures et technologies de détection associées ainsi que l'objectif rapport tenseur sur scalaire.

Site d'observation : Sol vs Espace Observer à partir de l'espace présente des contraintes différentes de l'observation à partir du sol. Nous sommes moins limités par la variance cosmique et nous pouvons observer tout le ciel. De plus, l'absorption de l'atmosphère n'est plus un problème. En revanche, les coûts et les délais associés à une mission spatiale ne peuvent pas être comparés à une mission "sol". De plus, un instrument au sol a l'avantage d'un temps d'observation plus étendu et peut par conséquent être plus sensible sur des petites régions du ciel. Il peut en outre bénéficier de stratégies d'étalement évoluées et dont le déploiement pourraient s'avérer très complexe dans l'espace. C'est pour ces raisons qu'il est plus probable qu'un instrument sol fasse la première détection. Pour la mesure précise sur tout le ciel, il faudra aller dans l'espace.

Dans les tableaux 1.2, j'ai essayé de résumer les propriétés des principales expériences dans la course à la détection des modes B en 2017. En regardant ces tableaux, il est facile de remarquer que la course à la "détectabilité" des modes B primordiaux rime souvent avec l'augmentation du nombre de détecteurs. Il est aussi évident que la grande majorité des projets a fait le choix d'une technologie supraconductrice et d'architectures basées sur l'imagerie. Certains détails échappent pourtant à cette description. En effet, à compromis identiques, les choix instrumentaux peuvent être radicalement différents. Néanmoins, la concurrence n'est pas seulement technologique car les stratégies d'observation diffèrent également. Pour autant, les collaborations technologiques et les échanges de données sont fréquents. C'est cela, je pense, qui fait la force de ce paysage expérimental.

Nous reviendrons vers les détails technologiques plus loin. Pour l'instant, concentrons-nous sur une problématique à la fois liée à la technologie et à la stratégie d'observation : l'architecture de détection.

2.2 Architectures de détection intelligentes

Il s'agit, pour une architecture évoluée, de l'assemblage intelligent des différentes briques technologiques qui la composent. Autrement dit, il s'agit de la manière avec laquelle les photons du CMB sont acheminés de l'entrée de l'instrument jusqu'aux détecteurs. Les contraintes définies précédemment (polarimétrie, sensibilité, effets systématiques, couverture spectrale, couverture angulaire et site d'observation) sont autant de données d'entrée qui

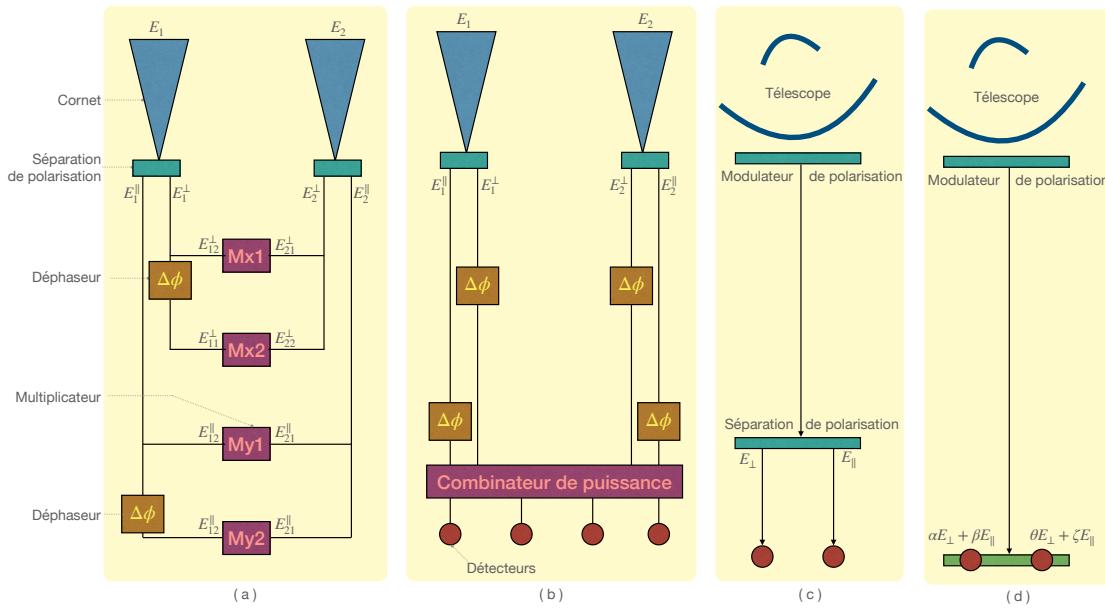


Figure 1.9 – Exemples d’architectures de détection évoluées. Les détails de l’optique et du filtrage sont omis par souci de simplification. (a) Interférométrie multiplicative (classique); (b) Interférométrie additive (incohérente); (c) Imageur à polarimétrie fixe; (d) Imageur à polarimétrie variable.

aident à mieux définir une telle architecture.

2.2.1 Interférométrie multiplicative

C’est à Michelson que l’on doit les débuts de l’utilisation de l’interférométrie pour l’astrophysique. Cette technique s’est depuis bien développée, notamment pour les mesures nécessitant un contrôle des effets systématiques et une résolution angulaire fine. Le principe est d’utiliser la différence de phases entre deux ondes électromagnétiques provenant d’une même source et arrivant à deux endroits différents. La recombinaison de ces deux ondes donne alors la figure d’interférence. La figure 1.9 (a) montre un exemple d’une telle architecture avec un couple de récepteurs. L’on définit alors une ligne de base comme la séparation $\vec{u} = \vec{D}/\lambda$ entre les deux récepteurs distants de \vec{D} . Si \vec{x} est la direction d’observation, les deux ondes arrivent aux récepteurs avec un déphasage $\delta = 2\pi\vec{u} \cdot \vec{x} = 2\pi\nu t$. Notons :

$$E_1(\vec{x}, t) = E_0 \sin(2\pi\nu t) \quad \text{et} \quad E_2(\vec{x}, t) = E_1(\vec{x}, t - \tau) \quad (1.36)$$

avec E_0 l’amplitude du champ électrique. Notons aussi le lobe de puissance totale $B(\vec{n} - \vec{n}_0)$ identique pour les deux récepteurs (cornets dans la figure 1.9 (a)) avec \vec{n}_0 la direction d’observation sur le ciel.

L’interférence peut être effectuée en ligne ou hors ligne. Dans les longueurs d’onde millimétriques qui nous intéressent ici, c’est généralement le multiplicateur qui effectue la corrélation complexe des champs électriques reçus. Avant sa détection, le signal est amplifié par des [High Electron Mobility Transistors \(HEMT\)](#). Les HEMT étant des composants cohérents, leur utilisation introduit un bruit quantique dû au fait qu’ils ne peuvent pas transmettre à la fois l’amplitude et la phase du signal sans introduire un bruit minimal $T_{QL} = h\nu/k$ (principe d’incertitude d’Heisenberg) [Piat2008]. Dans notre cas, les deux champs E_1 et E_2 sont séparés en leurs composantes orthogonales E^{\parallel} et E^{\perp} à l’aide de diplexeurs de polarisation. Après les HEMT, les signaux sont séparés en deux parties égales qui sont ensuite envoyées vers des multiplicateurs, pour l’une avec un déphasage $\Delta\phi = 90^\circ$, pour l’autre sans déphasage induit. Les multiplicateurs multiplient simplement les signaux électriques. Après les multiplicateurs, des détecteurs extraient le signal en le moyennant sur une durée bien plus longue que la période de l’onde électromagnétique. Nous obtenons donc, pour la voie \perp , les deux signaux suivants :

$$V_{Mx1} = \frac{1}{2} \int d\vec{x} B_{\perp}(\vec{x}) E_{\perp,0}^2(\vec{x}) \cos(2\pi\vec{u} \cdot \vec{x}) \quad \text{et} \quad V_{Mx2} = \frac{1}{2} \int d\vec{x} B_{\perp}(\vec{x}) E_{\perp,0}^2(\vec{x}) \sin(2\pi\vec{u} \cdot \vec{x}) \quad (1.37)$$

A partir de V_{Mx1} et V_{Mx2} , nous pouvons définir la visibilité complexe par :

$$V(\vec{u}) = 2(V_{Mx1} + iV_{Mx2}) \quad (1.38)$$

qui, d'après le théorème de Van Citter-Zernicke, représente la transformée de Fourier de la puissance du signal reçu. Comme nous nous intéressons à la polarisation du signal, nous obtenons les visibilités complexes polarisées suivantes :

$$V_{\perp} = \int B_{\perp}(\vec{x}) E_{\perp,0}^2(\vec{x}) \exp(2i\pi\vec{u} \cdot \vec{x}) \quad \text{et} \quad V_{\parallel} = \int B_{\parallel}(\vec{x}) E_{\parallel,0}^2(\vec{x}) \exp(2i\pi\vec{u} \cdot \vec{x}) \quad (1.39)$$

Il est possible de ré-écrire les visibilités polarisées en fonction des paramètres de Stokes précédemment définies. Dans ce cas, pour une ligne de base et deux polarisations linéaires, les combinaisons de toutes les voies sont nécessaires soit 16 multiplicateurs. Comme explicités dans [Hamilton2008b], les visibilités polarisées s'écrivent comme les produits de convolution des transformées de Fourier des paramètres de Stokes et du lobe en puissance :

$$V_I = \int \tilde{B}(\vec{u} - \vec{v}) \tilde{I}(\vec{v}) d\vec{v} \quad V_Q = \int \tilde{B}(\vec{u} - \vec{v}) \tilde{Q}(\vec{v}) d\vec{v} \quad (1.40)$$

$$V_U = \int \tilde{B}(\vec{u} - \vec{v}) \tilde{U}(\vec{v}) d\vec{v} \quad V_V = \int \tilde{B}(\vec{u} - \vec{v}) \tilde{V}(\vec{v}) d\vec{v} \quad (1.41)$$

Où le tilde désigne la transformée de Fourier.

L'interférométrie multiplicative a une place particulière dans l'histoire de la mesure de la polarisation du fond diffus cosmologique. Comme discuté précédemment, cette mesure nécessite un contrôle drastique des effets systématiques. L'interférométrie offre une certaine immunité aux fluctuations rapides de l'atmosphère et évite les effets systématiques associés aux optiques des imageurs comme les télescopes et les lentilles. C'est donc naturel que les premiers instruments ayant permis la détection des modes E de polarisation du fond diffus cosmologique soient des interféromètres (CBI²¹, DASI). En revanche, la complexité inhérente à la technologie des HEMT et des multiplicateurs et le bruit associé limite fortement la possibilité d'utiliser cette architecture pour la traque des modes B de polarisation. C'est la raison pour laquelle la grande majorité des expériences dans la course pour la détection des modes B sont des imageurs.

2.2.2 Imagerie / Spectro-polarimétrie

L'écrasante majorité des instruments du tableau 1.2 sont des imageurs sensibles à la polarisation. Il s'agit là d'une architecture plus classique mettant en oeuvre généralement un télescope, une optique d'adaptation et un plan focal. Cette architecture permet de prendre une capture/photo des anisotropies du fond diffus cosmologique. Le fait qu'elle ne soit pas immune aux fluctuations rapides de l'atmosphère et qu'elle soit sujette aux effets systématiques instrumentaux d'une optique complexe implique un soin particulier dans la fabrication des composants et l'assemblage et l'étalonnage de l'instrument. Elle offre aussi un avantage non négligeable par rapport à l'interférométrie multiplicative : celui de permettre la mise en oeuvre de grandes matrices de détecteurs à la limite de la sensibilité ultime. Même avec une unique architecture, de nombreuses variantes existent comme celle utilisant des cornets suivis de diplexeurs planaires qui acheminent le signal vers des bolomètres ou encore celle utilisant des micro-lentilles hémisphériques qui concentrent le signal sur des antennes ségrégratrices des polarisations linéaires avant de le transmettre en technologie planaires vers des filtres et des détecteurs. Il s'agit là de pixels polarisés. Ces mêmes pixels polarisés peuvent être sensibles à des combinaisons différentes de la polarisation linéaire des photons et donc offrir un paramètre de plus pour la mitigation des effets systématiques liés à la polarisation. Les modulateurs de polarisation sont aussi souvent présents comme l'un des premiers éléments optiques pour la mitigation des effets systématiques. Deux exemples d'architecture sont montrés sur la figure 1.9 (c) et (d). Les composants qui font le coeur de cette architecture seront explicités dans la sous-section 2.3 puis détaillés pour certains dans la section 3 et le chapitre 2.

21. [Cosmic Background Imager \(CBI\)](#)

2.2.3 Interférométrie additive

L'interférométrie multiplicative et l'imagerie dite incohérente (ne conservant pas la phase) ou spectropolarimétrie ont toutes deux démontré leur intérêt dans les instruments astrophysiques et dans la traque des modes de polarisation du CMB en particulier. Et s'il était possible de combiner les avantages des imageurs à grandes matrices de détecteurs ultra-sensibles et des interféromètres au contrôle avancé des effets systématiques ? C'est la question que se sont posé de nombreuses personnes. Cela s'est manifesté à travers différents projets dont [MBI](#)²², [BRAIN](#)²³ et aujourd'hui, [QUBIC](#)²⁴. J'ai fait partie des deux dernières équipes et participé à la première démonstration expérimentale de l'interférométrie bolométrique [[Ghr+10](#)].

Dans cette architecture, nous retrouvons presque tous les composants des imageurs, simplement assemblés différemment. L'interférométrie additive a longtemps posé des questions importantes, notamment liées à la perte de sensibilité, aux mesures simultanées des visibilités polarisées, de l'effet de la largeur de bande etc ... Les différents travaux sur le sujet menés à l'APC ont non seulement démontré la faisabilité mais aussi la compétitivité de cette architecture.

Revenons maintenant sur le principe de l'interférométrie bolométrique dont un schéma de principe est montré sur la figure 1.9 (b) avec une ligne de base. L'idée ici est de remplacer les corrélateurs par des détecteurs incohérents comme des bolomètres. Ces détecteurs ne conservent pas l'information de phase mais mesurent la puissance reçue en la moyennant sur un temps donné. Au lieu d'avoir une corrélation multiplicative, nous avons dans ce cas une corrélation additive soit :

$$S = \langle |E_1 + E_2|^2 \rangle = \langle |E_1|^2 \rangle + \langle |E_2|^2 \rangle + 2 \langle E_1 E_2^* \rangle \quad (1.42)$$

où E_1 et E_2 sont les champs électriques provenant des deux voies d'entrée et où $\langle E_1 E_2^* \rangle$ représente le terme d'interférence.

Il est donc possible de démontrer [[Ham09](#)] que le signal reçu par chaque détecteur est une combinaison linéaire des visibilités des paramètres de Stokes associées à chacune des lignes de base, soit :

$$\begin{aligned} S = & N_H \int I(\vec{n}) B^2(\vec{n}) d\vec{n} + \int U(\vec{n}) B^2(\vec{n}) d\vec{n} \sum_k \sin(\phi_{k\parallel} - \phi_{k\perp}) \\ & + \sum_b \Re[V_{Ib}] (\cos \Delta\phi_{\parallel\parallel} + \cos \Delta\phi_{\perp\perp}) - \Im[V_{Ib}] (\sin \Delta\phi_{\parallel\parallel} + \sin \Delta\phi_{\perp\perp}) \\ & + \sum_b \Re[V_{Qb}] (\cos \Delta\phi_{\parallel\parallel} - \cos \Delta\phi_{\perp\perp}) - \Im[V_{Qb}] (\sin \Delta\phi_{\parallel\parallel} - \sin \Delta\phi_{\perp\perp}) \\ & + \sum_b \Re[V_{Ub}] (\cos \Delta\phi_{\parallel\perp} + \cos \Delta\phi_{\perp\parallel}) - \Im[V_{Ub}] (\sin \Delta\phi_{\parallel\perp} + \sin \Delta\phi_{\perp\parallel}) \\ & + \sum_b \Re[V_{Vb}] (\sin \Delta\phi_{\parallel\perp} - \sin \Delta\phi_{\perp\parallel}) - \Im[V_{Vb}] (\cos \Delta\phi_{\parallel\perp} - \cos \Delta\phi_{\perp\parallel}) \end{aligned} \quad (1.43)$$

où la première ligne représente les termes d'auto-corrélation et les lignes suivantes les termes représentant les visibilités polarisées, définies dans 1.41, avec :

$$\Delta\phi_{b\parallel\parallel} = \phi_{i\parallel} - \phi_{j\parallel} \quad (1.44)$$

$$\Delta\phi_{b\parallel\perp} = \phi_{i\parallel} - \phi_{j\perp} \quad (1.45)$$

$$\Delta\phi_{b\perp\parallel} = \phi_{i\perp} - \phi_{j\parallel} \quad (1.46)$$

$$\Delta\phi_{b\perp\perp} = \phi_{i\perp} - \phi_{j\perp} \quad (1.47)$$

les différences de phases entre les voies i et j polarisées linéairement (\parallel et \perp). Ces déphasages incluent naturellement les sommes des déphasages induits entre les différentes voies par les déphaseurs (déphasage variable) et le combinatoire de puissance conçu pour induire une sommation cohérente des lignes de bases.

Il est alors possible de récupérer l'ensemble des visibilités en inversant le problème linéaire posé dans l'équation 1.43. Il apparaît ici clairement que le nombre d'inconnues est supérieur au nombre de lignes de bases (quatre inconnues par ligne de base), ce qui pose le problème du nombre de mesures importantes pour l'inversion de l'équation et donc, in fine, de la sensibilité et de la viabilité de toute l'architecture. Quelques astuces permettent cependant de sauver la mise. La première est purement géométrique. Considérons une matrice de cornets carrée assez grande. Nous constatons alors qu'une telle géométrie offre l'avantage d'un grand nombre de lignes de base

22. [Millimeter-wave Bolometric Interferometer \(MBI\)](#)

23. [B mode Radiation INterferometer \(BRAIN\)](#)

24. [QUBIC](#)

équivalentes²⁵. Par exemple, une matrice carrée de 144 cornets possède 9428 lignes de base équivalentes dont seulement 174 sont différentes. Il s'agit là d'une redondance de mesures simultanées qui permet de grandement réduire la dimensionnalité du problème posé. L'autre grande force de l'IB qui apparaît clairement dans l'équation 1.43 est la possibilité d'avoir une stratégie de déphasage variable permettant à la fois de récupérer l'ensemble des visibilités polarisées et d'effectuer ce qui s'appelle maintenant "auto-étalonnage" [Cha+09 ; Big+13].

2.3 Technologies de détection

L'autre facette des défis instrumentaux associés à la traque des modes B de polarisation du fond diffus cosmologique est la technologie de détection. Ce terme désigne l'ensemble des pièces individuelles du puzzle que l'on associe suivant une architecture donnée. Chaque pièce du puzzle ne peut être associée qu'à la bonne pièce et doit être conçue, fabriquée et assemblée avec un soin particulier. C'est l'ensemble qui constitue la propriété instrumentale nécessaire. Il s'agit donc là de l'ensemble des composants fabriqués par l'homme que les photons fossiles traversent avant d'être détectés. De ces composants, citons par exemple le télescope ou les cornets que nous pouvons considérer comme la frontière adaptant l'impédance du vide à celle du milieu dans lequel nous propageons les photons. S'en suit alors le filtrage, d'abord grossier (filtrage infrarouge) puis détaillé (sélection précise des bandes spectrales d'observation). Les détecteurs utilisés, eux, ont aujourd'hui des sensibilités limitées seulement par la statistique des photons incidents. Ceux auxquels je me suis intéressé sont des détecteurs supraconducteurs fonctionnant dans un environnement cryogénique. Dans cette famille de détecteurs, ceux qui sortent du lot sont les détecteurs à inductance cinétique [Cal+10] et les bolomètres supraconducteurs [IH05]. Ceux auxquels je me suis intéressé pendant mes travaux de recherches sont les bolomètres supraconducteurs aussi appelés *Transition Edge Sensor*. Le sujet et les développements associés méritent une place à part et seront abordés au chapitre 2.

3 Participation aux projets et expériences d'observation

3.1 De BRAIN à QUBIC

3.1.1 Présentation de l'instrument

3.1.1.1 Historique En 2006, le projet qui portait alors le nom de BRAIN [Pol+07] était l'unique contribution européenne à un instrument sol dédié au CMB. De l'autre côté de l'Atlantique, la collaboration MBI 2 [Tuc+08] avait la même ambition. En 2009, les deux collaborations fusionnent pour former le projet QUBIC [Tar+09 ; Kap09]. Il s'agissait alors d'un projet cohérent, au concept innovant et proposant une alternative aux imageurs traditionnels utilisés dans l'observation sol du fond diffus cosmologique. Le travail constant et, oserais-je, courageux (devant la quasi-standardisation des techniques d'imageurs pour le CMB) pendant les 13 dernières années a porté ses fruits. Cela a donné une technique, une technologie et une stratégie abouties. A présent, l'interférométrie bolométrique et son intérêt ne sont plus à démontrer. La stratégie d'auto-étalonnage et de soustraction des avant-plans fait aussi partie des plus abouties aujourd'hui.

3.1.1.2 Instrument final Une coupe de l'instrument est représentée sur la figure 1.10. Pour mieux comprendre cette figure, suivons le parcours des photons incidents sur l'instrument, ceux-ci rencontrent dans l'ordre :

1. une série de filtres infra-rouges qui constituent la fenêtre d'entrée du cryostat.
2. Une fois à l'intérieur du cryostat, une lame demi-onde achromatique refroidie à 4 Kelvin permet de moduler la polarisation du rayonnement incident [dAl+20].
3. Les photons rencontrent ensuite une grille polarisatrice où une seule polarisation linéaire est sélectionnée à la fois. A première vue, il peut paraître que la perte de la moitié de l'information est préjudiciable mais la pureté de la polarisation instrumentale vient compenser cette faiblesse apparente car il s'agit là d'une des sources d'effets systématiques les plus importantes dans le cas de l'étude de la polarisation du fond diffus cosmologique. Cette grille polarisatrice est refroidie à 4 Kelvin.
4. L'élément qui suit est une matrice carrée faite de 400 cornets primaires qui ré-émettent par l'intermédiaire de 400 cornets secondaires. Entre les cornets primaires et secondaires sont placés des commutateurs quasi-optiques qui donnent la capacité d'aveugler ou pas des cornets spécifiques, donnant une grande liberté pour le jeu de sélection des lignes de bases. Il s'agit là d'un élément vital pour la stratégie de calibration. Ce bloc, refroidi à 4 Kelvin, est constitué de 175 plaques d'aluminium de 0,3 mm d'épaisseur chacune. L'empilement de ces plaques permet de reproduire les corrugations des cornets nécessaires à

25. deux lignes de bases équivalentes ont le même vecteur \vec{u} les séparant. Par exemple, une matrice carrée de 4 cornets possède 6 lignes de base dont 4 lignes de base équivalentes.

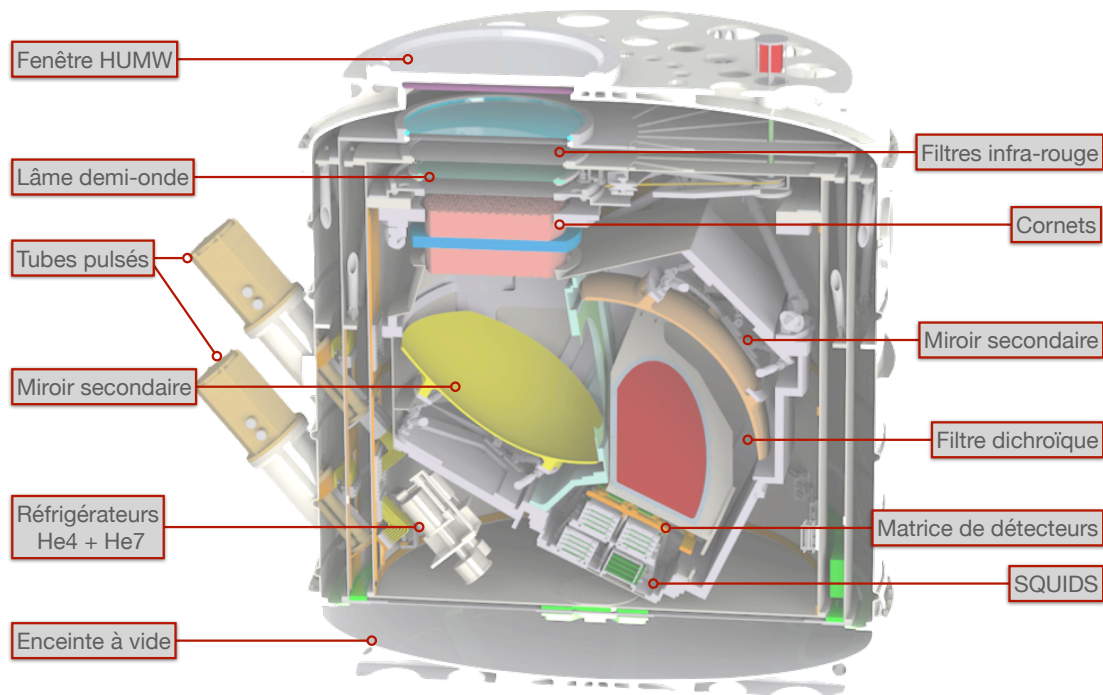


Figure 1.10 – Coupe de l'instrument montrant les différents sous-systèmes dans leur configuration réelle [Ham+20]

l'obtention des performances requises. Les cornets primaires et secondaires sont identiques. Ils couvrent un champ de vue de 13 degrés (largeur à mi-hauteur) avec des lobes secondaires de -25 dB [Cav+20].

5. Les cornets secondaires ré-émettent vers un combinateur optique constitué d'un système Grégorien hors axe de deux miroirs [OSu+20].
6. les photons se dirigent ensuite vers un filtre dichroïque qui sépare les deux bandes spectrales principales d'opération. La première est centrée autour de 150 GHz et la deuxième autour de 220 GHz. Le filtre dichroïque permet aussi de rediriger les photons de chaque bande spectrale vers un plan focal différent.
7. La détection se fait donc, en suivant l'axe optique, sur un premier plan focal (autour de 150 GHz) et, perpendiculaire à l'axe optique, sur un deuxième plan focal (autour de 220 GHz). Les deux plans focaux sont identiques et sont faits de 992 détecteurs chacun. Les détecteurs utilisés sont des bolomètres supraconducteurs (TES) *NbSi* [Pia+21] refroidis à 300 mK grâce à un réfrigérateur à sorption [Mas+20].

3.1.1.3 Démonstrateur technologique Ce qu'on appelle l'instrument de "test" ou démonstrateur technologique est fidèle en tout point à l'instrument final mais offre une matrice de cornets réduite et un nombre de détecteurs réduit. Il comporte 64 cornets, une optique réduite en conséquence et une matrice de 248 bolomètres TES fonctionnant à 150 GHz. Cet instrument constitue une étape technologique intermédiaire qui a servi à valider, en laboratoire, le comportement théorique de l'instrument, toutes les spécificités de l'instrument final, ainsi que le comportement individuel de briques technologiques comme le système de réfrigération ou les commutateurs quasi-optiques [Tor+20]. Cet instrument, aux performances réduites par rapport à sa version finale, servira aux premières opérations de type ingénierie prévue sur le site d'observation en Argentine. Cette phase d'ingénierie est très importante dans le déploiement d'un instrument astrophysique sol. Elle constitue la première étape qui valide les performances de l'instrument sur le ciel, la stratégie d'observation et la stratégie d'étalonnage. Par la suite, l'augmentation des matrices de cornets et de détecteurs permettra de passer à l'instrument final tout en gardant la même structure thermo-mécanique et le même cryostat.

3.1.1.4 Site d'observation Concevoir, construire et déployer un instrument astrophysique sol est un travail de longue haleine. Outre la dimension scientifique et technique, il y a une dimension économique que nul ne saurait ignorer. L'histoire récente regorge d'instruments conçus mais qui n'ont jamais vu le jour. D'autres sont nés mais n'ont jamais vu le ciel, faute de financement et de support suffisant. Le coût de déploiement et d'observation peut, en effet, être très important. A titre d'exemple, le coût de déploiement de l'instrument PolarBear sur le site du Conycit chilien du plateau de l'Atacama a avoisiné le M€ dans les premiers mois. La menace constante de l'arrêt du financement d'observation est donc quelque chose qui doit être prise en compte dès le début du projet. Pour

QUBIC, le site d'observation initial était au Dome Charlie en Antarctique. Plusieurs campagnes d'observation du site ont d'ailleurs été faites sur place [Pol+08; De +10] avec le soutien de l'Institut polaire français Paul-Emile Victor (IPEV) et ont confirmé l'excellence du site. En revanche, la lourdeur de la logistique et les coûts d'opération très importants ont fait pencher la balance. En 2018, une décision est prise de changer de site d'observation. Le site final sera situé à Alto Chorillos [De +18] dans la province de Salta en Argentine, à 4869 m d'altitude. Hormis la logistique simplifiée, un critère important a été la forte implication argentine dans la phase d'installation et d'opération de l'instrument. Outre le fait qu'il s'agisse d'un des meilleurs sites d'observation du CMB au monde, la possibilité d'observer la même zone du ciel que d'autres imageurs situés sur le plateau de l'Atacama pour confirmer ou infirmer une éventuelle détection augmente l'importance du choix du site.

Le projet QUBIC revêt une importance capitale dans le paysage instrumental mondial de la cosmologie expérimentale car il offre une approche instrumentale différente, des effets systématiques différents, un étalonnage différent, etc ... Il offre donc aujourd'hui l'unique confirmation différente d'une éventuelle détection des modes B de polarisation du fond diffus cosmologique par un instrument imageur. Mais l'importance de QUBIC ne s'arrête pas là. La sous-section 2.2.3 montre l'importance de l'interférométrie bolométrique ou additive dans la mitigation des effets systématiques. En réalité, il s'agit toujours d'un compromis entre effets systématiques et sensibilité de détection. Là où les progrès effectués dans la conception et la fabrication des grandes matrices de détecteurs permettent de repousser toujours encore plus les limites de la sensibilité instrumentale, la question des effets systématiques ne peut prétendre à autant d'avancées. Comme explicité précédemment, celle-ci est de deux natures : Les effets systématiques naturels et les effets systématiques instrumentaux.

3.1.1.5 Les effets systématiques naturels Il s'agit ici de tout ce que les photons du CMB rencontrent pendant leur voyage ou qui s'ajoute à leur rayonnement (voir 1.4) : du lentillage gravitationnel à la poussière galactique en passant par l'effet SZ. Parmi ces effets, il en est un qui peut représenter un réel frein. En effet, l'analyse conjointe des données de WMAP²⁶, Planck HFI et S-PASS a pu déterminer une limite fondamentale du rapport tenseur sur scalaire qu'il est possible d'atteindre. Celle-ci serait de $r = 0,01$ essentiellement à cause du rayonnement synchrotron à basse fréquence et de l'émission thermique de la poussière galactique à haute fréquence et sur les grandes échelles angulaires [Kra+16; Kra+18]. La détermination de l'indice spectral et du profil d'émission de la poussière galactique est donc aujourd'hui la principale raison pour laquelle tous les instruments cherchent à étendre leurs bandes spectrales d'observation au delà de la bande d'intérêt principale du CMB à travers les grands plans focaux multichroïques incluant de multiples filtres spectraux à faibles bandes ou canaliseurs de signaux (channelizers). Je me suis intéressé à ces problématiques pendant la période 2010-2012 à l'université de Berkeley. Ce qui est particulièrement intéressant dans le cas de QUBIC est que l'architecture de l'instrument permet une approche complètement différente. En effet, dans le cas de l'interférométrie bolométrique, le profil d'émission de la poussière galactique pourrait être différencié du profil d'émission du CMB à l'intérieur d'une seule et même bande spectrale [Ham+20]. De plus, QUBIC serait à même de discriminer plusieurs sous-bandes à l'intérieur des bandes principales sans filtrage additionnel. Aujourd'hui et dans le paysage instrumental actuel, il s'agit d'un argument de taille en faveur de l'instrument QUBIC.

3.1.1.6 Les effets systématiques instrumentaux Les arguments initiaux qui ont motivé l'instrument et plus généralement l'interférométrie bolomètre sont la minimisation, la mitigation et le contrôle des effets systématiques instrumentaux. Les motivations de l'architecture considérées pourront être retrouvées dans la sous-section 2.2.3. Les détails de la procédure d'auto-étalonnage qui fait usage des commutateurs quasi-optiques sont décrits dans la sous-section 2.2.3 et explicités dans [Cha+09; Big+13]

3.1.2 Rôles et implication

3.1.2.1 Interférométrie bolométrique Mon aventure avec l'interférométrie bolométrique a commencé en 2006 pendant ma thèse de doctorat. Au sein du laboratoire millimétrique et avec Michel Piat et Jean-Christophe Hamilton, nous avons mis en place un petit démonstrateur à une ligne de base permettant de démontrer le principe de fonctionnement de l'interférométrie bolométrique [Ghr+10]. L'effort conjoint sur la réflexion instrumentale et théorique a lentement fait évoluer le projet du démonstrateur vers l'instrument. En particulier, les composants quasi-optiques comme les cornets, les polariseurs, le combinateur de puissance ou les interrupteurs quasi-optiques ont donné à l'instrument la forme qu'il a aujourd'hui.

3.1.2.2 Chaîne de détection A mon retour de mon postdoctorat à Berkeley en 2012, j'ai repris une activité dans QUBIC avec une implication importante dans la chaîne de détection (fabrication, intégration, tests) [Ghr+14]. J'ai notamment co-encadré en 2014 l'implication de Camille Perbost, doctorante de Michel Piat à l'époque, dans le processus de fabrication des matrices de détecteurs [Per16b]. Entre 2012, et 2014, des avancées importantes

26. Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP)

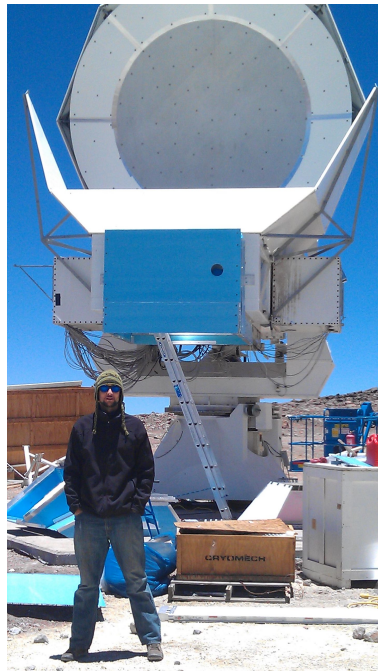


Figure 1.11 – Photo du télescope HTT pendant le déploiement de PolarBear au Chili en 2012.

sur la compréhension, la fabrication et la caractérisation des matrices de bolomètres supraconducteurs basse impédance à base de Niobium Silicium (NbSi) ont été réalisées. Ces développements seront détaillés dans le chapitre 2, dans la section 4 spécifique aux développements des plans focaux multichroïques. L'effort continue aujourd'hui pour qualifier et délivrer l'ensemble des matrices de détecteurs de QUBIC dans les temps et avec les sensibilités requises.

3.1.2.3 Déploiement En 2020, les échanges dans le cadre de projets de l'[Institut national de physique nucléaire et de physique des particules \(IN2P3\)](#) entre le [Grand Accélérateur National d'Ions Lourds \(GANIL\)](#) et le laboratoire [AstroParticules et Cosmologie \(APC\)](#) m'ont permis d'avoir l'accord pour une implication dans le projet QUBIC et d'autres projets liés (NGCryo). La pandémie n'a pas permis ma participation à la dernière campagne de tests avant envoi sur le site d'observation en Argentine. Cependant, il reste beaucoup à faire dans le cadre de la première campagne d'ingénierie, après réception et intégration sur site.

3.2 PolarBear

3.2.1 Présentation de l'instrument

3.2.1.1 Historique L'instrument PolarBear est né dans le groupe de Cosmologie expérimentale de l'université de Berkeley sous l'impulsion de Paul Richards, Adrien Lee et William Holzappel. Il est aussi le fruit des développements qui ont vu émerger la technologie de détecteurs bolométriques supraconducteurs que l'on connaît aujourd'hui pour la cosmologie. Proposé en 2005, il porte aussi dans son architecture, la philosophie de la recherche dans le groupe qui est fondé sur la formation de la prochaine génération de chercheurs expérimentaux. Le cryostat de l'instrument de PolarBear a ainsi été entièrement conçu par Zigmund Kermish [[Ker12](#)], les antennes à fentes planaires supraconductrices sensibles à la polarisations par Mike Myers [[Mye10](#)], Les bolomètres supraconducteurs et la matrice de détection par Kam Arnold [[Arn10](#)], les micro-lentilles par Erin Queely [[Que12b](#)], le pipeline d'acquisition et de pré-analyse par Bryan Steinback [[Ste14](#)]. Tous étaient doctorants au moment de mon arrivée dans le groupe en 2010. Le télescope [Huan Tran Telescope \(HTT\)](#) porte, lui, l'emprunte de Huan Tran qui l'a conçu. Il a laissé la vie pendant son installation à Cedar Flat (White Mountain - CA). Pr. Adrian T Lee, PI du projet, est lui le véritable architecte de l'instrument, de son développement, de son financement public et privé et de sa stratégie de déploiement.

3.2.1.2 Architecture PolarBear est un imageur à architecture intelligente. En effet, il se base sur de nombreuses astuces pour la mitigation des effets systématiques instrumentaux. Faisons comme précédemment et suivons des photons arrivant sur l'instrument. Ces photons rencontrent dans l'ordre :

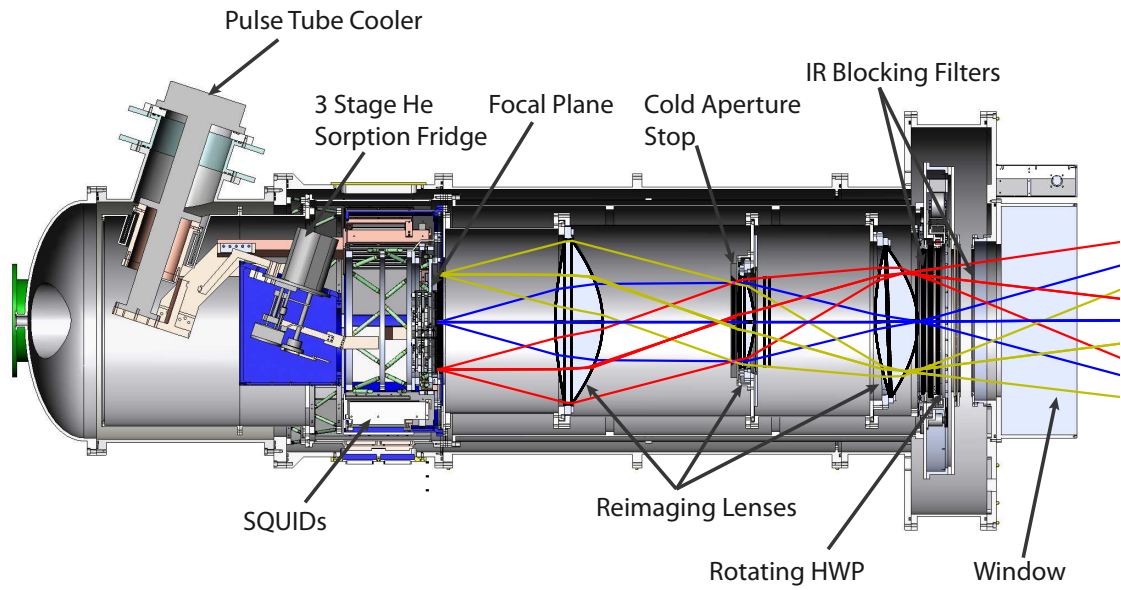


Figure 1.12 – Cryostat de PolarBear avec les différents éléments optiques.

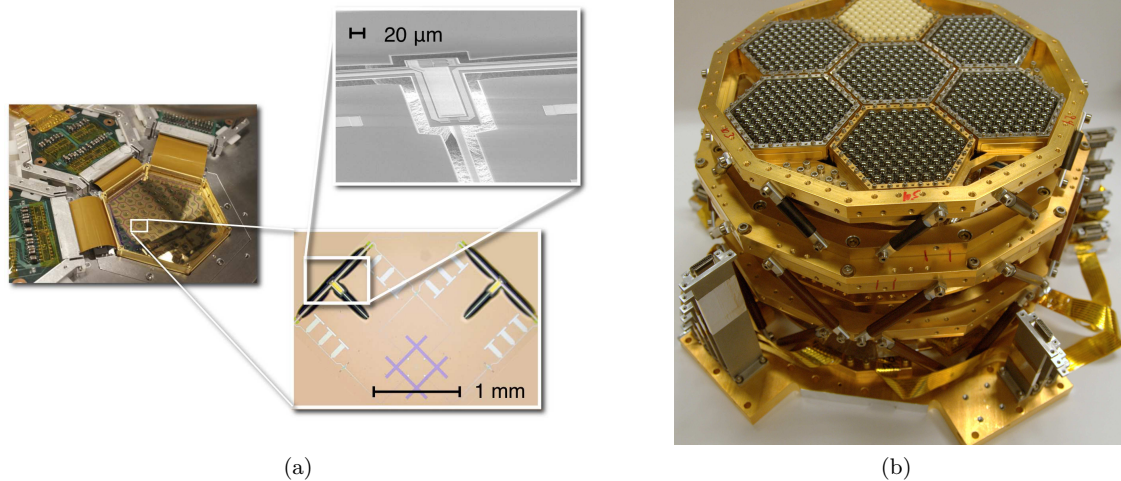


Figure 1.13 – (a) Photo d’une matrice de détecteur monolithique partiellement assemblée avec un agrandissement sur un pixel unitaire sensible à la polarisation et un deuxième agrandissement au microscope électronique à balayage montrant la structure du thermostat du bolomètre supraconducteur. (b) Plan focal entièrement assemblé montrant l’ensemble des matrices de détecteurs avec leurs micro-lentilles.

1. Le télescope [HTT](#) (voir figure 1.11) : Il s'agit d'un télescope Grégorien hors axe classique satisfaisant la condition de Mizuguchi-Dragone. Le miroir primaire a un diamètre projeté de 2.5 m qui permet de sonder des échelles angulaires allant jusqu'à $l \sim 2500$ et couvrant le spectre des modes B de lentillage gravitationnel à $l \sim 1000$. Sa surface en aluminium a une précision de 53 μm et son usinage monobloc permet de réduire les effets de diffraction et de diffusion introduits par les miroirs segmentés. La surface du miroir secondaire est, elle, usinée avec une précision de 37 μm . Le télescope a été construit par la société [VertexRSI](#).
2. Après la fenêtre optique du cryostat (Zootfoam) et différents filtres infra-rouges faits de grilles à fréquences sélectives, une lame demi-onde rotative ([HWP](#)) en saphire, refroidie à 70 K, vient moduler la polarisation linéaire des photons incidents.
3. Après cela, trois lentilles quasi-optiques, traitées avec un revêtement anti-réfléctif en [Polytétrafluoroéthylène \(PTFE\)](#) poreux, permettent de focaliser le faisceau vers le plan focal. L'ensemble des éléments quasi-optiques est maintenu entre 4 K et 6 K.
4. Les photons arrivent ensuite sur des micro-lentilles en Silicium qui re-concentrent le rayonnement vers des antennes à fentes sensibles à la polarisation. L'information est ensuite acheminée en technologie micro-ruban vers un filtrage planaire pour la définition précise de la bande spectrale d'observation. Enfin, le rayonnement issu de chacune des deux polarisations est dissipé sur un absorbeur en or. Le thermomètre, fait par un empilement bi-couche d'Aluminium et de Titane, mesure alors l'augmentation de la température par la variation de sa résistance. Le thermomètre est suspendu sur un îlot de Nitrure de Niobium de 0.7 μm . En tout, 7 matrices de détecteurs sont utilisées pour remplir le plan focal, amenant le nombre total de détecteurs à 1274 pour 637 pixels sensibles à la polarisation. Une photo de l'ensemble du plan focal et des pixels unitaires est visible sur la figure 1.13.

3.2.1.3 Site d'observation PolarBear observe le ciel à partir du télescope [HTT](#) sur le site de l'observatoire James Ax. Ce dernier se situe à Cerro Toco, dans le désert de l'Atacama, à 5200 m d'altitude, à une latitude de 22,958°S et une longitude de 67,786°W. Ce site est avantageux à bien des aspects. Il présente d'abord une faible épaisseur de vapeur d'eau dans l'atmosphère, premier contributeur des fluctuations rapides de l'atmosphère et de l'émission atmosphérique totale. Le site offre aussi l'avantage d'être à proximité de plusieurs autres expériences d'observation comme [APEX](#)²⁷ et [ACT](#)²⁸. Même si [ACT](#) est une expérience concurrente, il s'est créé une cohérence entre les deux équipes pour résoudre des problèmes techniques, scientifiques, de sécurité ou simplement co-voiturer à partir du camp de base. Quand à [APEX](#), ses mesures d'épaisseur de vapeur d'eau ont permis de programmer et d'organiser les créneaux d'observation en fonction des prédictions météorologiques sur site. Il a aussi permis des vérifications de la calibration de l'instrument. Le site de James Ax est situé sur un territoire géré par le gouvernement chilien. Ce dernier a permis de grandement améliorer l'accessibilité du site. Cependant, par temps neigeux, il nous a, à plusieurs reprises, été impossible d'emprunter le chemin habituel, abrupt et quelque peu dangereux. Fort heureusement, un autre voisin de taille, le réseau de télescopes [ALMA](#)²⁹, nous a permis d'emprunter l'autre route, confortablement aménagée pour le transport des grands télescopes de l'interféromètre d'[ALMA](#) et maintenue par l'[ESO](#)³⁰. Le camp de base et le lieu de transfert de données est lui situé dans le village de San Pedro De Atacama, quelques 2500 m plus bas que le site d'observation.

3.2.2 Rôles et implication

3.2.2.1 Campagnes de tests et d'ingénierie Il s'agit ici de ma première contribution à l'instrument PolarBear à mon arrivée à l'université de Berkeley. Après une campagne d'intégration et de tests couronnés de succès en laboratoire, une version réduite de PolarBear a été déployée sur le site de Cedar Flat, à l'est de la chaîne montagneuse de la Sierra Nevada en Californie au printemps/été 2010. Le déploiement a été entièrement financé par l'observatoire CARMA qui a aussi fourni un support technique et logistique précieux pour une équipe qui n'avait, à l'époque, que peu d'expérience dans les télescopes d'observation. Le plan focal consistait en 3 matrices de détecteurs des 7 prévues pour le déploiement scientifique au Chili. Le processus de fabrication des détecteurs n'était pas assez avancé à cette époque et les matrices montraient un [yield](#)³¹ assez faible (1/3 à 2/3). L'objectif de ce déploiement auquel j'ai participé était de :

- Vérifier les performances de pointage du télescope en observant des sources ponctuelles comme des planètes de manière couplée avec une caméra optique (star caméra) fixée sur le télescope.
- Valider les performances des détecteurs et de l'optique froide en terme de sensibilité et de bruit instrumental.

27. [Atacama Pathfinder EXperiment \(APEX\)](#)

28. [Atacama Cosmology Telescope \(ACT\)](#)

29. [Atacama Large Millimeter/submillimeter Array \(ALMA\)](#)

30. [European Organisation for Astronomical Research in the Southern Hemisphere \(ESO\)](#)

31. pourcentage de détecteurs non endommagés, pouvant être lus et montrant des propriétés conformes aux spécifications.

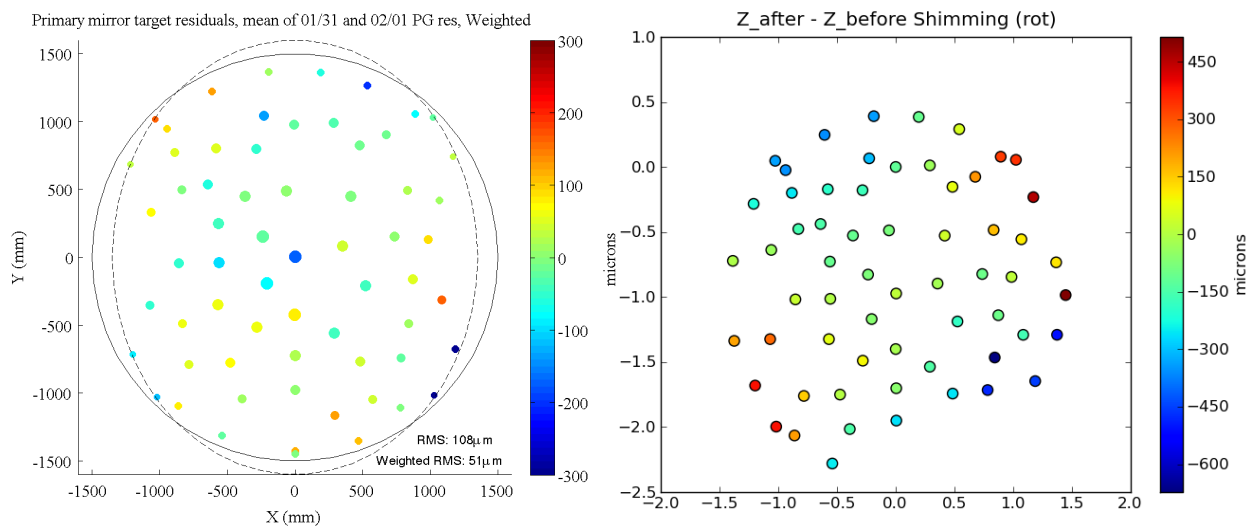


Figure 1.14 – A droite : Différence entre les profondeurs des points mesurées par photogrammétrie avant et après correction du stress de la surface du miroir primaire. A gauche : Différence entre la surface théorique et la surface réelle du miroir primaire mesurée par photogrammétrie. Chaque point représente une cible réfléchive collée sur la surface.

Ainsi, des observations de Mars et de Jupiter ont elles permis de caractériser les lobes optiques de l'instrument. L'observation qui s'est avérée la plus intéressante était cependant celle de TauA (Nébuluse du Crabe). Cette dernière a été faite avec des positions différentes de la lame demi-onde (qui n'était à l'époque pas encore continue). Ceci a permis de reconstituer les cartes polarisées I, Q et U de TauA. Cette étape d'ingénierie a permis de comprendre plusieurs problématiques :

- La contribution de l'optique à la puissance thermique totale mesurée par les détecteurs était trop importante. Plus tard, les lentilles seront refroidies à plus basse température.
- Les détecteurs ont montré des performances en deçà de ce qui était attendu. Cette limitation était due au décalage des bandes spectrales des filtres planaires qui définissent les fréquences d'observation et donc une contribution trop importante de l'atmosphère. Ce décalage est un résultat de la variation de la vitesse d'onde dans la structure micro-ruban à cause de la méconnaissance (à un niveau suffisant) des propriétés du Niobium et des diélectriques utilisés. En effet, l'impédance caractéristique de ces composants est très dépendante des processus de fabrication et des variabilités importantes dues à des recettes de fabrication légèrement différentes, des supports Silicium différents ou encore des non uniformités d'épaisseurs des structures minces. Cette problématique a motivé mes travaux sur la compréhension des propriétés des composants supraconducteurs et diélectriques à l'université de Berkeley. La problématique concernant les détecteurs motivera ma participation à la fiabilisation des processus de fabrication de manière très couplées avec les développements des matrices multi-chroïques de [PolarBear II](#) et de [LiteBird](#)³².

3.2.2.2 Fabrication des matrices de détecteurs Après la campagne d'ingénierie de Cedar Flat, j'ai participé à la fabrication des matrices de détecteurs de PolarBear avec l'ensemble des étudiants, ingénieurs et chercheurs. Cette partie a eu lieu au Marvell NanoLab de l'université de Berkeley. En préparation du déploiement scientifique et pour tenir les délais de la chaîne fabrication, tests, validation et intégration, il a été nécessaire de s'organiser en équipes se relayant et travaillant de jour comme de nuit pour faire face à la forte affluence et réservations en journée pour les machines d'intérêt. Le point critique ici a été la capacité à mettre en commun les connaissances que nous avions sur des processus et des machines spécifiques tout en continuant à améliorer certaines recettes de dépôt ou de structuration de couches minces. Comme souvent, il y avait une forte dépendance des machines utilisées. La machine la plus critique (qui permettait de déposer le Niobium ayant les bonnes caractéristiques puis de le protéger) a par exemple été acquise par mécénat et dédiée uniquement au projet. Les détails des processus de fabrication sont détaillés dans le chapitre 2.

3.2.2.3 Campagnes d'observation et 1ère lumière En 2012, a eu lieu le déploiement scientifique de l'instrument PolarBear sur son site final d'observation (voir 3.2.1.3). Les modifications nécessaires avaient alors été effectuées et le plan focal était entièrement peuplé des 7 matrices de détecteurs avec des yields supérieurs à 90%. En

32. [Light satellite for the studies of B-mode polarization and Inflation from cosmic background Radiation Detection \(LiteBird\)](#)

novembre 2011, la majorité de l'infrastructure était prête, le télescope installé et le cryostat envoyé sur site. Après réception, du cryostat, les 7 matrices de détecteurs ont été montées sur le plan focal. Il s'en est suivi une campagne de réglages, d'étalonnage et de caractérisation de l'instrument en préparation de la phase d'observation. Une organisation sans faille était nécessaire pour l'aboutissement de l'installation de l'instrument. Nous étions plusieurs équipes en rotation entre différentes localisations (Japon, Etats-Unis, Europe, Chili) et avec des responsabilités diverses. J'ai fait partie de l'équipe qui a observé la première lumière du ciel pendant la première semaine de janvier 2012. Comme chaque membre de l'équipe, mes responsabilités étaient diverses :

- **Gestion d'équipe** répartition des rôles et reporting à l'ensemble de la collaboration à la suite des réunions quotidiennes hebdomadaires (rotation hebdomadaire de chef d'équipe).
- **Oxygénation des locaux** Le site était situé à plus de 5000 m d'altitude et le temps de trajet entre le camp de base et le site ne permettait pas une réelle acclimatation. Nous travaillions donc (pour les tâches physiques) en surveillant notre taux d'oxygène et avec un apport en oxygène par personne. Pour le travail d'intérieur, nous travaillions dans des conteneurs aménagés. A un certain moment, le besoin de pressuriser en oxygène les conteneurs s'est faite sentir. Je me suis chargé de cette partie.
- **Sécurité** La haute altitude et l'isolement du site comportait d'autres risques qu'il fallait gérer au mieux pour éviter tout accident. En cas d'accident ou malaise, nous ne disposions que de peu de temps avant que les dégâts sur le cerveau soient irréversibles. Je me suis chargé de la sécurité du site, de l'instauration des actions et réflexes de sécurité avec Masashi Hazumi (co-PI de PolarBear).
- **Surface des miroirs** La caractérisation des lobes du télescope en utilisant les planètes a montré des déformations des miroirs primaires et secondaires (beaucoup plus importantes pour le miroir primaire), empêchant d'obtenir les performances d'observation. Je me suis occupé, avec Bryan Steinbach, de la caractérisation tri-dimensionnelle des miroirs et de la correction de la déformation en appliquant un stress proportionné via des écrous prévus à cet effet sur la structure de support arrière des miroirs. La caractérisation s'est faite par photogrammétrie. Nous collions des carrés d'adhésif réfléchissants à des emplacements spécifiques. Nous utilisons ensuite un appareil photo réflex numérique de haute résolution avec flash et vitesse d'obturation maximale pour prendre des photos à une distance focale fixe permettant de remplir l'ensemble du champ de vue. Ces photos étaient prises à différents angles et de différentes élévations en utilisant une nacelle. La reconstitution des photos (spectre vert uniquement pour éviter la diffraction et augmenter le contraste) a permis de caractériser la surface des miroirs avec une précision de 30 μm permettant ainsi de mieux corriger les déformations (voir figure 1.14).
- **Correction de pointage** Mon autre contribution à PolarBear a été la correction d'inclinaison du télescope. La reconstitution de la position d'un pixel sur le ciel dépend du modèle de pointage du télescope. Celui-ci peut être idéalement décrit par un modèle combinant des mouvements de rotation d'élévation et d'azimut. Ainsi, l'action du télescope sur le champ de vue peut être décrite simplement par :

$$\hat{v}_f = R_z(az)R_y(el)\hat{v}_I \quad (1.48)$$

Dans la réalité, plusieurs effets introduisent des couplages géométriques. D'après la convention du [James Clerk Maxwell Telescope \(JCMT\)](#), il est possible de définir 7 paramètres de correction d'élévation et d'azimut suivant l'équation suivante :

$$\begin{aligned} az' &= az - \alpha \sin(az) \sin(el) - \beta \cos(az) \sin(el) + \gamma \sin(el) - \kappa + \zeta_1 \cos(el) \\ el' &= el + \alpha \cos(az) - \beta \sin(az) - \zeta_2 + \eta \cos(el) \end{aligned} \quad (1.49)$$

Où α , β , γ et κ représentent différents effets de l'inclinaison des axes d'azimut et d'élévation dans différentes directions, ζ_1 et ζ_2 représentent l'offset de l'encodeur à mouvement nul (origine) et η la flexure. Il est donc nécessaire de corriger, sinon de connaître tous ces effets. Le télescope [HTT](#) est équipé d'une mesure d'inclinaison (tiltmeter) Applied Geomechanics D711-2A installée en dessous de l'engrenage de contrôle d'azimut. Pour chaque pas de rotation du télescope, le D711-2A délivre une mesure de tension pouvant directement être convertie en angle à raison de 0,005 arcminutes/volt. Nous obtenons donc des mesures de positions d'inclinaisons suivant deux axes perpendiculaires x et y en fonction de l'azimut (ou de l'élévation) que nous venons faire correspondre au modèle :

$$\begin{aligned} x(az) &= \beta \cos(az) + \alpha \sin(az) + x_0 \\ y(az) &= \beta \sin(az) + \alpha \cos(az) + y_0 \end{aligned} \quad (1.50)$$

afin d'obtenir les paramètres de correction d'inclinaison α et β . Le télescope repose sur une base à trois piliers réglables orientés ouest, sud et nord est. Après chaque série de scans du télescope, nous effectuons une correction manuelle d'inclinaison sur un ou plusieurs piliers. La figure 1.15 montre le résultat de la correction d'inclinaison. La correction du pointage s'est ensuite poursuivie grâce à l'observation de sources compactes dont la brillance est supérieure à 3 Jansky.

- **Etalonnage** Les efforts se sont poursuivis pour la caractérisation de l'instrument à travers la mesure précise des lobes du télescope et l'étalonnage (gain relatif des bolomètres, polarisation). L'étalonnage est une

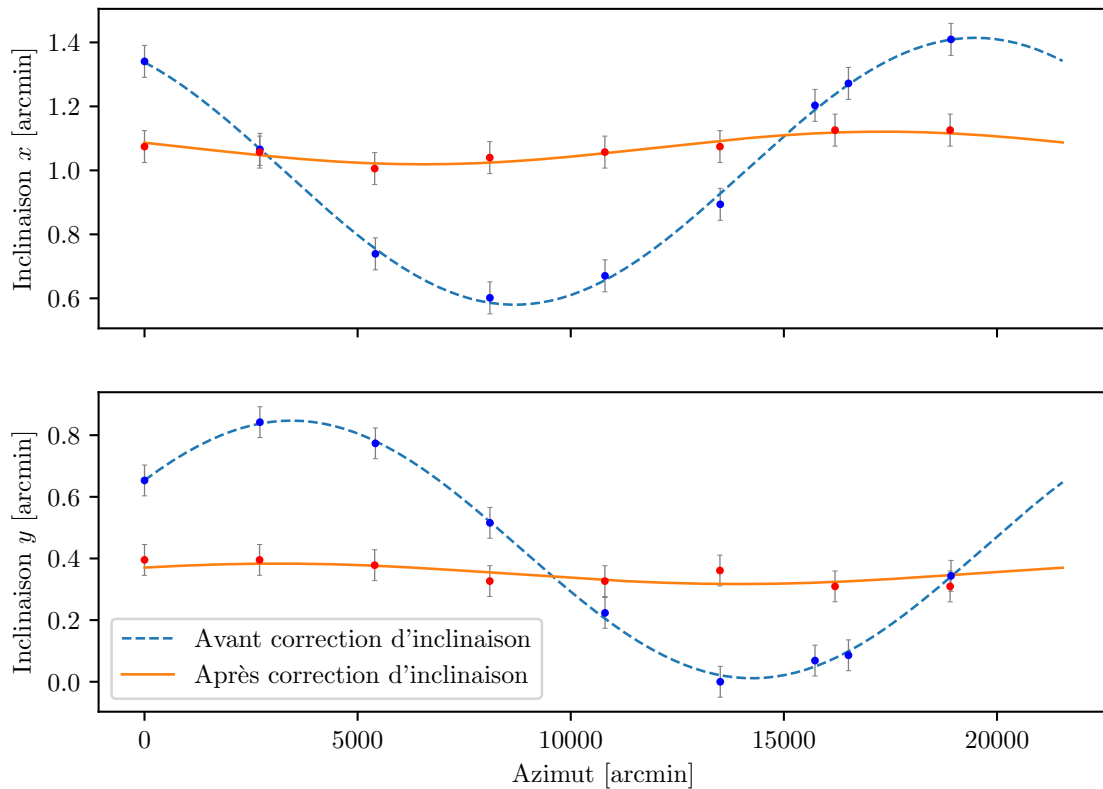


Figure 1.15 – Mesures d'inclinaison à l'aide de l'inclinomètre D711-2A avant et après correction de la base du télescope.

entreprise complexe qui prend beaucoup de temps et qui nécessite beaucoup de soin. J'ai participé à la phase d'étalonnage qui utilisait une diode Shottky en champ lointain. La procédure, dans son ensemble, incluait l'utilisation d'un spectromètre à transformée de Fourier embarqué, une source thermique, les planètes et la nébuleuse du crabe (Tau A). Tau A était utilisé plusieurs fois par semaine pour l'étalonnage de l'angle de polarisation des pixels.

PolarBear observe le ciel depuis maintenant plusieurs années. Il a ouvert la voie à la fabrication de masse de grandes matrices de détecteurs adaptées à l'observation du CMB. En 2014, le même cryostat allait bientôt être utilisé pour la seconde génération de matrices de détecteurs incluant des pixels multichroïques pour mieux soustraire les avant-plans. Déjà à l'époque, à l'avènement de la première lumière, nous obtenions un premier million de dollars pour un second télescope. HTT allait devenir le [Simons Observatory \(SO\)](#) [Zhu+21]. Les données d'observation de PolarBear entre 2014 et 2016 viennent compléter notre patrimoine de connaissance des spectres C_l^{BB} et C_l^{EE} (voir figure 1.16) permettant par la même occasion de mieux contraindre les modèles inflationnaires, la masse des neutrinos ou encore l'abondance de l'hélium primordial.

3.3 Autres projets

3.3.1 PolarBear 2

De ce qui a précédé, il apparaît clairement maintenant que concevoir et déployer un instrument dédié à la mesure de la polarisation du fond diffus cosmologique est une entreprise complexe qui doit prendre en compte de multiples éléments. Outre l'apport scientifique important, PolarBear est une école qui permet d'apprendre et d'évoluer. Il était déjà clair que la mesure du fond diffus cosmologique dans plusieurs bandes spectrales était vital pour pouvoir soustraire les avant-plans. Il est aussi évident que le seul moyen d'augmenter le rapport signal sur bruit lorsqu'on utilise des détecteurs limités par la statistique des photons est d'augmenter cette même statistique, c'est à dire augmenter le nombre de détecteurs. Ceci nous place indubitablement dans les développements des plans focaux multi-chroïques intégrés. Pendant mon postdoctorat, j'ai travaillé avec Aritoki Suzuki sur ces aspects de plans focaux multi-chroïques utilisant des antennes sinus log-périodiques ultra large-bandes et des filtres sélectifs inspirés de la Cochlée humaine. Il s'agit ici de l'évolution qui remplace aujourd'hui le plan focal de PolarBear I et qu'on appelle PolarBear 2-a. La partie technique concernant ce plan focal sera décrite en chapitre 2.

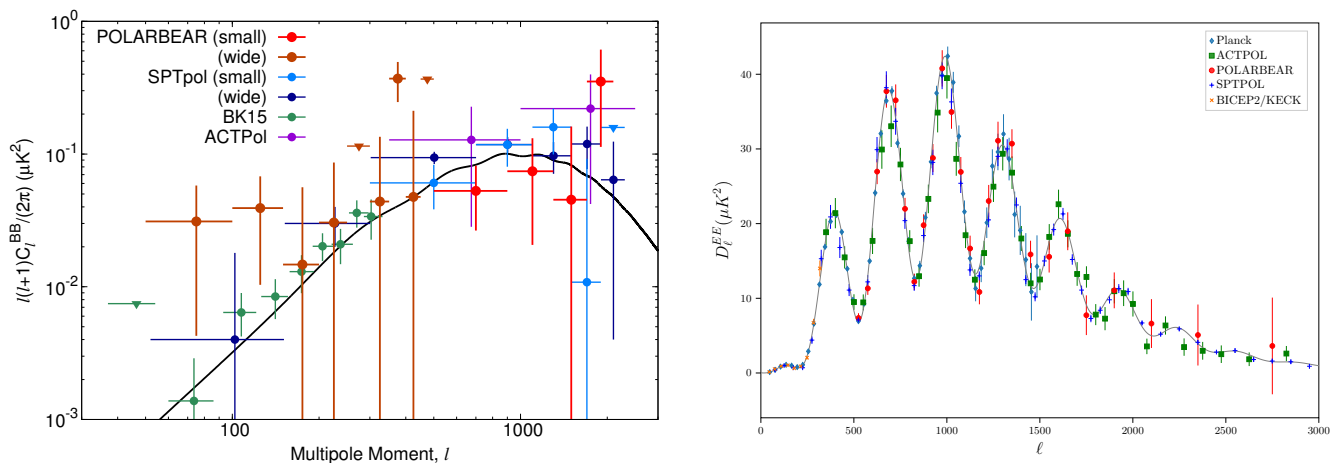


Figure 1.16 – A gauche : spectre de puissance C_l^{BB} des modes B de polarisation du fond diffus cosmologique de différentes expériences incluant PolarBear selon [Chi+20]. La courbe noire représente le spectre théorique selon le modèle Λ CDM. A droite : Spectre de puissance C_l^{EE} des modes E de polarisation du fond diffus cosmologique issu de plusieurs expériences incluant PolarBear selon [Ada+20].

3.4 Les instruments spatiaux

Nous savons qu'une mesure précise, non limitée par la variance cosmique et non limitée par l'absorption atmosphérique ne peut se faire que depuis l'espace. La communauté scientifique en avait bien conscience. En est témoin la succession des satellites et expériences spatiales dédiées au CMB (COBE, WMAP, PLANCK). Mais convaincre et préparer une mission spatiale n'est pas chose aisée, surtout si une première détection sol n'a pas encore eu lieu. Avant même le lancement du satellite Planck, les développements pour la prochaine génération d'instruments spatiaux dédiés au CMB étaient en cours. Mes travaux s'étaient, pendant ma thèse, directement inscrits dans ce contexte. Malheureusement, jusqu'en 2019, les différentes propositions d'instruments spatiaux n'étaient pas jugées prioritaires. A Berkeley, la préparation pour défendre une éventuelle mission spatiale portée par la NASA était continue mais toujours non prioritaire. De plus, certains financements des développements par la DOE³³ mettaient une concurrence directe avec des projets de physique des particules dont les budgets sont souvent à une toute autre échelle.

3.4.0.1 LiteBird [2008-2014] Du côté de PolarBear, il y avait une contribution nipponne importante. Dès 2008, la collaboration avait commencé à réfléchir à une proposition de mission spatiale à la JAXA³⁴. En 2010, j'ai rejoint ce premier groupe réduit qui avait pour but de proposer une mission spatiale (initialement de taille S ou M), aux objectifs scientifiques exclusivement centrés sur les modes B de polarisation du fond diffus cosmologique [Mat+14 ; Haz+12]. J'ai ainsi fait partie de deux groupes de travail. Le premier s'occupait de la stratégie de pointage et le contrôle d'attitude. Le deuxième s'occupait du plan focal, directement inspiré de celui PolarBear 2. En 2012, l'instrument proposé devait pouvoir cartographier le ciel sur trois bandes de fréquences allant de 50 à 320 GHz. Il utilisait en outre 2022 pixels et un télescope compact de type Crossed Dragone. La sélection des bandes de fréquences permettait d'éviter les raies de CO [Pap+00] qui dominent les émissions atomiques et moléculaires des avant-plans. Les limites dues aux bandes de fréquences et à la résolution angulaire, assez réduite, ne permettaient pas de pousser plus loin les objectifs scientifiques. Le travail continu de la collaboration LiteBird initiale augmentée d'une plus grande participation américaine et européenne (principalement les personnes impliquées dans Planck HFI) a modelé la proposition de départ. Celle-ci a notamment bénéficié des efforts qui ont construit les précédentes propositions d'instruments spatiaux pour la NASA³⁵ (PIXIE, PICO) et l'ESA³⁶ (Core+, PRISM³⁷). Après avoir passé plusieurs phases d'études et de pré-sélection, LiteBird a enfin été sélectionné par la JAXA en mai 2019 en tant que mission de classe L (large) [Haz+20]. Les objectifs scientifiques restent inchangés et visent principalement les modes B de polarisation du fond diffus cosmologique. En revanche, l'instrument devrait maintenant être armé de 4339 détecteurs supraconducteurs refroidis à 100 mK, observant le ciel à partir du point de Lagrange L2 sur 15 bandes de fréquences entre 34 et 448 GHz et à l'aide de trois télescopes : le Low Frequency Telescope (LFT) entre 34 et 161 GHz, le Medium Frequency Telescope (MFT) entre 89 et 225 GHz et enfin le High Frequency Telescope (HFT) entre 166 et 448 GHz. La stratégie d'étalonnage a également évolué et s'appuie maintenant à la fois sur la

33. Department Of Energy (DOE)

34. Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)

35. National Aeronautics and Space Administration (NASA)

36. European Space Agency (ESA)

37. Polarized Radiation Imaging and Spectroscopy Mission (PRISM)

stratégie d'observation (satellite spinné) et sur l'utilisation d'une lame demi-onde rotative pour chaque télescope. Notons que, vu les contraintes d'observation, une dépendance très forte de la caractérisation sol de l'instrument reste d'actualité. En résumé, LiteBird devrait pouvoir observer le ciel à partir de la fin des années 2020 et permettre une détection des ondes gravitationnelles primordiales si le rapport tenseur sur scalaire est contraint par $0.003^{38} \leq r < 0.044^{39}$. Dans le cas contraire, il sera possible d'écarter toute une famille de modèles inflationnaires, notamment ceux pour lesquels $r > 0.01$ [KK16].

Fréquences [GHz]	NEP ^a [$10^{-18} W/\sqrt{Hz}$]	τ^b requis [ms]	Technologie du plan focal			
			Technologie des détecteurs		Couplage optique	
			Baseline	Backup	Baseline	Backup
30-75	3.3 – 5.7	2.96 – 1.18	TES ^c	HEMT ^d	MPA ^e /CSA ^f	HA ^g
90-320	4.6 – 7	1.18 – 0.4	TES	KID ^h	HA+POMT ⁱ	MPA
395-660	0.94 – 3.1	0.4 – 0.13	TES	KID	MPA/CSA	LHA
800-6000	0.011 – 0.63	0.13 – 0.01	KID	HEB/CEB	MPA/CSA	LHA

a. [Noise Equivalent Power \(NEP\)](#) : Bruit équivalent en puissance

b. Constante de temps

c. [Transition Edge Sensor](#) : bolomètres supraconducteurs

d. [High Electron Mobility Transistors](#)

e. [Multichroic Planar Antenna](#) : antennes planaires multi-chroïques

f. [Crossed Slot Antenna](#) : antennes à fentes sensibles à la polarisation

g. [Horn Array](#) : Matrice de cornets

h. [Kinetic Inductance Detectors](#) : détecteurs à inductance cinétique

i. [Planar Ortho-Mode Transducer](#) : diplexeurs de polarisation planaires

Table 1.2 – Bruit équivalent en puissance (NEP) et constante de temps requis pour les détecteurs de PRISM en fonction de la fréquence et de la technologie des détecteurs.

3.4.0.2 de Core+ à PRISM De SAMPAN à Core+ en passant BPOL, les propositions pour des missions spatiales post-Planck visant les modes B de polarisation du CMB se sont succédées. Si elles n'ont pas été retenues, elles ont néanmoins permis de murir la réflexion jusqu'à aboutir en 2014 à une des propositions les plus ambitieuses jamais proposées pour le CMB, le satellite PRISM [And+14]. Balayant les précédentes critiques arguant les objectifs scientifiques trop restreints et la dépendance trop importante à la stratégie d'étalonnage au sol, PRISM proposait de faire différemment. Les objectifs scientifiques avaient, cette fois-ci, été étendus aux distorsions spectrales du CMB, le fond diffus infra-rouge, la structure du milieu interstellaire, l'étude de la poussière interstellaire, l'étude du champ magnétique galactique et la formation des étoiles entre autres objectifs. Ceci aurait été rendu possible grâce à une couverture spectrale étendue et la présence de deux instruments (un polarimètre et un spectrophotomètre). Ce satellite aurait utilisé une modulation de polarisation basée sur la stratégie de pointage proposée précédemment pour SAMPAN et EPIC. Quand à l'étalonnage, il aurait été basé sur un satellite auxiliaire et sur des mesures conjointes, relatives avec le polarimètre et absolues avec le spectrophotomètre. J'ai fait partie du groupe d'étude et de définition de l'instrument. Je me suis intéressé en particulier aux géométries d'implantation d'un plan focal monolithique multi-chroïque (multispectral) et à la revue et la classification des technologies de détection pouvant constituer la ligne de base du choix du plan focal en concordance avec le niveau de maturité et les objectifs scientifiques (voir tableau 1.2).

38. voir [Lin17]

39. dernière contrainte sur r à partir des résultats de Planck [Tri+21]

4 Publication choisie

J Low Temp Phys (2014) 176:698–704
DOI 10.1007/s10909-013-1024-1

Latest Progress on the QUBIC Instrument

A. Ghribi · J. Aumont · E. S. Battistelli · A. Bau · B. Bélier · L. Bergé · J.-Ph. Bernard · M. Bersanelli · M.-A. Bigot-Sazy · G. Bordier · E. T. Bunn · F. Cavaliere · P. Chanial · A. Coppolecchia · T. Decourcelle · P. De Bernardis · M. De Petris · A.-A. Drilien · L. Dumoulin · M. C. Falvella · A. Gault · M. Gervasi · M. Giard · M. Gradziel · L. Grandsire · D. Gayer · J.-Ch. Hamilton · V. Haynes · Y. Giraud-Héraud · N. Holtzer · J. Kaplan · A. Korotkov · J. Lande · A. Lowitz · B. Maffei · S. Marnieros · J. Martino · S. Masi · A. Mennella · L. Montier · A. Murphy · M. W. Ng · E. Olivieri · F. Pajot · A. Passerini · F. Piacentini · M. Piat · L. Piccirillo · G. Pisano · D. Prêle · D. Rambaud · O. Rigaut · C. Rosset · M. Salatino · A. Schillaci · S. Scully · C. O'Sullivan · A. Tartari · P. Timbie · G. Tucker · L. Vibert · F. Voisin · B. Watson · M. Zannoni

Received: 23 July 2013 / Accepted: 9 December 2013 / Published online: 31 December 2013
© Springer Science+Business Media New York 2013

Abstract QUBIC is a unique instrument that crosses the barriers between classical imaging architectures and interferometry taking advantage from both high sensitivity and systematics mitigation. The scientific target is to detect primordial gravitational waves created by inflation by the polarization they imprint on the cosmic microwave background—the holy grail of modern cosmology. In this paper, we show the latest advances in the development of the architecture and the sub-systems of the first module of this instrument to be deployed at Dome Charlie Concordia base—Antarctica in 2015.

Keywords Cosmology · CMB · B-modes · Polarization · Transition edge sensors · Bolometric interferometry

A. Ghribi (✉) · M.-A. Bigot-Sazy · G. Bordier · P. Chanial · T. Decourcelle · L. Grandsire · J.-Ch. Hamilton · Y. Giraud-Héraud · J. Kaplan · M. Piat · D. Prêle · C. Rosset · A. Tartari · F. Voisin
AstroParticule et Cosmologie, Univ. Paris 7, CNRS, Paris, France
e-mail: ghribi@in2p3.fr

J. Aumont · J. Martino · F. Pajot · L. Vibert
Institut d'Astrophysique Spatiale, Paris, France

E. S. Battistelli · A. Coppolecchia · P. De Bernardis · M. De Petris · S. Masi · F. Piacentini · M. Salatino · A. Schillaci
Università di Roma La Sapienza, Rome, Italy

A. Bau · M. Gervasi · A. Passerini · M. Zannoni
Università di Milano Bicocca, Milan, Italy

 Springer

1 Introduction

The cosmic microwave background (CMB) has been heavily observed and studied in the last decades. From this keen interest emerged a number of experiments, backed by important R&D efforts, that put tight constraints in favour of inflationary cosmology models. One last prediction, the presence of primordial gravitational waves resulting in tensor mode perturbations in the metric, is still undetected. These space-time fluctuations would have left a faint but indelible trace on the polarization of the CMB photons [1]. Today, thanks to the development of large arrays of photon noise limited detectors, this detection seems to be within reach. One last barrier could prevent us from detecting it: uncontrolled systematic effects. In the landscape of imaging instruments, usually suffering from uncontrolled time varying systematics (e.g. atmospheric contamination), one outsider architecture was proposed in the early 2000: bolometric interferometry [6,7]. This new architecture is now making its way through theoretical and technological developments: bolometric interferometry [8,9]. It uses background limited incoherent detectors but takes advantage of baseline redundancy to make interferometry a viable option without significant sensitivity loss [2] thanks to a special self-calibration technique [10]. In this type of architecture, equivalent baselines are coherently summed on every detector avoiding the need for expensive,

B. Bélier
Institut d'Electronique Fondamentale, Paris, France

L. Bergé · A.-A. Drilien · L. Dumoulin · N. Holtzer · S. Marnieros · E. Olivieri · O. Rigaut
Centre de Spectrométrie Nucléaire et de Spectrométrie de Masse, Paris, France

J.-Ph. Bernard · M. Giard · J. Lande · L. Montier · D. Rambaud
Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie, Toulouse, France

M. Bersanelli · F. Cavaliere · A. Mennella
Università degli studi Milano, Milan, Italy

E. T. Bunn
University of Richmond, Richmond, VA, USA

M. C. Falvella
Italian Space Agency, Rome, France

A. Gault · A. Lowitz · P. Timbie
University of Wisconsin, Madison, WI, USA

M. Gradziel · D. Gayer · A. Murphy · S. Scully · C. O'Sullivan
NUI Maynooth, Kildare, Ireland

V. Haynes · B. Maffei · M. W. Ng · L. Piccirillo · G. Pisano · B. Watson
University of Manchester, Manchester, UK

A. Korotkov · G. Tucker
Brown University, Providence, RI, USA

complex and noisy correlators, mixers and amplifiers. QUBIC (Q and U Bolometric Interferometer for Cosmology) is today the only instrument based on bolometric interferometry.

In this paper, we report the latest advances on the development of the 1st module of the QUBIC instrument. After introducing the QUBIC instrument, we will review progress on each of its subsystems.

2 The QUBIC Instrument

QUBIC will ultimately be composed of six single-frequency modules, operating at 97, 150 and 220 GHz with 25 % bandwidth. Each module will respectively comprise 144, 400 and 625 horns. The first module will be centered around 150 GHz as the base CMB channel, taking advantage of recently released data (Planck HFI) for foreground removal and a unique self calibration strategy to mitigate instrumental systematic effects [10]. For that purpose, it will use electromagnetic switches sandwiched between the primary and the secondary horn arrays. The primary horns look at the sky through optical filters and a cold rotating half wave plate. The secondary horn array re-emits the signal to illuminate a beam combiner. The latter realizes the necessary path-dependent phase shift to allow coherent summation of equivalent baselines on the focal plane after polarization separation. The focal planes will be made of two arrays of 1,024 TES bolometers each cooled to a temperature of 0.3 K. Currently the subsystems are being fabricated and tested. First light at the observation site is scheduled for 2015. The expected sensitivity to the tensor to scalar ratio after one year of observation is 0.05 with one module and 0.008 with six modules [2]. The observation site will be at Dome Charlie Concordia Station in Antarctica, a site that has proven to be one of the best on earth for CMB observations [5]. Previous campaigns at Dome C have already allowed the characterization of the atmosphere as well as the improvement of the logistics [4,5].

3 First Module Instrument Subsystems

3.1 Cryogenics

The large size of the horn array, the optical combiner and the focal plane drives the overall dimensions of the cryostat (see Fig. 1). The cold volume is of the order of 1.3 m^3 , and a large (60 cm in diameter) window is required by the large optical throughput of the system. All-aluminum construction [3] is necessary to limit the weight of the system and the requirements on the mount. For operation in the harsh Dome-C environment, where supply of cryogenic liquids is difficult, we opted for a dry cryostat cooled by a Sumitomo pulse tube refrigerator, adapted for operation at low temperatures in Dome-C by means of suitable heaters [4]. The detector arrays are cooled to 0.3 K by a ^3He sorption cooler, while the cold optics are cooled below 4 K by a ^4He sorption cooler.

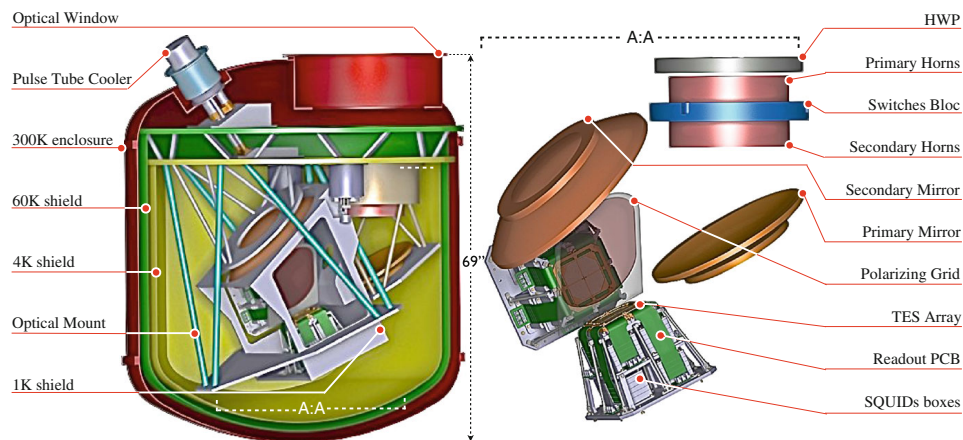


Fig. 1 *Left* cryostat sketch design. *Right* optical system, focal plane and readout blocks. (Colour figure online)

3.2 Optics

3.2.1 Filters and Half Wave Plate

Metal mesh interference filters reduce the radiative load on the cryogenics and detectors and, in combination with a section of waveguide between each back-to-back primary/secondary horn, define the spectral band. A Half Wave Plate (HWP) will be used at 4 K in order to mitigate systematic effects and decrease the $1/f$ noise. Measurements of the HWP are in good agreement with the modeled performance, with a differential phase error of a few degrees and cross-polarization at the $-35/-40$ dB level with a bandwidth of $\sim 30\%$ [12]. The rotating mechanism is a scaled-up version of the one developed for the PILOT experiment [11]. It will allow a stepped movement with a position control better than 0.1° .

3.2.2 Horn Array

The first module will have a close-packed array of 400 primary horn antennas backed by a similar array of secondary antennas, sandwiching an array of aperture shut-off switches.. These single-mode corrugated horn antennas operate around 150 GHz with a beam of 14° FWHM and have low cross-polar response. They will be made of a stack of aluminum platelets mounted with an accuracy better than $30 \mu\text{m}$. At 90 GHz this fabrication technique has proven to be very efficient and has produced horns with good agreement with simulations [13].

3.2.3 Switches

During calibration (but not sky observations), an array of 400 switches will be used as shutters, operated independently for each channel. They will be operated by mag-

netically shielded electromagnets, controlled and de-multiplexed by a cold ASIC¹. Measurement of the inductance of each coil will allow cross-verification of the state of the switches. These devices have been successfully tested at 77 K and show a power dissipation of 150 mW. Only two switches are activated at a time during the self-calibration procedure. The switches are not expected to affect the magnetically shielded SQUIDs² (see Sect. 3.3.2).

3.2.4 Beam Combiner

Beam combination in QUBIC is performed by means of an optical system that propagates the fields radiated by the back-to-back horn array to a detector plane where Fizeau interference fringes can be observed. The beam combiner [17] is an off-axis Gregorian dual reflector, designed using the Mizuguchi-Dragone condition to have low spherical aberration, astigmatism and geometrical cross polarization across as large a field-of-view as possible. A polarizing grid separates the signal into two orthogonal polarizations that are imaged onto separate detector grids and the entire combiner fits inside a $\sim 1.3 \text{ m}^3$ cold volume (see Fig. 1). A field-of-view of 14° together with a focal length and entrance aperture diameter of 300 [mm] makes the design extremely challenging but simulations have shown that the effect of aberrations in our design is to reduce the overall sensitivity, compared to an ideal combiner, by $\sim 10\%$.

3.3 Detection Chain

3.3.1 Detectors

The focal plane will be covered with two filled arrays in order to Nyquist sample the image of the interference fringes. Each array will detect a linear polarization either transmitted or reflected by a polarized grid. The 1,024 detectors of each array (Fig. 2) are based on 0.3 K cooled Transition Edge Sensors with a target noise equivalent power (NEP) of $4 \cdot 10^{-17} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$ and a time constant shorter than 20 ms. A single bolometer is made of an island of suspended TiV absorber on a low stress SiN_x membrane heating an Nb_xSi_{1-x} thermistor. Four SiN_x legs provide the thermal link to the bulk silicon. This design has the advantage of independently tuning the critical temperature by varying the concentration of Si and Nb in the Nb_xSi_{1-x} alloy and the normal resistance by tuning the geometry of Nb interdigitated electrodes [14] (see Fig. 2). A target T_c of 0.4 K and normal resistance of 200 m Ω has been set to reach the required NEP and time constant. These parameters result from a tradeoff between the required sensitivity, the saturation power to observe the artificial calibration source and the capabilities of the cryogenic system that will be used for the first module. A first array is being fabricated and is scheduled for completion in September 2013. In the meanwhile, 23 pixel detectors arrays have been characterized and show an NEP of $4 \cdot 10^{-17} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$ for a T_c of 0.5 K [15].

¹ Application Specific Integrated Circuit

² Superconducting Quantum Interference Devices

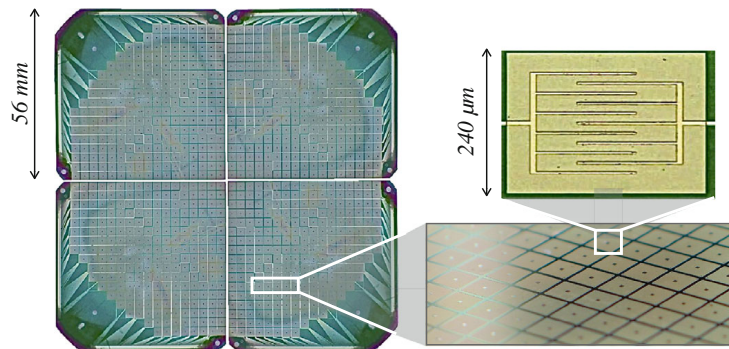


Fig. 2 Picture of preliminary realizations of detector sub-arrays with a zoom on the thermistor. (Color figure online)

3.3.2 Readout Electronics

The readout electronics use SQUIDs as a first time-domain multiplexing stage followed by a cryogenic full custom BICMOS SiGe ASIC. The SQUIDs are integrated with second order gradiometers and each one of them is enclosed in a separate tin-coated ferromagnetic box that provides magnetic shielding. The ASIC controls the capacitive SQUID addressing for row readout and second stage amplification. The advantages of such a system are a simplification of the architecture, miniaturization of the readout electronics, low power consumption and very low noise properties. The ASIC uses a single voltage supply of 3.3 V and consumes only 15 mW per ASIC. This technique has been demonstrated [16] with a 24 pixel readout in a 24:1 multiplexing scheme (done in two steps: 8:1 by the SQUID stage and 3:1 with the ASIC). The current design is based on a new ASIC that is able to read out 128 detectors with a 128:1 multiplexing factor (32:1 SQUIDs and 4:1 ASIC). The full detector array will therefore be read out with 2048 SQUIDs and 16 SiGe ASICs.

Data acquisition and control software and warm electronics design and fabrication are ongoing at IRAP Toulouse. These components are designed to facilitate operation during the Antarctic winter.

4 Conclusion

Significant progress has been made in the design, fabrication and characterization of the subsystems for the first module of QUBIC. Its deployment at Dome C will allow us to achieve a tensor to scalar ratio of 0.05 within one year of observation. It will also allow the demonstration of the importance of the self calibration strategy to reach unprecedented levels of systematics control in CMB instruments. The five modules that will follow will be a real breakthrough with a target tensor to scalar ratio lower than 0.01. For future modules several improvements will be considered: A dilution fridge will allow to achieve lower temperature and hence improve TESs performance. Planar orthogonal mode transducers will give better optical performance than a polarizing grid, reducing the number of focal planes from two to one. Superconducting switches

will allow very fast, low power consumption and compact baseline shut-off for the self calibration. It is important to note that the first QUBIC module is not only a scientific demonstration on CMB photons of the capabilities of bolometric interferometry but also a technology demonstration of new techniques for a future cosmology space mission.

Acknowledgments Agence Nationale de la Recherche (ANR), Centre National d'Etudes Spatiales (CNES), Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), Science and Technology Facilities Council (STFC), the National Science Foundation (NSF), the National Aeronautics and Space Administration (NASA), Institutut Paul Emile Victor (IPEV), Programma Nazionale Ricerche in Antartide (PNRA), Science Foundation Ireland (SFI), and Labex UnivEarthS.

References

1. M. Zaldarriaga, *Carnegie Obs. Astrophys. Ser.* **2**, 309 (2004)
2. E. Battistelli et al., *Astropart. Phys.* **34**(9), 705–716 (2011)
3. S. Masi et al., *Cryogenics* **39**, 217–224 (1999)
4. G. Polenta et al., *New Astron. Rev.* **51**, 256–259 (2007)
5. E.S. Battistelli et al., *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **423**, 1293–1299 (2012)
6. S. Ali et al., *AIP Conf. Proc.* **616**, 126–128 (2001)
7. L. Piccirilo, *Mem. Soc. Astron. It. S.* **2**, 200 (2003)
8. A. Ghribi et al., *J. Infrared Millim. Terahertz Waves* **31**(1), 88–99 (2010)
9. Charlassier et al., *A&A* **497**(3), 963–971 (2009)
10. M.-A. Bigot-Sazy, *A&A* **550**(A59), 11 (2013)
11. M. Salatino, P. de Bernardis, S. Masi, *A&A* **528**, A138 (2011)
12. G. Pisano et al., *PIER M* **25**, 101 (2012)
13. F. Del Torto et al., *JINST* **6**, P0600 (2011)
14. F. Pajot et al., *J. Low Temp. Phys.* **151**, 513 (2008)
15. Martino J., PhD thesis, 2012.
16. Prêle D. et al., *Eur. Astron. Soc.*, 37, 2009.
17. D. Gayer et al., *Proc. SPIE* **8452**, 8 (2012)

Chapitre 2

Technologies de détection supraconductrices

Il faut mesurer tout ce qui est mesurable, et tâcher de rendre mesurable tout ce qui ne l'est pas directement.

Galileo Galilei

Sommaire

1	Introduction	49
2	Bancs de tests cryogéniques	52
2.1	Objectifs	52
2.2	Montages et géométries	53
2.3	Extraction des paramètres d'intérêt	56
3	Optimisation des processus de micro-fabrication	57
3.1	PolarBear	58
3.2	PolarBear 2	60
3.3	QUBIC	60
4	Plans focaux multi-chroïques	63
5	Commutateurs et déphaseurs à état solide	68
6	Participation aux programmes de R&D	71
6.1	DCMB	71
6.2	COS2	71
6.3	BSD	71
6.4	COSMOS	71
6.5	ESA AO/1-7393/12/NL/MH	71
7	Publication choisie	73

1 Introduction

« Il déclare (Galilée) que dans tous ces phénomènes il faut mesurer tout ce qui est mesurable, et tâcher de rendre mesurable tout ce qui ne l'est pas directement. Il ne s'agit donc pas de poser des principes, les uns métaphysiques, les autres mathématiques, puis d'essayer d'en conclure a priori quelles doivent être les lois physiques; mais il s'agit d'abord d'observer, d'expérimenter, de mesurer, de compter, et ensuite de demander aux mathématiques et au raisonnement la formule, l'analyse, la transformation et le développement des résultats obtenus »¹. Cette analyse de Thomas-Henri Martin est tout à fait actuelle et représente les défis de l'expérimentateur. La mesure se trouve imbriquée dans son interprétation à son incertitude et à l'instrument, qu'il soit mathématique ou physique et qui permet d'en extraire l'essence. Nous avons vu dans le chapitre 1 ce qu'était le signal recherché, quelle était sa signature et comment il était possible de se jouer des pièges qu'il nous tend. Les architectures intelligentes décrites au chapitre 1 font état de ses ruses. Elles utilisent pour ce faire des pièces individuelles qui sont nécessaires au succès de cette entreprise. Il s'agit là des éléments qui conduisent les photons, en séparent

1. Th.-Henri Martin; Galilée, les droits de la science et la méthode des sciences physiques (1868).

les polarisations, en modulent la réponse, en filtrent la fréquence pour enfin les voir s'anéantir dans un détecteur. Je me suis intéressé à tout ce que le signal rencontre avant d'arriver au détecteur. Je me suis intéressé aux problématiques que la conception, l'intégration et la fabrication de tous ces composants posent. Pour essayer d'en comprendre les raisons, commençons par introduire ces différentes technologies et les défis qu'elles représentent pour la cosmologie expérimentale.

1.0.1 Les détecteurs et leurs matrices

L'amplitude des modes B de polarisation du fond diffus cosmologique est tellement faible que leur détection nécessiterait des détecteurs ultra-sensibles. Ces détecteurs devraient alors avoir cette sensibilité dans les longueurs d'ondes millimétriques car, étant donnée la température de corps noir du fond diffus cosmologique, c'est là que le signal est maximal (voir chapitre 1). Sur Terre, les observations devront se faire dans les bandes de transmission de l'atmosphère. La figure 2.1 en montre la distribution spectrale. Plusieurs technologies existent pour la détection millimétrique. Pour les comparer, définissons la détectivité :

$$D^* = \frac{\sqrt{A_{det}}}{NEP_{det}} \quad (2.1)$$

avec A_{det} l'aire du détecteur et NEP_{det} le bruit équivalent en puissance du détecteur (voir équation 2.3). La compilation des données de [Rog17] permet de comparer les détectivités des radiomètres à 4,2 Kelvin, des bolomètres à électrons chauds ou HEBs à 4 Kelvin au cas des bolomètres supraconducteurs ou TESs et des détecteurs à inductance cinétique KIDs calculés pour PRISM. La figure 2.1 montre la supériorité claire des KIDs et des TES par rapport aux autres technologies. L'on atteint ici une sensibilité limitée uniquement par le bruit de photons incidents. Pour mieux comprendre ce que cela signifie prenons le cas d'un TES. La figure 2.2 en montre le principe de fonctionnement. Un absorbeur subit un échauffement lorsqu'un rayonnement s'y dépose. Cet échauffement est ensuite mesuré par un thermomètre dont la résistance varie en fonction de la température. Ce thermomètre peut être supraconducteur, métallique ou semi-conducteur. Dans notre cas, il est supraconducteur. Si nous le maintenons à sa transition normal/supraconducteur, la résistance devient très sensible aux fluctuations de températures. Si nous polarisons le bolomètre en tension fixe V_f , nous pouvons alors extraire la puissance thermique relative P_{var} en mesurant le courant aux bornes du thermomètre :

$$P_{var} = \frac{V_f^2}{R(I)} \quad (2.2)$$

Le lecteur pourra se référer à [Cam99] pour plus de détails. Il est toutefois utile de rappeler le bruit équivalent en puissance d'un bolomètre supraconducteur :

$$NEP_{phonons}^2 = NEP_{phonons}^2 + NEP_{johnson}^2 + NEP_{photons}^2 \quad (2.3)$$

avec :

1.0.1.1 Le bruit de phonon

$$NEP_{phonons}^2 = 4k_B T^2 G \quad (2.4)$$

k_B est ici la constante de Boltzman, $T = T_0 + \Delta T$, T_0 la température du bain et ΔT la fluctuation de température. G est la conductance dynamique qui caractérise le lien entre le thermomètre et le bain thermique. Il s'agit d'un bruit principalement dû à la propagation de vibrations thermiques dans le réseau cristallin. La géométrie joue donc un rôle central ici. En fonction des géométries, des limites peuvent être atteintes par les processus de fabrication quant à la structuration des poutrelles et des membranes sur lesquelles sont suspendues les thermomètres.

1.0.1.2 Le bruit de Johnson ou de Nyquist

$$NEP_{johnson}^2 = \frac{4k_B T R \Delta\nu}{S^2} \quad (2.5)$$

où R est la résistivité, $\Delta\nu$ la largeur de bande et S la réponse du bolomètre. Il s'agit là d'un bruit lié à l'agitation thermique des électrons. Il est souvent lié à la stabilité de l'environnement cryogénique et à l'électronique de lecture.

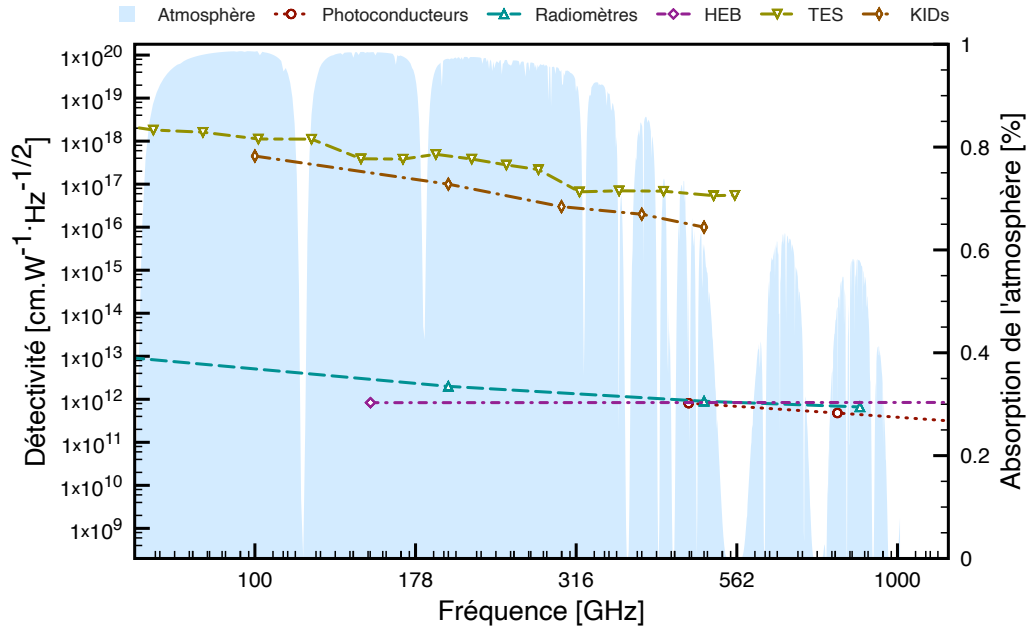


Figure 2.1 – Comparaison des détectivités de plusieurs technologies de détecteurs dans le millimétrique et l’infrarouge. Cas des TESs et des KIDs calculés pour PRISM. Cas des radiomètres (4,2 K), des HEBs et des photoconducteurs à partir de [Rog17].

1.0.1.3 Le bruit de photon

$$NEP_{photons}^2 = 2h^2\nu_0^2 \langle n_0 \rangle \Delta\nu + 2 \frac{(h\nu_0 \langle n_0 \rangle \Delta\nu)^2}{\Delta\nu} \quad (2.6)$$

h étant la constante de Planck et ν_0 la fréquence centrale d’opération. Ce bruit est lié à la distribution statistique du nombre de photons arrivant sur le détecteur. Les photons obéissant à la statistique de Bose Einstein, il y a une limitation intrinsèque du nombre de photons qui peuvent être reçus par unité de temps, par mode spatial et fréquence (ou énergie), soit :

$$\langle n_0 \rangle = \left(e^{\frac{h\nu}{k_B T}} - 1 \right)^{-1} \quad (2.7)$$

Il s’agit là de la véritable limitation de la détection bolométrique. Pour augmenter la sensibilité, il faut donc nécessairement augmenter le nombre de détecteurs. Nous parlons donc de matrices de détecteurs. La fabrication des matrices de bolomètres supraconducteurs pose des défis particuliers qui seront abordés en section 3 pour le cas de PolarBear et de QUBIC. Les matrices intégrées posent également d’autres défis d’intégration, d’électronique de lecture et de couplage optique. Dans la suite, sera abordée la problématique du couplage optique.

1.0.2 Les technologies de détection, toujours en matrice

Tout ce qui se situe entre le ciel et le détecteur permet d’acheminer les photons du ciel vers le détecteur. Il s’agit, si l’on peut l’écrire ainsi, d’une succession d’adaptations d’impédances qui se veulent les plus parfaites possible. En chapitre 1 a été abordé l’assemblage intelligent de ces composants. Nous aborderons dans ce chapitre les problématiques que posent certains de ces composants. La figure 2.4 montre les différentes technologies et composants habituellement utilisés dans les expériences de CMB. Historiquement, ce sont les cornets qui faisaient partie des premiers éléments optiques après le télescope et les éventuels modulateurs de polarisation. La raison est que ces composants quasi-optiques permettent une définition très propre de la polarisation et des lobes d’antennes. Cette technologie a été utilisée pour l’instrument Planck HFI et est encore utilisée aujourd’hui pour les instruments ACTpol, SPTpol ou encore QUBIC. ACTpol et SPTpol extraient les deux polarisations linéaires par l’intermédiaire d’un diplexeur de polarisation planaire qui assure la transition d’un mode de propagation quasi-optique à un mode de propagation quasi-TEM³. Tous les éléments qui suivent (filtrage, dissipation thermique sur les thermomètres) sont également planaires. L’ensemble est donc micro-structuré en matrices sur des substrats

3. Transverse Electrique Magnétique (TEM)

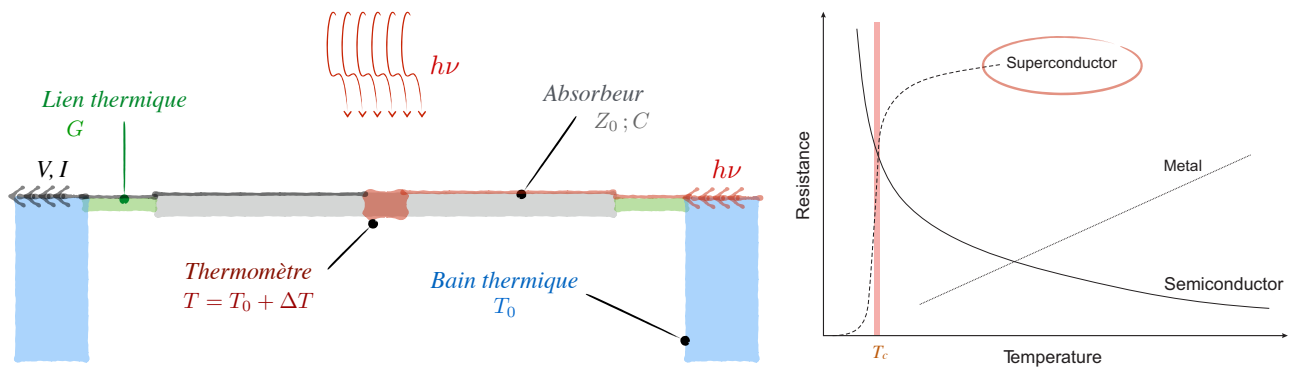


Figure 2.2 – A gauche : principe de fonctionnement d’un bolomètre. A droite : variation de la résistance en fonction de la température pour différents types de thermomètres.

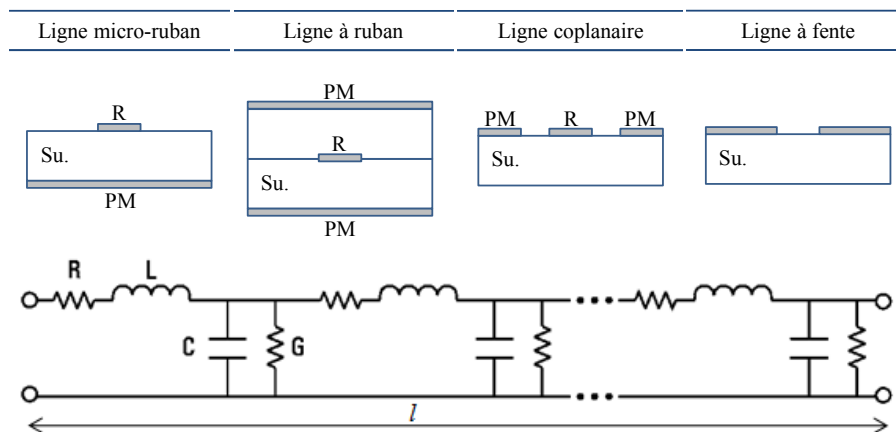


Figure 2.3 – Résumé des principales technologies de lignes de transmission planaires utilisées.

monolithiques. QUBIC a quant à lui fait le choix différent d'utiliser les modes quasi-optiques pour le filtrage et la séparation des polarisations (par grilles). Le couplage avec le thermomètre se fait par l'intermédiaire d'une grille d'absorption dont l'impédance est adaptée à celle du vide. Ce choix est le résultat de l'architecture choisie pour QUBIC. PolarBear a quant à lui fait un choix entièrement planaire. Les polarisations sont séparées directement par des antennes planaires couplées à des micro-lentilles. Le signal se propage ensuite entièrement en quasi-TEM sur une structure planaire. Pour la suite, il est nécessaire d'avoir un petit aperçu des technologies des lignes de propagation planaires. La figure 2.3 en résume les grandes lignes. Pour PolarBear, c'est la technique micro-ruban qui a été utilisée. Pour PolarBear 2, les épaisseurs réduites de substrats et la connaissance des propriétés des matériaux ont permis de passer outre cette limitation géométrique et d'utiliser des passages en coplanaire ou en fente au grès des capacités et des inductances localisées dont il y avait besoin. Cette capacité de pouvoir jouer sur les propriétés d'une ligne planaire a permis d'explorer d'autres manière de faire, en ralentissant l'onde électromagnétique (étude du chargement inductif des antennes sinus log-périodiques dans le cadre du projet AO/1-7393/12/NL/MH de l'ESA- voir section 6.5). Un autre exemple est l'utilisation de méta-matériaux mains-gauches qui permettent, en exploitant une invisibilité spectrale localisée, de réduire la taille des composants tout en augmentant leur largeur de bande (coupleur hybride conçu et fabriqué dans le cadre de la collaboration COSMOS - voir section 6.4).

2 Bancs de tests cryogéniques

2.1 Objectifs

La méconnaissance des propriétés des matériaux pour la fabrication des matrices de détecteurs est un problème récurrent. En ce qui me concerne, le besoin est apparu pour la première fois lors de la participation à un groupe de travail pour l'investigation d'effets mesurés avec SPTPol, attribués aux effets systématiques instrumentaux mais non encore compris à l'époque. Lors du déploiement d'ingénierie de l'instrument PolarBear à Cedar Flat (CA, 2010), cette méconnaissance est apparue comme le principal facteur limitant les performances du plan focal.

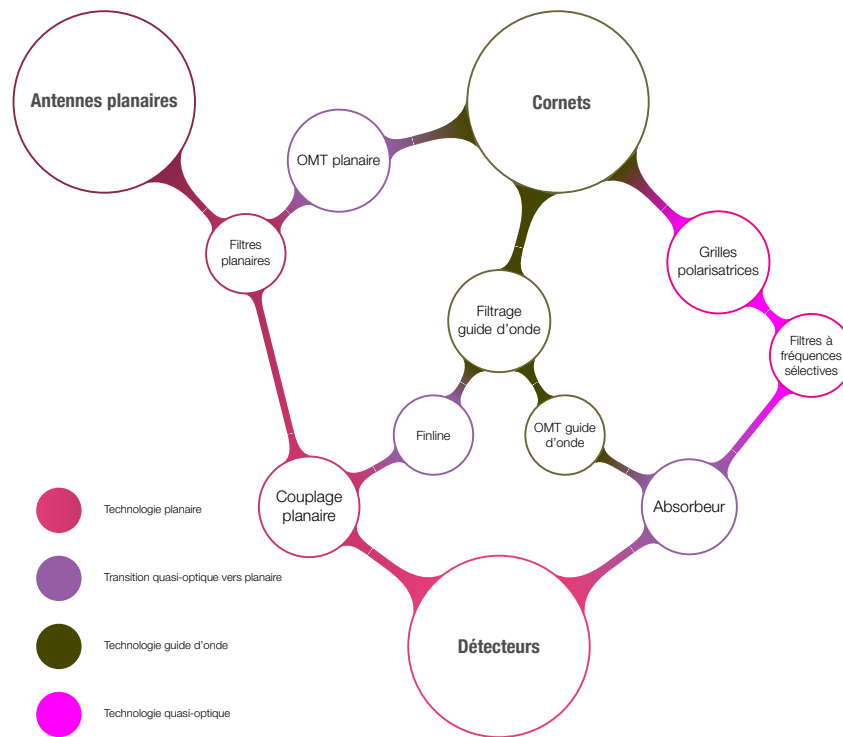


Figure 2.4 – Arborescence des technologies couramment utilisées dans les expériences de CMB pour acheminer le signal astrophysique du ciel aux détecteurs.

En effet, une non uniformité importante ou une constante diélectrique de substrat trop différente de ce qui est attendu peut changer les impédances caractéristiques des composants utilisés et avoir comme effet des pertes importantes, un décalage des bandes spectrales ou encore un coupleur ligne/détecteur trop peu efficace. Pour remédier à ce problème, je me suis vu confier le projet d'un banc de test cryogénique (4 Kelvin) dans la bande Ka (26 GHz - 40 GHz). Ce banc utilise un analyseur vectoriel (VNA⁴) Agilent HP8722ES comme générateur de signaux et comme détection cohérente. La mesure simultanée de l'amplitude et de la phase permet de récupérer les différents paramètres des composants testés. L'utilisation de ce banc est aussi liée à deux projets connexes dans lesquels j'étais impliqué et qui sont l'augmentation des tailles des matrices monolithiques (4" à 6" puis 8") et l'augmentation de la fréquence d'opération des composants. Un exemple est l'utilisation des antennes de types sinus log-périodiques pour des fréquences avoisinant le THz. A ces fréquences, nous avons besoin de matériaux supraconducteurs affichant une faible profondeur de pénétration London et de matériaux diélectriques à fortes constantes diélectriques. Dans le cas de PolarBear 2, nous avons mesuré à l'aide d'un spectromètre à transformée de Fourier la réponse d'un pixel utilisant une antenne sinus log-périodique et une banque de filtres (channelizers). Les résultats (voir figure 2.5) indiquent une sous-estimation claire des pertes tangentielles (supposées inférieures à 0,01 pendant la modélisation).

Ce banc a ainsi permis de :

- Investiguer différents matériaux diélectriques (Si_3N_x , SiO_x , ...);
- Investiguer les effets de différents métaux supraconducteurs à 4 K (Nb , NbN , $SiNbN$);
- Optimiser les géométries de différentes lignes de transmission planaires;
- Investiguer les différents effets de pressions partielles des gaz, de température et autres paramètres à forte variabilité et leur incidence dans les machines utilisées pour la micro-fabrication des plans focaux.

2.2 Montages et géométries

Les différents bancs de test étaient montés sur une platine refroidie à 4 Kelvin par un cryogénérateur Gifford McMahon. Différents montages ont été utilisés.

4. Vectorial Network Analyser (VNA)

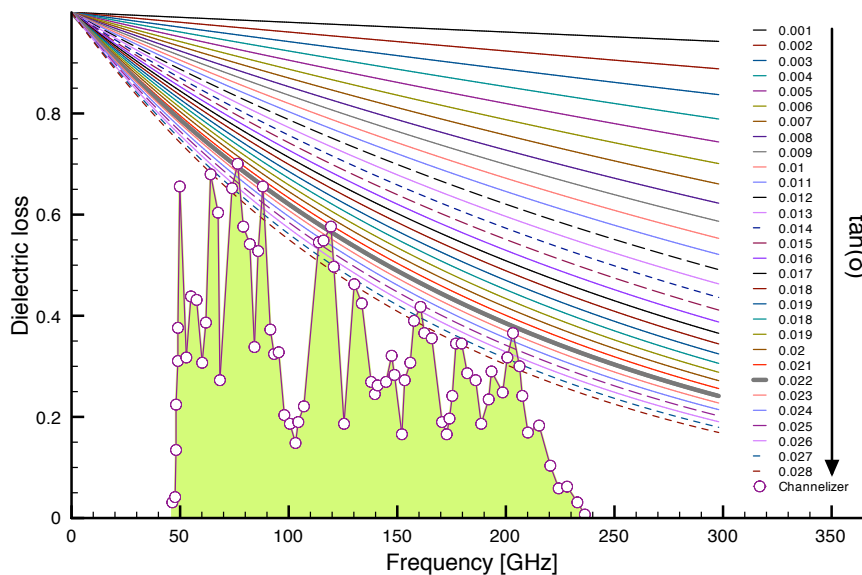


Figure 2.5 – Réponse fréquentielle d'un pixel de PolarBear 2 mesurée à l'aide d'un spectromètre à transformée de Fourier.

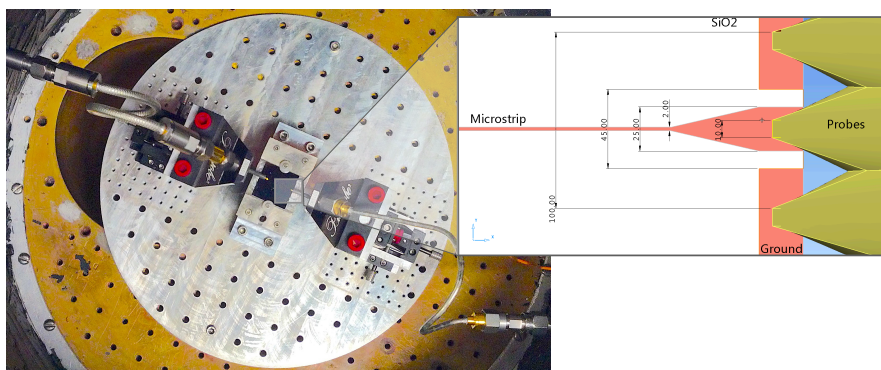


Figure 2.6 – Photo des microprobes montées dans le cryostat de test et en contact avec une ligne micro-ruban en Nb sur substrat de SiO_x .

2.2.1 Montage sous pointe - *Microprobe*

La mesure sous pointe est la technique la plus utilisée pour la caractérisation des micro-composants planaires haute fréquence. J'ai utilisé des microprobes type Picoprobe 40A de GGB industries. Les dispositifs utilisés possèdent 3 pointes en Beryllium et sont qualifiés pour fonctionner à 4 K (voir figure 2.6). Ce type de montage fournit de bonnes performances en transmission et offre une bonne surface de contact. Il y a cependant plusieurs inconvénients à leur utilisation :

- Le contact avec la surface du métal est destructif (raye la surface)
- Leur utilisation couplée avec un étalonnage cryogénique nécessite un système optique de micro-positionnement cryogénique.

2.2.2 Montage type "*Flipchip*"

Le deuxième montage utilise des adaptateurs de lignes coaxiales vers lignes micro-ruban. Dans le cas de ce montage, c'est le modèle 1092-03A-5 de Southwest Microwave qui a été utilisé. Ces adaptateurs sont ensuite connectés à un circuit imprimé (lignes micro-ruban) sur un support diélectrique en Kapton. Les lignes micro-rubans viennent en contact direct avec un substrat en Silicium sur lequel sont déposés et structurés les composants à tester. Une mesure de transmission et de réflexion à température ambiante est visible sur la figure 2.8. Cependant, pour avoir une caractérisation précise, une procédure d'étalonnage utilisant plusieurs ports est nécessaire. C'est ainsi qu'un circuit utilisant 28 ports de mesures simultanées a été conçu (voir figure 2.7). La procédure d'étalonnage et d'extraction des paramètres utiles est détaillée dans la suite.

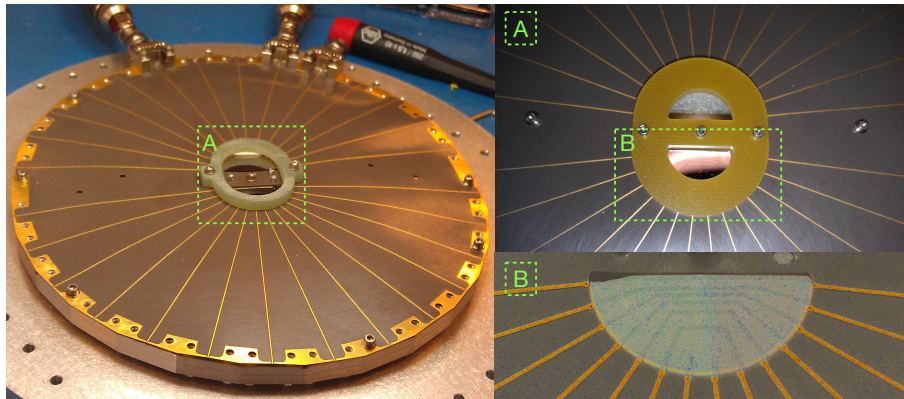


Figure 2.7 – Montage type "flipchip" avec trois connecteurs coax à micro-ruban montés. Les lignes micro-rubans sont structurées sur un support en Kapton. Une pièce en G10 assure la pression nécessaire au contact entre les lignes micro-rubans et les lignes coplanaires sur Silicium.

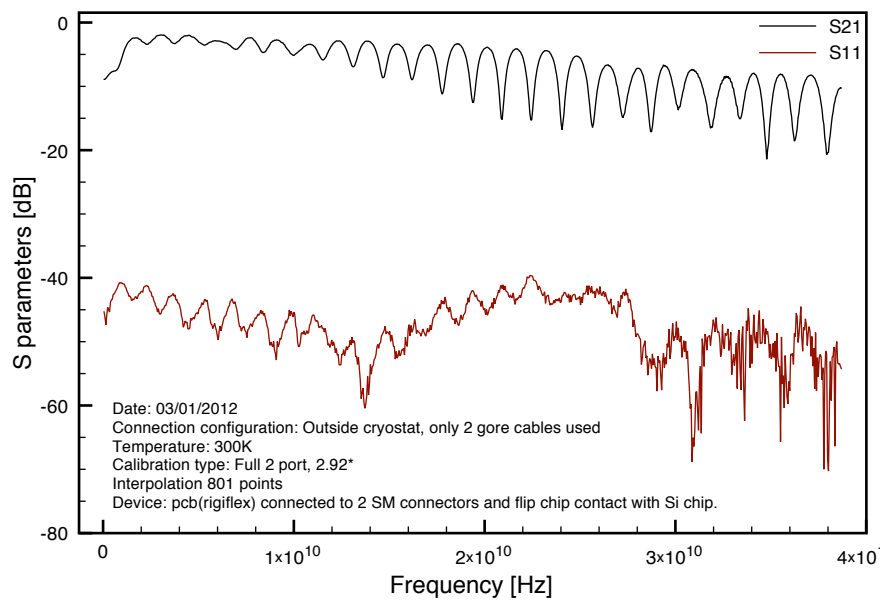


Figure 2.8 – Mesure de l'amplitude des paramètres de diffusion S21 (transmission) et S11 (réflexion) / Mesures 2 ports de la transition coax (gore flex) à micro-ruban (sur Kapton) à ligne coplanaire sur Silicium (contact direct flip chip).

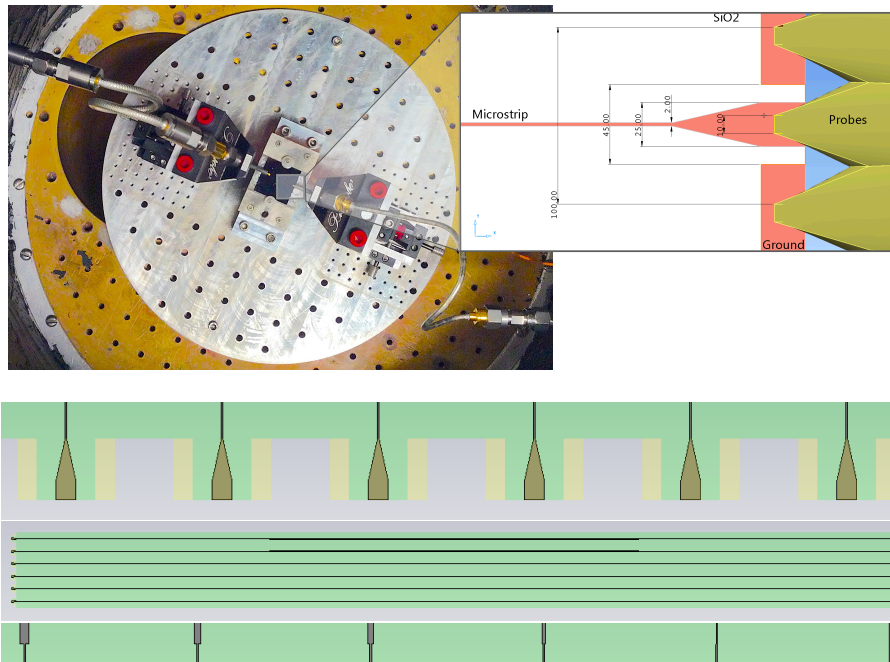


Figure 2.9 – Structures d'extraction d'impédance caractéristique.

2.3 Extraction des paramètres d'intérêt

2.3.1 Etalonnage

Habituellement, la procédure **SOLT** [SH02 ; SY07] est utilisée pour l'étalonnage des mesures vectorielles standards. Cependant, elle n'est pas adaptée si l'on ne connaît pas à l'avance les propriétés des éléments d'étalonnage utilisés. C'est la raison pour laquelle la procédure **TRL** [WMD91] est souvent considérée pour les mesures sur substrat. Il faut en revanche être conscient de deux problèmes principaux. Le premier est la non prise en compte des erreurs dites "switching errors" qui sont internes au **VNA**. Le deuxième est la largeur de bande relativement limitée de l'étalonnage **TRL** ($\Delta\nu = 8 : 1$). C'est la raison pour laquelle la procédure **TRL multi-ligne** [DJM02] a été proposée. Les différentes lignes doivent être optimisées de manière à minimiser l'erreur en augmentant la redondance tout en évitant les singularités (erreur infinie) à certaines fréquences d'intérêt. Le choix des différentes longueurs doit aussi permettre d'enlever les erreurs d'extrémité de bande passante. Pour notre cas, 9 différentes longueurs ont été considérées pour des fréquences centrales allant de 22 GHz à 38 GHz et des largeurs de bandes de 2 GHz. Après étalonnage, différents composants ont été conçus pour extraire les différents paramètres d'intérêt avec une plus grande précision. Ces composants ont été conçus et fabriqués pour une utilisation sous pointe.

2.3.2 Mesures d'impédances

Considérons une simple mesure de paramètres de diffusion **S** d'une ligne micro-ruban à l'aide d'un analyseur vectoriel. Il est possible de traduire les paramètres **S** en terme de matrice **ABCD** [Poz11]. Cette matrice peut alors s'exprimer de la manière suivante :

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\beta l) + j \sin(\beta l) & j Z_0 \sin(\beta l) \\ \frac{2}{Z_0} (\cos(\beta l) + j \sin(\beta l)) & \cos(\beta l) + j \sin(\beta l) \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Où β est la constante de propagation du milieu, Z_0 l'impédance caractéristique et l la longueur de la ligne. L'étalonnage **TRL** multiligne permet d'extraire β et Z_0 . Pour augmenter la précision de la mesure, nous utilisons de multiples désadaptations d'impédances (voir figure 2.9). Le coefficient de réflexion mesuré est alors :

$$\Gamma = \frac{Z_0 - 1}{Z_0 + 1} \quad (2.9)$$

2.3.3 Mesures de constantes diélectriques

Les deux raisons principales de ce travail sont l'extraction de l'inductance cinétique et de la constante diélectrique. Les deux termes sont inclus dans la constante de propagation β . Afin de les séparer, deux résonateurs planaires

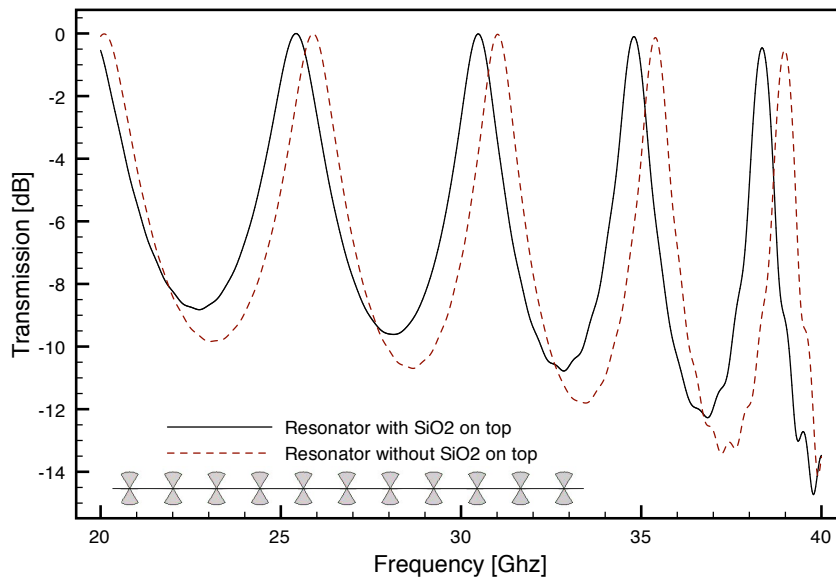


Figure 2.10 – Simulation de la transmission d'un résonateur à stub radial avec et sans une surcouche de 0,5 µm de SiO_2 . La ligne micro-ruban a une largeur de 6 µm et le diélectrique considéré est du SiO_2 de 0,5 µm d'épaisseur.

à haut facteur de qualité ont été conçus. Les deux résonateurs sont identiques et sont déposés et structurés en même temps et sur le même support en Si. A la fin de la fabrication, on dépose sur l'un des deux résonateurs une couche de SiO_2 d'une épaisseur contrôlée et compatible avec les paramètres des matrices de détecteurs. Il résulte de ce dépôt un décalage de la fréquence de résonance. Ce décalage est recalculé en simulation et une approximation de la constante diélectrique en est extraite (voir figure 2.10).

2.3.4 Mesures d'inductance cinétique

Connaissant la constante diélectrique ϵ_r , il est possible d'extraire l'inductance cinétique L_k en considérant :

$$L_k = \left[\left(\frac{2\pi c}{\beta} \right)^2 \frac{1}{\epsilon_r} - 1 \right] \frac{\mu_0 h}{w} \quad (2.10)$$

où c est la vitesse de la lumière dans le vide, μ_0 la perméabilité magnétique du vide, h la hauteur du diélectrique, β la constante de propagation, ϵ_r la constante diélectrique et w la largeur de la ligne micro-ruban.

2.3.5 Mesures de pertes en transmission

La connaissance de la constante diélectrique permet d'extraire les pertes tangentielles $\tan \delta$ dues au matériau diélectrique. En dessous de la température critique du supraconducteur utilisé⁵, $\tan \delta$ domine les pertes en transmission. Afin d'avoir une bonne estimation de ces pertes, des lignes micro-rubans (méandres non résonnants) ont été conçues avec des longueurs de 25 cm à 50 cm, une largeur de 6 µm et sur un diélectrique de SiO_2 de 0,5 µm d'épaisseur. On peut ainsi extraire $\tan \delta$ en retrouvant la constante d'atténuation fréquentielle du diélectrique α_d :

$$\alpha_d = \frac{k_0 \epsilon_r \left(\epsilon_e \left(1 + \frac{L_k w}{\mu_0 h} \right) - 1 \right) \tan \delta}{2 \sqrt{\epsilon_e \left(1 + \frac{L_k w}{\mu_0 h} \right)} (\epsilon_r - 1)} \quad (2.11)$$

où k_0 est le nombre d'onde, ϵ_r la constante diélectrique, ϵ_e la permittivité effective de la ligne micro-ruban, μ_0 la perméabilité du vide, L_k l'inductance cinétique, h la hauteur diélectrique et w la largeur de la ligne micro-ruban. Un exemple d'une telle extraction est visible sur la figure 2.11.

3 Optimisation des processus de micro-fabrication

5. Il est supposé ici une utilisation en dessous de l'énergie de gap du supraconducteur et une épaisseur du supraconducteur bien supérieure à la profondeur de pénétration London.

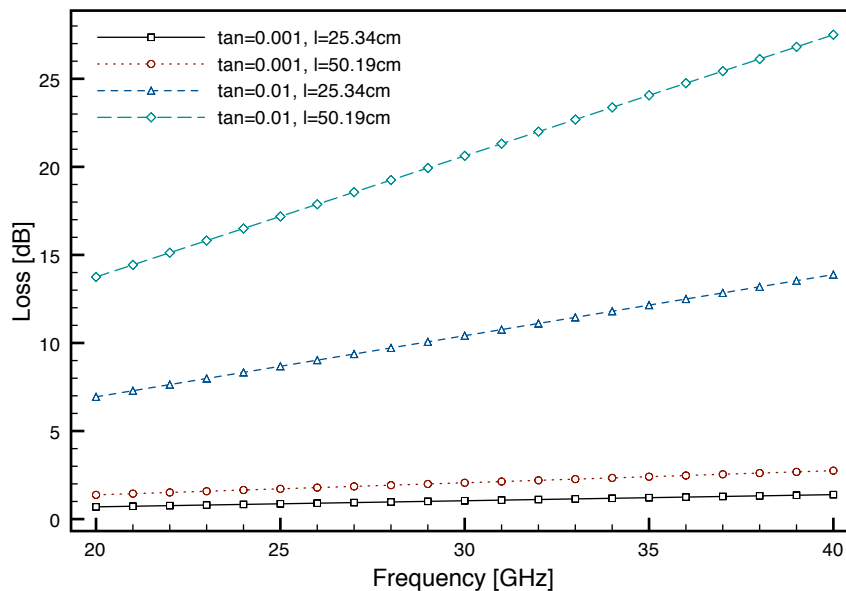


Figure 2.11 – Pertes diélectriques en fonction de la fréquence, de la longueur des lignes et de $\tan \delta$ pour $\varepsilon_e = 2, 91$.

3.1 PolarBear

Les tests cryogéniques tels que décrits dans la section 2 avaient pour but d'améliorer les performances du plan focal de PolarBear. Ils permettaient notamment d'adapter les géométries des micro-composants radiofréquences aux contraintes liées aux matériaux. Ils permettaient aussi d'améliorer les procédés de micro-fabrication.

3.1.1 Description des géométries

Le plan focal de PolarBear a plusieurs atouts. Il est basé sur une technologie micro-ruban supraconductrice qui s'affranchit entièrement de la dépendance du choix du substrat (wafer) de fabrication. Pour PolarBear, ce support est en Silicium. Lorsque les composants micro-rubans utilisent le Silicium du substrat comme diélectrique, on se trouve avec des performances qui dépendent fortement du lot de wafer. Par exemple, le dopage a un effet assez important sur les pertes fréquentielles. La constante diélectrique ou l'épaisseur du substrat peuvent aussi varier et induire une variation importante de la vitesse de propagation des ondes dans les structures micro-ondes. De plus, les épaisseurs assurant une rigidité mécanique suffisante sont compatibles avec des fractions entières de certaines longueurs d'onde d'intérêt. Ceci peut induire des résonances multiples entre le conducteur en surface et le plan de masse en dessous. Pour éviter cette forte dépendance, toutes les structures micro-rubans utilisent comme diélectrique un oxyde de Silicium fin ($0,5 \mu\text{m}$) déposé sur un plan de masse en *Nb*, lui-même déposé en surface du substrat de Silicium. De cette manière les filtres et autres composants se retrouvent complètement isolés du Silicium. Un autre avantage est une grande liberté quant aux propriétés des composants qui peuvent être construits⁶ grâce notamment à la possibilité de fabriquer des vias⁷. Les structures de propagation micro-ondes sont placées en face arrière par rapport au ciel. Elles sont donc protégées par leur plan de masse et ne peuvent être excitées par des modes quasi-optiques. Les antennes qui permettent le couplage optique sont des antennes à fentes gravées directement dans le plan de masse. L'épaisseur de Silicium en face arrière devient donc une extension des lentilles semi-hémisphériques Silicium. Ces dernières sont aussi placées en face arrière. Elles forment ainsi avec le substrat une forme semi-ellipsoïdale. La lentille résultante permet d'adapter chaque antenne à l'impédance du vide, d'avoir des lobes conformes aux spécifications et de maximiser le signal reçu en maximisant le coefficient de remplissage du plan focal.

3.1.2 Processus de fabrication

Lors du déploiement d'ingénierie à Cedar Flat en 2010, nous nous sommes aperçus de certaines problématiques du plan focal induites notamment par une méconnaissance de l'influence de certains procédés impliquant des fours à très hautes températures sur le Nb, les oxydes et les résidus. De plus, le coefficient de remplissage effectif (que nous appellerons dans la suite "yield") était assez faible. Il s'agit là du nombre de pixels affichant des performances

6. Amplitude importante de variation des capacités et des inductances localisées

7. Trous conducteurs liant plan de masse et ligne de transmission

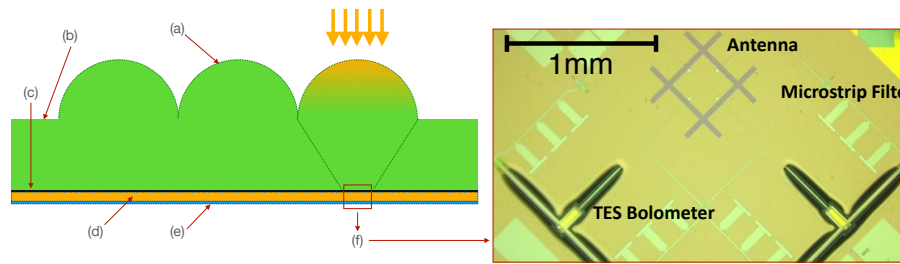


Figure 2.12 – Schéma de principe du montage des micro-lentilles sur le substrat en Silicium montrant : (a) Lentille hémisphérique ; (b) Substrat Silicium ; (c) Plan de masse en Nb ; (d) Couche de SiO_2 ; (e) Couche de Niobium structurée ; (f) Agrandissement d'un pixel de PolarBear montrant une antenne à fente sensible à la polarisation, 4 filtres micro-rubans et deux bolomètres. L'ensemble des nanostructures n'est pas représenté sur ce schéma.

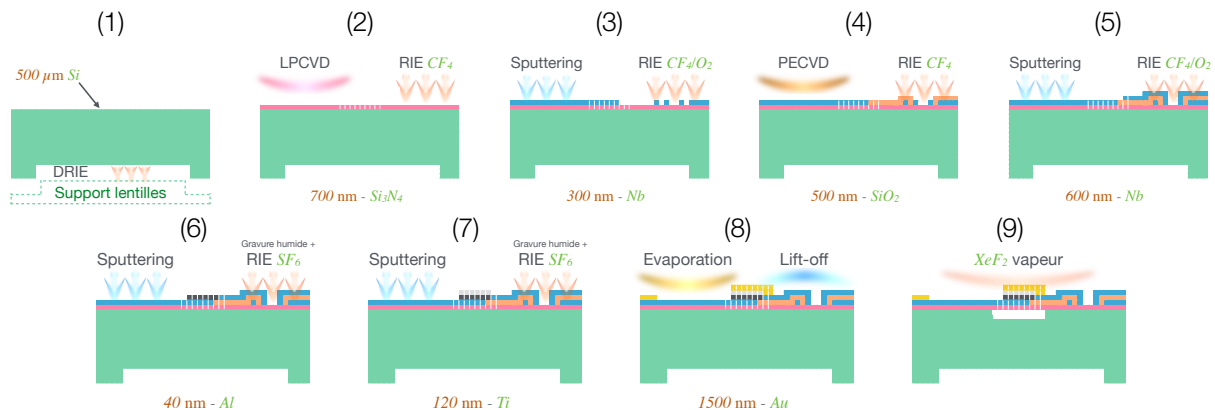


Figure 2.13 – Résumé des étapes de micro-fabrication d'un pixel du plan focal de PolarBear.

compatibles avec le déploiement scientifique. De retour au Nanolab de UC Berkeley, les efforts ont été démultipliés pour vérifier systématiquement tous les paramètres (températures critiques, pertes, ...), et avoir un suivi plus rigoureux des variations des résultats en fonction des numéros de lots et des paramètres des machines. Toute modification de paramètres d'une machine, maintenance ou tout simplement nouveau lot de wafer était systématiquement suivi. Un lot de fabrication était constitué de 50 à 100 substrats de départ. De ces substrats de départ, seulement quelques-uns étaient retenus pour leurs performances. Lors du déploiement scientifique dans le désert de l'Atacama, les yields étaient en moyenne de 98%. Une des stratégies clés était la mise en place d'une base de données semi-automatique commune regroupant tous les détails des procédés, les suivis de lots de fabrication, le suivi d'incidents et d'anomalies ainsi que d'autres détails. Cette base de données regroupait tous les utilisateurs et tous les projets du groupe (EBEX, PolarBear, PolarBear II). Elle permettait donc un retour d'expérience important. Tout en participant à la fabrication des matrices de détecteurs, je me suis occupé de mettre en place et de gérer cette base de données. Un exemple extrait de cette base de données est montré dans le tableau 2.1. En plus, chaque matrice avait une fiche accompagnatrice pendant toute sa durée de vie (ex. annexe III). Il a par exemple été possible de comprendre des anomalies vues sur certains détecteurs pendant la phase de traitement de données en revenant à sa fiche d'identité et de suivi.

Les étapes de micro-fabrication du plan focal sont résumées sur la figure 2.13. Elles se déroulent comme suit :

1. **DRIE**⁸ : Gravure profonde du substrat Si (500 μm d'épaisseur) suivant le masque d'alignement des lentilles.
2. **LPCVD**⁹ : Dépôt de 700 nm de Si_3N_4 ultra bas stress. Cette couche servira de support pour suspendre l'îlot du bolomètre.
3. **Sputtering + RIE**¹⁰ : Dépôt de 300 nm de Nb (plan de masse) et structuration des électrodes et des antennes.
4. **PECVD**¹¹ + **RIE** : Dépôt de 500 nm de SiO_2 qui sera utilisé comme diélectrique pour les lignes micro-rubans.

8. Deep Reactive Ion Etching (DRIE)

9. Low Pressure Chemical Vapor Deposition (LPCVD)

10. Reactive Ion Etching (RIE)

11. Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD)

Date	Project	Layer	Wafer	Machine name	User	Recipe
07/06/2010	Test Chip	ant	AS1-4, AS1-5	Ptherm	asuzuki	8 mn @ 75 W CF_4 50.9 sccm O_2 50.9 sccm BP 2.54 mtorr PP 67 mtorr
08/06/2010	PolarBear		9A2, 9A3	Technic-C	adnan	Descum
08/06/2010	PolarBear	mic	8D8	Gartek	karnold	6000 Å Nb deposition standard recipe
15/06/2010	PolarBear	mcc	9A3	SEMI	adnan	11 :40 300nm Nb etch $CF_4 - O_2$ Process 5 / Step 2

Table 2.1 – Exemple de détails de fabrication extraits de la base de données mise en place à UC Berkeley.

5. Sputtering + RIE : Dépôt de 600 nm de Nb et structuration des lignes micro-rubans.
6. Sputtering + RIE : Dépôt de 40 nm d' Al et structuration de la première couche du thermomètre du bolomètre.
7. Sputtering + RIE : Dépôt de 120 nm de Ti et structuration de la deuxième couche du thermomètre du bolomètre.
8. Evaporation + Lift-off : Dépôt de 1500 nm d' Au et structuration de l'absorbeur du bolomètre.
9. Libération de la membre : Il s'agit de la libération de la membrane en Si_3N_4 par XeF_2 vapeur. Le thermomètre du bolomètre sera ensuite suspendu dans le vide par à trois pattes en Si_3N_4 .

3.2 PolarBear 2

Ma participation aux travaux concernant le plan focal de PolarBear 2 s'est faite sur deux plans. Le premier est celui de la micro-fabrication. Le deuxième est celui de l'étude des antennes ultra larges-bandes et de banques de filtres inspirées de la cochlée humaine (voir section 4).

Le plan focal de PolarBear 2 est assez différent de PolarBear. Il utilise des antennes différentes, des filtres différents et un dimensionnement de détecteurs différent. Pourtant, les deux plans focaux partagent la même technologie. Les deux utilisent du Niobium comme matériau supraconducteur pour les composants radiofréquences. Les deux utilisent de l'Oxyde de Silicium comme milieu diélectrique. Les deux utilisent aussi des bolomètres bi-couches Al/Ti . Pour autant, la fabrication et la production de ces matrices ne sont pas dépourvues de défis. Les matrices de PolarBear 1 ont toutes été fabriquées sur des supports 3 pouces avec des machines dédiées. La plupart du temps, ces machines sont des donations ou sont vendues aux enchères par les entreprises de nanotechnologies de la Silicon Valley. Le parc de machines était donc vieillissant et la plupart des machines n'étaient pas compatibles avec des substrats de plus de 3" ou n'offraient pas les performances requises. Un grand effort de jouvence a donc été effectué par le renouvellement d'une grande partie du parc de machines du Nanolab et l'agrandissement de la salle blanche. Cette jouvence tombait à point nommé pour PolarBear 2 qui s'inscrivait dans le cadre de la production de grandes matrices de détecteurs multi-chroïques sur supports monolithiques. J'ai donc été impliqué, pour cette partie, dans l'optimisation des processus de fabrication pour le passage de 3" à 4", de 4" à 6" et enfin de 6" à 8". Il fallait pour cela réussir des dépôts et des gravures uniformes et avec des matériaux ayant les propriétés requises (pertes, résistivités, température critique). Pour atteindre la phase de production, il fallait avoir une répétabilité importante et un faible taux d'échec. Un exemple de transition de 3" à 6" pour les matrices de PolarBear 2 avec un passage de 364 détecteurs à 1084 détecteurs est montré sur la figure 2.14.

3.3 QUBIC

Le plan focal de QUBIC est très différent de celui de PolarBear. Il utilise aussi la technologie TES mais avec un couplage et des matériaux différents. En effet, le couplage avec l'impédance du vide ne se fait pas via des structures de guidage micro-rubans. Il se fait directement via une grille d'absorption dont l'impédance est optimisée pour s'adapter à celle du vide. Le plan focal de QUBIC contient deux matrices identiques de 992 détecteurs chacune (une pour chaque polarisation). Chacune des matrices est composée de 4 parties symétriques fabriquées séparément. La micro fabrication a lieu dans la Centrale de Technologie Universitaire (CTU) MINERVE de l'Institut

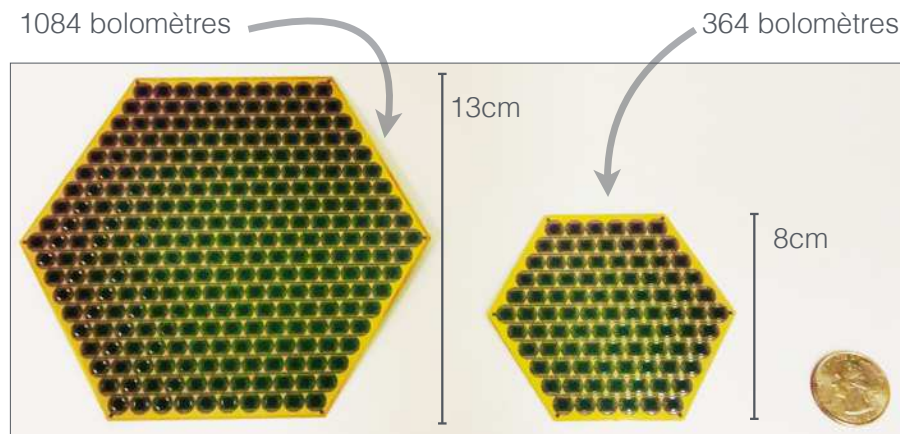


Figure 2.14 – Passage d'un substrat de 3" à un substrat de 6" dans la fabrication de matrices de détecteurs et gains en nombre de détecteurs.

d'Electronique Fondamentale (IEF) et au Centre de Sciences Nucléaires et de Sciences de la Matière (CSNSM)¹² sous la responsabilité de Stefanos Marnieros et de Benoît Bélier. J'ai pu participer à la micro-fabrication des matrices de QUBIC entre 2012 et 2014 dans le cadre du projet QUBIC et de la thèse de Camille Perbost [Per16a]. La particularité du procédé de fabrication de QUBIC est sa forte dépendance à un Nb_xSi_{1-x} tout particulier et dont les propriétés sont optimisées pour les détecteurs de QUBIC. Il n'était maîtrisé et fabriqué qu'au CSNSM grâce à un co-évaporateur spécialement conçu à cet effet. Cette forte dépendance présentait évidemment un risque pour le projet tout entier. C'est la raison pour laquelle la co-pulvérisation d'un $NbSi$ adapté à QUBIC à l'aide d'un bâti à la CTU était à l'étude dès 2012. La deuxième préoccupation était la migration qui se préparait vers le Centre de Nanotechnologies et de Nanosciences (C2N) qui allait rassembler une grande partie de la micro et nano fabrication d'Orsay dans 2900 m² de salles blanches. Mes travaux ont cependant eu lieu avant ce déménagement. Le $NbSi$ mis à part, le procédé de micro-fabrication des matrices était en 2012 encore à un stade de maturité insuffisant pour un déploiement scientifique de l'instrument. Il avait en revanche largement bénéficié des développements effectués dans le cadre du projet DCMB (voir section 6.1). La figure 2.15 montre certains des défauts les plus récurrents que j'ai pu rencontrer pendant la fabrication. Il restait donc encore beaucoup à faire pour fiabiliser le procédé. Les premières vérifications pendant la fabrication sont des mesures de continuité électrique sous pointe. Elles déterminent si un pixel est électriquement vivant ou totalement inutilisable. Au début, le yield de la continuité électrique¹³ ne dépassait pas 30%. Après optimisation des paramètres de fabrication (étapes de gravure et lift-off), le yield était nettement plus élevé et atteignait quelques fois 100% (voir figure 2.16). L'autre problème récurrent était un problème de stress de la membrane Si_3N_4 . Si celle-ci pouvait survivre l'étape de libération XeF_2 , le transport ou le mouvement pouvait détruire certains pixels. Il ne s'agit pas là d'un problème unique aux matrices de QUBIC. A l'université de Berkeley, la résolution de ce problème s'est faite par l'utilisation de fours de Low Pressure Chemical Vapor Deposition (LPCVD) à haute température et de haute pureté (utilisation très restreinte et contrôlée) et l'augmentation de l'épaisseur de la membrane. De manière générale, nous avons pu remarquer que, plus une machine est utilisée par différentes personnes et différents projets, plus les chances de succès en bout de process sont faibles.

La micro-fabrication des matrices de QUBIC suit les étapes détaillées sur la figure 2.17. Elles se déroulent comme suit :

1. Substrat SOI : Le procédé commence avec un substrat de SOI. Il s'agit d'un substrat en Si de 500 μm sur lequel sont déposées une couche d' SiO_2 de 1 μm et une couche de Si de 5 μm .
2. LPCVD + RIE : Il s'agit ici de l'étape de dépôt de la couche de Si_3N_4 qui servira de support mécanique aux grilles d'absorption et à l'ilot du thermomètre du bolomètre. Cette étape est critique car le stress du dépôt détermine la solidité de l'ensemble.
3. Sputtering + RIE : Dans cette étape, nous déposons et structurons 25 nm de Nb qui serviront d'électrodes et de routages.
4. Evaporation + Lift-off : Nous déposons et structurons maintenant 200 nm d' Al qui serviront de plots de contact pour l'électronique de lecture.
5. Co-évaporation + Lift-off : Cette étape consiste à déposer et à structurer le thermomètre. Contrairement aux bolomètres bi-couches, ce dernier est fait d'un seul alliage $NbSi$ composé de Nb et de Si . Le procédé

12. aujourd'hui Laboratoire Irène Joliot-Curie (IJC Lab)

13. ou pourcentage de pixels montrant une continuité électrique

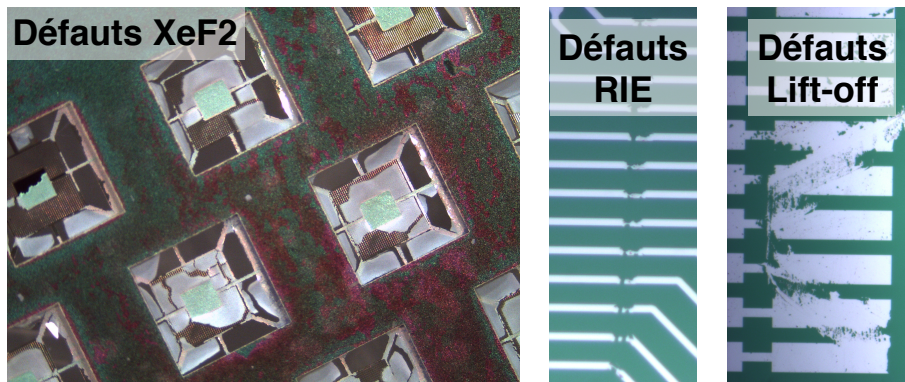


Figure 2.15 – Photos des dommages les plus courants pendant le développement du procédé de fabrication des matrices de détecteurs de QUBIC.

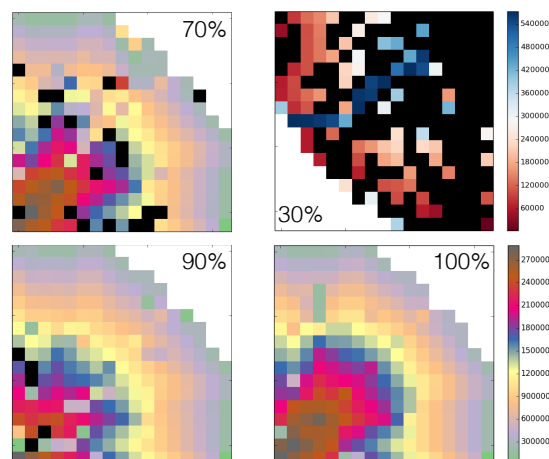


Figure 2.16 – Evolution du yield électrique pendant le développement du procédé de micro-fabrication des matrices de QUBIC.

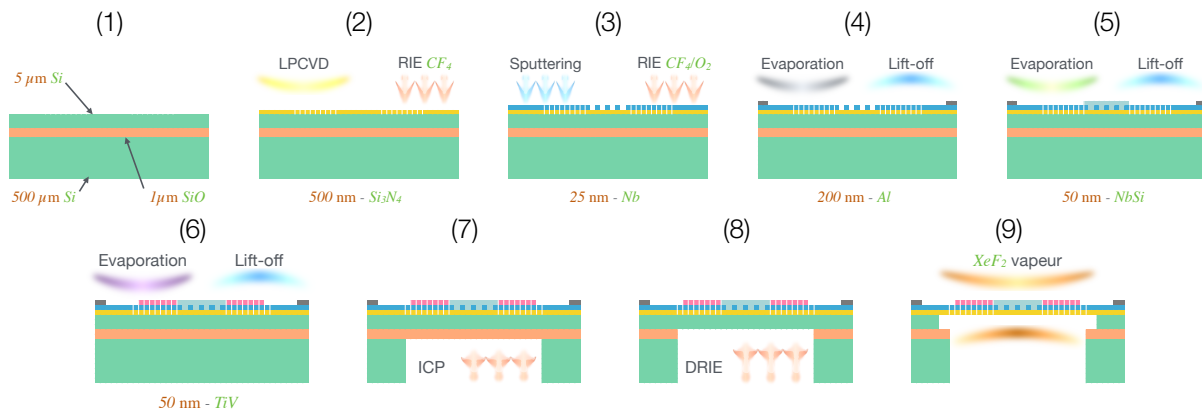


Figure 2.17 – Résumé des étapes de micro-fabrication d'un pixel du plan focal de QUBIC

de co-évaporation permet d'optimiser la résistivité et la température critique du matériau. C'est donc une étape déterminante pour avoir des détecteurs conformes aux spécifications de départ.

6. Co-évaporation + Lift-off : Cette étape sert à déposer et à structurer la grille d'absorption.
7. ICPE¹⁴ : Cette étape de gravure profonde sert à éliminer les 500 µm de *Si* en face arrière. La couche de *SiO* sert alors de barrière pour arrêter la gravure. Ainsi le support mécanique en *Si* épais est structuré.
8. DRIE : La couche de *SiO* est ensuite éliminée grâce à une gravure ionique réactive profonde.
9. Libération de la membre : Enfin, la membrane bas stress en *Si₃N₄* est libérée par *XeF₂* vapeur. Cette couche de nitrure structure les poutres sur lesquelles les thermomètres des bolomètres sont suspendues.

4 Plans focaux multi-chroïques

L'importance d'un plan focal multi-spectral a bien été explicitée dans le chapitre 1. Que ce soit au sol ou dans l'espace, la conception de plans focaux multi-chroïques devient une nécessité. Cependant, avant que cette technique n'eut été prête à être déployée, plusieurs barrières technologiques devaient être levées. Ces dernières dépendent fortement du type de plan focal. Par exemple, pour un plan focal à couplage indirect, c'est à dire utilisant des lentilles, des antennes et des filtres les défis sont tout autres que pour un plan focal utilisant des absorbeurs à grilles larges-bandes. Je me suis intéressé à ces techniques.

Suivant la technologie utilisée, un plan focal multi-chroïque pose aussi d'autres défis. En effet, l'intégration de pixels de différentes dimensions et de différents champs de vue doit prendre en compte toute l'optique en amont ainsi que la stratégie d'observation. Dans le cadre de la collaboration BSD (voir 6.3), j'ai fait partie de l'équipe qui s'est attaquée à ces problématiques. La figure 2.18 montre le dimensionnement d'un tel plan focal pour la proposition de satellite Core (voir chapitre 1, section 3.4).

4.0.1 Antennes

Les pixels de PolarBear 2a sont di-chroïques (voir figure 2.19). Ils utilisent, comme PolarBear 1, des microlentilles et des antennes à fentes sensibles à la polarisation pour le couplage au ciel. En revanche, les antennes utilisées ont une forme géométrique toute particulière. On appelle cette forme sinus log-périodique car sa forme géométrique obéit à une équation mathématique ayant cette propriété :

$$\phi(r) = (-1)^p \alpha_p \sin \left[\pi \frac{\ln(r/R_p)}{\ln(\tau_p)} \right] \pm \delta_p \quad (2.12)$$

Avec p un entier représentant l'ordre de la cellule¹⁵. α_p l'amplitude angulaire du sinus, R_p le rayon interne de la cellule p , δ_p est la largeur angulaire de chaque bras de l'antenne et τ_p le coefficient d'expansion logarithmique. Un exemple de l'incidence de ces paramètres sur la géométrie est montré sur la figure 2.19. Sur le principe, cette antenne fonctionne comme une antenne à fente classique à 4 bras sensibles à la polarisation linéaire. Si l'on choisit $\alpha = 360/2N$ et $\delta = \alpha/2$, la partie évidée de l'antenne devient identique à sa partie métallique. C'est ce qu'on appelle, d'après le principe de Babinet [Bab37], un aspect auto-complémentaire. Une des conséquences

14. Inductively Coupled Plasma Etching (ICPE)

15. Une cellule est ajoutée à chaque fois que la géométrie change de sens.

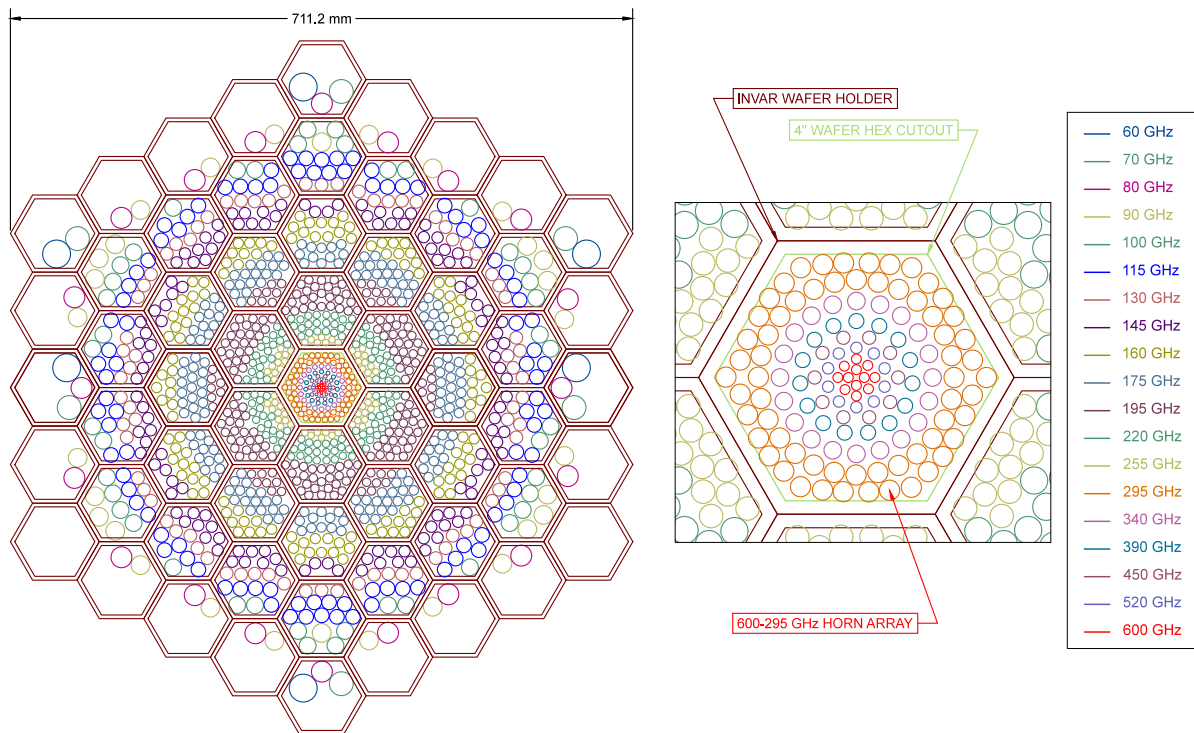


Figure 2.18 – Un des plans focaux dimensionnés pour la proposition de satellite Core dans le cadre du projet BSD pour un fonctionnement entre 60 GHz et 600 GHz.

qui confère à l'antenne des propriétés très larges-bandes est que son impédance réelle Z devient indépendante de la fréquence :

$$Z = \frac{\eta}{2} \quad (2.13)$$

avec η l'impédance intrinsèque du milieu.

Dans la pratique cette antenne peut souffrir de plusieurs handicaps :

- Modulation fréquentielle de la polarisation : Chaque cellule de l'antenne est comme une antenne à fente dimensionnée pour une longueur d'onde différente. Plus l'on s'éloigne du centre, plus la longueur d'onde augmente. On voit aussi que chaque cellule est tournée par rapport à celle qui la précède et celle qui la suit. L'effet de cette rotation est que chaque cellule est sensible à une polarisation linéaire différente (rotation). Ce que l'on observe dans la pratique est une modulation de la polarisation. Il a été proposé [Suz13] de résoudre ce problème en considérant plusieurs antennes présentant une symétrie axiale qui compense cette modulation de la polarisation lors de l'intégration du signal dans le détecteur d'un même pixel. Ceci veut dire considérer plusieurs antennes pour chaque pixel.
- Asymétrie : Il y a en pratique deux asymétries. L'une est planaire et est causée par l'imprécision de la micro-fabrication. L'autre est due à la différence entre les deux milieux en dessous et au dessus de l'antenne. Ceci fait que les impédances des deux structures complémentaires ne sont pas parfaitement symétriques. L'incidence ici est l'introduction d'une dépendance fréquentielle.
- Couplage à la propagation planaire : Le couplage avec la ligne micro-ruban se fait au milieu de la structure. La ligne micro-ruban zigzague ensuite sur la partie métallique grâce au dépôt d'une fine couche de diélectrique. Il y a cependant une limitation due à la précision de fabrication de la ligne et des effets de bords avec les bras de l'antenne.
- Limitation haute fréquence : Plus la fréquence est élevée, plus la taille des structures est réduite. Une limitation purement technologique limite alors la fabrication d'une antenne très haute fréquence.
- Limitation basse fréquence : Pour les basses fréquences, la taille de l'antenne devient au contraire importante et des effets de bord sur la fréquence la plus basse peuvent être visibles.

Tous ses effets ont été abordés de manière pratique lors des études pour PolarBear 2. Bien que la solution finale soit un compromis, les performances de cette structure restent bien supérieures aux autres antennes connues. Un des objectifs d'une partie du projet AO/1-7393/12/NL/MH (voir section 6.5) de l'ESA auquel j'avais participé avait bien pour but d'étudier des solutions novatrices pour résoudre certains de ses problèmes. Une des pistes qui avait été suivie consistait à charger les bras des antennes d'éléments localisés pour réduire leur taille et réduire la rotation de la polarisation.

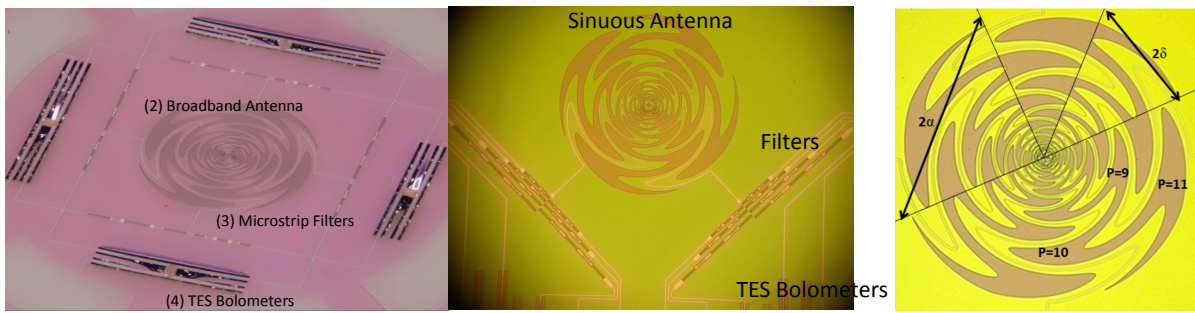


Figure 2.19 – A gauche : pixel bi-chroïque d'un polarimètre intégré réalisé pour PolarBear 2a [Suz+12]. Au milieu : pixel avec une banque de filtres permettant de séparer 7 bandes de fréquences. Les deux pixels fonctionnent entre 70 GHz et 220 GHz. A droite : photographie d'une antenne sinus log-périodique à 11 cellules avec $\alpha = 45^\circ$, $\delta = 22,5^\circ$, $\tau = 1,3$ et $R_1 = 24 \mu m$ [Suz13].

4.0.2 Filtres

Comme explicité dans le chapitre 1, la définition propre des bandes spectrales est très importante pour les performances de l'instrument. Pour PolarBear 2, plusieurs type de filtres avaient été étudiés, fabriqués et intégrés au plan focal. La figure 2.20 en montre trois exemples. Une des nouveautés étudiées s'inspire directement de la cochlée de l'oreille interne. Elle résulte d'une collaboration à laquelle j'ai participé entre 2010 et 2012. Cette dernière liait le groupe Richards-Lee-Holzzapfel de l'université de Berkeley et le groupe du Prof. Rebeiz de l'université de San Diego. La figure 2.20 en montre un exemple décliné en un spectro-polarimètre à 7 bandes de fréquences. Pour cela, la cochlée a été modélisée en 1D comme un fluide interagissant avec une structure à impédance variable [GR08] :

$$Z(x) - j\omega m(x) + r(x) + \frac{k(x)}{j\omega} = \frac{-P(x)}{v_{bm}(x)} \quad (2.14)$$

où $P(x)$ est la pression du fluide, v_{bm} la vitesse de la structure, m sa masse, r son amortissement et k sa rigidité. Une analogie électrique-mécanique permet ensuite de lier des capacités, des inductances et des résistances par unité de longueur à une tension V le long d'une ligne de transmission :

$$\frac{d^2V(x)}{dx^2} + \frac{L_1(x)C(x)}{1 + j\omega R(x)C(x) - \omega^2 L_2(x)C(x)} \omega^2 V(x) = 0 \quad (2.15)$$

avec L_1 une inductance série, C une capacité parallèle, R une résistance parallèle et $1/\omega L_2$ la susceptance inductive parallèle. Ces paramètres sont ensuite reconstitués en éléments localisés.

Dans notre cas, le fait d'avoir une propagation micro-ruban sur substrat fin a permis une grande liberté pour définir des capacités et des inductances localisées en jouant sur la géométrie de la ligne, en utilisant des court-circuits à la masse ou en changeant de type de propagation (micro-ruban vers coplanaire). Une mesure spectrale de la réponse de filtres à 7 canaux inspirés de ce principe est montrée sur la figure 2.5.

4.0.3 Lentilles planes

Hormis les réseaux phasés d'antennes, les plans focaux planaires multi-chroïques utilisent des pixels multichroïques. Ces derniers font usage d'antennes très larges-bandes et nécessitent souvent la présence de lentilles individuelles pour optimiser le coefficient de remplissage du plan focal, améliorer la forme et les propriétés du faisceau, réduire la polarisation croisée ou encore réduire la diaphonie (interaction entre pixels adjacents). Seulement, les lentilles hémisphériques classiques ont leurs limitations intrinsèques en terme d'équation de variation d'index. De plus, l'épaisseur des lentilles implique la nécessité de revêtements anti-réfléctifs larges-bandes dans le cas de pixels larges-bandes. Ces revêtements posent à leur tour leurs propres défis en terme d'épaisseurs de couches et d'uniformité de dépôts sur des surfaces non planes. Pour résoudre cette problématique, des travaux de R&D dédiés avaient été conduits à l'université de Berkeley [Suz13 ; Que12a] pour rendre possible la fabrication des plans focaux de PolarBear et de PolarBear 2. Pour ma part, je m'y suis intéressé dans le cadre du projet AO/1-7393/12/NL/MH de l'ESA (voir section 6.5) dans l'étude de lentilles et de revêtements anti-réfléctifs plans.

Pour essayer de comprendre les méthodes utilisées, essayons de voir comment agit une lentille sur un rayonnement incident. De manière effective, le rayonnement voit un changement de propriétés du milieu suivant une loi particulière. Dans le cas d'une lentille faite d'une demi-ellipsoïde en Silicium par exemple, l'onde verra un changement d'indice (frontière entre l'air et le Silicium) suivant l'équation d'une ellipsoïde en fonction de la hauteur de la

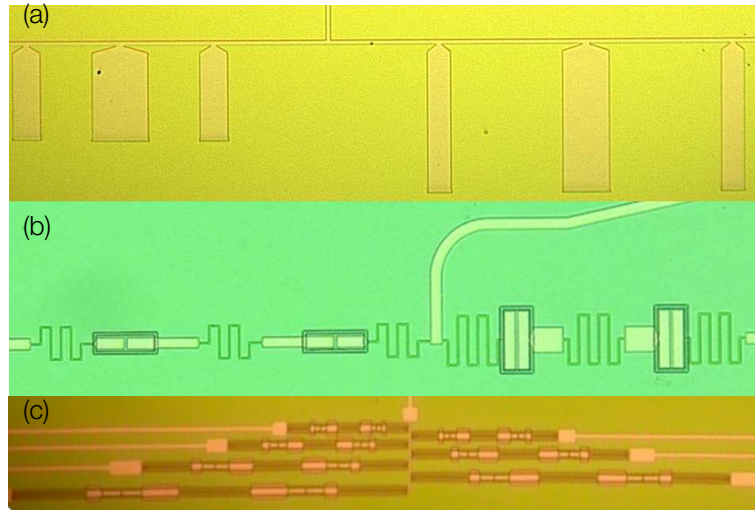


Figure 2.20 – Diviseurs de spectre à deux canaux : (a) Filtre à stubs. (b) Filtre à structure hybride à éléments localisés. (c) Diviseur de spectres à 7 canaux fonctionnant entre 70 GHz et 220 GHz. Les composants sont en Nb sur $0,4 \mu\text{m}$ de SiO_x [Suz+12].

lentille (z) . Si nous traduisons l'effet qu'a cette structure sur la phase de l'onde incidente dans le plan (x,y) , nous voyons :

$$\phi(x, y) = k_0(d - \sin \theta_0(x \cos \varphi_0 + y \sin \varphi_0)) \quad (2.16)$$

avec k_0 la constante de propagation dans le vide et $d = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2}$ la distance à partir du centre de phase (x_0, y_0, z_0) . Nous avons donc une variation ellipsoïdale de l'indice de réfraction du milieu. L'optique transformative nous permet de retrouver des paramètres effectifs pour essayer de traduire cette structure ellipsoïdale en structure plane. Supposons que la perméabilité magnétique du milieu est inchangée. Dans ce cas, il s'agit d'une variation ellipsoïdale de la constante diélectrique. Si nous considérons un substrat Silicium d'une épaisseur constante t_e , à chaque point de coordonnées (x, y) correspond une constante diélectrique effective différente $\varepsilon(x, y)$. Cette dernière peut être retrouvée grâce à la variation de la phase :

$$\varepsilon(x, y) = \frac{c\phi(x, y)}{(2\pi\nu t_e)^2} \quad (2.17)$$

avec c la vitesse de la lumière et ν la fréquence. La première transformation consiste à traduire la structure en une lentille annulaire à n anneaux. Il s'agit ici d'une discrétisation de l'ellipsoïde. Chaque anneau i , possède alors une constante diélectrique constante ε_i . Divisons maintenant chaque anneau en m cellules. Chaque cellule possède une constante diélectrique ε_{ij} spécifique. La relation Clausius–Mossotti (C-M) [Mer+99] permet alors de définir ε_{ij} à partir de la fraction totale de volume d'air dans une cellule et de la constante diélectrique ε_r du matériau support, soit :

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_r \left[1 + 2F_{ij} \left(\frac{1 - \varepsilon_r}{1 + 2\varepsilon_r} \right) \right] \left[1 - F_{ij} \left(\frac{1 - \varepsilon_r}{1 + 2\varepsilon_r} \right) \right]^{-1} \quad (2.18)$$

La résolution de cette dernière equation permet de retrouver les paramètres nécessaires pour structurer chaque anneau de manière à reconstituer le comportement de la lentille d'origine. La figure 2.21 montre le résultat d'une telle conception par gravure de trous traversants sur un substrat de Silicium de 1 mm d'épaisseur (projet AO/1-7393/12/NL/MH).

4.0.4 Revêtements anti-réfléctifs et absorbeurs pour bolomètres

Le passage d'une onde d'un milieu à un autre différent induit une désadaptation d'impédance qui se traduit par une réflexion d'une partie du signal. C'est donc le même phénomène limitant qui se produit dans le cas de lentilles et d'absorbeurs de bolomètres. Dans le cas de lentilles, l'ajout d'un revêtement anti-réfléctif est d'usage pour éviter ce genre de phénomène. Dans sa version la plus simple, l'on utilise un revêtement anti-réfléctif de type quart-d'onde. Celui-ci se base sur l'adaptation des indices des différents milieux à une fréquence donnée. Supposons par exemple deux milieux, d'indices n_1 et n_2 , séparés par un troisième milieu d'indice n et d'épaisseur t . Dans ce cas, le coefficient de réflexion peut être exprimé par :

$$\Gamma = \frac{n^2(n_1 - n_2)^2 \cos(k_0 n t) + (n_1 n_2 - n^2)^2 \sin^2(k_0 n t)}{n^2(n_1 + n_2)^2 \cos(k_0 n t) + (n_1 n_2 + n^2)^2 \sin^2(k_0 n t)} \quad (2.19)$$

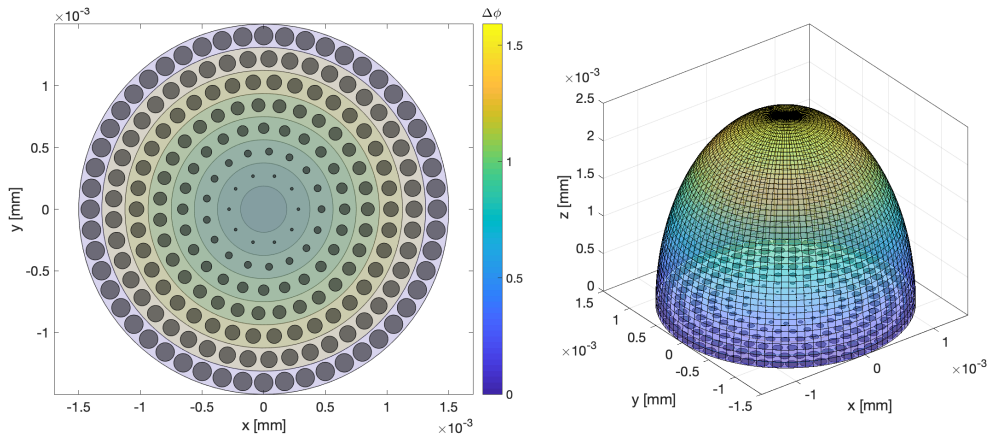


Figure 2.21 – A droite : Isocontours théoriques d'une lentille semi-ellipsoïdale conçue pour une antenne sinus logpériodique fonctionnant autour de 90 GHz. A gauche : Résultat de l'optique transformative de la lentille semi-ellipsoïdale en lentille plane à trous. $\Delta\phi$ est ici le déphasage que subit l'onde incidente dans la structure de la lentille.

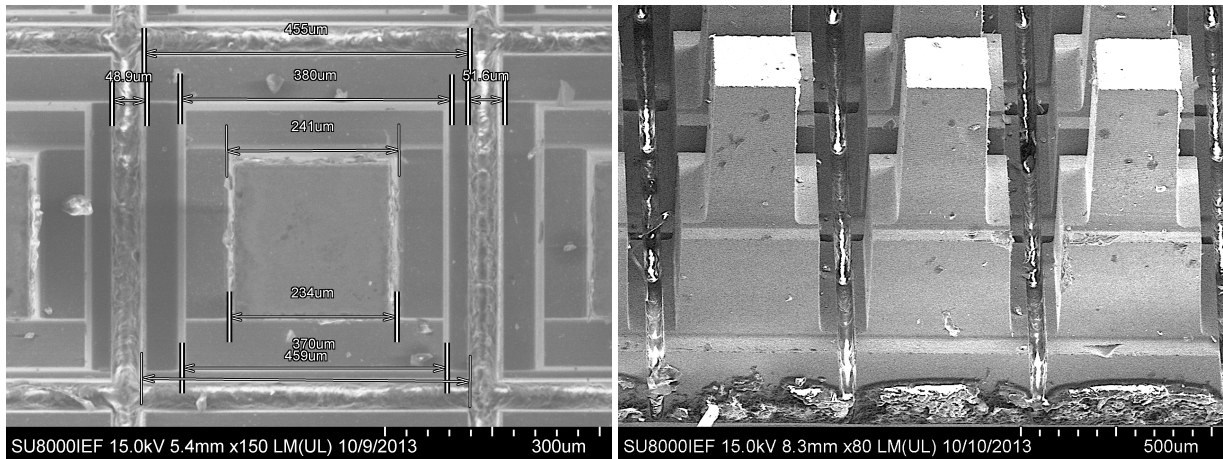


Figure 2.22 – Démonstration de la fabrication d'un revêtement anti-réfléctif à deux couches dans le cadre du projet AO/1-7393/12/NL/MH.

L'expression 2.19 s'annule lorsque $t = \lambda/4n$ et $n = \sqrt{n_1 n_2}$, λ étant la longueur d'onde. Nous avons donc un revêtement anti-réfléctif parfait lorsque nous déposons une épaisseur quart d'onde d'un matériau ayant un indice n contrôlé. Pour des considérations larges-bandes, il est souvent déposé plusieurs couches satisfaisant aux conditions d'indice et d'épaisseur à différentes fréquences. Pour PolarBear, plusieurs difficultés sont apparues. Il fallait d'abord trouver le matériau qui possède le bon indice. Ceci a été atteint en chargeant de l'Epoxy avec des micro-billes de quartz à différentes concentrations. Il fallait ensuite réussir à appliquer de manière uniforme, contrôlée et répétitive les revêtements sur des lentilles d'à peine 1 millimètre de diamètre. Cette dernière difficulté est significativement réduite dans le cas de lentilles planes. Pour le projet AO/1-7393/12/NL/MH, une autre approche a été considérée. Elle s'appuie sur une structuration répétitive d'un matériau spécifique (dans notre cas, du Silicium) avec une dimension inférieure à $\lambda/10$. Pour une géométrie à piliers de base carrée, de côté b et de hauteur d , il est possible de contrôler la constante diélectrique effective en fonction des paramètres géométriques [Bib+03] :

$$\epsilon_e = \frac{C}{\epsilon_0 d} \tag{2.20}$$

où ϵ_0 est la permittivité diélectrique du vide et C la capacité équivalente d'une cellule individuelle satisfaisant la relation :

$$C = \epsilon_0 d \left(\frac{e}{e + 2b} + \frac{2b\epsilon_r}{e\epsilon_r + 2b} \right) \tag{2.21}$$

avec e la distance entre les piliers et ϵ_r la constante diélectrique du Silicium. Pour une application large-bande, une structure multi-couches est possible. Des essais de micro-fabrication d'un tel revêtement bi-couche structuré ont été effectués dans le cadre du projet cité (voir figure 2.22).

5 Commutateurs et déphaseurs à état solide

Dans le cadre du travail sur la prochaine génération de modulateurs en technologie planaire, j'ai conçu pendant ma thèse un composant particulier permettant de jouer le rôle de déphaseur variable ou d'interrupteur radiofréquence en fonction des matériaux et épaisseurs choisis. Ce travail a ensuite continué dans le cadre de la thèse de Guillaume Bordier [Bor14]. J'ai pu ensuite contribuer à cet effort dans le cadre de la collaboration BSD à mon retour au laboratoire APC après mon postdoctorat.

5.0.1 Commutateur radiofréquence

Il s'agit d'un micro-pont supraconducteur conçu pour permettre une commutation on/off micro-seconde avec une isolation meilleure que 26 dB et une consommation inférieure au milli Watt [Bor+14]. Pour comprendre comment cela fonctionne, considérons une ligne de transmission coplanaire dont une partie est polarisée en courant. Lorsque le courant injecté dépasse le courant critique pour la partie aux dimensions réduites du micro-pont, ce dernier transite à l'état normal. L'on passe alors d'une impédance :

$$Z_{on} = j\omega(L_g + L_k) + \frac{1}{j\omega C} \quad (2.22)$$

à une impédance :

$$Z_{off} = R_n + j\omega L_g + \frac{1}{j\omega C} \quad (2.23)$$

avec ω est la fréquence angulaire, L_g l'inductance géométrique, L_k l'inductance cinétique, C la capacité et R_n la résistance normale. Lors de la transition normale-supraconductrice, le terme L_k disparaît au profit de l'apparition de la résistance normale R_n . Plus R_n est élevé, meilleures sont les performances. La conception avait été faite avec du NbN ayant une résistance normale de 1000 $\mu\Omega$.cm. En 2014, Guillaume Bordier et Davide Camilleri [Bor14] ont poussé l'expérience plus loin en fabriquant et testant des échantillons de NbN avec des résistances normales allant jusqu'à 15000 $\mu\Omega$.cm pour des températures critiques supérieures à 5 K. Une vitesse de commutation supérieure à 0,5 μ s a aussi pu être confirmée. Dans le cadre de la collaboration BSD, des micro-ponts ont aussi pu être fabriqués et leur comportement radio-fréquence testé dans la bande 2 - 15 GHz. Les résultats obtenus ont confirmé :

- Une dynamique de l'isolation entre l'état ouvert et fermé supérieure à 23 dB.
- Une dépendance importante de la procédure d'étalonnage pour établir une mesure précise. En effet, seulement une correction de ligne simple avait été réalisée. Pour une future version, il sera intéressant de réaliser un banc d'étalonnage froid intégré au composant à tester. Ce banc pourra par exemple contenir 4 ports d'entrée et 4 ports de sortie pour permettre un étalonnage froid de type SOLT ou TRL (voir section 2).
- La nécessité d'ajouter une isolation entre la ligne qui polarise le pont et la structure radiofréquence. Cette séparation avait bien été prévue dans la conception de départ [Ghr09]. La ligne polarisatrice était séparée du Nb par une couche d'oxyde. Le contact avec le Nb ne se faisait ainsi qu'à l'endroit précis où la transition est voulue. L'ajout d'une capacité d'isolation DC, également prévue dans la conception de départ, permettrait aussi d'éviter de transiter d'autres parties du circuit RF supraconducteur ou d'en affecter les performances.

Les résultats obtenus sont très prometteurs et méritent d'être poussés plus loin dans le cadre de la continuité des activités de la collaboration BSD.

5.0.2 Déphaseur à inductance cinétique

La même structure géométrique décrite dans la section 5.0.1 peut agir très différemment d'un simple commutateur. Considérons pour cela la structure dont l'impédance est décrite dans l'équation 2.22. Pour cette structure la phase de l'onde traversant le micro-pont peut être exprimée par :

$$\phi = \omega l \sqrt{(L_g + L_k)C} \quad (2.24)$$

où l est la longueur du micro-pont, L_k l'inductance cinétique, L_g l'inductance géométrique et C la capacité. Dans ce cas et pour une ligne coplanaire, l'inductance cinétique peut être exprimée par :

$$L_k = \rho_g \mu_0 \lambda_L + \rho_c \mu_0 \frac{\lambda_L}{t} \left(1 + \frac{4I_c^2}{9I_c^2} \right) \quad (2.25)$$

où μ_0 est la perméabilité magnétique du vide, λ_L la profondeur de pénétration London, t l'épaisseur du supraconducteur et I_c le courant critique. ρ_g et ρ_c sont des facteurs liés aux contributions respectives du plan de masse et

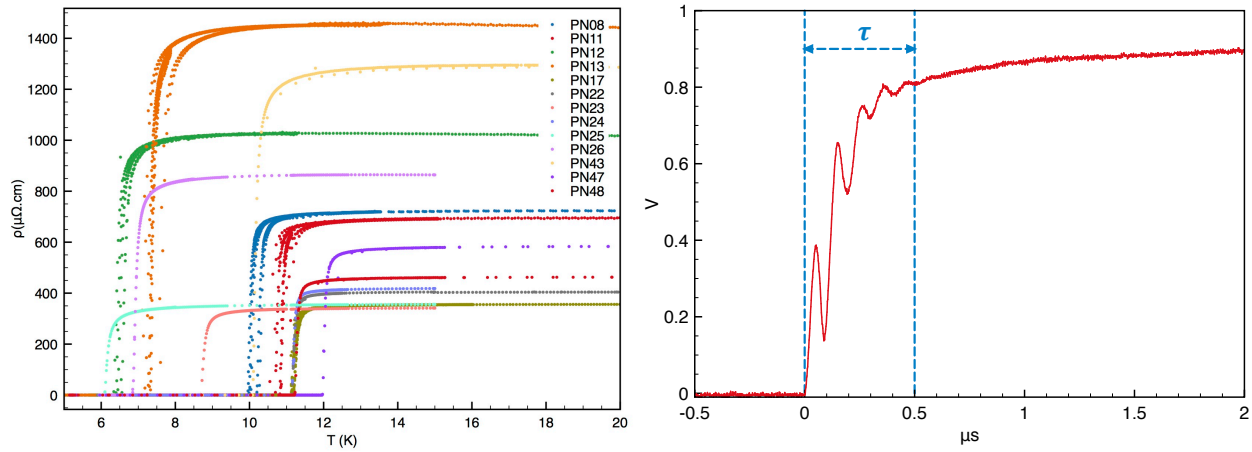


Figure 2.23 – A gauche, résultats de mesures 4 pointes de résistivité Van der Pauw. A droite : Mesure de la tension aux bornes du micro-pont montrant une constante de temps τ de 0,5 μs [Bor14].

du ruban central de la ligne coplanaire. Nous voyons donc à partir des équations 2.24 et 2.25 qu'une variation de courant traversant le micro-pont supraconducteur et qui ne dépasse pas le courant critique induit un déphasage :

$$\Delta\phi(I) = \omega l \sqrt{C} \left(\sqrt{L_g + \rho_g \mu_0 \lambda_L} - \sqrt{L_g + \rho_g \mu_0 \lambda_L + \rho_c \mu_0 \frac{\lambda_L}{t} \left(1 + \frac{4I^2}{9I_c^2} \right)} \right) \quad (2.26)$$

Afin d'induire une variation maximale de la phase en fonction du courant injecté, la variation de l'inductance cinétique doit dominer les autres termes de l'équation 2.26. Pour ceci, nous nous assurons d'abord que l'inductance géométrique est réduite en choisissant une géométrie de ligne adaptée. Nous nous assurons ensuite que l'inductance cinétique est importante en réduisant l'épaisseur du matériau supraconducteur utilisé en dessous de la profondeur de pénétration London. Notre choix s'est également porté sur le NbN pour l'application déphaseur et ceci pour deux raisons. La première est la compatibilité de son énergie de gap par rapport aux fréquences d'utilisation qui n'atteignent pas 700 GHz dans notre cas. La deuxième est la possibilité d'influencer le comportement du dispositif en variant la phase structurale, la température critique et les épaisseurs par des proportions adaptées de Niobium et Nitrure lors de la co-évaporation et ainsi maximiser l'inductance cinétique. Une variation de l'inductance cinétique induit néanmoins une variation de l'impédance caractéristique du micro-pont par rapport à l'impédance de la ligne. Cette désadaptation d'impédance peut être un réel frein dans la mise en pratique de ce principe. Une des méthodes pour arriver à nos fins est d'utiliser plusieurs micro-ponts en série induisant chacun une désadaptation d'impédance minimale au prix d'un déphasage individuel réduit. De cette manière, il est possible d'atteindre une variation de phase de 2π tout en maintenant une désadaptation d'impédance minimale.

5.0.3 Applications

Il existe plusieurs applications possibles pour le commutateur supraconducteur et le déphaseur à inductance cinétique. La modulation rapide du signal peut agir comme un étalonnage rapide à haute efficacité pour éliminer des effets de proximité ou de diaphonie ou pour moduler directement les canaux de polarisation. Une autre application potentielle est d'utiliser ces composants comme faisant partie intégrante d'un banc d'étalonnage cryogénique planaire à 2 ports. Les commutateurs permettraient, à la manière des kits d'étalonnage classiques des analyseurs vectoriels, de basculer entre différents circuits d'étalonnage cryogéniques.

Le déphaseur peut aussi être utilisé dans un grand nombre d'autres applications. Son incorporation dans un réseau d'antennes phasées permettrait de balayer le ciel avec une très haute efficacité et une rapidité seulement limitée par la variation de courant. Une autre application très intéressante est son utilisation comme longueur variable de bras d'un spectromètre à transformée de Fourier. Son utilisation serait précieuse à la fois pour la caractérisation spectrale de composants planaires et pour la spectroscopie ou la spectropolarimétrie millimétrique. Le potentiel de miniaturisation atteint alors un facteur 1000. Un schéma de principe de cette dernière application est représenté en figure 2.24.

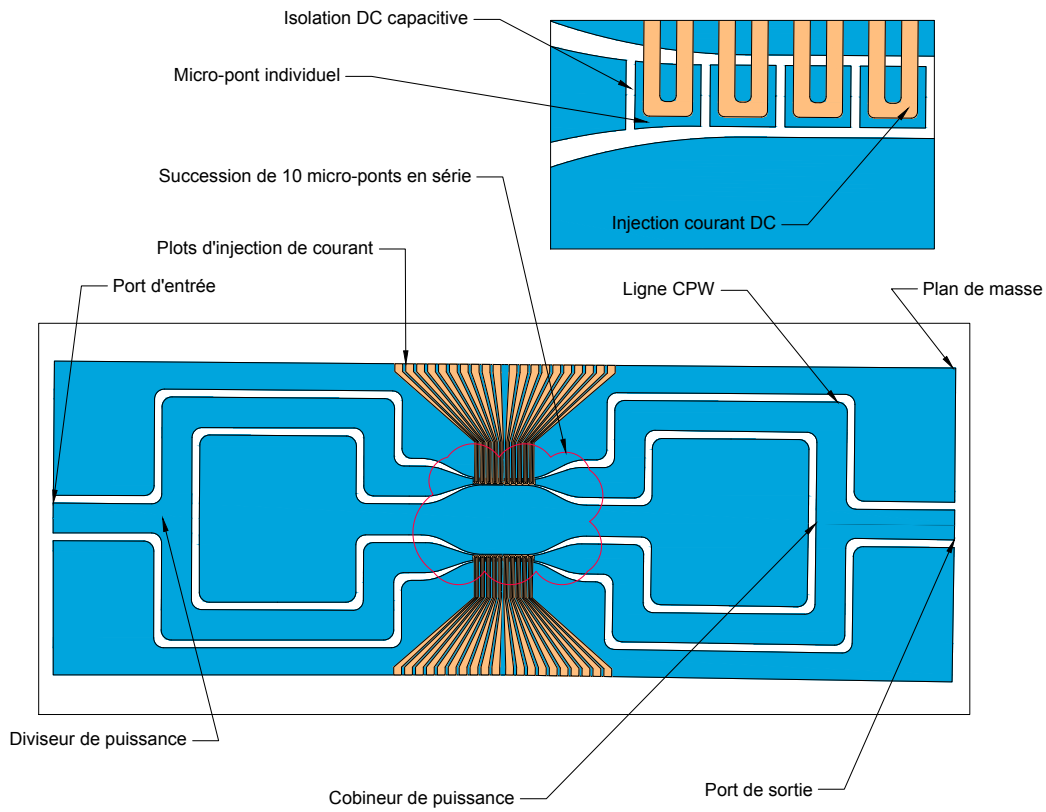


Figure 2.24 – Figure de concept d’un spectromètre à transformée de Fourier planaire utilisant 10 déphaseurs à inductance cinétique en série.

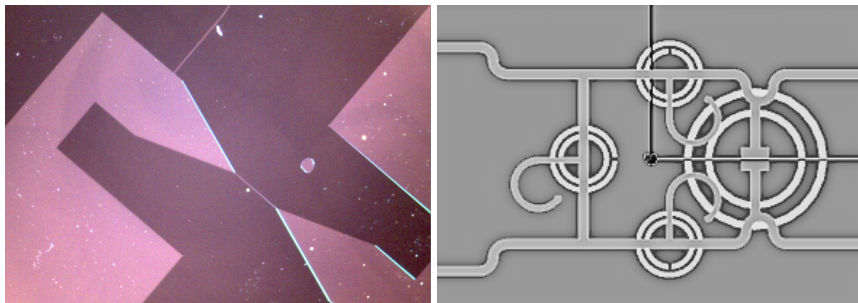


Figure 2.25 – A gauche : micro-pont supraconducteur fabriqué dans le cadre du projet BSD (crédit D. Camilleri). A droite : coupleur hybride à matériaux mains gauches fabriqué dans le cadre de la collaboration COSMOS (crédit A. Sidibé).

6 Participation aux programmes de R&D

A y regarder de plus près, les travaux de R&D concernant la technologie planaire supraconductrice pour l'étude du fond diffus cosmologique a commencé bien avant le lancement de Planck HFI en préparation de la prochaine génération d'instruments spatiaux pour la cosmologie. Le noyau des principaux contributeurs à l'instrument HFI a toujours été au centre de ces travaux de R&D. Le financement est quant à lui resté modeste mais stable. Il a permis à la communauté de s'organiser au niveau national et européen et d'apporter une pierre à l'édifice des compétences européennes pour ces technologies. Ce que l'on constate aussi est qu'il y a aujourd'hui une différenciation claire entre la R&D pour les détecteurs supraconducteurs ([TES](#), [KID](#), [LEKID](#)) et la R&D pour les technologies supraconductrices de couplage radio-fréquence. Néanmoins, si nous mettons en perspective la croissance du financement de ces technologies aux Etats Unis, au Japon ou encore en Chine, ces efforts restent insuffisants pour se placer de manière favorable dans le paysage des contributeurs aux technologies de détection pour une future mission spatiale dédiée à l'étude du [CMB](#).

6.1 DCMB

[DCMB](#)¹⁶ représente un consortium de différents laboratoires français¹⁷ impliqués dans l'effort national pour développer les compétences nécessaires à la fabrications des matrices de détecteurs fonctionnant aux basses températures. Cette collaboration s'est fortement développée à partir de 2001 et jusque 2008 avec des financements principalement issus du CNRS (programme AstroParticule), du CNES (programme R&T pour la préparation des missions spatiales) et des universités. Plusieurs technologies y étaient étudiées comprenant les matrices de [TES](#), l'électronique de lecture et de multiplexage froide, et les technologies de couplage optique. Les matrices actuelles de QUBIC sont en partie le résultat de cette R&D.

6.2 COS2

[COS2](#)¹⁸ est un projet financé par l'[Agence Nationale de la Recherche \(ANR\)](#) à hauteur de 150 k€ entre 2007 et 2010. Ce projet était centré sur les composants planaires supraconducteurs pour la cosmologie. Il a pris le relais de la collaboration [DCMB](#) en ce qui concerne les composants radio-fréquences.

6.3 BSD

[BSD](#)¹⁹ est un projet financé par l'[ANR](#) à partir de 2011 et dont les travaux se sont poursuivis jusque fin 2013. Il regroupait les laboratoires APC, CSNSM, IAS, IEF, IRAP, LERMA et L2E. Ce projet a financé le développement de composants planaires supraconducteurs comme les antennes planaires, les détecteurs [LEKID](#) ou le micro-pont supraconducteurs (voir figure 2.25) à hauteur de 70 k€. Il a en outre permis de former un consortium centré sur ces thématiques et qui s'est poursuivi bien après la fin du financement.

6.4 COSMOS

[COSMOS](#)²⁰ est un projet financé par l'[ANR](#) entre 2012 et 2015 à hauteur de 190 k€. Il regroupait les laboratoires APC, IEF et IAS. Ce projet exploratoire avait pour but d'investiguer le potentiel des métamatériaux dits "mains gauches" dans le spectre millimétrique et en technologie planaire supraconductrice pour des applications astrophysiques. Un des résultats a été la production d'un coupleur hybride supraconducteur planaire basé sur les anneaux résonnants²¹ (voir figure 2.25)[Sid+14].

6.5 ESA AO/1-7393/12/NL/MH

Il s'agit ici de la réponse en 2013 à l'invitation à proposition de l'[ESA](#) sur la thématique "Concepts de couplage pour la prochaine génération de plans focaux sub-millimétriques". Cette réponse a été dirigée par l'université de Maynooth (Irlande) en collaboration avec l'université de Manchester (GB), l'université de Charlmers (Suède), l'université La Sapienza (Italie), et le laboratoire APC (France). Cette réponse a été organisée en plusieurs tâches :

1. Revue des critères requis pour la mesure des modes B de polarisation du fond diffus cosmologique.

16. Développement Concerté de Matrices de Bolomètres (DCMB)

17. CRTBR/LAOG, LPSC, LPN, CSNSM, IEF, IAS, APC, LISIF, CESR

18. Superconducting COmponents for Cosmic microwave background ObservationS (COS2)

19. BSD

20. COmposantS millimétriques Main gauche pour la détection des Ondes gravitationnelles primordialesS (COSMOS)

21. Split RingResonators

2. Revue des critères requis pour la conception de l'optique du télescope.
3. Revue et comparaison des concepts d'architecture de plans focaux pour les futures missions spatiales dédiées aux modes B.
4. Compromis et choix de concept de technologie de couplage de plans focaux.
5. Conception et analyse détaillée d'un démonstrateur de couplage de plan focal.
6. Fabrication du démonstrateur de couplage de plan focal.
7. Test du démonstrateur de couplage de plan focal.
8. Recommandations pour les futures technologies de couplages de plan focal.

Ce projet a été financé à hauteur de 400 k€ entre 2013 et 2015. Ma participation a concerné les tâches 3, 4 et 5. C'est dans ce cadre que les travaux concernant les lentilles planes, les revêtements anti-réfectifs structurés ou les antennes sinus améliorées ont été effectués.

7 Publication choisie

Multi-chroic dual-polarization bolometric detectors for studies of the Cosmic Microwave Background

Aritoki Suzuki^a, Kam Arnold^a, Jennifer Edwards^b, Greg Engargiola^c, Adnan Ghribi^a, William Holzapfel^a, Adrian T. Lee^{a,d}, Xiao Fan Meng^e, Michael J. Myers^a, Roger O'Brient^f, Erin Quealy^a, Gabriel Rebeiz^b, Paul Richards^a, Darin Rosen^a, Praween Siritanasak^g

^aUniversity of California, Berkeley, Physics, Berkeley, CA 94720 USA;

^bUniversity of California, San Diego, Electrical and Computer Engineering, La Jolla, CA 92092 USA;

^cLawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA 94720 USA;

^dUniversity of California Berkeley, Radio Astronomy, Berkeley, CA 94720 USA;

^eUniversity of California Berkeley, Electrical Engineering, Berkeley, CA 94720 USA;

^fCalifornia Institute of Technology, Physics, Pasadena, CA 91125 USA;

^gUniversity of California, San Diego, Physics, La Jolla, CA 92092 USA

ABSTRACT

We are developing multi-chroic antenna-coupled TES detectors for CMB polarimetry. Multi-chroic detectors increase the mapping speed per focal plane area and provide greater discrimination of polarized galactic foregrounds with no increase in weight or cryogenic cost. In each pixel, a silicon lens-coupled dual polarized sinuous antenna collects light over a two-octave frequency band. The antenna couples the broadband millimeter wave signal into microstrip transmission lines, and on-chip filter banks split the broadband signal into several frequency bands. Separate TES bolometers detect the power in each frequency band and linear polarization. We will describe the design and performance of these devices and present optical data taken with prototype pixels. Our measurements show beams with percent level ellipticity, percent level cross-polarization leakage, and partitioned bands using banks of 2, 3, and 7 filters. We will also describe the development of broadband anti-reflection coatings for the high dielectric constant lens. The broadband anti-reflection coating has approximately 100% bandwidth and no detectable loss at cryogenic temperature. Finally, we will describe an upgrade for the POLARBEAR CMB experiment and installation for the LiteBIRD CMB satellite experiment both of which have focal planes with kilo-pixel of these detectors to achieve unprecedented mapping speed.

Keywords: CMB, Polarization, B-Mode, Broadband, TES Bolometer, Sinuous Antenna, Microstrip Filter, Anti-Reflection Coating

1. INTRODUCTION

Characterization of the Cosmic Microwave Background (CMB) B-mode polarization signal will test models of inflationary cosmology, as well as constrain the sum of the neutrino masses and other cosmological parameters. The low intensity of the B-mode signal combined with the need to remove polarized galactic foregrounds requires an extremely sensitive millimeter receiver and effective methods of foreground removal. Current bolometric detector technology is reaching the limit set by the CMB photon noise. Thus, we need to increase the optical throughput to increase an experiment's sensitivity. To increase the throughput without increasing the focal plane size, we can increase the frequency coverage of each pixel. Increased frequency coverage per pixel has additional advantage that we can split the signal into frequency bands to obtain spectral information. The detection of multiple frequency bands allows for removal of the polarized foreground emission from synchrotron radiation and thermal dust emission, by utilizing its spectral dependence. Traditionally, spectral information has been captured with a multi-chroic *focal plane* consisting of a heterogeneous mix of single-color pixels. To maximize the efficiency of the focal plane area, we developed a multi-chroic *pixel*. This increases the number of pixels per

Author Information: Aritoki Suzuki, e-mail: asuzuki@berkeley.edu, telephone: +1(510)642-7801

Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy VI,
 edited by Wayne S. Holland, Jonas Zmuidzinas, Proc. of SPIE Vol. 8452,
 84523H © 2012 SPIE · CCC code: 0277-786X/12/\$18 · doi: 10.1117/12.924869

Proc. of SPIE Vol. 8452 84523H-1

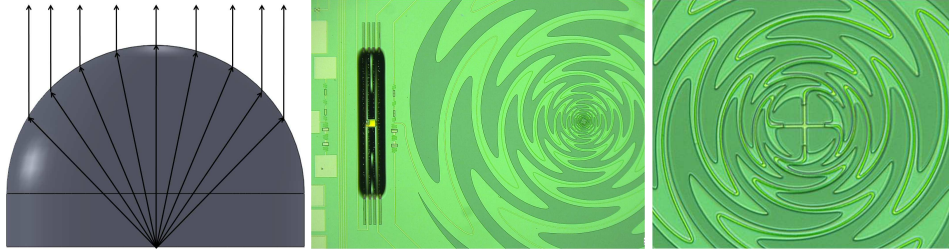


Figure 1. (Left) side view of the silicon hemisphere lens with spacer. Spacer height is $0.38 \times$ hemisphere's radius to place the antenna at the elliptical point. Rays drawn are schematic drawing. (Center) photograph of the lumped diplexer pixel. The antenna is $1500 \mu\text{m}$ radius sinuous antenna. The black rectangular structure is the released TES bolometer. A lumped diplexer is between the antenna and the TES bolometer. (Right) Close-up of the center of the sinuous antenna. Crossed line is the microstrip line. Two lines from orthogonal polarization crosses on the same layer.

frequency, at no extra cost per focal plane area, weight and cryogenic cost. For earlier development of this work, please refer to O'Brien *et al.*¹

In section 2, we discuss the design and fabrication of the multi-chroic pixel. In section 3, we describe the test setup. In section 4, results are presented. We show our development in broadband anti-reflection (AR) coating in section 5. Finally, we conclude in section 6 with fabrication of arrays of multi-chroic detectors and plans for implementing these multi-chroic detector arrays in next-generation CMB experiments.

2. PIXEL DESIGN

Figure 1 shows our prototype pixel. We used an AR coated silicon hemisphere with a silicon extension to form a synthesized elliptical lens to increase the gain of the antenna^{2,3} (Figure 1, left). The AR coating was a thermoformed Ultem1000 plastic shell epoxied on the silicon lens. The choice of the extension length of the synthesized lens is a compromise between the pixel's directivity and gaussianity of the beam. We chose the extension length for the elliptical point ($0.38 \times$ radius) to maximize directivity. The silicon half-space also increases front-to-back ratio to approximately 10:1 due to its high dielectric constant, and it makes the antenna more efficient.

For the antenna, we used a sinuous antenna. The sinuous antenna is a broadband antenna that has log-periodic and self-complementary structure and provides a stable input impedance over a wide frequency range.⁴ Its self-complementarity is broken by the presence of the silicon half-space, but its impedance stays stable enough that antenna's reflection coefficient to an optimized constant real impedance transmission line stays below -10dB over its range.² The sinuous antenna is favored over other log-periodic antennas for its sensitivity to linear polarizations. It also has a small polarization axis rotation as a function of frequency.² We want to keep the logarithmic expansion coefficient, frequency of repetitive structure, (τ) as close to unity as possible to keep the impedance fluctuation and polarization axis rotation as small as possible. A smaller expansion coefficient requires a smaller antenna and microstrip features. We chose $\tau = 1.3$ given micro-fabrication limitations. We chose the inner and outer radii of the antenna to be $15 \mu\text{m}$ and $1500 \mu\text{m}$ respectively. With an expansion factor of 1.3, the $1500 \mu\text{m}$ radius fits 16 repetitions (*cells*) of the antenna. A four-arm, self-complementarity sinuous antenna on silicon radiates at $360 \mu\text{m}$ radius for 70 GHz, the lowest frequency we use. From the results of 3D EM simulation with HFSS, we found out that a larger outer radius was required to obtain stable input impedance and round beam shape at our operating frequencies (Figure 2). This result was also observed experimentally by testing samples with antennas of different sizes. We will show results from a distributed diplexer, a distributed triplexer and a channelizer, which had a sinuous antenna with a radius of $540 \mu\text{m}$. These result demonstrate the multiplexing technique. We will then show the beam performance of an antenna with a $1500 \mu\text{m}$ radius using a lumped diplexer.

Power from the antenna is coupled to microstrip lines to allow RF frequency-selection with on-chip filters prior to detection at the bolometers. The metalized *arms* of the sinuous antenna are used as the ground plane of

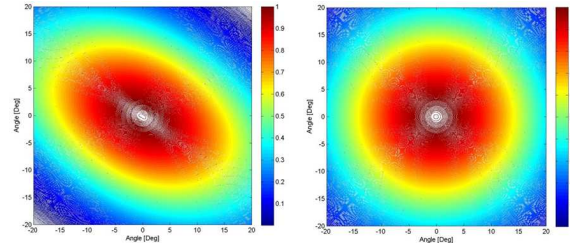


Figure 2. Simulated beam at 80 GHz with a 540 μm radius sinuous antenna (left) and a 1500 μm radius sinuous antenna (right). The simulation was performed with the 3D EM software HFSS. Due to a long required computational time, the lens size was reduced to 6.35 mm diameter.

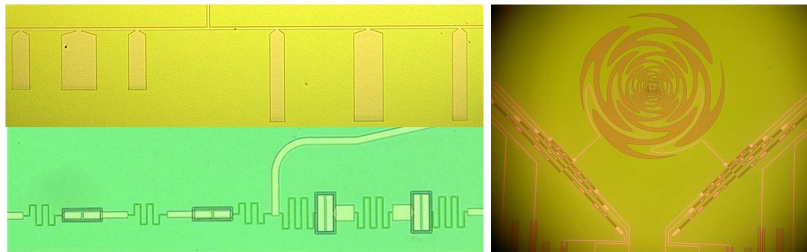


Figure 3. (Left top) photograph of a distributed diplexer. Stubs are shorted to the ground plane at the ends. A distributed triplexer has similar appearance except there is one more filter branch attached to the junction. (Left bottom) photograph of the lumped diplexer. The meander structure is the inductor created from a narrow ($2\ \mu\text{m}$) microstrip line. The rectangular structures are capacitors. (Right) photograph of the channelizer filter attached to a 540 μm radius sinuous antenna. The spiral structure is the sinuous antenna, and each leg of the V-shaped structure is the channelizer filter for one of the linear polarizations.

the microstrip line so that we can bring microstrip line to the center of the antenna without interfering with the antenna. This scheme allows a planar design, and this allows large array fabrication with lithography technique. To simplify the fabrication process, microstrip lines for orthogonal polarizations cross at the center on the same layer (Figure 1, right). They do not couple to each other since odd-mode excitation of the antenna creates a virtual short at the intersection.

For the multiplexing method, we explored four schemes of partitioning: distributed diplexers, distributed triplexers, lumped element diplexers and channelizers with seven frequency bands (Figure 3). Both the diplexer and triplexer were developed with terrestrial observations in mind. We strategically placed bands between atmospheric emission lines to avoid detecting photons from the hot atmosphere. Both the distributed element filter and lumped element filter designs were based on a 0.5 dB ripple three-pole Chebyshev band pass filter, as a compromise between loss due to the filter elements and roll-off speed.⁵ The quarter-wavelength stub filter consists of three stubs of shorted $\lambda/4$ lines separated by $\lambda/4$ lengths of microstrip lines. For a lumped filter design, we designed an inductor with short lengths of narrowed ($2\ \mu\text{m}$) microstrip line. For a capacitor, we designed a parallel plate capacitor with two layers of niobium separated by silicon dioxide. For calculating the required values of inductor and capacitor, we followed O'Brien *et al.*^{6,7} Filters for each frequency were independently optimized using the Sonnet EM 2.5 dimension simulation package. The effect of superconducting kinetic inductance was accounted for using a surface impedance of $0.11\ \text{pH}/\text{sq}$.⁸ The distances between the microstrip junction and each filter were adjusted until -20 dB isolation between frequency bands was obtained.

The channelizer was designed with a satellite mission in mind, where atmospheric lines are not a problem. Therefore, optimal performance is obtained by partitioning bands that are adjacent to each other. In the channelizer, lumped band pass filters are spaced in a log-periodic frequency schedule, and attached to the transmission

Material	Thickness [μm]	Deposition	Etch
Silicon	500	test-grade 6in.	XeF ₂
Silicon Dioxide	0.05	thermal growth	CF ₄ RIE
Low Stress Nitride	0.7	LPCVD	CF ₄ RIE
Niobium	0.3	DC Mag. Sputter	CF ₄ /O ₂ RIE
Silicon Dioxide	0.5	350°C PECVD	CHF ₃ /O ₂ RIE
Niobium	0.3	DC Mag. Sputter	CF ₄ /O ₂ RIE
Silicon Dioxide	0.2	350°C PECVD	CHF ₃ /O ₂ RIE
Niobium	0.3	DC Mag. Sputter	CF ₄ /O ₂ RIE
Al/Ti Bilayer	0.04/0.08	DC Mag. Sputter	Pre-mixed Wet Etch/SF ₆ RIE
Gold	1.5	Evaporation.	Photo.Res. Lift-off

Table 1. Summary fabricated device layers and fabrication processes. The layers are in the order of preparation.

line from high to low frequency. Within the filter's resonant band pass, the signal is transmitted through the filter to its associated bolometer, while other frequencies continue on the main transmission line. Galbraith and Rebeiz realized a three-pole channelizer at lower frequencies using surface mount lumped components.⁹ We adapted this design to thin film fabrication.⁶ We made a seven channel channelizer to cover the 70 to 220 GHz range.

The signals are detected by superconducting Transition Edge Sensor (TES) bolometers. Microstrip lines from the antenna are terminated by a 20 Ω resistor made of aluminum-titanium bilayer. We made a dual-transition TES with 1 Ω aluminum-titanium bilayer and 10 Ω aluminum in series. We used the same metal layer for the termination resistor and the TES thermistor to simplify fabrication. The superconducting transition temperature of the aluminum-titanium bilayer was tuned to be around 0.5 Kelvin by changing the thickness of the titanium. Aluminum's superconducting transition is assumed to be 1.2 Kelvin. This difference in T_c allows us to operate the TES bolometer over two orders of magnitude difference in receiving power, such that we can use aluminum-titanium transition for CMB observations while the aluminum transition is used in lab tests. Between the termination resistor and TES, we left layers of aluminum-titanium as well as a 1.5 thick micron gold. This provides additional heat capacity, allowing detector time constants to be tuned to match the readout bandwidth. The bolometer structure is supported on four 0.8 micron thick and about five hundred micron long nitride legs to provide thermal isolation from the rest of the chip. A summary of the layers of the device and the fabrication processes is shown in Table 1.

3. TEST SETUP

We tested the prototype pixel in an 8 inch IR Labs dewar. We modified the dewar by adding a 4 inch diameter optical window made from Zotefoam. For infrared filters, two layers of 0.125 inch thick expanded teflon and a metal mesh low pass filter with 18cm^{-1} cut off are anchored to a liquid nitrogen temperature. Two metal mesh low pass filters with cut off at 14cm^{-1} and 12cm^{-1} are mounted at liquid helium buffer to further reduce the optical loading. The pixel stage is isolated from the liquid helium buffer with thin walled vespel tubes. The stage is cooled to 0.25 Kelvin with homemade 3He adsorption fridge. We mounted the test pixel behind the 14mm diameter hemispherical silicon lens with 2mm thick flat silicon spacer. The test pixel was fabricated on top of 0.675 mm thick silicon, thus combination of spacer and the test pixel locate the antenna right at the elliptical focus. The TES bolometer is DC voltage biased with 0.02 Ω of shunt resistor in parallel with the bolometer. Current through the bolometer is read out by commercially available laboratory DC SQUID from Quantum Design with its input inductor coil in series with the bolometer.

We produced beam maps of the pixel by scanning 0.25 inch diameter temperature modulated source (liquid nitrogen soaked eccosorb and room temperature eccosorb) 10 inches away from the antenna. We scanned 3 inch \times 3 inch patch with step size of 0.125 inch on motorized XY stage. We measured the response of the pixel to a linear polarized source by rotating wire grid polarizer between the pixel and the temperature modulated source. We measured spectra of the device using Michaelson Fourier transform spectrometer (FTS). The FTS uses temperature modulated source with 1200 Kelvin ceramic heater and 300 K eccosorb. Mirrors are 6 inch

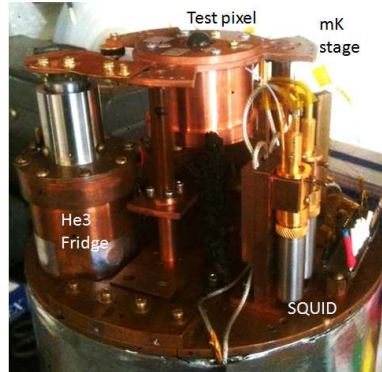


Figure 4. Photograph of the milli-kelvin stage of the IR Labs dewar. Homemade ^3He fridge sit on the left side of the dewar. Milli-Kelvin stage is isolated from 4 Kelvin plate by thin vespel leg approximately 2 inch long and 0.010 inch thick. Silicon lens of the test pixel is visible at the center of milli-kelvin stage. Quantum Design DC SQUID readout was used to read out TES bolometer, that is visible on the right.

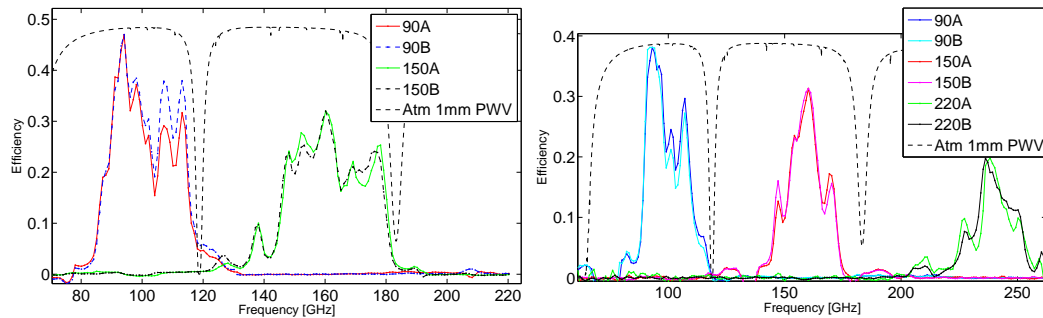


Figure 5. Spectrum of a distributed diplexer (left) and a distributed triplexer (right). *A* and *B* refers to two orthogonal linear polarization channels. Peaks are normalized to the measured optical efficiency. See Table 2 for details. Dotted black lines are expected transmission through 1mm PWV of atmosphere.

by 6 inch large in cross-section. Beam splitter was 0.010 inch thick mylar that has a beam splitter minima at 360 GHz. We focused the output of the FTS onto the pixel using ultra high molecular weight polyethylene lens. The efficiency of the device was measured with beam filling temperature modulated source. For a single moded antenna detector, the power difference between two temperature source is $k_B \Delta T \Delta \nu$ in the Rayleigh-Jean limit. Here k_B is the boltzmann constant, ΔT is the difference in temperature of modulated source. We used liquid nitrogen soaked eccosorb and room temperature eccosorb for $\Delta T = 223$ Kelvin. $\Delta \nu$ is the integrated bandwidth of the peak normalized spectrum measured with FTS. We divide power received on detector with $k_B \Delta T \Delta \nu$ to measure an end-to-end efficiency which includes dewar loss.

4. RESULTS

The results from lab measurements are summarized in Table 2. To analyze the spectra, the interferogram from the FTS was apodized with triangular window function prior to the Fourier transformation. Then the spectrum was divided by analytical beam splitter function to remove its effect. The resulting spectra from distributed diplexer and distributed triplexer are shown in Figure 5, and the spectra from lumped filter diplexer and channelizer are shown in Figure 6. Peaks of the spectra were normalized to a measured optical efficiency of each band. The results show that we successfully partitioned a broadband signal into 2, 3 and 7 bands with matching band shape

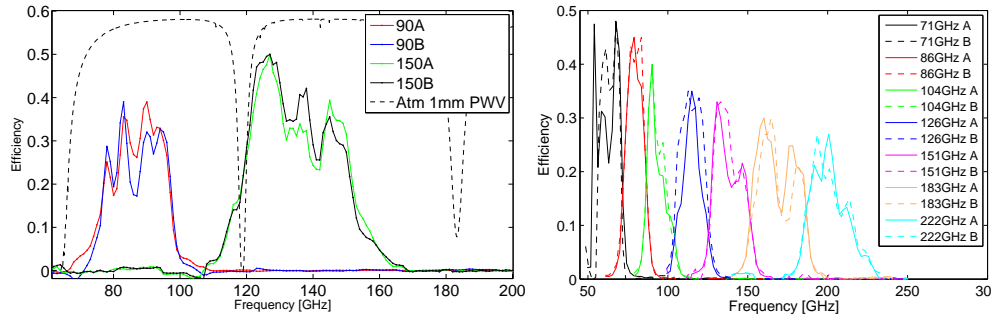


Figure 6. Spectrum of a lumped diplexer (left) and a channelizer (right). *A* and *B* refers to two orthogonal linear polarization channels. Peaks are normalized to measured optical efficiency. See Table 2 for details. Dotted black lines are expected transmission through 1mm PWV of atmosphere.

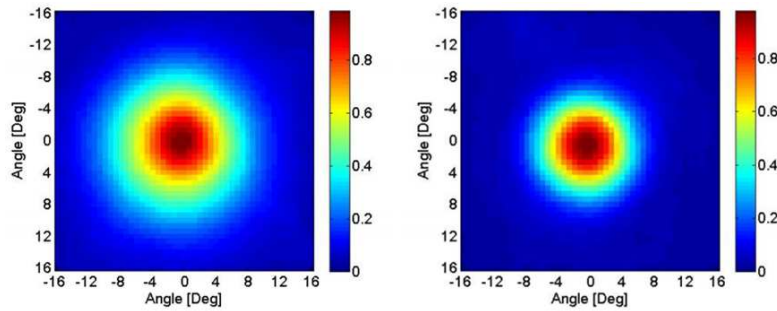


Figure 7. Beam map measurement from a lumped diplexer. Plots were peak normalized. Lumped diplexer was the only test structure that was attached to large (1500 μm radius) sinuous antenna. Ellipticity was calculated by fitting an ellipse on the -3 dB contour and used the definition $\epsilon = (a - b)/(a + b)$, where *a* and *b* are the major and the minor axes. Ellipticities were 1.1% and 1.3% for 90GHz and 150GHz band respectively.

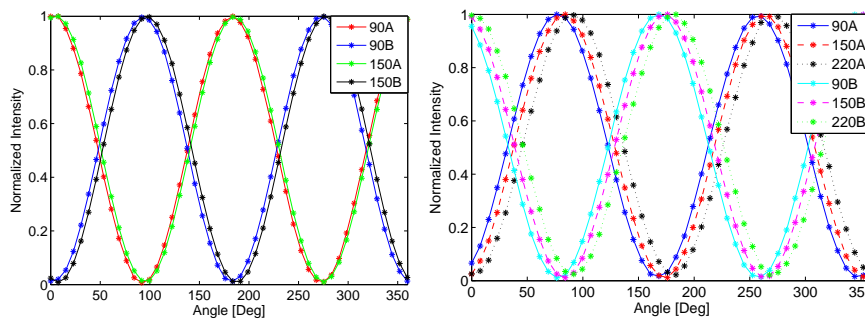


Figure 8. Responses of the lumped diplexer (left) and distributed triplexer (right) to a linearly polarized source as a function of relative angle between antenna and the polarizer. Plots were peak normalized prior to fitting by sum of a sine function and a constant. Cross-pol for each channels are summarized in Table 2.

Filter Type	Ant rad [μm]	ν_0 [GHz]	$\Delta\nu$ [GHz]	Opt Eff	Ellipticity	Cross-pol
Lumped Diplexer Low	1500	87	17.0	39%	1.1%	< 0.3%
Lumped Diplexer Mid	1500	135	26.4	50%	1.3%	< 1.6%
Stub Diplexer Low	540	101	20.2	47%	4.9%	< 2.3%
Stub Diplexer Mid	540	162	26.2	32%	1.0%	< 1.6%
Stub Triplexer Low	540	100	16.6	38%	3.0%	< 2.5%
Stub Trilexer Mid	540	158	17.7	31%	1.5%	< 2.1%
Stub Trilexer High	540	239	19.6	20%	4.0%	< 4.3%

Table 2. Summary from one of the polarizations of each diplexer and triplexer. ν_0 is the center frequency of the band and $\Delta\nu$ is integrated bandwidth. Cross-pol values are upper limit value as we expect leakage from wire-grid

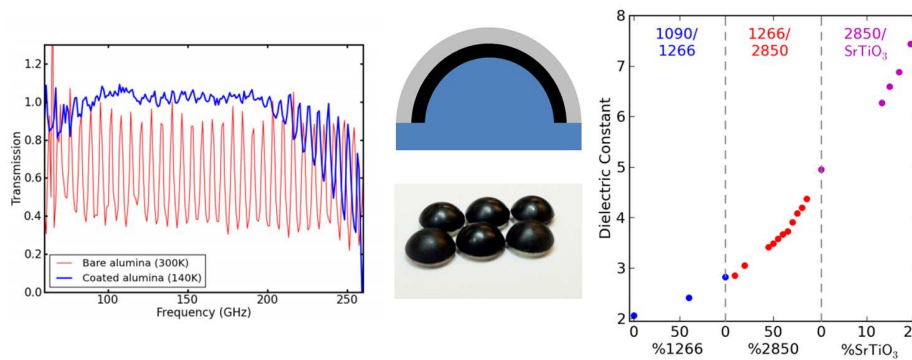


Figure 9. (Left) Transmission of 2-layer AR coated alumina (blue) and uncoated alumina sample (red) measured with an FTS. Fabry-Perot fringes disappears over 70% of bandwidth for the AR coated sample. (Center top) Cut-away drawing showing how two layer coatings are applied. For a silicon lens, the inner layer (black) would be Stycast 2850FT ($\epsilon = 4.95$) and outer layer would be Stycast 1090 ($\epsilon = 2.05$). (Center bottom) alumina lens coated with 2-layers of AR coating. Inner layer is Stycast 2850FT and the outer layer is Stycast 1090. (Right) Plot of measured dielectric constant of the material and various epoxy and filler mix. Left region is a mix of S 1090 and Stycast 1266, center region is a mix of Stycast 1266 and Stycast 2850FT and right section is the mix of Stycast 2850FT and SrTiO_3 powder. Percentage on the x-axis is the percentage of mass of second material in the mix.

for orthogonal polarizations. We did not know the material properties ahead of the test pixel fabrication to get the band location correct. The POLARBEAR CMB experiment successfully tuned their band location of the filters by making correction to the filter design with feedback from lab measurements.⁵ Our filter can be tuned in the same way in future fabrications.

The beam maps from a lumped diplexer pixel with a 1500 μm radius sinuous antenna are shown in Figure 7. We characterize the beam property by fitting ellipse at -3 dB contour and define ellipticity as $\epsilon = (a - b)/(a + b)$, where a and b are the major and the minor axes of the ellipse, respectively. Ellipticity from large antenna is 1.1% and 1.3% for 90 GHz and 150 GHz band respectively. At this level, we were limited by measurement systematics. Comparing 1500 μm radius antenna measurements with the 540 μm radius antenna, we clearly see the improvement in beam ellipticity for the large antenna at low frequencies, as predicted from 3D EM simulation.

Polarization measurement results are shown in Figure 8 and tabulated at Table 2. We expect the wiregrid to have approximately 1% leakage, thus we are limited by systematics for low cross-pol measurement. We also see that polarization performance for the lower frequency improves with the larger antenna.

5. ANTI-REFLECTION COATING

One of the optical challenges of building a multi-chroic system is the production of broadband anti-reflection (AR) coatings. Since our pixel uses silicon lens that has a high dielectric constant ($\epsilon = 11.7$) there would be a 30% reflection without an AR coating. Also in the future CMB experiments such as POLARBEAR-2, reimaging lenses will be fabricated from alumina which also has a high dielectric constant $\epsilon = 9.6$. Solving the broadband AR coating issue is one of the keys to make the multi-chroic technology viable.

The bandwidth of the coating increases with the number of correctly tuned layers, but absorptive loss will also increase. Thus we want to keep the number of layers as low as possible and still provide enough bandwidth. The coating must stay on the lens at cryogenic temperatures. For millimeter wave application, the thickness of the AR coating will be order 100 μm . Thus it is too thin to easily machine and too thick for vapor deposition. We would also like to be able to tune the dielectric constant of the coating to obtain optimal coating performance.

We calculated that a 2-layer coating with dielectric constants of 2 and 5 with thicknesses of one-quarter wavelength at the center frequency will give sufficient bandwidth to cover 90 GHz and 150 GHz bands. To cover 90,150 and 220 GHz bands simultaneously, we need a 3-layer coating with dielectric constants of 2,4, and 7 with thickness of a quarter of wavelength at the center frequency. We chose to use mixtures of various types of epoxies (Stycast 1090, Stycast 1266, Stycast 2850FT) and filler (SrTiO_3) which can be molded into appropriate AR coating layers.

First we measured the dielectric constant of the materials using the FTS. The Stycast 1090, Stycast 1266 and Stycast 2850FT have dielectric constants of 2.05, 2.60 and 4.95 respectively. We also successfully obtained epoxy with an intermediate dielectric constant by mixing two types of epoxy as shown in Figure 9. To get dielectric constant higher than 4.95, we mixed Stycast 2850FT with SrTiO_3 filler which was shown to have a high dielectric constant.¹⁰ We were able to fabricate materials with a dielectric constant as high as 7.5.

To test the multi-layer AR coating, we applied two layers of coating made from Stycast 1090 and Stycast 2850FT on flat 2 inch alumina sample which has a dielectric constant of 9.6. We then cooled the sample to 140 Kelvin using liquid nitrogen and measured transmission using the FTS. As shown in Figure 9, uncoated alumina shows high Fabry-Perot fringes due to high reflection whereas coated sample has high transmittance over a wide band. We are currently preparing 3-layer coatings in similar way to demonstrate even wider bandwidth.

To make a sufficiently precise coating on a lens, we designed a mold that leaves a thin gap between lens and mold. The cavity was made using a precision machined ball-ended mill which has 0.0005 inch tolerance. Combined with machining tolerance, we were able to create coatings with a tolerance of 0.001 inch, which is approximately 10% of the thickness of the layer. We filled the cavity with the appropriate amount of epoxy measured by its weight. Then we inserted the lens in a mold that keeps its concentricity and accurate depth. Epoxy cures in a few hours in a 100°C oven. We repeated the process with molds with different spacings.

To test its cryogenic adhesion property, we made twelve 2-layer coated lenses as shown in Figure 9. We kept one sample as a control, nine samples were slowly cooled to liquid nitrogen temperature in a 6 inch IR Labs dewar. Two additional samples were rapidly thermal cycled between room temperature and liquid nitrogen temperature until failure. Failure for those samples occurred after 18 and 50 dunks. Nine samples went through ten slow thermal cycles in the dewar and all survived. These nine samples were then dunked 18 times in liquid nitrogen, bringing them back up to room temperature each time, and all survived. There was no change to the control sample that was kept at room temperature. We conclude that the adhesion of the coating is good enough for our applications given the results of this testing.

6. CONCLUSION

To bring the proto-type multi-chroic pixels closer to readiness for future CMB experiments, we fabricated the arrays of multi-chroic detectors shown in Figure 10. We fabricated these on 6-inch wafers. The larger array has a side-to-side length of 13cm, containing 271 pixels. The smaller array has a side-to-side length of 8cm, with 91 pixels. Each pixel uses a dual-polarized diplexer (90 GHz and 150 GHz bands) with a 1500 μm radius sinuous antenna. The next generation CMB B-mode experiments such as POLARBEAR-2 and LiteBIRD are planning to use these multi-chroic detectors to increase their mapping speed. CAD drawings of the proposed focal planes

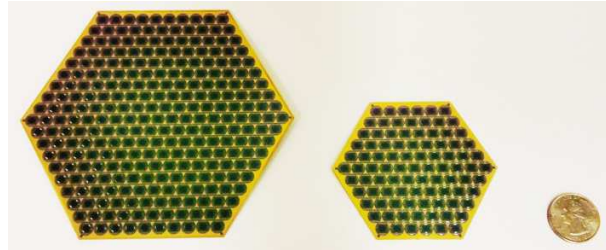


Figure 10. Photograph of the fabricated detector arrays and US 25 cent coin for size comparison. Larger hexagonal array is 13 cm across and it has 271 pixels. Smaller hexagonal array is 8 cm across and it has 91 pixels. Both wafers has lumped diplexer (90 GHz and 150 GHz) with $1500 \mu\text{m}$ radius sinuous antenna.



Figure 11. CAD drawing of the proposed POLARBEAR-2 focal plane (left) and LiteBIRD focal plane (right). POLARBEAR-2 focal plane mounts seven hexagonal wafers with lumped diplexer with total of 7588 bolometers. LiteBIRD focal plane uses two types of detectors. There will be eight low frequency wafers with larger lenses and five high frequency wafers near the center of the focal plane. LiteBIRD focal plane will have 2022 bolometers total.

for POLARBEAR-2 and LiteBIRD are shown in Figure 11. POLARBEAR-2 will use 7 of these 13 cm hexagonal arrays in its focal plane. The total number of bolometers will be 7588. POLARBEAR-2 will achieve an array noise equivalent temperature (NET) of $6 \mu\text{K}\sqrt{\text{s}}$. LiteBIRD, a compact satellite CMB B-mode experiment, is planning to use two types of triplexer pixel: low frequency pixels (60,78 and 100 GHz) and high frequency pixels (140, 190 and 280 GHz). The current design uses eight low frequency arrays and five high frequency arrays. There will be 2022 bolometers with an array NET of $1 \mu\text{K}\sqrt{\text{s}}$.

We have successfully demonstrated multi-chroic detection with single pixels. With correct design of the antenna, we produced a detector with a round beam and low cross-pol performance. We have also presented a solution for broadband AR coatings, and we have fabricated arrays of multi-chroic detectors which will be used in future CMB experiments.

ACKNOWLEDGMENTS

We acknowledge support from NASA through grant NNX10AC67G. Devices were fabricated at the Marvell Nanofabrication Laboratory at the University of California, Berkeley.

REFERENCES

- [1] O'Brient, R., Ade, P., Arnold, K., Edwards, J., Engargiola, G., Holzapfel, W., Lee, A. T., Meng, X., Myers, M., Quealy, E., Rebeiz, G., Richards, P., and Suzuki, A., "A dual-polarized multichroic antenna-coupled tes bolometer for terrestrial cmb polarimetry," *SPIE proceedings* (2010).
- [2] Edwards, J., O'Brient, R., Lee, A., and Rebeiz, G., "Dual polarized sinuous antennas on extended hemispherical silicon lenses," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions*, submitted (2011).

- [3] Filipovic, D., “Double-slot antennas on extended hemispherical and elliptical silicon dielectric lenses,” *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions* **41**(10), 1738–1749 (1993).
- [4] Duhamel, R., “Dual polarized sinuous antennas,” (1987). United States Patent 4658262.
- [5] Arnold, K., *Design and Deployment of the POLARBEAR Cosmic Microwave Background Polarization Experiment*, PhD thesis, University of California, Berkeley (2010).
- [6] O’Brient, R., *A Log Periodic Focal-Plane Architecture for Cosmic Microwave Background Polarimetry*, PhD thesis, University of California, Berkeley (2010).
- [7] Kumar, S., Vayonakis, A., LeDuc, H., Day, P., Golwala, S., and Zmuidzinas, J., “Millimeter-wave lumped element superconducting bandpassfilters for multi-color imaging,” *Applied Superconductivity, IEEE Transaction* **19**(3), 924–929 (2009).
- [8] Kerr, A., “Surface impedance of superconductors and normal conductors in em simulators,” tech. rep., ALMA (1999). <http://www.alma.nrao.edu/memos/>.
- [9] Galbraith, C. and Rebeiz, G., “Higher order cochlea-like channelizing filters,” *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions* **56**(7), 1675–1683 (2008).
- [10] Lee, S., Hyun, J., Kim, H., and Paik, K., “A study on dielectric constants of Epoxy/SrTiO₃ composite for embedded capacitor films (ecfs),” *Advanced Packaging, IEEE Transaction* **30**(3), 428–433 (2007).

Chapitre 3

La cryogénie au service des accélérateurs

When things get too heavy, Just call me Helium.

Jimmy Hendrix

Sommaire

1	Introduction	83
2	Résumé des participations aux projets et aux programmes de R&D	86
2.1	SPIRAL2	86
2.2	S3	87
2.3	NewGain	87
2.4	GRAAL	89
2.5	NGCryo	90
2.6	NGTACryo	91
2.7	EuroLabs	91
3	La cryogénie de SPIRAL2	92
3.1	Présentation du système	92
3.2	Un peu d'histoire : Mise en place et réception du système	95
3.3	Optimisation et opération du système	100
3.4	Investigation de la problématique de CM ^A ₁₁	109
3.5	Evolutions futures du système	111
3.6	La thermo-acoustique cryogénique de SPIRAL2	115
4	Publications choisies	116
4.1	Publication 1	116
4.2	Publication 2	127

1 Introduction

Faire une transition des thématiques des deux précédents chapitres à celle-ci n'est pas chose aisée. Dans les deux précédents chapitres, il s'agissait de guider quelques vieux photons, les manipuler, les filtrer, les détecter ; ceci en gardant en tête dans la conception, la mise en place ou l'analyse la cosmologie qui reste au coeur des préoccupations. Mais sous un autre angle, nous avons dans tous les cas une optique, des résonateurs opérés à des températures cryogéniques et une détection. Dans le cas d'un accélérateur d'ions lourds, nous avons aussi une optique, des structures résonnantes et de la détection. Seulement, ce ne sont plus des photons mais des ions lourds que nous guidons et accélérons. S'agissant de particules chargées, les aimants agissent comme des lentilles modifiant la perméabilité magnétique locale. Les structures accélératrices sont des résonateurs qui stockent l'énergie électromagnétique et la transmettent aux particules. La physique est opportuniste lorsqu'il s'agit d'outils puissants. La possibilité qu'offrent les supraconducteurs de stocker de grandes quantités d'énergie avec un minimum de dissipation thermique est donc ici la bienvenue. Mais ces supraconducteurs ont besoin d'être refroidis en dessous de leurs températures critiques pour être opérés. C'est ici que la cryogénie entre en scène. Seulement, il ne s'agit plus de quelques microwatts cryogéniques mais bien de kilowatts. Les fréquences d'opération sont aussi

très différentes. Là où nous avons des composants opérant dans les centaines GHz, les structures résonnantes des accélérateurs opèrent à des fréquences bien plus basses qui peuvent aller au GHz mais rarement au delà. Dans le cas de [SPIRAL2](#), la fréquence d'opération est de 88 MHz. Il y a donc bien aussi un facteur d'échelle important. Là où les composants pour la cosmologie étaient micrométriques, ceux pour les accélérateurs sont métriques. Les défis auxquels font face les accélérateurs sont donc très différents. Puissance et fiabilité prennent le devant. Pour opérer un accélérateur supraconducteur, une véritable usine "cryogénique" doit voir le jour. Une fois cette derrière mise sur pied, et ce n'est pas là une mince affaire, la physique reprend ses droits naturels sur la curiosité bien opportuniste d'un monde semi-industriel. Les problèmes de l'opération deviennent alors un amusement pour d'autres physiciens. Ces derniers s'empressent alors à trouver des solutions à d'autres problèmes qui ne sont pas encore là mais qui ne devraient pas tarder à pointer le bout de leur nez.

L'accélérateur SPIRAL2

Avant de continuer, faisons une halte sur les raisons qui poussent à autant d'efforts de développement pour les accélérateurs d'ions lourds et en particulier SPIRAL2. Nous avons bien vu que la cosmogonie, transmutée en cosmologie au début du 20ème siècle, émanait de ce besoin insatiable de comprendre le monde dans lequel nous évoluons, son origine, son évolution et pour essayer, en somme, autant que cela puisse être possible, de nous connaître nous-mêmes. Cette motivation primaire reste ici inchangée, au facteur d'échelle près. Précédemment, nous abordions des sujets qui concernent les grandes échelles angulaires de l'Univers observable. Notre laboratoire était à la fois cette soupe de particules primaires et les potentiels dans lesquels ces derniers baignaient, tout cela manifesté dans le fond diffus cosmologique tel qu'il est observable aujourd'hui. Cette fois, nos deux laboratoires sont l'atome et le noyau. Il s'agit bien là de laboratoires traitant de sujets aussi importants et vastes que ceux abordés précédemment. Citons par exemple notre connaissance, hélas encore bien limitée, des forces qui maintiennent les protons et les neutrons ensemble dans les noyaux. Lorsque ces noyaux interagissent les uns avec les autres, nous recréons des laboratoires éphémères très particuliers où la modification de la structure nucléaire, la présence de courants, de charges, de champs et de potentiels peuvent apporter des éléments de réponse. Ces phénomènes se passent à des échelles où la physique quantique s'applique et où l'exclusion de Pauli ou l'incertitude d'Heisenberg viennent complexifier un peu plus les choses. Comment pouvons-nous mieux comprendre l'équation d'état nucléaire? En quoi l'asymétrie extrême de charge peut-elle l'affecter? Quel est la thermodynamique qui régit les noyaux exotiques? Pourquoi la stabilité des noyaux semble-t-elle obéir aux nombres magiques? Y a-t-il une nouvelle physique loin de la stabilité? Quelle est la limite de l'existence nucléaire? Ce sont toutes ces questions et plus encore que [SPIRAL2](#) pourrait permettre d'aborder grâce aux faisceaux de noyaux exotiques qu'il produira. [SPIRAL2](#) se propose aussi de recréer quelques laboratoires astrophysiques éphémères, ceux-là même qui font la synthèse des éléments que nous connaissons aujourd'hui. De ceux-là résulte l'abondance des éléments chimiques dans l'Univers. Ces questions que l'on croyait bien comprendre il y a quelque temps sont loin d'être closes. Nous savons par exemple que nous ne parlons pas ici uniquement des nucléosynthèses des étoiles mais de tous les événements violents et énergétiques dans notre Univers.

Les éléments que nous parviendrons à produire viendront compléter nos connaissances et inscriront quelques pixels de plus dans la charte des noyaux (voir figure 3.1). Le potentiel scientifique du faisceau qui en est l'origine est alors donné par le type d'ions accélérés, le rapport masse sur charge A/Q , l'énergie du faisceau et enfin son courant. Ces paramètres sont donnés par la structure de l'accélérateur et les différents éléments qui le composent (voir figure 3.2). Ses spécifications, en terme de faisceau, sont montrés sur le tableau 3.1. Les performances de [SPIRAL2](#) ne sont d'ailleurs pas en reste par rapport aux courants/énergies proposés aujourd'hui à la communauté de la physique nucléaire. Comme nous pouvons le voir sur la figure 3.1, SPIRAL2 occupe bien une place unique dans le paysage mondial dans sa gamme de courant/énergie.

Suivons maintenant un faisceau type. Celui-ci voit le jour dans les sources d'ions, point de départ de ce qu'on appelle l'injecteur. Les sources utilisées dans la première phase de [SPIRAL2](#) sont des sources [Electron Cyclotron Resonance \(ECR\)](#). Elles sont au nombre de deux. La première est dédiée à la production de deutons et de protons. La seconde est dédiée à la production d'ions plus lourds ayant un rapport $A/Q=3$. Une nouvelle source supraconductrice permettant la génération d'ions avec un rapport $A/Q=7$ devrait aussi être construite dans le cadre du projet du nouvel injecteur NewGain (voir section 2.3). Revenons maintenant à nos sources de départ. Celles-ci produisent un faisceau continu d'ions. Suit alors la ligne de basse énergie ou [Low Energy Beam Transport line \(LEBT\)](#) qui conditionne le faisceau avant son injection dans la structure accélératrice. Le cœur de cette partie est ce qu'on appelle le [Radio Frequency Quadupole \(RFQ\)](#). Ce composant est électromagnétiquement tout à fait fascinant. Il s'agit d'une structure entièrement en cuivre alimentée par une onde électromagnétique à la fréquence d'opération des structures accélératrices suivantes. Grâce à sa composition en quatre pôles, elle produit un moment quadri-polaire au centre qui a pour effet de compenser la répulsion naturelle entre les ions et donc de focaliser le faisceau. Les ondulations des pôles produisent, elles, un champ longitudinal périodique qui a pour effet de grouper les particules (en fonction de leur position par rapport à l'ondulation) et de les accélérer. En sortie

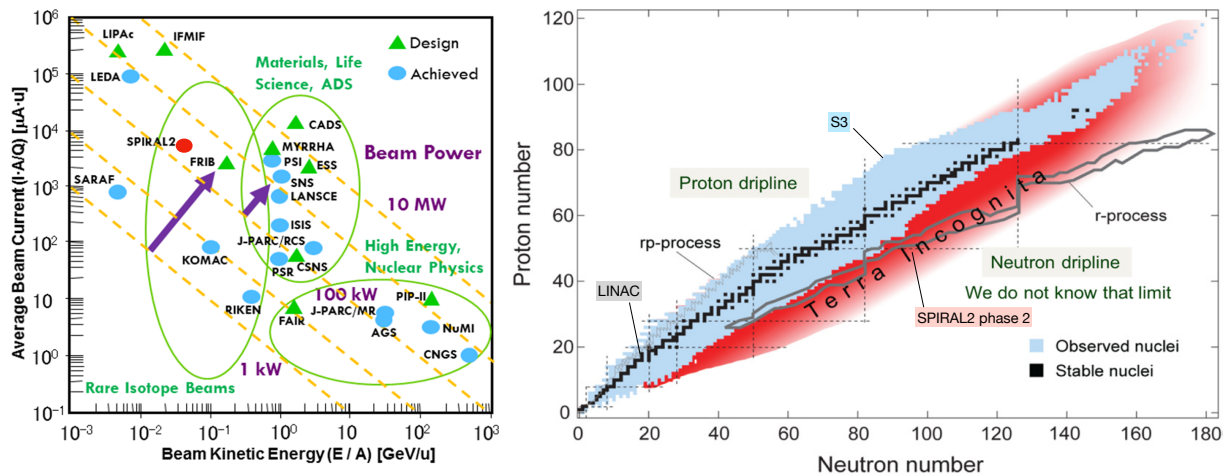


Figure 3.1 – A gauche : Energie et courant moyen des faisceaux de différents accélérateurs. SPIRAL2 figure parmi les accélérateurs ciblant les noyaux rares et exotiques [Wei+14]. A droite : charte des isotopes montrant plus de 3000 éléments découverts en laboratoire (en bleu) et le territoire encore inconnu (en rouge). Les deux figures proviennent de [Wei19].

Table 3.1 – Spécifications principales des faisceaux de SPIRAL2.

Particules	H ⁺	D ⁺	ions	ions
A/Q	1	2	3	6
Courant maximum (mA)	5	5	1	1
Energie maximale (MeV/A)	33	20	15	8,5
Puissance faisceau maximale (kW)	165	200	45	51

du RFQ, un rebuncher maintient les paquets et les adapte aux structures accélératrices. Le cœur de la partie accélératrice à proprement parler est le LINAC. Il est constitué de 26 cavités résonantes supraconductrices. Ce sont ces dernières qui motivent les développements autour de la cryogénie. Elles seront décrites avec plus de détails dans la section 3.1.2.2. Pour la première phase de SPIRAL2, deux salles d'expériences sont au bout du tunnel. La première s'appelle Neutron For Science (NFS) [Led+18] et s'intéresse principalement aux mesures de temps de vol (nToF) d'un faisceau pulsé secondaire de neutrons. Ce dernier est produit à partir de l'interaction du faisceau primaire avec un convertisseur carbone rotatif. La deuxième salle d'expérience est le Super Separator Spectrometer (S3) [Dro+20]. Elle est décrite en section 2.2.

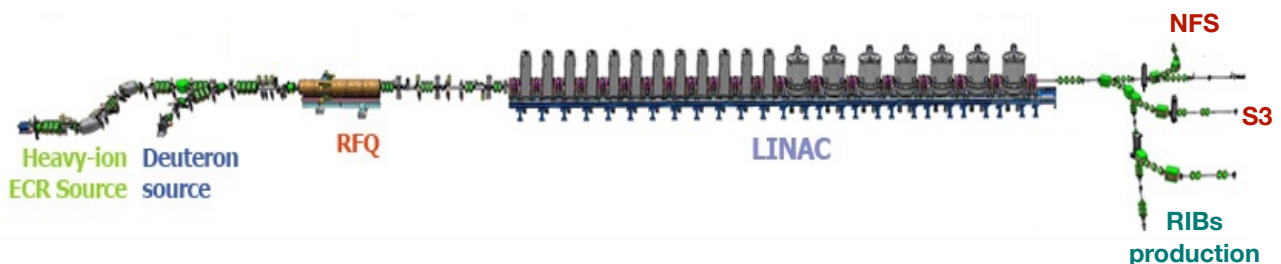


Figure 3.2 – Différents composants de l'accélérateurs SPIRAL2.

La mise en service de l'accélérateur SPIRAL2 a passé avec succès plusieurs jalons importants pendant les dernières années. Fin novembre 2020, un faisceau de protons de 16 kW à 4,8 mA ($2,88 \cdot 10^{16}$ particules par secondes) a été produit. Ceci représente 10% de la puissance maximale attendue. Au même temps que la montée progressive (2019), un faisceau de protons de 33 MeV a été envoyé dans NFS et a permis de valider ses premiers éléments. Les premières expériences de NFS sont prévues à l'automne 2021. La prochaine étape pour le LINAC sera la montée en puissance jusqu'à 200 kW. Cette étape devrait être atteinte en accélérant un faisceau de deutérium de 5 mA.

2 Résumé des participations aux projets et aux programmes de R&D

Lorsque je suis arrivé au [GANIL](#) à la fin de l'année 2014, il s'agissait avant tout de combler un vide. Le laboratoire était en train d'assembler un accélérateur linéaire supraconducteur et allait bientôt s'approprier à le réceptionner et à l'opérer. Le problème est que la cryogénie est omniprésente dans le projet et qu'il n'y avait personne en interne pour s'en occuper. Le besoin avait pourtant été identifié depuis longtemps, mais, pour une raison qui m'échappe encore, le poste avait du mal à rester occupé très longtemps. Il n'y avait pas non plus de programme de R&D dans ce domaine dans le laboratoire. Je suis donc arrivé frais, sans aucune connaissance préalable dans le domaine de la cryogénie des accélérateurs. Peut-être était-ce la un avantage ? J'ai vu dans mes faiblesses une occasion de chercher dans les forces de ceux qui m'entouraient. Christian Commeaux s'était chargé de la conception cryogénique de [SPIRAL2](#) (lot IPNO) et était maintenant à la retraite. Il était pourtant bien présent en tant que contractant. Il m'a ainsi accompagné, formé et pris un vrai rôle de maître d'apprentissage au sens ancien du terme. Christian voyait les choses avec la force de son expérience dans le domaine mais toujours avec une touche difficile à saisir. C'est sans doute ce qui m'a poussé à approfondir la thématique pour essayer de mieux comprendre, à défaut de tout maîtriser. Il y avait aussi à mon arrivée Guillaume Lescalié, technicien et mécanicien, sur qui je me suis largement appuyé pour combler mes lacunes en mécanique et en montage. Pierre-Emmanuel Bernaudin, chef du groupe, a quant à lui aussi endossé le rôle de l'ingénieur en cryogénie. Je me suis largement appuyé sur lui pour la gestion des contrats, la maintenance et bien d'autres choses qui concernaient les grands projets et pour lesquels je n'avais, si ce n'est peu d'attrait, sinon peu d'expérience. Je me suis aussi largement appuyé sur d'autres personnes qui m'ont aidé à avoir une vision extérieure et objective des projets dans lesquels j'étais impliqué. Ces personnes étaient du CERN, d'ESS, du CEA (IRFU et DSBT), de SNS, ... Certains sont devenus d'excellents amis et d'autres des collaborateurs précieux. C'est ainsi que la collaboration GRAAL est née. Depuis quelques années, elle hésite à s'internationaliser. Il se peut qu'elle passe le cap cette année dans le cadre d'un projet européen. Jean-Pierre Thermeau a rejoint le projet en tant qu'expert au départ de Christian Commeaux en 2016. Son aide a été précieuse et l'est toujours. C'est aussi grâce à lui que nous avons rejoint le projet NGCryo et que la R&D NGTACryo est lancée.

A côté de [SPIRAL2](#), il y avait aussi S3. L'exercice était là quelque peu différent et j'ai pu ici réellement mettre mon empreinte dans la définition des processus cryogéniques. Muhammad Aburas est arrivé pour prendre le relais en 2017 et a depuis travaillé sur ce dernier projet, l'amenant pas à pas vers son assemblage et sa réception. Il a aussi récemment pris le relais d'une partie de mes rôles et de ceux de Pierre-Emmanuel Bernaudin en ce qui concerne l'usine cryogénique et l'opération cryogénique du [LINAC SPIRAL2](#). Il a donc reçu cette tâche, à la manière d'un projet qui, une fois développé, construit, optimisé et réceptionné, est livré à son exploitant. Ceci me permet aujourd'hui de me consacrer un peu plus à la R&D tout en gardant un œil sur l'installation cryogénique et son évolution future.

Le projet du nouvel injecteur NEWGAIN dont je ne savais absolument rien est venu quelque peu par surprise à l'occasion du premier confinement. Il a nécessité une étude cryogénique que j'ai pu mener grâce à l'expérience passée. Suivant les choix qui seront faits par le projet et le laboratoire, une R&D cryogénique bien spécifique et rare pourrait émerger.

Au fil du temps, l'équipe en charge de la cryogénie au [GANIL](#) s'est vue renforcée de nouveaux membres. Constituée de 3 ingénieurs et de 4 techniciens, elle est aujourd'hui à la mesure des tâches qui lui sont confiées. La figure 3.3 montre cette évolution au fil du temps. Les étudiants, qu'ils soient apprentis, thésards ou stagiaires, ont été omniprésents dans l'équipe. J'ai ainsi pu impulser une thèse de doctorat que j'ai co-encadrée. J'ai aussi pu diriger ou co-diriger 5 stages ingénieurs ou techniciens dont deux sont en cours.

2.1 SPIRAL2

Plus de dix années ont été nécessaires pour voir le projet émerger du papier et prendre forme. A mon arrivée les choses étaient donc déjà bien avancées du point de vue de la conception. Le [LINAC](#) était cependant vide, l'usine cryogénique prenait tout juste forme et l'ensemble des tuyauteries propres n'étaient pas encore terminées. Pierre-Emmanuel Bernaudin a pris en charge la mise en place de la cryogénie du [LINAC](#) tandis que je me suis occupé de la partie supérieure, celle de l'usine cryogénique. La définition du processus cryogénique global était aussi loin d'être terminée. En travaillant main dans la main avec [Air Liquide Advanced Technologies \(ALAT\)](#), j'ai pu apprendre comment ce genre d'installation était géré. J'ai ainsi pu coucher sur papier l'ensemble des diagrammes cryogéniques sur lesquels on se base aujourd'hui et qui étaient à l'époque au stade de brouillon de définition. Ces schémas, appelés [Piping and Instrumentation Diagram \(P&ID\)](#), sont équivalents aux plants [Tels Que Construits \(TQC\)](#) pour la mécanique. Ceci a été nécessaire pour pouvoir avoir un suivi de la nomenclature, du tuyautage et de l'avancée des différents chantiers. La gestion de ces chantiers et leurs réceptions (circuits purs, circuits de récupération, boîte froide, ...) ont donc dominé mon activité pendant un certain temps. Il a ensuite été nécessaire de travailler avec les automaticiens pour les processus gérant l'opération cryogénique. Je pense que, hormis

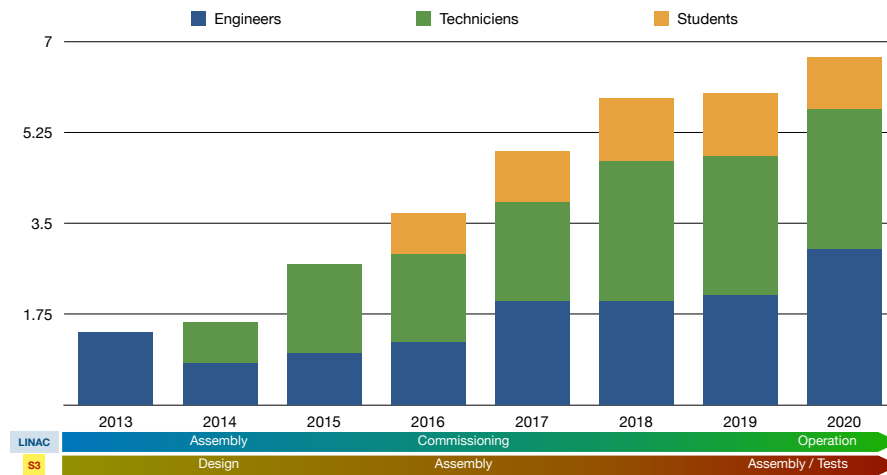


Figure 3.3 – Evolution des ressources humaines dans l'équipe cryogénie du GANIL au fil du temps. Les ressources temporaires sont aussi incluses.

les personnes du Groupe Vide et Cryogénie, les collaborateurs du [CERN](#)¹, de [GSI](#)², du [CEA](#)³ de Grenoble, ... aucune personne de la gestion stratégique des ressources pour l'automatisme n'avait d'idée réelle sur l'ampleur de la tâche. C'est chose faite aujourd'hui. L'activité des automatismes impliqués dans la cryogénie de [SPIRAL2](#) est continue et suit toute la vie du projet, de sa définition à sa mise en place puis sa réception, son optimisation et sa vie de tous les jours. Il faut aussi avouer que nous apprenions au fur et à mesure que nous avançons et que les corrections et évolutions paraissent inévitables dès le départ. Aujourd'hui, cette partie du contrôle commande a atteint un haut niveau de maturité, même comparée à d'autres systèmes auxiliaires de l'accélérateur aussi critiques que la cryogénie. Toutes ces activités ne constituent pas nécessairement une activité de recherche. Elles ont cependant été nécessaires pour prendre en main le système et préparer les projets de recherche qui viendront par la suite. Ces derniers sont détaillés avec une organisation temporelle dans la section 3.

2.2 S3

[S3](#) [Dro+20] est un spectromètre de masse à très haute résolution. Il a été principalement conçu pour des expériences d'astrophysique nucléaire mettant en oeuvre de faibles sections efficaces [Ser19]. L'instrument est constitué de 7 triplets d'aimants multipolaires supraconducteurs. Chacun est intégré dans son propre cryostat et le tout est relié par une ligne de cryodistribution. S3 a sa propre usine cryogénique aux dimensions modestes (100W à 4K) mais couplée à l'installation cryogénique de [SPIRAL2](#) (voir figure 3.4). J'ai été impliqué dans les phases de réception usine de l'installation cryogénique, de définition du processus de contrôle commande et de l'architecture de la ligne de cryodistribution. Nos choix ont été confirmés lors d'une revue internationale de conception avancée que nous avons lancée en 2018.

2.3 NewGain

NewGain est un projet d'injecteur $A/Q=1/7$ pour [SPIRAL2](#). Il se base sur une source [ECR](#)⁴ supraconductrice inspirée de la source VENUS [Lei+01 ; Ben+12]. La source nécessite d'être opérée à une température inférieure à 5 Kelvin. La source aurait une charge thermique d'environ 5 Watts à 4 Kelvin et 20 Watts à 60 Kelvin. Les détails des hypothèses de départ pourront être trouvés dans [GR21]. Deux choix technologiques ont été proposés. Le premier utilise des cryo-générateurs et le deuxième utilise l'installation cryogénique [SPIRAL2](#) en place.

2.3.0.1 Option 1 - Cryogénérateurs Cette option a fait l'objet d'une pré-étude du CEA IRFU [May20]. Elle utilise 8 cryogénérateurs [Tay+04] connectés à un séparateur de phase d'hélium liquide dans lequel l'aimant supraconducteur est immergé. Les cryogénérateurs permettent d'extraire l'hélium gaz saturé et de le re-condenser. Dans ce scénario, les échangeurs et le condensateur devront être conçus en même temps que le cryostat de l'aimant. Une étude de conception détaillée, un développement (condensateur) et un démonstrateur de principe devront

1. Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire (CERN)
2. Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI)
3. Commissariat à l'Energie Atomique et aux énergies alternatives (CEA)
4. ECR

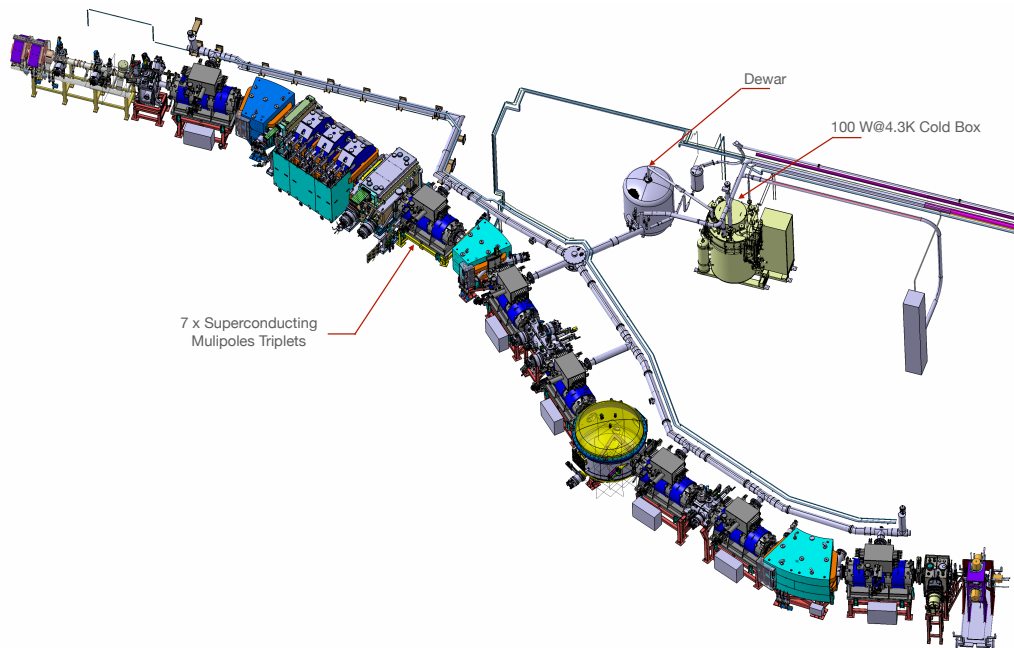


Figure 3.4 – Vue 3D de l'installation cryogénique du spectromètre S3 [Crédit : F. Lutton].

être réalisés en amont de la fabrication du cryostat de l'aimant. Cette solution a l'avantage d'être démontable et indépendante de tout système de refroidissement centralisé. Cela permet en particulier de tester et de réceptionner la source dans des laboratoires et instituts partenaires différents et qui ne possèdent pas nécessairement d'installation cryogénique adaptée. De plus, cette solution peut être directement installée sur la plateforme haute tension dédiée à la source. En revanche, une fois installée sur le site d'opération, cette solution nécessite une mise en froid séparée par remplissage du réservoir d'hélium liquide et une gestion du retour d'hélium pendant la mise en froid. Ceci ajoute un surcoût de 136 k€ à l'installation sur le site d'exploitation en plus des 320 k€ de coût de départ des cryo-générateurs, leurs flexibles et leurs compresseurs. Elle nécessite aussi une maintenance dédiée avec un coût annuel de 40 k€. De plus, la procédure de remise en froid est à recommencer à chaque quench⁵. Un tel système possède aussi une marge de puissance cryogénique à 4 Kelvin assez réduite. Si une détérioration de la charge thermique statique ou dynamique supérieure à la marge même réduite venait à être observée, le système ne pourrait plus être opéré.

2.3.0.2 Option 2 - Usine cryogénique SPIRAL2 Je me suis chargé de la pré-étude concernant cette partie [GR21]. Le but de cette pré-étude était d'investiguer la faisabilité d'une solution couplée à l'installation cryogénique de SPIRAL2 et la compatibilité avec le process cryogénique du LINAC SPIRAL2. L'étude a bien permis de démontrer le principe de fonctionnement et la compatibilité avec le LINAC SPIRAL2. Comme pour la première option, cette solution présente des avantages et des inconvénients. Commençons par les avantages. La solution proposée a l'avantage d'être parfaitement intégrée à l'opération cryogénique de SPIRAL2. Le procédé, le système de contrôle commande et l'automatisme (matériel et logiciel) serait en grande partie une copie de ce qui a été développé pour SPIRAL2. Le groupe en charge de l'automatisme au GANIL a maintenant une bonne expérience de ce procédé pour le prendre en charge avec un minimum de ressources et de manière intégrée avec le système en place. L'opération cryogénique en tant que telle ne dépend pas du LINAC SPIRAL2 car la solution proposée offre la possibilité de mettre en froid l'ensemble de la cryodistribution, indépendamment des cavités accélératrices de SPIRAL2. Suite à un quench ou à un arrêt accidentel, la remise en froid peut se faire rapidement à partir du Poste de contrôle central de la cryogénie sans aucune intervention physique sur le cryostat de la source. La quantité d'hélium perdue est aussi minimisée car la mise en froid ou la re-mise en froid se fait dans le cycle fermé de l'usine cryogénique. De plus, compte tenu des performances mesurées du LINAC SPIRAL2 et de l'usine cryogénique associée, cette solution offre une marge de puissance disponible qui peut atteindre 1000%. Le coût de la maintenance annuelle spécifique à la cryogénie de NewGain est dans cette option pratiquement nul car directement intégré à la maintenance de SPIRAL2. Le coût de départ serait d'environ 270 k€ qui sont à comparer aux 456 k€ nécessaires à l'installation de l'option 1 sur le site d'exploitation. La solution proposée présente néanmoins plusieurs inconvénients :

- Elle ne permet pas une opération à une température inférieure à 4,5 K. Cette contrainte est due aux pressions d'hélium imposées par SPIRAL2.

5. perte de l'état supraconducteur

- Elle nécessite d'isoler les lignes cryogéniques de la plateforme haute tension de la source (140 kV). Je me suis penché sur cette question à la lumière des précédents développements qui avaient été effectués pour ITER. En peu de temps, un travail de démonstration théorique et expérimental a pu être effectué par le Pr. Wanjiang Pan de l'ASIPP. Ce dernier a pu établir la faisabilité théorique de la mise en place d'isolants cryogéniques compatibles avec les géométries, pressions et températures spécifiques à NewGain. Il s'en est suivi une démonstration expérimentale avec des prototypes testés à des pressions de 2 bars et de 14 bars pour des tensions de 140 kV. Ce test a validé la faisabilité avec une fuite de courant mesurée de 100 μ A. Cependant, il faut garder à l'esprit qu'il s'agit là d'une démonstration de principe sur de courtes durées. Si cette solution est choisie, il faudra mener une phase de R&D avec des tests prolongés pour valider complètement le principe pour le cas de NewGain.
- La problématique des tests de l'aimant avant réception sur site d'exploitation est sans doute le plus grand inconvénient de cette solution. Suivant la première organisation le LPSC devait se charger de ces tests. Or ce laboratoire ne dispose pas d'installation cryogénique adaptée. Si les tests au LPSC sont maintenus, il y aurait un surcoût d'environ 550 k€ dû à l'approvisionnement d'hélium et d'azote liquide pour 200 jours de tests effectifs. Plusieurs solutions peuvent être envisagées ici :
 1. Prise en compte du surcoût et financement intégré au projet.
 2. Financement par le projet de 6 cryocoolers (au lieu des 8 prévus pour l'opération et qui incluent deux redondances) pour un coût s'élevant à 240 k€.
 3. Financement alternatif de l'une des deux options (alimentation en cryogènes ou cryogénérateurs). Par exemple, une rétrospective de l'IN2P3 sur les besoins des laboratoires de l'institut en cryogénie est en cours. Elle pourrait permettre de financer des équipements de tests qui resteraient à demeure dans le laboratoire choisi pour les tests. L'avantage par rapport à la solution projet est que les équipements appartiennent dans ce cas au laboratoire et non au projet.
 4. Une dernière option consiste à faire les tests de l'aimant dans un laboratoire disposant des infrastructures nécessaires comme le GANIL ou le CEA IRFU.

Dans le cas le plus défavorable (alimentation en hélium liquide au LPSC), la solution 2 présenterait un surcoût de 550 k€. Ce surcoût serait amorti par le coût de la maintenance sur site en 13 ans. Passé ce délai, la solution 1 deviendra plus onéreuse. Dans le cas d'un financement de 6 cryogénérateurs par le projet, le délai passe à 6 ans. Dans le cas des tests dans un autre laboratoire partenaire, il n'y aurait pas de surcoût. Le projet NewGain a obtenu 70% du financement demandé à l'ANR pour la première phase d'étude.

2.4 GRAAL

Dès la première année au GANIL, je me suis rendu compte des difficultés que nous aurions à opérer le LINAC vu les conditions du process initialement définies. En effet, nous opérons les cavités autour de 4 K et à basse pression avec un écoulement d'hélium diphasique et chaotique. Il s'agit ici d'un choix qui devient aujourd'hui rare dans le monde des accélérateurs et qui est avant tout économique. J'ai donc essayé de comprendre les problèmes que nous pourrions rencontrer et comment les résoudre. Avec la naïve pensée que thermodynamique d'une boîte froide n'est pas plus compliquée que celle de l'Univers à l'échelle macroscopique, je me suis attaqué aux équations qui régissent le fonctionnement des écoulements des fluides dans l'installation. Déjà, dans la boîte froide, je me suis heurté aux premiers problèmes : rien ne semblait répondre exactement à ce que j'attendais et aucun élément n'était défini de manière assez précise. Il s'agissait là du lot quotidien de l'ingénierie industrielle et j'étais en train de m'en rendre compte. Le temps allait manquer et il fallait trouver des alternatives. Je me suis donc intéressé aux codes de modélisation. Il me fallait un code assez précis pour rendre compte des problématiques que nous pourrions rencontrer et assez léger pour interagir avec le contrôle commande. Je me suis orienté au début vers la bibliothèque Cryolib⁶ du logiciel Ecosimpro⁷. Il s'agit d'une librairie développée dans le cadre de la thèse de doctorat Benjamin Bradu [Bra10] et qui a été rendue commerciale plus tard. Cette librairie a servi à la modélisation dynamique des installations cryogéniques du CERN. Elle était cependant un peu lourde et inadaptée à notre besoin immédiat. Je me suis ensuite orienté vers la bibliothèque SimCryogenics de Simulink/Matlab. Cette dernière bibliothèque a été développée initialement dans le cadre de la thèse de doctorat de François Bonne [Bon14] et qui a continué à être développée par le DSBT du CEA Grenoble. A première vue, cette bibliothèque semblait tout à fait adaptée à notre besoin. J'ai donc pris contact avec Patrick Bonnay, François Millet et François Bonne du LEA⁸ au DSBT⁹ du CEA de Grenoble.

6. <https://www.ecosimpro.com/products/cryolib/>

7. <https://www.ecosimpro.com/>

8. Laboratoire d'Electronique et Automatisme (LEA)

9. Département Service des Basses Températures (DSBT)

2.4.0.1 Période 2016-2019 Nous avons exploré la faisabilité de l'approche SimCryogenics grâce un stage ingénieur de fin d'étude [Ber16] co-encadré par François Bonne et moi-même. A l'issue de ce stage, nous avons confirmé la pertinence de la méthode et avons décidé de commencer officiellement une collaboration que nous allons appeler **Grande Réfrigération pour les Accélérateurs supraconducteurs Linéaires (GRAAL)** et dans laquelle j'occuperai la fonction de responsable scientifique. Nous avons pu trouver un financement de thèse rapidement et notre thésard commun, Adrien Vassal, allait commencer à travailler avec nous l'automne qui suivit. Ses travaux s'étaient concentrés sur la modélisation des **cryomodules (CM)** et de la boîte froide **SPIRAL2** en lien avec les stratégies de contrôle. Nous allons aussi apprendre à nos dépens que toutes les bonnes volontés de coopération scientifique ne suffisent pas à calmer un affrontement tripartite entre juristes sur une arène GANIL/CEA/Université même sans aucune valorisation économique prévue dans le projet. Cette mésaventure nous vaudra deux mois de retard et quelques migraines. Plus tard, nous allons renouveler notre collaboration autrement et plus simplement. La thèse soutenue en novembre 2019 [Vas19] aboutira sur 3 publications scientifiques [Vas+18; Vas+19; Vas+21], 1 brevet d'invention [Ghr+18], un contrôle optimisé de la cryogénie de **SPIRAL2** et une ouverture vers une approche multi-physique utilisant de l'apprentissage profond pour le contrôle optimisé et la détection de défaillances [Vas+21]. Tout ceci n'aurait pas pu se faire sans le co-encadrement actif de François Bonne et la participation non moins dynamique de Patrick Bonnay et de François Millet aux différents essais et études machines avec les automatismes du GANIL.

2.4.0.2 Période 2019-2020 Les succès de la période 2016-2019 ont permis d'attirer l'attention du **GANIL** et d'avoir une plus grande implication du **Groupe Contrôle Commande et Automatisation (G2CA)**. Cette implication était la bienvenue car il fallait maintenant que ce groupe s'approprie les nouvelles méthodes et participe à leur mise en place effective (du point de vue de l'opération) et leur développement. Ceci s'est fait par le travail simultané sur l'interface homme machine pour le réglage des différents paramètres issus des modèles et leur chargement dans les automates. Cette partie a fait l'objet d'un stage co-encadré par Patrick Bonnay, Quentin Tura et moi-même [Pou20]. Cette interface d'échange entre la modélisation et les automates est aujourd'hui en place et fonctionnelle.

2.4.0.3 Période 2020-2021 Une des retombées de la thèse d'Adrien Vassal et qui a fait l'objet d'un brevet est la possibilité d'avoir un observateur virtuel de la charge thermique que voit le bain d'hélium liquide d'un cryomodule (voir section 3.5.1). Cette fonctionnalité pourrait être très utile en coupage avec la RF pour surveiller le comportement ou la détérioration de la résistance de surface de la cavité ainsi que toute augmentation de la charge thermique quel qu'en soient les raisons. Il fallait donc mettre en place cet observateur dans le système de contrôle commande de manière à ce qu'il soit exploitable par les personnes en charge de l'opération. Ce travail est en cours et implique les équipes du **G2CA/GVC GANIL** et du **LEA DSBT**. Un stage est également en cours et co-encadré par ces équipes.

Il est important de rappeler que les développements effectués dans le cadre de GRAAL font intégralement partie de l'historique de la réception et de la mise en service cryogénique de **SPIRAL2**. Il faudra donc se reporter aux sections 3.2.1 et 3.3 pour en connaître les détails.

2.5 NGCryo

Next Generation Cryogenic Systems (NGCryo) est un projet transverse financé par l'**IN2P3** sur 4 ans et qui a commencé en 2020. Il regroupe plusieurs laboratoires (APC, LIMSI, GANIL, IJC Lab) et plusieurs thématiques qui couvrent un spectre assez large concernant les basses températures :

1. Réfrigération sub-Kelvin ;
2. Micro-électronique cryogénique ;
3. Insert d'étalonnage Sub-Kelvin ;
4. Propriétés thermiques Sub-Kelvin ;
5. Prospective des activités et évolutions des besoins concernant les basses et très basses températures dans les laboratoires de l'IN2P3.

Les première et deuxième thématiques sont coordonnées par l'**APC** et concernent des activités liées au développement d'une instrumentation dédiée pour les **KIDs**. La deuxième et la troisième s'intéressent à la caractérisation des matériaux et la thermométrie de précision. Elles sont coordonnées par l'IJC Lab et sont aussi en lien avec les développements pour la cryogénie des accélérateurs. Quant à moi, je coordonne la 5ème thématique. Cette dernière a pour but d'améliorer la visibilité des installations cryogéniques disponibles dans l'ensemble des laboratoires de l'IN2P3. Elle vise aussi à avoir une visibilité sur les nouveaux besoins dans le cadre de l'évolution de projets existants ou de nouveaux projets.

2.6 NGTACryo

Le projet [Next Generation ThermoAcoustic Cryogenics \(NGTACryo\)](#) est une nouvelle collaboration entre les laboratoires APC, IJCLab et le [CES](#)¹⁰ de Mines Paristech (début 2021). Les travaux ici s'intéressent à la modélisation de la thermo-acoustique cryogénique dans le cas des accélérateurs supra-conducteurs. Les travaux préliminaires effectués sur [SPIRAL2](#) sont reportés en section 3.6. Pour la première phase du projet, il s'agit de :

- Effectuer les premières modélisations du système dans le cadre d'un stage ingénieur de fin d'études ;
- Concevoir, fabriquer et mettre en place dans le [LINAC SPIRAL2](#), un banc à impédance thermodynamique variable pour la caractérisation précise des ondes thermo-acoustiques.

Cette première partie prépare la soumission d'une demande de financement pour un sujet de Doctorat.

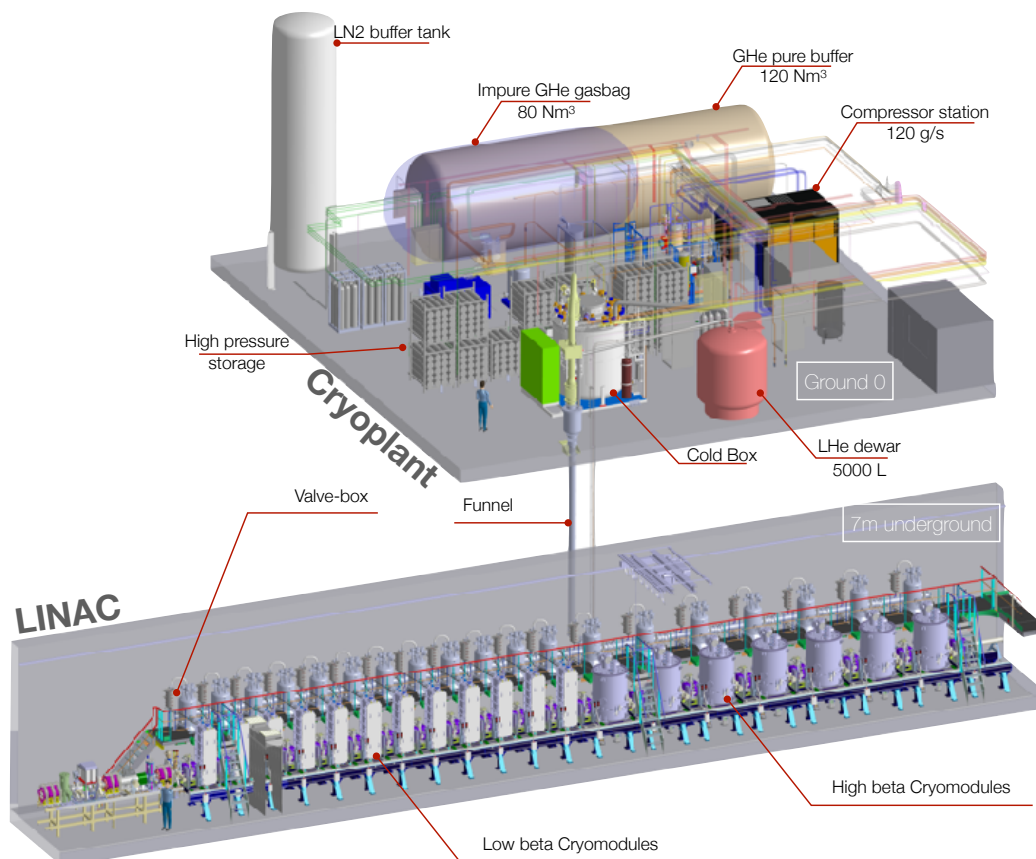


Figure 3.5 – Vue 3D de l'installation cryogénique de [SPIRAL2](#) [Crédit : M. Clément].

2.7 EuroLabs

Pendant l'été 2019, j'avais réussi à regrouper autour d'une table à Oxford tous les grands noms européens de la cryogénie des accélérateurs. Il y avait des représentants de différents laboratoires du [CNRS](#)¹¹, [CEA](#), [ESS](#)¹², [CERN](#) et [GSI](#). Officiellement, nous devons nous organiser pour répondre à l'appel à proposition H2020 [ERINS](#)¹³, le nom donné à la suite d'[ENSAR](#)¹⁴. Le projet proposé dans le cadre d'ERINS ne verra le jour ni sous la forme d'un réseau, ni d'un projet bien structuré. Qu'à cela ne tienne, le réseau est bien là. En 2021, la communauté de physique nucléaire s'organise à nouveau. Le nouveau nom (temporaire) est EuroLabs. En peu de temps, nous nous organisons pour proposer un projet que je coordonne. Ce dernier regroupe le GANIL ([SPIRAL2](#)), le CEA (DSBT), le CNRS (IJCLab, APC), DESY (XFEL) et SCK (MYRRHA). Le projet exploite la suite de la thèse d'Adrien Vassal (GRAAL) qui étend la modélisation cryogénique à la radiofréquence et les contextes particuliers des accélérateurs [SPIRAL2](#), XFEL et MYRRHA pour donner une orientation opération et intelligence artificielle à la modélisation. Un résumé du projet est en annexe III.

10. [Centre Efficacité Énergétique des Systèmes \(CES\)](#)

11. [Centre National de la Recherche Scientifique \(CNRS\)](#)

12. [European Spallation Source \(ESS\)](#)

13. [European Research Infrastructures for Nuclear Science \(ERINS\)](#)

14. [European Nuclear Science and Applications Research \(ENSAR\)](#) - <http://www.ensarfp7.eu/>

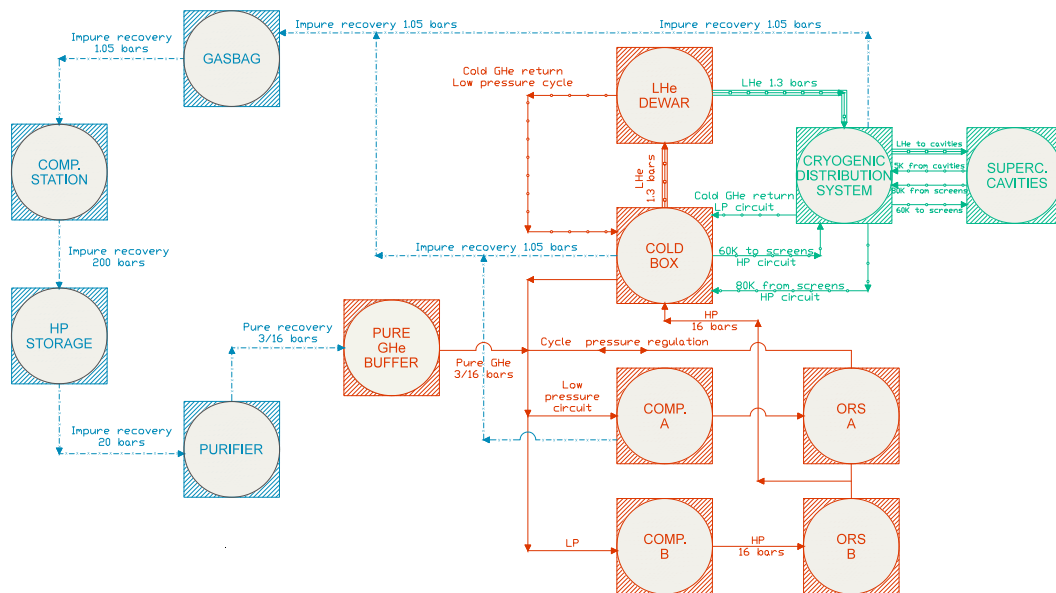


Figure 3.6 – Principe de fonctionnement de la partie production de l'installation cryogénique **SPIRAL2**. En Rouge : cycle principal en réfrigération **Dewar**. En vert : extension du cycle principal vers la réfrigération du **LINAC SPIRAL2**. En bleu : gestion et stockage du retour d'hélium impur et son épuration en vue de sa ré-injection dans le cycle principal. Dans notre cas, la pression du cycle de haute pression a été fixée à 14,7 bars absolus.

3 La cryogénie de SPIRAL2

La cryogénie de **SPIRAL2** est présente sur deux projets : **SPIRAL2** et S3. Celui de S3, brièvement décrit dans 2.2 et visible sur la figure 3.4, ne sera pas détaillé d'avantage. A la place cette partie est dédiée à la cryogénie spécifique au **LINAC SPIRAL2**.

3.1 Présentation du système

Une représentation tri-dimensionnelle de l'installation est visible sur la figure 3.5. Elle est divisée en deux :

- L'usine cryogénique et l'installation de récupération d'hélium en rez de chaussée. Dans la suite, nous appellerons cette partie **production**.
- Les cryostats des cavités accélératrices et la cryodistribution associée dans le tunnel de l'accélérateur. Dans la suite, nous appellerons cette partie **exploitation**.

Ces deux parties sont détaillées dans [Ghr+17] et seront décrites de manière succincte dans la suite.

S'il fallait mettre quelques chiffres pour mieux se représenter l'installation et les défis qu'elle pose en terme de mise en place, de réception, d'opération et de maintenance, je mettrais les suivants :

- 21 cryostats des cavités accélératrices ;
- Plus de 20 000 Nm³ et plus d'hélium dont une capacité de stockage de plus de 5000 L d'hélium liquide ;
- 25 000 litres d'azote liquide ;
- 45 unités de pompage pour le vide d'isolation ;
- 132 jauges à vide ;
- 114 vannes cryogéniques ;
- 108 capteurs de pression absolus ;
- 22 capteurs de pression piezo-électriques rapides ;
- 428 sondes de température ;
- 38 sondes de niveau d'hélium liquide ;
- 142 résistances chauffantes cryogéniques ;
- 91 soupapes ;
- 59 disques de rupture ;
- Plusieurs kilomètres de tuyautage Hélium ;
- 32 kilomètres de câblage ;
- 31 automates programmables (PLC¹⁵).

15. Programmable Logic Controller (PLC)

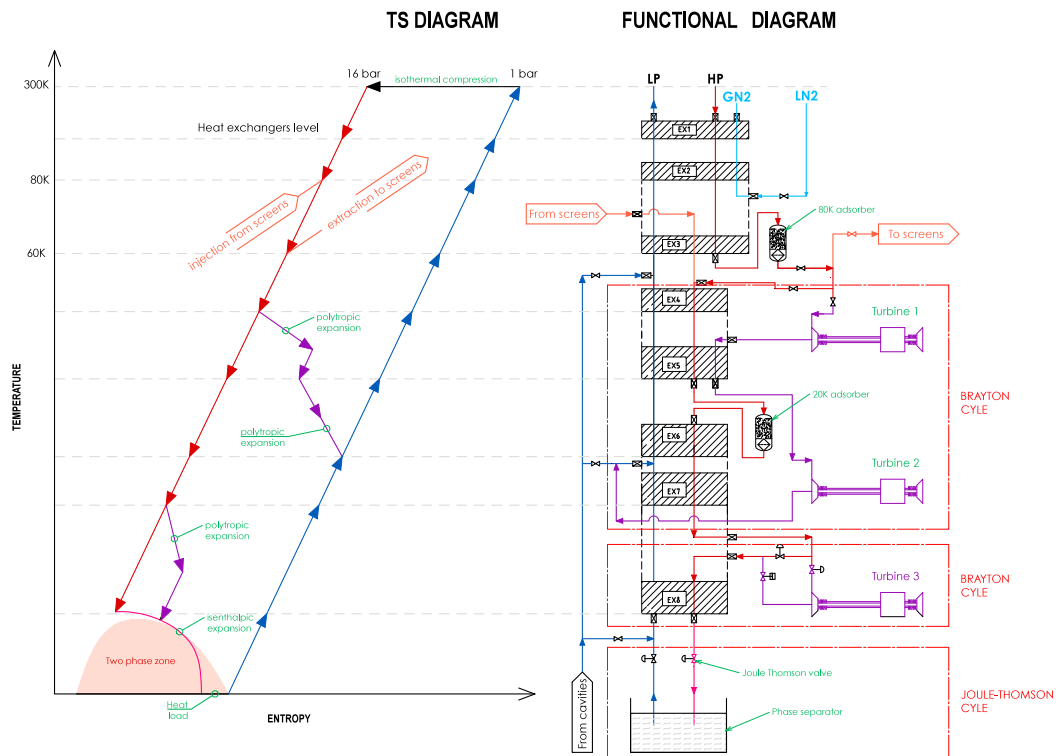


Figure 3.7 – Diagramme TS (température-entropie) et P&ID associé de la boîte froide SPiRAL2.

3.1.1 Installation de production (de froid)

Cette partie est visible sur la moitié supérieure de la figure 3.5. Elle produit le froid et le gère. Le P&ID détaillé de cette installation peut être trouvé en annexe III. Elle est constituée de l'usine cryogénique et de l'installation de récupération d'hélium. Le principe de fonctionnement et la direction des fluides dans le cycle principal et dans l'installation de récupération sont détaillés dans la figure 3.6.

3.1.1.1 Installation de récupération Il s'agit de l'installation qui récupère et gère tout hélium considéré comme impur à la suite d'une opération de maintenance, d'arrêt de l'installation, de dépotage d'hélium liquide ou encore d'évènement accidentel. Tout le retour est centralisé dans une boudruche (Gasbag) de 80 Nm³. Le gaz en sortie de la boudruche est comprimé et stocké à 200 bars dans des cadres de stockage dédiés. Lorsque le besoin d'injecter du gaz impur dans le cycle apparaît, nous l'épurons grâce à un épurateur cryogénique dédié. Nous le ré-injectons ensuite dans le cycle principal lorsque le niveau de pollution d'azote et d'eau est inférieur à 20 parties par million (ppm).

3.1.1.2 Usine cryogénique L'usine cryogénique est constituée de deux compresseurs de cycle à vis (fabriqués par Kaeser), de deux déshuileurs qui leurs sont associés, d'une boîte froide (fabriquée par ALAT) et d'un Dewar de stockage d'hélium liquide d'une capacité de 5000 L. La station de compression est capable de gérer 120 g/s d'hélium à plus de 15 bars absolus. Hormis le tuyautage et le câblage, la fourniture de l'ensemble de l'usine cryogénique a été confiée à ALAT. La boîte froide ou Cold Box est le coeur de cette usine cryogénique. Elle peut fournir 1300 W à 4 K et 3000 W à 60 K. Il s'agit d'une machine thermodynamique qui permet, par une série de détentes et d'échanges thermiques, de baisser la température d'un gaz qui la traverse. La boîte froide SPiRAL2 a été modélisée dans le cadre du stage de Yoann Bert [Ber16] et de la thèse d'Adrien Vassal [Vas19]. Le diagramme température-entropie de la figure 3.7 en montre le principe de fonctionnement en correspondance avec les étages de refroidissement de la boîte froide. On y voit notamment les détentes polytropiques assurées par les 2 premières turbines (1er cycle de Brayton). La troisième turbine, dite supercritique, est seulement utilisée lors d'une forte demande de puissance cryogénique. Si tel n'est pas le cas, une série de vanes assure la fonction de détente. La détente isenthalpique finale montre l'action de la vanne Joule-Thomson faisant entrer l'hélium gaz dans la zone di-phasique. Le séparateur de phase assure alors la séparation des phases gazeuses et liquides par gravité. Le gaz saturé (autour de 5 K) rejoint le circuit retour basse pression (BP), optimisant par la même occasion le cycle par le passage dans différents échangeurs et fermant ainsi le cycle. Le LINAC est alimenté en hélium liquide à partir du Dewar. Le retour froid du LINAC rejoint le cycle BP de la boîte froide à différents étages suivant sa température.

3.1.2 Le LINAC

Le système cryogénique du **LINAC SPIRAL2** se trouve dans le tunnel accélérateur, 7 mètres de béton sous terre. Une vue 3D en est représentée sur la figure 3.5 et son P&ID est joint en annexe III. Le schéma 3.8 en montre les principaux composants. La partie accélératrice de **SPIRAL2** est constituée de 27 cavités quart d'onde supraconductrices. Ces dernières sont logées dans 19 cryostats qu'on appellera dans la suite "cryomodules". Les 12 premiers cryostats logent une cavité chacun et constituent la partie bas beta du LINAC. Les 7 derniers logent deux cavités chacun et constituent la partie haut beta du LINAC. L'optique faisceau est une optique chaude. On retrouve ses éléments qu'on appelle "sections chaudes" et qui sont constitués d'aimants quadripolaires entre chaque cryomodule. A chaque cryostat est associée une boîte à vannes. Cette dernière, comme son nom l'indique, incorpore plusieurs vannes cryogéniques qui ont pour but la mise en froid et la régulation cryogénique des cryomodules. La boîte de raccordement (appelée connection box dans la figure 3.8) fait la jonction entre la partie "production" et la partie "exploitation".

3.1.2.1 Cryodistribution Cela représente l'ensemble des éléments qui permettent de mettre en froid, de contrôler, de réchauffer et de gérer la mise en sécurité ainsi que l'ensemble des modes d'opération cryogéniques. La cryodistribution est constituée de 19 boîtes à vannes interconnectées, d'une ligne de descente verticale, et d'une boîte de raccordement. Chaque boîte à vannes est suffisamment équipée (capteurs pression, sondes de températures, vannes) pour lui permettre d'assurer ses fonctions. Elle contient notamment 5 vannes dont 2 sont dédiées à la mise en froid et à la régulation des écrans thermiques et dont 3 sont dédiées aux bains LHe des cavités. Le vide d'isolation de la cryodistribution est divisé en trois ensembles séparés : (1) l'ensemble **LINA** constitué des 12 premières boîtes vannes qui gèrent les 12 premières cavités ; (2) l'ensemble **LINB** constitué des 6 dernières boîtes à vannes qui gèrent les 12 dernières cavités ; (3) l'ensemble **LINC** constitué de la boîte de raccordement et de la boîte à vanne centrale du **LINAC**.

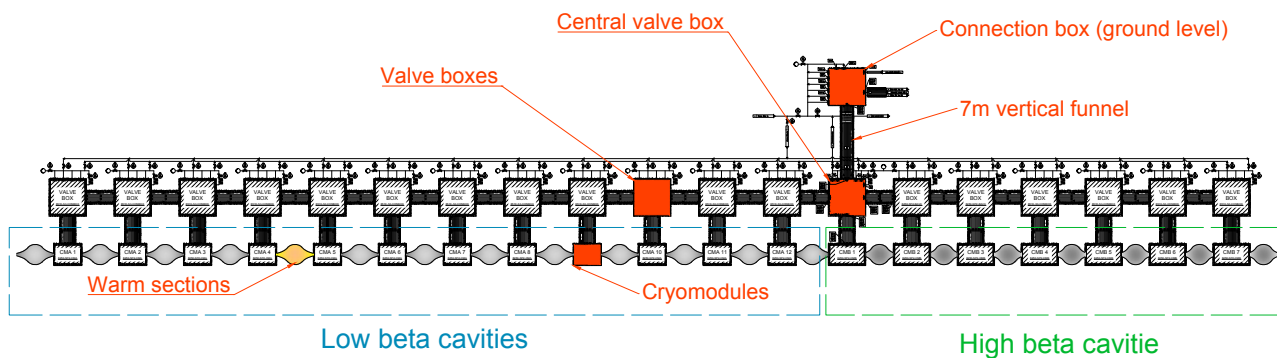


Figure 3.8 – Schéma de l'installation cryogénique dite d'exploitation du **LINAC SPIRAL2**.

3.1.2.2 Les cavités accélératrices et leurs cryomodules Les éléments accélérateurs du **LINAC** sont des cavités supraconductrices de type quart d'onde [Mar+15]. Elles sont faites en Niobium massif et opèrent à 88,025 MHz. Il y en a en tout 26, divisées en deux familles. La première, dite de type A, est optimisée pour un facteur d'accélération relative $\beta = 0,07$. Elle regroupe les douze premières cavités du **LINAC** logées chacune dans un cryostat séparé : le cryomodule. La deuxième, dite de type B, est composée des 14 prochaines cavités accélératrices logées par deux dans 7 cryomodules séparés. Ces dernières sont optimisées pour un facteur d'accélération relative $\beta = 0,12$. Les cavités sont phasées séparément et opèrent à un champ accélérateur maximal $E_{acc} = 6,5 \text{ MV/m}$. Le tableau 3.2 relate quelques-uns des points communs et des différences des cavités accélératrices. Dans la suite, nous adopterons la nomenclature suivante : CM^j_i où j prend la valeur A ou B pour renvoyer vers les cryomodules de type A ou de type B et i prend la valeur de 1 à 12 pour les type A et de 1 à 7 pour les types B en fonction de la position dans le LINAC. Quand les cavités seront mentionnées, nous donnerons un numéro allant de 1 à 26 relatif à la position de la cavité dans le LINAC. Le sens suit celui de l'accélération du faisceau.

Les cavités sont logées dans des cryostats qu'on appelle des cryomodules et qui contiennent l'ensemble de l'instrumentation nécessaire à leur opération. Ces différents éléments, en plus des cavités, donneront la signature thermique statique du cryomodule. Par exemple, le bas des CM^A est en cuivre et leurs écrans magnétiques sont à température ambiante. La cavité est alors plongée dans un bain d'hélium liquide dont le niveau et la pression sont régulés suivant les spécifications requises. Les CM^B sont eux intégralement en Nb mais sont logés par paires dans des cryomodules plus gros. Leurs écrans magnétiques sont en cryoperm® et sont refroidis par l'hélium liquide. Les deux cavités d'un CM^B sont plongées dans un bain d'hélium liquide dont le niveau et la pression sont régulés via un réservoir de garde commun.

Table 3.2 – Résumé des propriétés communes et des différences des cavités accélératrices [SPIRAL2](#).

Propriétés	Type A	Type B
	Différences	
β	0,07	0,12
Facteur de qualité Q_0	$3,5 \cdot 10^8$	$1,4 \cdot 10^9$
E_{pk}/E_{acc}	5,36	4,76
B_{pk}/E_{acc} [$mT \cdot MV^{-1} \cdot m$]	8,7	9,35
Système d'accord en fréquence	Ecrasement latéral	Plongeur vertical
Ecran magnétique	μ -métal	Cryoperm® refroidi
Matériau	Niobium + cuivre (bas cavité)	Niobium + Titane
Type alignement	température ambiante	froid
	Propriétés communes	
Champ accélérateur	$6,5 \text{ MV/m}$	
Contraintes d'alignement	$\sim 1 \text{ mm}$	
Fréquence RF	$88,0525 \text{ MHz}$	
Facteur de couplage Q_i	$\sim 10^6$	
Type de couplage	Couplage capacitif	
Température d'opération	$4,3 \text{ K}$	
Matériau	Niobium massif	

3.1.3 Le système de contrôle/commande

La cryogénie de [SPIRAL2](#) a plusieurs systèmes de contrôle/commande dédiés et interagissant les uns avec les autres et avec des systèmes extérieurs comme la sécurité, le système radiofréquence ou le vide. La figure [3.10](#) montre ses différents systèmes et leur organisation.

3.1.3.1 Usine cryogénique L'usine cryogénique a un système de contrôle commande basé sur un automate Siemens ETS200S qui contrôle la boîte froide, la station de compression et interagit avec différents systèmes extérieurs dont le [RGA](#) ¹⁶ et le LINAC. La supervision est basée sur un système PCVue®. Les données sont enregistrées en local et sont remontées vers le système d'archivage d'[EPICS](#) ¹⁷. Les alarmes sont uniquement archivées en local.

3.1.3.2 Installation de récupération d'hélium Le retour et le stockage de l'hélium impur à haute pression, les analyses de gaz et l'azote gaz et liquide sont gérés par un seul automate. Il s'agit d'un automate programmable Siemens S7-300 contrôlé par un pupitre tactile fonctionnant sous WinCC®. Ce système est central car il communique avec l'ensemble des systèmes de la cryogénie et du [RGA](#) y compris celui de [S3](#). Il centralise notamment les autorisations d'azote liquide et de gaz vers [SPIRAL2](#) et [S3](#). Les données sont enregistrées en local et sont remontées vers le système d'archivage d'[EPICS](#). Les alarmes sont uniquement archivées en local.

3.1.3.3 Système de contrôle/commande [SPIRAL2](#) Le système gérant la mise en froid, l'opération et la sécurité du [LINAC SPIRAL2](#) est centré sur un automate Siemens S7-400 dit "concentrateur". Ce dernier gère la cryodistribution, la communication avec la RF, le vide et la sécurité. Il gère aussi les autorisations et la communication avec et entre les différents sous-systèmes spécifiques aux cryomodules. Ces derniers sont basés sur des automates Siemens ETS200S et gèrent, individuellement, la mise en froid, le contrôle et le repli éventuel des cryomodules. Un grafset typique des différents modes de fonctionnement gérés par ces automates pour un cryomodule [SPIRAL2](#) est visible en annexe III. Un autre rôle qui a été ajouté récemment à cet automate est la communication avec Matlab, qui est utilisé pour la simulation thermodynamique des cryomodules et qui génère, de manière automatique, des paramètres réglages optimisés. Cette partie sera détaillée dans la section [3.3](#).

3.2 Un peu d'histoire : Mise en place et réception du système

3.2.1 Assemblage et montage du LINAC

En 2014, le [LINAC](#) était presque entièrement vide mais les préparatifs des travaux de montage des différents éléments qui composent le [LINAC](#) étaient bien engagés. Cette phase a monopolisé l'ensemble des équipes de mon-

16. Report Général d'Alarmes) (RGA)

17. Experimental Physics and Industrial Control System) (EPICS)

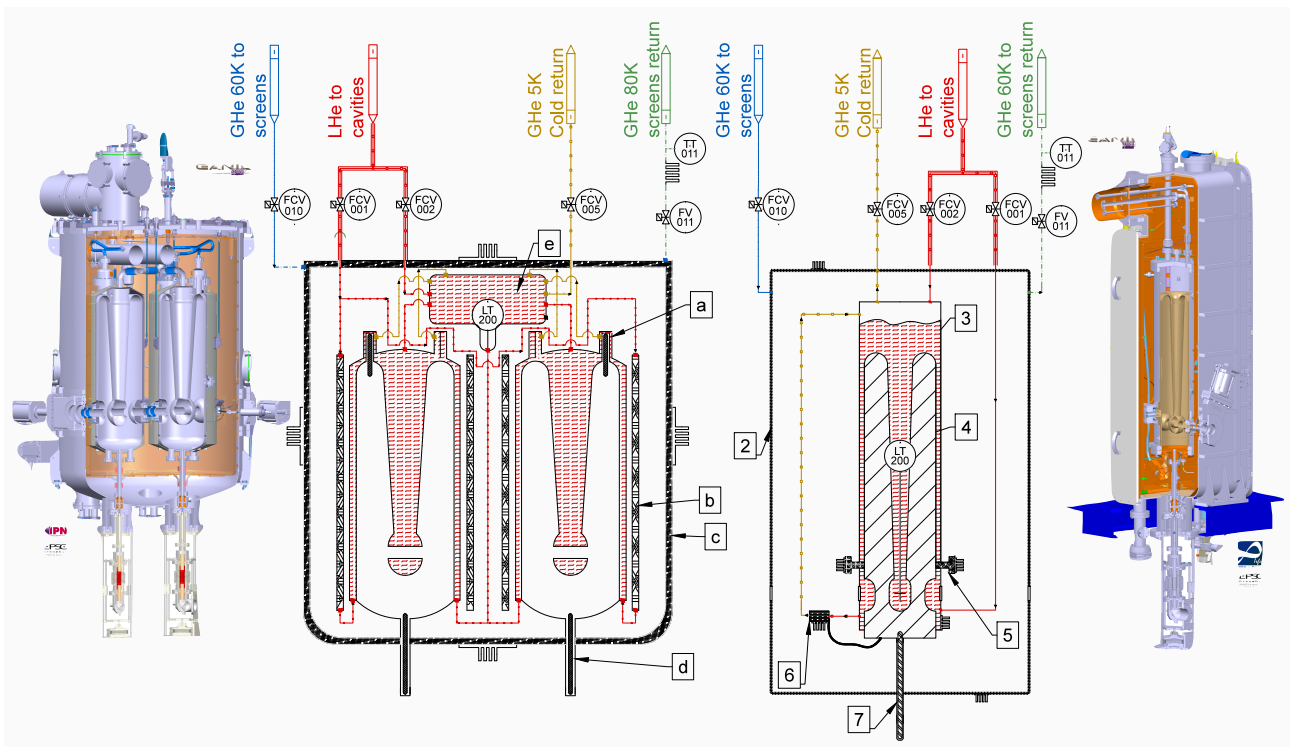


Figure 3.9 – Vue 3D et P&ID simplifiés des cryomodules SPiRAL2. (a) système d'accord en fréquence CM^B ; (b) écrans magnétiques CM^B ; (c) écrans thermiques CM^B ; (d) coupleurs radiofréquences cavités B; (e) réservoir de garde CM^B ; (2) écrans thermiques CM^A ; (3) bain LHe CM^A ; (4) cavité accélératrice CM^A ; (5) système d'accord en fréquence CM^A ; (6) thermo-siphon CM^A ; (7) coupleur radiofréquence CM^A .

teurs, de géomètres et plusieurs experts métiers différents ... Et ce, pendant plusieurs années. Pierre-Emmanuel Bernaudin, qui avait suivi la fabrication des CM^A à Saclay, s'est occupé de la coordination de la partie cryogénique du LINAC. Malgré les péripéties des boîtes à vannes et les retards qui en ont résulté, le montage s'est déroulé comme prévu. Grâce aux équipes du GANIL, de l'IRFU¹⁸, de l'IN2P3 et d'IFJ Pan¹⁹ qui se sont montrées à la hauteur de la tâche, les risques, les délais et les difficultés techniques ont été bien maîtrisés. Comme le montre la figure 3.12, en 2017, nous avons donc un LINAC complet, monté, câblé et prêt pour la phase de réception.

3.2.2 Réception de l'usine cryogénique

Cette réception concerne tous les éléments de l'usine cryogénique. Elle a commencé en 2015 dès la fin du tuyautage hélium au niveau 0 et avant même que le tuyautage vers le LINAC ne soit terminé. La charge thermique du LINAC a été simulée avec une résistance chauffante située dans le Dewar principal et les écrans thermiques par un circulateur à gaz avec des résistances chauffantes. Pendant cette phase, toutes les spécifications liées à la puissance cryogénique et à la régulation de pression ont pu être validées [Ghr+17]. C'est aussi à cette occasion que le modèle thermodynamique de la boîte froide a pu être validé [Ghr+17]. Les différents modes testés (voir tableau 3.3) hypothétisent des utilisations différentes de l'usine cryogénique : charge minimale, charge nominale, charge maximale, réfrigération pure et réfrigération + liquéfaction simultanées.

3.2.3 Mises en froid partielles

3.2.3.1 1^{ère} mise en froid partielle Comme le montre la figure 3.11, nous n'avons pas attendu la fin du montage du LINAC pour commencer les premiers essais de mise en froid. Dès juillet 2016 et avec seulement deux cryomodules prêts à être refroidis (CM^A_{03} et CM^B_{07}), nous avons commencé nos premiers essais [Ghr16a]. Nous connectons à l'époque la boîte froide au LINAC pour la première fois. Nous avons donc, de manière effective, le changement des conditions aux limites de fonctionnement de l'ensemble. Ceci a été provoqué par l'enclenchement d'oscillations thermo-acoustiques autour de 100 Hz dans le dewar principal (voir figure 3.13). Ces oscillations rendaient impossible la régulation de pression dans le Dewar et dans le LINAC. Nous avons donc exploré différentes solutions qui passaient par la mise en place d'un diagnostic (bypass du système de commande/contrôle de la boîte froide

18. Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (IRFU)

19. Instytut Fizyki Jądrowej (Institute of Nuclear Physics) im. H. Niewodniczańskiego PAN

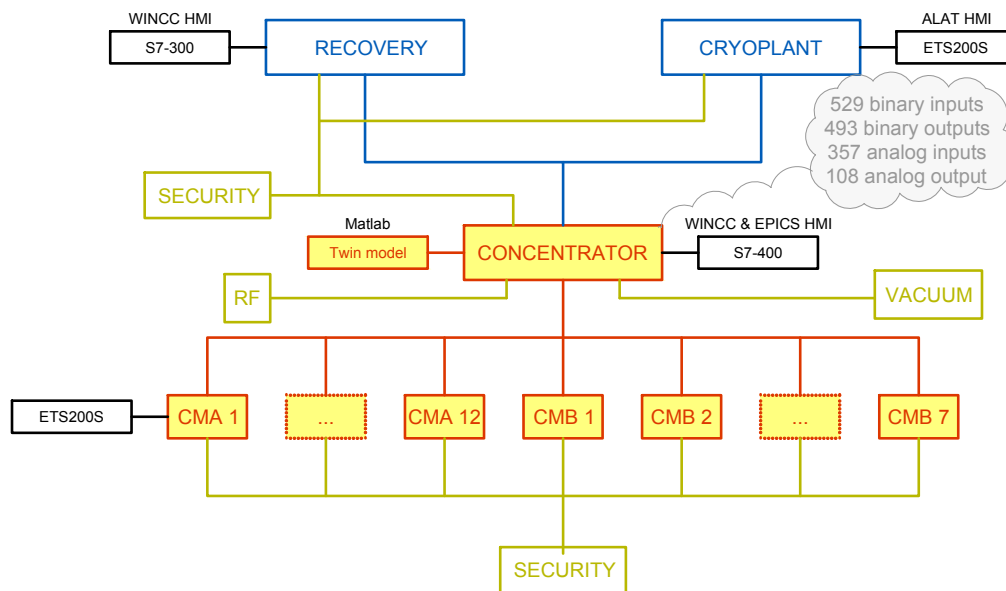


Figure 3.10 – Les différents systèmes de contrôle commande de la cryogénie SPIRAL2 et leur organisation.

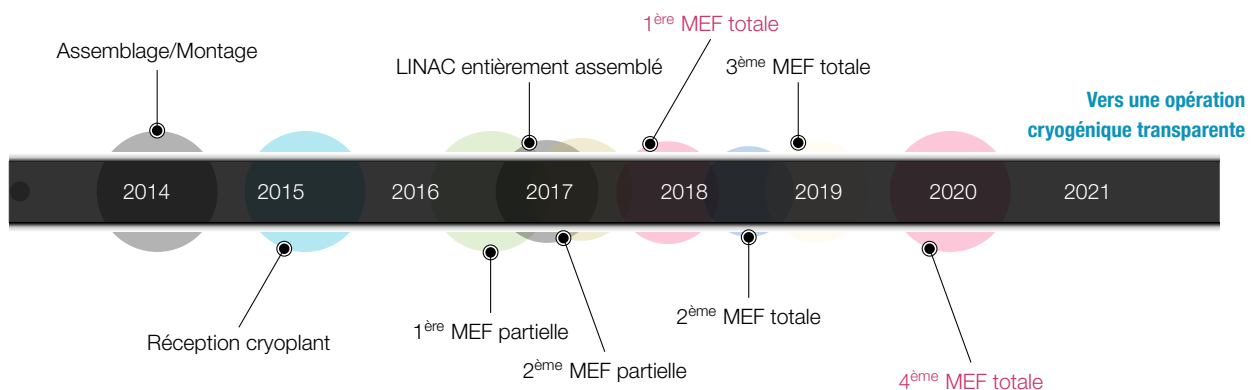


Figure 3.11 – Ligne de temps des différents jalons de la mise en place et de la réception de la cryogénie de SPIRAL2.

et utilisation d'un accéléromètre piézoélectrique). Nous avons aussi essayé différentes solutions passant par le court-circuit de ciel gazeux à des capacités tampon de différents volumes. Finalement, c'est une capacité tampon de 5 L montée en parallèle à la connection avec la boîte froide qui aura raison de cette anomalie. Nous aurons appris pendant cet épisode beaucoup de choses qui nous serviront à peine un an plus tard lorsque l'on découvrira d'autres oscillations thermo-acoustiques cryogéniques, cette fois-ci dans le LINAC.

Passons maintenant à l'objectif de la mise en froid de 2016. Celle-ci avait pour but de tester l'ensemble de l'instrumentation des cryomodules concernés ainsi que le processus de contrôle commande. Cette phase de tests précoces a été précieuse dans le débogage de l'automatisme, l'identification des faiblesses des systèmes, la réflexion sur les différentes procédures à adopter etc ... C'était par exemple l'occasion rêvée d'aiguiser les réflexes d'une permanence cryogénique lorsqu'il y a des coupures simultanées d'alimentation électrique, de communication réseau, que tout le monde se trouve à la cantine en même temps, que les soupapes du LINAC et du Dewar font leur usage, que la baudruche est gonflée à 110% et que les oiseaux chantent dans les aigus avec l'hélium qu'ils respirent ! On apprendra aussi qu'il vaut mieux réfréner la curiosité des manip du vendredi. De ce point de vue, ce fut donc un succès. Du côté de la régulation de la pression des bains des cavités, nous n'avons pas eu autant de succès. Nous avons en effet des instabilités de pression périodiques visibles dans le LINAC et dans le Dewar principal (voir figure 3.13). Nous les avons attribuées à l'époque (notamment grâce aux conseils de nos collègues de l'IRFU et de l'IN2P3) à un effet de thermosiphon sur la ligne de soutirage d'hélium liquide dû notamment à un titre de vapeur saturante trop important dans l'hélium diphasique. Ceci était causé par une charge thermique trop faible par rapport au dimensionnement du système.



Figure 3.12 – Photographies du LINAC entre 2014 et 2017 montrant la mise en place graduelle des différents éléments qui le composent.

Table 3.3 – Modes des essais de réception de l’usine cryogénique SPIRAL2 : Spécifications et mesures.

		Mode 1		Mode 2		Mode 3	
	Unités	Pré-requis	Mesure	Pré-requis	Mesure	Pré-requis	Mesure
$Load_{cav}^a$	[W]	1100	1100	370	370	553	553
$Load_{scr}^b$	[W]	3000	3000	1500	1500	1500	1500
P_{dewar}^c	[bar _{abs}]	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
		± 0.02	± 0.009	± 0.02	± 0.007	± 0.005	± 0.001
LT_{dewar}^d	[L/h]	10	> 70	0	0	0	0

a. Simulation de la charge thermique du circuit LHe des cavités et de la cryodistribution.

b. Simulations des charges thermiques des écrans thermiques des cavités et de la cryodistribution.

c. Dewar pressure

d. Cold Box liquefaction rate

3.2.3.2 2^{ème} mise en froid partielle La mise en froid de 2016 avait suscité beaucoup de questions pour le novice que j’étais et que je suis. Pour la mise en froid suivante, nous allons prendre le temps de nous attarder sur plusieurs questions : La modélisation thermodynamique des CM et les régulations des pressions de leurs bains LHe. En décembre 2016, nous avons donc mis en froid $CM^A_{01,02}$ et CM^B_{07} [Ghr16b; GV17]. Nous avons réussi à optimiser les régulations PI^{20} des vannes et avons confirmé par la même occasion que l’augmentation de la charge thermique du LINAC et donc du titre massique liquide avait un effet stabilisateur sur l’ensemble des pressions (voir figure 3.14). La thèse d’Adrien Vassal avançait et nous avons les premières données confrontant la modélisation thermodynamique des cryomodules à la réalité du terrain. Nous avons d’ailleurs à cette occasion fait une découverte fortuite dans l’instrumentation non câblée des cryomodules de type B : la présence de chauffe-ettes présentant un très bon couplage thermique avec le bain LHe. Cette chauffe-ette existait déjà pour les CM^A mais la puissance injectée n’était pas variable. A l’aide d’une petite alimentation à tension variable, nous avons donc fait nos premières mesures de charge thermique dynamique pour simuler l’effet de l’injection de la puissance radiofréquence et la robustesse des régulations. Les méthodes que nous étions en train d’appliquer allaient plus tard se généraliser pour le LINAC.

3.2.4 Mises en froid totales

3.2.4.1 1^{ère} mise en froid totale La première mise en froid totale du LINAC a eu lieu fin 2017. Il s’agissait là d’un jalon important pour le projet et d’une importance capitale pour l’opération cryogénique de SPIRAL2. Le premier objectif était de réceptionner l’ensemble du système contrôle/commande, le câblage associé et toute l’instrumentation

20. Proportionnelle Intégrale (PI)

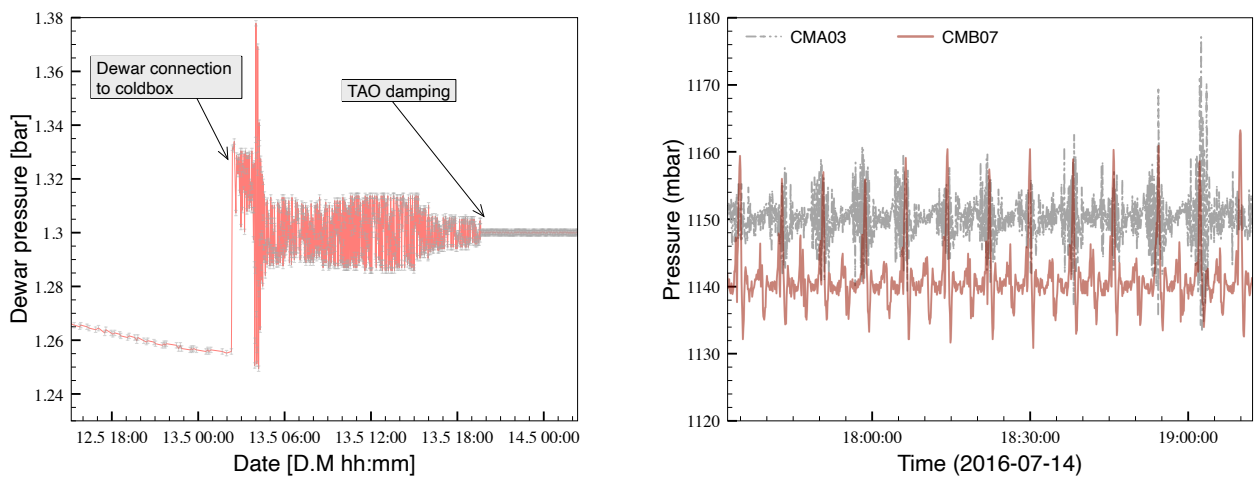


Figure 3.13 – Deux des résultats de la mise en froid partielle du LINAC SPIRAL2 de juillet 2016. A gauche : apparition puis élimination d’oscillations thermo-acoustiques dans le dewar aux moments de la connexion de la boîte froide au dewar et à l’activation de la vanne de la capacité tampon. A droite : pression des bains LHe des cryomodules CM^A_{03} et CM^B_{07} .

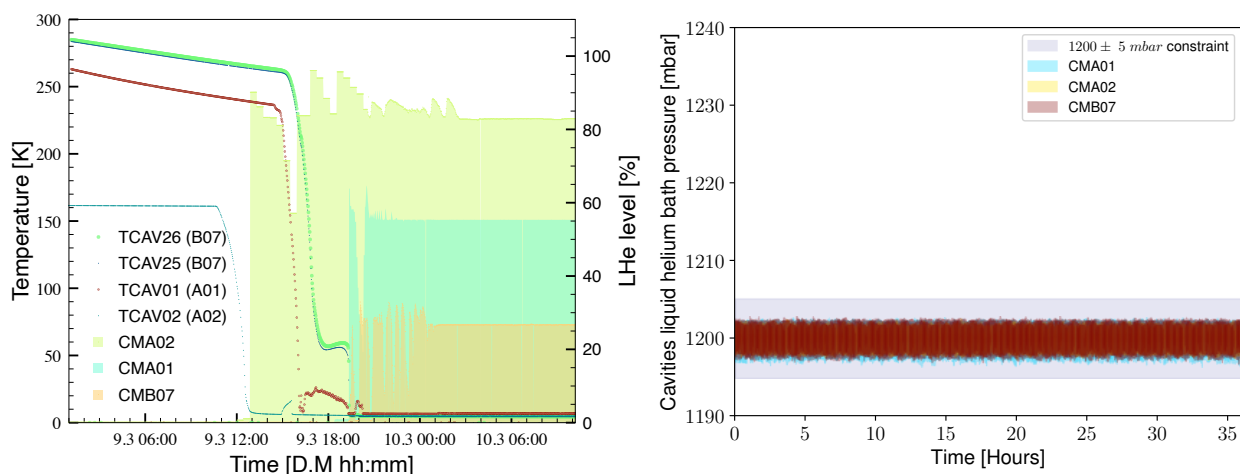


Figure 3.14 – Deux des résultats de la mise en froid partielle du LINAC SPIRAL2 de décembre 2016 pour $CM^A_{01,02}$ et CM^B_{07} . A gauche : Descente en froid des cavités et remplissage de leurs séparateurs de phase en LHe. A droite : Pression des bains des cavités.

froide du LINAC [GB17]. Ce fut là un succès [Ghr+20]. Nous continuons bien sûr d’améliorer nos procédures de contrôle et de préparation et nos collègues du contrôle/commande nous avaient concocté un mode d’opération virtuelle (simulation) que nous convoitions si expressément. Cette virtualisation sera précieuse pour les vérifications concernant la logique fonctionnelle des actionneurs et les changement de modes.

Nous avons aussi exploré l’ensemble de l’instrumentation des CM^B et avons malheureusement découvert que plusieurs chaufferettes non câblées étaient brûlées suite aux tests en laboratoire à l’IPNO et donc inutilisables. Fort heureusement, nous avons trouvé une solution que nous allons nous employer à tester pendant les prochaines campagnes de mises en froid.

Concernant les régulations de pression, il fallait bien se rendre à l’évidence : nos optimisations passées n’étaient plus valables. L’installation d’une surveillance logicielle cyclique des déviations de pression nous a permis de nous rendre compte de nombreux dépassements par rapport aux contraintes des ± 5 mbar requis (voir figure 3.15). Cela ne nous avait pas surpris car nous nous étions préparés à cette éventualité de la limitation de la gestion des couplages internes entre la pression et le niveau de deux régulateurs P&ID non informés par un modèle. Ce n’était cependant pas là la seule raison qui faisait apparaître les quelques instabilités observées car elles n’étaient qu’une des faces cachées du mont TAO²¹. Une autre face cachée allait être révélée par la radiofréquence. Cette mise en froid coïncidait en effet avec la première injection de puissance RF dans les cavités. Nous allons enfin savoir si ce tas de Niobium était bien vivant après tant d’années de stockage. Cette partie était très intéressante parce qu’il

21. Il ne s’agit pas là d’un des monts du Wudang mais d’un acronyme de Thermoacoustic oscillations (TAO).

s'agissait de la première ouverture de la cryogénie du LINAC qui s'était cantonnée jusque là à son périmètre réduit. Les mesures conjointes que nous avons faites avec le groupe RF ont montré un phénomène étonnant. L'amplitude et la phase du signal sortant subissait une modulation propre, claire et permanente par rapport au signal entrant. Pour CM^B_{07} , cette modulation avait une fréquence de 5 Hz (voir figure 3.15). C'était donc trop lent pour que le système du Low Level RF (LLRF) soit incriminé. Il fallait donc chercher du côté des modes mécaniques. C'était finalement bien une belle thermo-acoustique cryogénique face à laquelle nos capteurs de pression absolus étaient aveugles. Le voile allait donc bientôt être levé et une instrumentation piézoélectrique dédiée installée sur tous les cryomodules. Cette partie est détaillée dans la section 3.6.

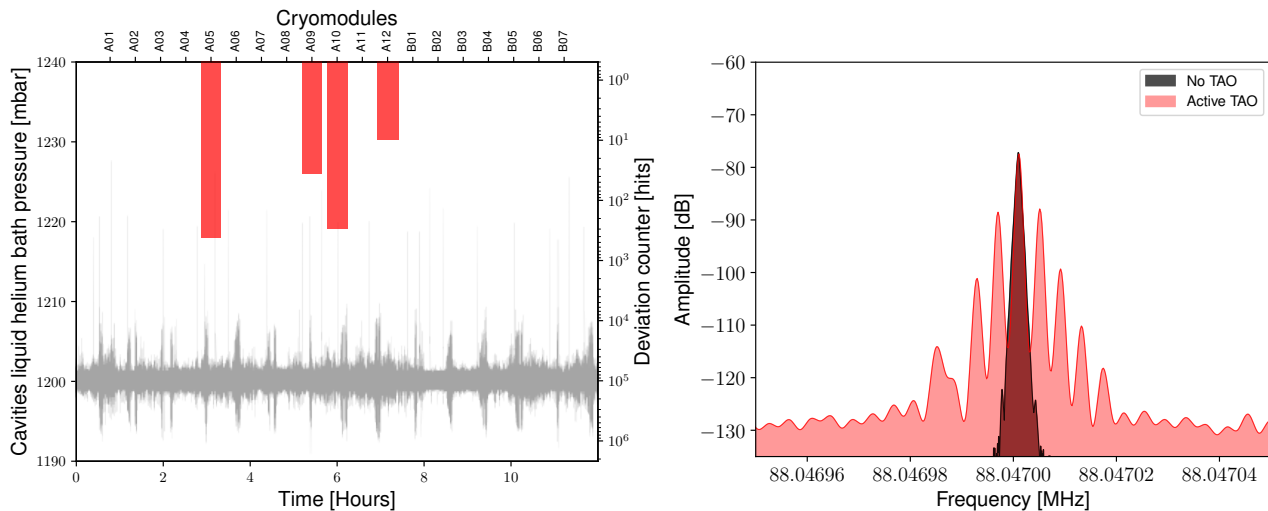


Figure 3.15 – A gauche : Pressions des baigns LHe des cavités du LINAC et compteur de déviation associé. A droite : Modulation de la différence d'amplitude entre la puissance radiofréquence transmise P_t et incidente P_i .

3.2.4.2 2^{ème}, 3^{ème}, ... n^{ème} mise en froid totale du LINAC Les campagnes de mise en froid totale du LINAC de 2018 [GVB18], 2019 et 2020 se sont concentrées sur la résolution des problèmes rencontrés précédemment et la mise en place de solutions adaptées. Nous avons ainsi pu mettre en place toute l'instrumentation nécessaire à un contrôle de la charge thermique par l'installation de résistances chauffantes et d'alimentations à puissance variable pour tous les cryomodules. Nous avons continué à travailler sur l'investigation du problème de la thermo-acoustique. Cette investigation était conjointe avec le groupe RF et a vu la mise en place d'une acquisition commune des pressions rapides et des signaux RF sur tous les cryomodules. J'ai pu mettre en place un pipeline d'analyse de données adapté à notre problématique sur un serveur dédié. Le problème a été rapidement résolu en adoptant la solution de court-circuit de ciel gazeux; solution qui reste un compromis à cause de l'effet sur la régulation de niveau (dans une certaine plage de régulation). Nous avons donc continué notre investigation. 3 ans de données nous auront permis de mieux comprendre les oscillations et leurs conditions d'apparition. La suite de cette investigation continue aujourd'hui dans le cadre de la collaboration NGTACryo (voir section 2.5). Ces travaux nous ont aussi permis de mettre en place une surveillance automatique de déclenchement de Taconis.

Les mises en froid de 2018, 2019 et 2020 se sont aussi concentrées sur l'optimisation de la procédure de la mise en froid et des réglages des contrôleurs de pression et de niveau d'hélium liquide des baigns des cryomodules (voir section 3.3). Elles ont aussi permis de mener de nombreuses études machines qui avaient pour but de caractériser le comportement thermique dynamique (en fonction du champ accélérateur) des cryomodules et d'investiguer des anomalies importantes constatées pour CM^A_{11} . La figure 3.16 montre par exemple une charge statique quasi-stable sur trois ans. La potentielle dégradation de la charge statique des CM^B est à surveiller.

A l'issue de la mise en froid de 2020, nous avons entamé sereinement la suite du transfert de la réception du système vers l'opération cryogénique qui devient aujourd'hui complètement transparente vis à vis de l'opération RF et faisceau. Les travaux passés continuent dans le cadre d'études d'algorithmes avancés de contrôle et de détection d'anomalies basés sur de l'apprentissage profond [Vas+21].

3.3 Optimisation et opération du système

3.3.1 Mise en froid

3.3.1.1 Contraintes de mise en froid Une des contraintes des cavités SPIRAL2 est qu'elles sont sensibles à l'effet 100 K aussi appelé Q-disease. Une pollution à l'hydrogène causerait la formation d'hydrides de Niobium dans la

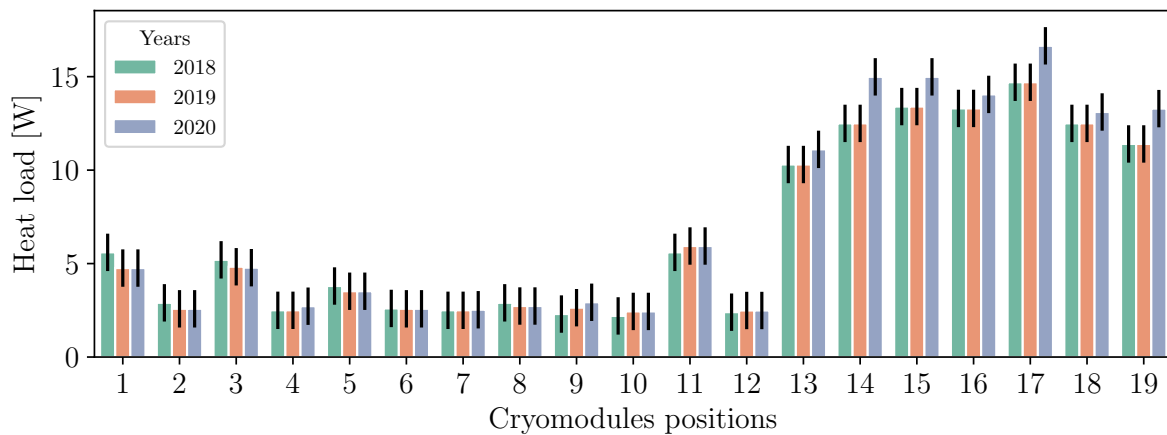


Figure 3.16 – Mesures des charges statiques des cryomodules du LINAC SPIRAL2 pour les années 2018, 2019 et 2020.

matrice du Niobium. Ce changement de phase en surface apparaîtrait à partir de 170 K et jusqu'à une température basse variable entre 70 et 50 K. Une très faible pollution suffit à provoquer cet effet qui dégraderait la résistance de surface. Il a cependant été démontré qu'une mise en froid rapide permet d'éviter cet effet. Sachant que le facteur de qualité Q_0 peut s'exprimer de manière simplifiée par :

$$Q_0 = \frac{G}{R_s} \quad (3.1)$$

avec G un facteur géométrique et R_s la résistance de surface, une éventuelle dégradation de la résistance de surface dégraderait également le Q_0 de la cavité. Ceci dégraderait par la même occasion le potentiel accélérateur de la cavité, c'est à dire la quantité d'énergie que cette dernière est capable de stocker et de transmettre au faisceau de particules. Dans la réalité, plusieurs contributions viennent compléter et complexifier l'équation 3.1 mais l'effet de la résistance de surface reste prépondérant dans le cas d'un syndrome dit de Q disease. Les conditions d'apparition de cet effet ont été explorées dans nombre d'études [Kno03] et, plus spécifiquement, dans la thèse de David Longuevergne [Lon09] pour les cas des CM^B. Les essais en laboratoires partenaires (IRFU pour les CM^A et IPNO pour les CM^B) ont montré que ce symptôme apparaît lorsque la cavité passe trop de temps entre 150 K et 50 K. Ce temps "trop important" dépend de la cavité et l'ampleur de la dégradation dépend de ce temps. Une durée conservative a alors été prise pour l'ensemble des cavités. Ces dernières ne devront pas passer plus de 60 mn entre 150 K et 50 K. Si cela était le cas, nous considérerions de les réchauffer pour désorber l'hydrogène. Nous avons donc mis en place un compteur observateur que nous appellerons dans la suite Q_{dcount} et qui compte la durée totale qu'une cavité a passé entre 150 K et 50 K depuis le début de sa mise en froid. La décision de réchauffer ou de ne pas réchauffer est prise au cas par cas. Par exemple, si nous passons toute une nuit entre 150 K et 50 K, la décision de réchauffer la cavité sera évidente. Si en revanche, la durée est de 100 mn, nous considérerons des mesures de dissipation thermique à champ accélérateur nominal pour établir si une dégradation significative du Q_0 a effectivement eu lieu. Plusieurs événements accidentels pendant une campagne ou un peu peuvent contribuer à incrémenter le Q_{dcount} et à mettre en évidence une possible dégradation de la cavité pourtant identifiée comme saine au départ. Nous pouvons également prendre la décision de cycler thermiquement une cavité isolée si, par exemple, nous observons de l'émission de champ qui limite ses performances.

3.3.1.2 Procédure de mise en froid optimisée Plusieurs années de tests et d'essais ont été nécessaires avant de trouver une stratégie de mise en froid optimale dans notre cas. Nous parlons évidemment ici de la mise en froid initiale totale du LINAC, c'est à dire avec tout le LINAC initialement à 300 K. La procédure détaillée peut être trouvée dans [Ber19]. Cependant, par soucis de pédagogie ici, il conviendra de séparer stratégie de mise en froid globale du LINAC et stratégie de mise en froid individuelle des cryomodules, les deux étant en réalité couplées. Comme il peut être visible sur la figure 3.8, le LINAC ne possède pas de by-pass froid qui permettrait de mettre en froid indépendamment la cryodistribution. Les premiers cryomodules refroidis souffrent donc d'un freinage de leur mise en froid à cause de la charge trop importante de la ligne de retour froid. En plus d'autres contraintes s'ajoutent comme la gestion du retour chaud vers le bas de la boîte froide si cette dernière est froide ou encore la gestion de la température des écrans thermiques. Voici donc un résumé de la stratégie de mise en froid globale appliquée aujourd'hui :

1. Mise en froid simultanée de la boîte froide, de l'écran thermique de CM^A₁₂ et de la portion GHe 60 K de LINC ;

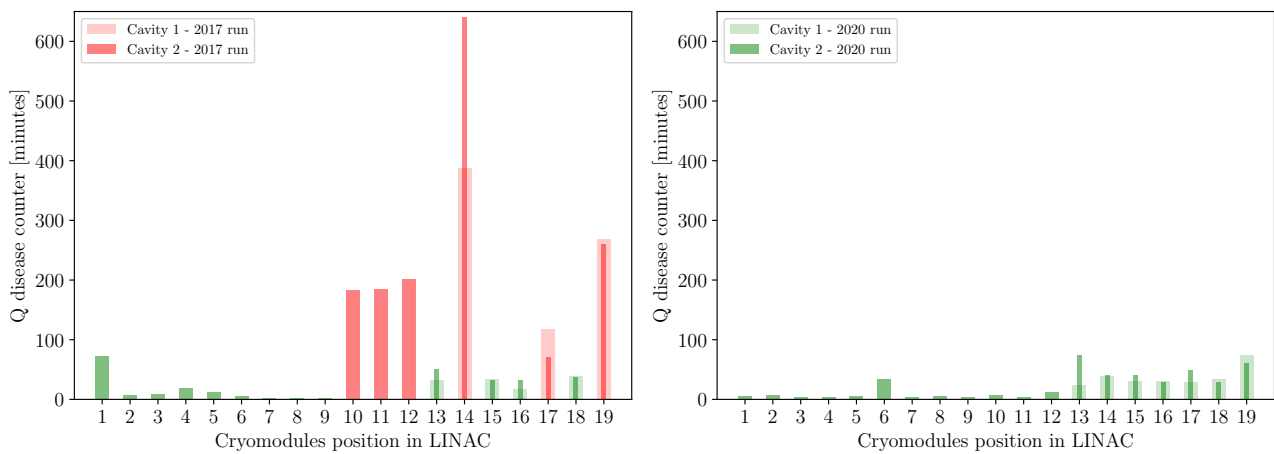


Figure 3.17 – Evolution du Q_{dcount} entre la première mise en froid en 2017 et la dernière mise en froid en 2020.

2. Mise en froid de la cavité de CM^A_{12} et de la portion LHe/GHe 5 K de LINC ;
3. Mise en froid simultanée de l'écran thermique de CM^A_{01} et de la portion GHe 60 K de LINA ;
4. Mise en froid de la cavité de CM^A_{01} et de la portion LHe/GHe 5 K de LINA ;
5. Mise en froid graduelle des écrans thermiques et des cavités des CM^A en partant de CM^A_{02} et en terminant par CM^A_{11} . Le nombre de mises en froid simultanées dépend du débit de retour froid et donc du nombre de cryomodules déjà froids. Plus le débit froid est important, plus le nombre de mises en froid simultanées pourra être important ;
6. Mise en froid graduelle des CM^B en commençant par CM^B_{01} et en terminant par CM^B_{07} . En effet, à cause de la charge thermique importante des CM^B , il n'est pas possible d'adopter la même stratégie que pour les CM^A pour refroidir la portion de la cryodistribution LINB. L'approche est donc de mettre en froid à chaque fois une portion réduite comprise entre deux cryomodules en même temps que le dernier cryomodule mis en froid.

La planification des étapes décrites dépendent aussi de la stratégie de mise en froid individuelle. Comme vu précédemment, la problématique de mise en froid est principalement due au Q-disease. Il faut donc mettre en froid le plus rapidement possible entre 150 K et 50 K. Le problème est que, si la charge thermique est trop importante, la pression du bain augmente diminuant en même temps la différence de pression entre le Dewar principal et le bain du cryomodule en question. En conséquence, le transfert d'hélium s'arrête et la température de la cavité augmente et stagne dans sa gamme critique. La stratégie qui a été adoptée consiste à contrôler la vitesse de mise en froid des cavités de manière à maximiser la thermalisation au dessus de 150 K. Ceci nous donne aussi un contrôle pour planifier le moment où l'accélération de la mise en froid est enclenchée. La figure 3.18 montre les détails de cette stratégie. Nous accélérons la mise en froid jusqu'à 250 K. Une fois cette température atteinte, nous appliquons une régulation PI de la température cavité avec une consigne rampante définie en mK/mn. Une fois la température de 150 K atteinte, nous accélérons la mise en froid. Lorsque le bain est suffisamment froid, il commence à se remplir en LHe. La mise en froid n'est cependant pas finie pour autant et il faudra attendre que tous les éléments des cryostats soient thermalisés pour passer au mode d'opération normal. C'est seulement à ce moment qu'il est possible de réguler la pression des bains et de donner l'autorisation de l'opération radio-fréquence des cavités.

3.3.2 Mode "normal" d'opération

Lorsque la mise en froid est terminée, que tous les éléments internes des cryostats sont thermalisés (voir [Ghr+20] pour les conditions de thermalisation), l'opérateur peut passer en mode normal d'opération. Les transitions de modes sont fidèles au grafcet présenté en annexe III. Ces transitions de modes ainsi que d'autres conditions comme la température de l'hélium conditionnent des modes d'opération d'autres systèmes comme les aimants quadripolaires qui précèdent et qui suivent un cryomodule donné et l'opération radio-fréquence. Le mode normal implique une régulation à la fois du niveau d'hélium et de la pression du bain d'hélium suivant le cahier des charges des pré-requis explicités ci-dessous.

3.3.2.1 Contraintes et pré-requis de l'opération cryogénique La cryogénie fournit les conditions d'opération nécessaires à l'injection et à la régulation de la puissance radio-fréquence dans les cavités. La première de ses conditions est de maintenir l'état supraconducteur des cavités et de s'assurer de leur uniformité de température afin d'avoir une résistance de surface uniforme. Pour ce faire, les cavités sont plongées dans un bain d'hélium liquide à basse

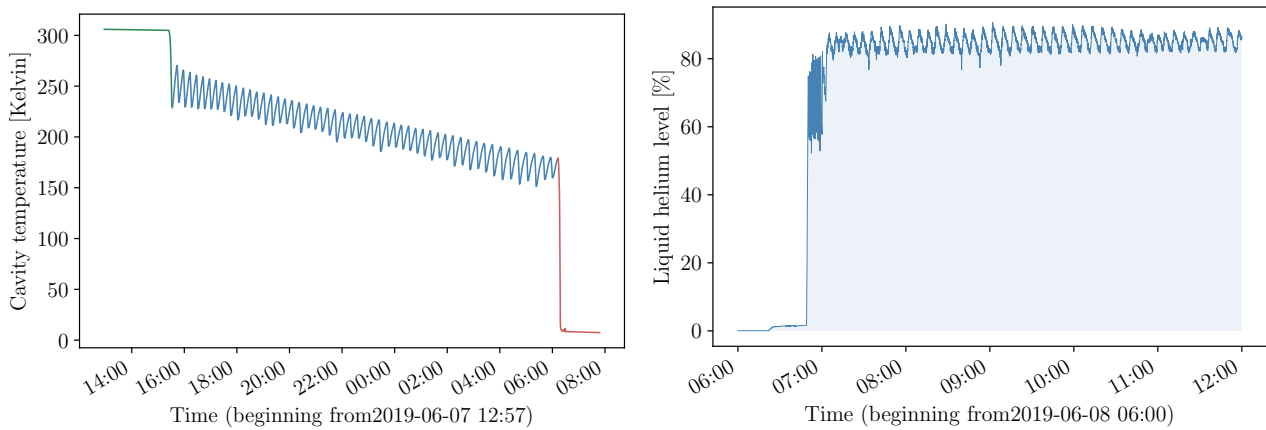


Figure 3.18 – Etapes d’une mise en froid typique d’une cavité [SPIRAL2](#) (ici [CM^A₀₃](#)). A gauche : descente contrôlée de la température de la cavité. A droite : Remplissage et régulation du bain [LHe](#).

Table 3.4 – Résumé des principales perturbations qui peuvent affecter la régulation RF des cavités [SPIRAL2](#).

Perturbation	Origine	Fréquence	Correction
Forces de Lorentz	Pression de radiation électromagnétique	~ 88 MHz	LLRF
Pression bain LHe	Couplage pression/niveau LHe	~ secondes	Cryogénie
Pression bain LHe	Couplage inter-cryomodules	~ secondes	Cryogénie
Pression bain LHe	variation de consigne	~ secondes	SAF
Thermoacoustique	BAV / CM	~ Hz ⇒ ~ 100 Hz	LLRF
Variations de températures	Coupleur	minutes	SAF
Mécanique	Moteur SAF	~ Hz ⇒ ~ 100 Hz	LLRF/SAF
Mécanique	Pompes	~ 10 Hz ⇒ ~ kHz	Découplage
Mécanique	Turbulence hélium	~ 10 Hz	Cryogénique

pression qui maintient la température des cavités autour de 4,2 K. La contrainte ici est donc que les cavités ne doivent jamais être dénoyées. Si une cavité venait à l’être, l’hélium gaz saturé pourrait ne pas être en mesure d’extraire la charge thermique dissipée par la RF. En conséquence, une partie de cette cavité transiterait à l’état normal provoquant une propagation de cet état et donc un quench de la cavité. Le reste des conditions sont liées à toute source de perturbation de la fréquence d’une cavité. Le tableau 3.4 en résume les grandes lignes. Les perturbations qui y sont reportées peuvent perturber la stabilité de l’accélération en affectant la fréquence de résonance des cavités. Lorsque ces instabilités ont des fréquences rapides (>10 Hz), c’est à la boucle de régulation du [LLRF](#) d’assurer la stabilité du champ accélérateur en amplitude et en phase. La capacité du [LLRF](#) à corriger ces instabilités est pourtant limitée par le temps de réponse de la boucle d’asservissement et par la réserve de puissance des amplificateurs. Un désaccord de fréquence Δf par rapport à la fréquence d’accord f_0 s’exprime alors par :

$$\Delta f = \frac{f_0}{2Q_L} \sqrt{\frac{P_{gmax}}{P_{g0}} - 1} \quad (3.2)$$

où Q_L est le facteur de qualité en charge, P_{g0} la puissance nécessaire à l’accord et P_{gmax} la puissance maximale délivrée par le générateur RF. Pour [SPIRAL2](#), il est clair que P_{gmax} est le facteur limitant. Ceci est dû aux marges de puissance trop réduites des amplificateurs pour certains groupes de cavités. Ceci est apparu être le cas lors des tests concernant les limites compensables par le [LLRF](#) des amplitudes des vibrations mécaniques d’origine thermo-acoustique cryogénique. Pour les [CM^B](#), nous avons pu établir cette limite à 5 mbars pour une fréquence de modulation de 5 Hz.

Lorsque les perturbations sont plutôt lentes (inférieures au Hz), c’est au [Système d’Accord en Fréquence \(SAF\)](#) de compenser les instabilités. Ici aussi, des limites s’appliquent quant aux amplitudes des perturbations mécaniques et leurs fréquences. Les instabilités de pression, par exemple, ne peuvent en général être compensées ni par le [SAF](#) (dont le rôle est de suivre les déviations lentes), ni par le [LLRF](#) (qui compense les variations très rapides). Les cavités étant plongées dans un bain d’hélium liquide, la pression de ce dernier représente une force uniforme appliquée sur toute la surface extérieure de la cavité. Or, une déformation, même micro-métrique, de la forme de la cavité provoque un changement de sa fréquence de résonance. Il s’agit là du lot des cavités supraconductrices à faible bande passante et à haut facteur de qualité. La contrainte est donc ici liée à la sensibilité des cavités à

Table 3.5 – Sensibilité à la pression des cavités [SPIRAL2](#) et contrainte de régulation de la pression des bains pour $\delta\phi = \pi/12$ et $Q_L \sim 10^6$.

Cavités	Cryomodules	S_p [Hz/mbar]	δP_{bain} [\pm mbar]
01	CM ^A ₀₁	-1,23	11,92
02	CM ^A ₀₂	-1,32	11,11
03	CM ^A ₀₃	-1,453	10,09
04	CM ^A ₀₄	-1,45	10,11
05	CM ^A ₀₅	-2,9	5,05
06	CM ^A ₀₆	-1,08	13,58
07	CM ^A ₀₇	-1,66	8,83
08	CM ^A ₀₈	-1,24	11,82
09	CM ^A ₀₉	-1,38	10,62
10	CM ^A ₁₀	-1,31	11,19
11	CM ^A ₁₁	-1,58	9,28
12	CM ^A ₁₂	-1,22	12,02
13	CM ^B ₀₁	-5,3	2,76
14	CM ^B ₀₁	-4,95	3
15	CM ^B ₀₂	-5,9	2,48
16	CM ^B ₀₂	-7,3	2
17	CM ^B ₀₃	-4,9	3
18	CM ^B ₀₃	-5,2	2,82
19	CM ^B ₀₄	-5,2	2,82
20	CM ^B ₀₄	-4,5	3,25
21	CM ^B ₀₅	-5,9	2,48
22	CM ^B ₀₅	-6,2	2,36
23	CM ^B ₀₆	-6,2	2,36
24	CM ^B ₀₆	-5,8	2,52
25	CM ^B ₀₇	-5,4	2,71
26	CM ^B ₀₇	-5,8	2,52

la pression du bain. Elles ont été mesurées pendant les tests de caractérisation en laboratoire (IRFU et IPNO) avant que les cryomodules ne soient envoyés au GANIL. Ils sont exprimés dans le tableau 3.5. En se basant sur la valeur du déphasage $\delta\phi$ (appelé DPCI dans le cadre du projet [SPIRAL2](#)) entre la puissance incidente P_i et celle transmise P_t , il est possible de déduire la contrainte en terme de régulation de pression :

$$\delta P_{bain} = \frac{\delta f}{S_p} = \frac{f_0 \delta\phi}{\pi Q_L S_p} \quad (3.3)$$

avec P_{bain} la pression du bain LHe, δf le décalage en fréquence admissible, f_0 la fréquence d'accord de la cavité, $\delta\phi$ le déphasage, S_p la sensibilité à la pression et Q_L le facteur de qualité en charge de la cavité. Les valeurs de δP_{bain} sont exprimées dans le tableau 3.5 pour les valeurs de S_p mesurées en laboratoire et un $\delta\phi$ de $\pi/12$.

La spécification de départ qui avait été fournie par le projet était de $\delta P_{bain} = \pm 5$ mbar sur l'ensemble du [LINAC](#) pour les instabilités de pression ne pouvant être compensées par le [SAF](#). Aucune spécification n'avait été donnée quant à l'amplitude des oscillations thermo-acoustiques de pressions. Il va de soi que, pour la suite, ce sont les spécifications fonctionnelles évolutives qui devront être prises en compte. Ces dernières sont susceptibles de varier suivant l'état des différents sous-systèmes autres que la cryogénie ainsi que les paramètres de la machine.

3.3.2.2 Diagnostique et caractérisation du système Avant de vouloir à tout prix contrôler un système, il faut apprendre à le connaître. C'était l'objectif de la première partie de la thèse que j'avais co-encadré dans le cadre du projet [GRAAL](#). C'était aussi l'objectif des premières campagnes de mise en froid, de réception des différents sous-systèmes du [LINAC SPIRAL2](#) et des études machines associées.

3.3.2.2.1 Mesures de la distribution de la charge thermique statique Le [LINAC](#) peut être assimilé, en analogie électrique, à un ensemble d'impédances distribuées. La boîte froide agit alors comme un générateur de tension. Les clients (les cryomodules), montés en parallèle, ont donc la même tension (la même pression de bain) mais des courants différents (débits d'hélium) en fonction de leurs impédances propres (charges thermiques). Un cryomodule

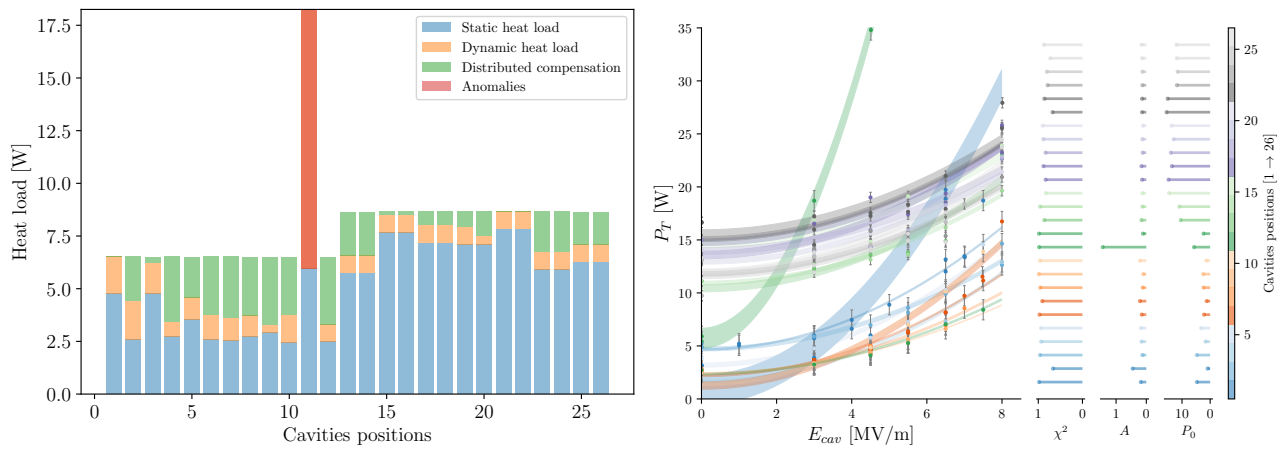


Figure 3.19 – A gauche : Equilibrage du débit hélium du LINAC avec mise en évidence des différentes contributions. A droite : Mesures et fits des charges thermiques du LINAC en fonction du champ accélérateur.

ayant une charge thermique beaucoup plus importante que ses voisins peut donc accaparer une grande partie du débit d'hélium disponible et donc vider les autres bains ou provoquer des instabilités. Il s'agit là d'un phénomène classique observé notamment dans l'installation cryogénique d'ISOLDE²² au CERN. Pour se prémunir de ce genre de phénomène, nous avons entrepris d'égaliser les débits le long de la ligne de distribution. Nous avons d'abord divisé la ligne de cryodistribution en trois portions que nous avons déjà mentionnées précédemment : LINA, LINB et LINC. Le débit arrivant par LINC doit être divisé à parts égales entre LINA et LINB. La charge thermique totale de la portion LINA de la cryodistribution et de l'ensemble des CM^A doit donc être égale à la charge totale de la portion LINB et de l'ensemble des CM^B . Nous avons supposé dans la suite que la différence de charge entre LINA et LINB était dominée par les cryomodules et avons donc entrepris d'équilibrer les charges thermiques dans ces derniers. Le long de LINA (respectivement LINB), tous les CM^A (respectivement CM^B) doivent avoir la même charge thermique. La figure 3.19 montre cette logique. La stratégie nécessite donc de connaître la charge statique et la charge dynamique (induite par la RF). Cette charge est mesurée par décroissance de niveau d'hélium. L'opérateur augmente le niveau du bain à une valeur supérieure à 90%. Il s'assure ensuite de la fermeture des vannes d'apport de LHe FCV₀₀₁ et FCV₀₀₂ (voir figure 3.9). La vanne de sortie FCV₀₀₅ reste en régulation de pression. La charge thermique est dans ce cas donnée par :

$$P_{d0} = \frac{\delta V(LT_{200})}{\delta t} \rho(P_{T_{001}}) C_{latente} \quad (3.4)$$

où V est le niveau d'hélium liquide calculé à partir de la mesure la sonde de niveau LT_{200} , ρ est la densité d'hélium liquide à la pression du bain $P_{T_{001}}$ et enfin $C_{latente}$ la chaleur latente de l'hélium liquide. En pratique, j'ai mis en place un code de calcul qui interroge directement la base de données EPICS et extrait l'ensemble des mesures de niveau et de pression. Les mesures de pression permettent pour chaque point de calculer la densité de l'hélium liquide grâce à la librairie Python CoolProp²³. La fonction $V(LT_{200})$ donnant la valeur réelle du volume du bain en fonction de la mesure de la sonde de niveau est extraite à partir des modèles 3D des cryomodules. Elle est donc dépendante du type de cryomodule. Enfin, la valeur P_{d0} est estimée par fit des données. L'incertitude dépend du nombre de points extraits et donc de la valeur de la charge thermique. Plus celle-ci est importante, plus la mesure est rapide et moins il y a de points de mesures. Entre 5 et 10 W à 4,3 Kelvin, l'incertitude ne dépasse pas ± 1 W. A 70 W à 4 Kelvin, elle dépasse ± 10 W. Multiplier les mesures permet d'avoir une meilleure statistique et donc une meilleure précision. Les précisions des mesures unitaires ont été vérifiées grâce aux chauffeuses installées dans les bains des cavités. Ce calcul se fait automatiquement en entrant l'heure de début et de fin de la mesure sur le notebook jupyter²⁴ concerné. La mesure, elle, est manuelle. L'action des vannes doit donc être gérée manuellement par l'opérateur en place. La mesure automatique de la charge thermique et son étalonnage est en cours de mise en place au moment de l'écriture de ce manuscrit.

3.3.2.2 Caractérisation de la dynamique de la charge thermique La stratégie de la compensation des différences de charges statiques pour uniformiser les débits est étendue ici à la charge dynamique. Celle-ci inclue tous les effets qui peuvent contribuer à la dynamique de charge comme l'effet de la résistance de surface, l'émission de champ ou encore les effets de couplage de la cavité. Nous supposons dans la suite une variation de la charge

22. Communication privée.

23. <http://www.coolprop.org/>

24. <https://jupyter.org/>

thermique en fonction du champ accélérateur dominée par la résistance de surface. Dans le cas des cavités [SPIRAL2](#) et pour des champs accélérateurs inférieurs à 7 MV/m cette supposition est réaliste et est amplement suffisante pour notre besoin. Dans ce cas, la dissipation thermique peut être exprimée par :

$$P_d = \frac{(E_{cav}\lambda\beta)^e}{R_s} + P_{d0} \quad (3.5)$$

où E_{cav} est le champ accélérateur, λ la longueur d'onde de la cavité, R_s la résistance de surface, P_{d0} la charge thermique statique, $\beta = c/v$ avec c la vitesse de la lumière et v la vitesse des particules. Nous définissons alors le paramètre :

$$A = \frac{(\beta\lambda)^2}{R_s} \quad (3.6)$$

dont l'extraction à partir des mesures permet de classer les cavités et d'identifier d'éventuelles anomalies. Nous effectuons alors une mesure de $P_d(E_{cav})$ en faisant varier E_{cav} . Chaque mesure suit la méthode décrite par l'équation 3.4. Nous effectuons ensuite le fit de l'équation 3.5 et obtenons les paramètres de l'équation de variation de charge en fonction du champ accélérateur pour chaque cavité. La figure 3.20 montre ces mesures pour le [LINAC SPIRAL2](#). Elle montre notamment deux groupes distincts correspondant aux [CMA](#) et aux [CMB](#). Deux anomalies sont également mises en évidence pour [CMA_{02,11}](#). Pour [CMA₀₂](#), il s'agit d'un comportement anormal nouvellement observé mais qui ne pose pas de problème. En effet, ce cryomodule étant au début du LINAC, il est opéré à un champ accélérateur faible auquel le problème n'apparaît pas. Il devra cependant être surveillé de près. Le problème de [CMA₁₁](#) mérite d'être abordé dans une section séparée. Il le sera dans la section 3.4. Les mesures permettent d'avoir une vision plus claire de la distribution dynamique des charges thermiques dans le LINAC. Cette vue générale est visible en heatmap sur la figure 3.20. Elle permet notamment de mettre en évidence de manière graphique les éventuelles anomalies constatées.

Les comportements thermiques dynamiques des cavités permettent de garder leur charge thermique effective constante pendant l'opération, facilitant ainsi grandement les régulations. Nous choisissons pour cela, la charge correspondant au champ accélérateur nominal des cavités, fixée pour [SPIRAL2](#) à 6,5 MV/m. Les chaufferettes installées dans chaque cryomodule viennent ensuite compenser les variations de E_{cav} . La consigne de puissance P_{ch} donnée aux chaufferettes s'exprime alors par :

$$P_{ch} = A(E_{cav,nom}^2 - E_{cav,mes}^2) + P_{dist} \quad (3.7)$$

où A est le paramètre exprimé dans 3.6 et estimé à partir des fits de la figure 3.19. $E_{cav,nom}$ est le champ nominal considéré. $E_{cav,mes}$ est la mesure du champ accélérateur transmise par les automates RF aux automates de la cryogénie. P_{dist} est la compensation distribuée qui égalise les charges thermiques statiques sur le [LINAC](#) (voir section 3.3.2.2.1). Nous majorons P_{ch} à 20 W et la minorons à 0 W. La figure 3.20 montre le heatmap correspondant à la compensation dynamique de charge. Les différents paramètres sont explicités dans le tableau 3.6.

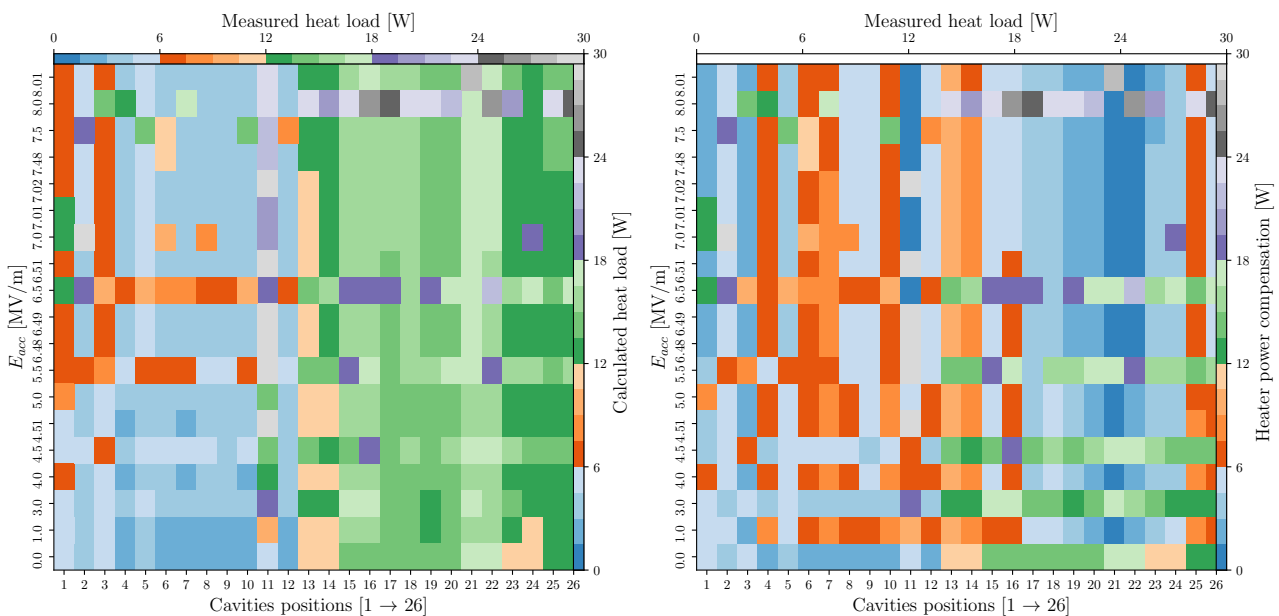


Figure 3.20 – A gauche : heatmap de la mesure de la charge thermique du [LINAC](#) en fonction du champ accélérateur. A droite : heatmap de la compensation automatique de charge [LINAC](#) en fonction du champ accélérateur.

Table 3.6 – Paramètres de compensation dynamique de charge du LINAC SPIRAL2 (données 2020).

Cavités	Cryomodules	A [Ω^{-1}]	$E_{cav,nom}$ [MV/m]	P_{dist} [W@4K]	P_{stat} [W@4K]	P_{LQ} [W@4K]	$P_{ch,cons}$ [W]
1	CM ^A ₀₁	0.18	6.5	0	4.67	12.275	6.416118
2	CM ^A ₀₂	0.08	6.5	5.745	3.15	12.275	8.596608
3	CM ^A ₀₃	0.13	6.5	2.0725	4.71	12.275	6.706363
4	CM ^A ₀₄	0.16	6.5	3.875	1.64	12.275	9.578216
5	CM ^A ₀₅	0.18	6.5	1.48	3.19	12.275	7.896118
6	CM ^A ₀₆	0.15	6.5	3.7575	2.18	12.275	9.104265
7	CM ^A ₀₇	0.21	6.5	2.1425	1.26	12.275	9.627971
8	CM ^A ₀₈	0.12	6.5	4.865	2.34	12.275	9.142412
9	CM ^A ₀₉	0.1	6.5	5.59	2.46	12.275	9.15451
10	CM ^A ₁₀	0.21	6.5	2.0125	1.39	12.275	9.497971
11	CM ^A ₁₁	1.44	3.8	0	5.73	66.57	11.282544
12	CM ^A ₁₂	0.11	6.5	5.2775	2.35	12.275	9.198461
13	CM ^B ₀₁	0.16	6.5	1.51	5.465	13.735	7.213216
14	CM ^B ₀₁	0.13	6.5	2.7775	5.465	13.735	7.411363
15	CM ^B ₀₂	0.13	6.5	0.8475	7.395	13.735	5.481363
16	CM ^B ₀₂	0.14	6.5	0.425	7.395	13.735	5.415314
17	CM ^B ₀₃	0.16	6.5	0	6.975	13.735	5.703216
18	CM ^B ₀₃	0.12	6.5	1.69	6.975	13.735	5.967412
19	CM ^B ₀₄	0.13	6.5	1.3725	6.87	13.735	6.006363
20	CM ^B ₀₄	0.11	6.5	2.2175	6.87	13.735	6.138461
21	CM ^B ₀₅	0.14	6.5	0.28	7.54	13.735	5.270314
22	CM ^B ₀₅	0.14	6.5	0.28	7.54	13.735	5.270314
23	CM ^B ₀₆	0.13	6.5	2.4675	5.775	13.735	7.101363
24	CM ^B ₀₆	0.13	6.5	2.4675	5.775	13.735	7.101363
25	CM ^B ₀₇	0.14	6.5	1.845	5.975	13.735	6.835314
26	CM ^B ₀₇	0.16	6.5	1	5.975	13.735	6.703216

3.3.2.3 Vers un contrôle intelligent à base de modèles Le LINAC est un macro-système à multiples variables couplées. Examinons d'abord les dépendances entre les différents sous systèmes, c'est à dire les cryomodules. Ces derniers sont liés les uns aux autres par les lignes d'apport de LHe et de retour de GHe saturé. Le débit est équilibré par la compensation de charge. Hors anomalies, nous devrions donc avoir le même débit entrant et sortant des cryomodules. Le niveau d'hélium liquide et la pression des bains sont régulés à l'aide de vannes situées sur les boîtes à vannes. Les actions des régulateurs sur un cryomodule pendant les régulations peuvent donc en affecter un autre. Nous avons alors deux choix : 1. Découpler les systèmes ; 2. Gérer le couplage de manière intelligente. Ces deux solutions ont été investiguées dans la thèse d'Adrien Vassal [Vas19]. Pour l'une, le découplage était assuré par un régulateur Linéaire Quadratique (LQ). Pour l'autre, le couplage était géré par un contrôleur central de type Model (Based) Predictive Controller (MPC). Nous avons testé la première solution de découplage. Cette dernière ayant donné satisfaction, nous n'avons pas poussé l'approche MPC centralisé pour le LINAC plus loin.

Le deuxième type de couplage auquel nous pouvons faire face est un couplage interne dans les cryomodules. En effet, originellement, nous régulions la pression et le niveau dans le bain d'hélium liquide avec deux contrôleurs distincts et non communicants. Il y avait donc fort à craindre que ce genre de couplage apparaisse.

Dans la suite, les couplages internes et externes ainsi que les dépassements de consignes seront comparés pour les régulateurs PI d'origine et les régulateurs LQ nouvellement mis en place.

3.3.2.3.1 Modèles, régulateurs et plus si affinité Cette partie est largement détaillée dans la thèse d'Adrien Vassal [Vas19] et dans plusieurs communications [Vas+18 ; Vas+19]. Elle ne sera donc pas approfondie ici. Le principe est cependant simple : le modèle consiste en l'assemblage de blocs de base représentant des éléments physiques dont les propriétés s'approchent de la réalité. Le modèle assemblé donne une connaissance de l'état interne du système en fonction des conditions limites appliquées, à savoir, pour un cryomodule : la densité du fluide, l'énergie interne, la mesure de pression du bain (PT₀₀₁), la mesure de niveau du bain (LT₂₀₀), les mesures des retours d'états des vannes d'entrée et de sortie (FCV₀₀₂ et FCV₀₀₅), la puissance de la chaufferette (CH₂₀₀). Le modèle est non linéaire et a besoin d'être linéarisé autour d'un point de fonctionnement donné. Nous utilisons ensuite le modèle linéarisé pour générer un observateur de l'état interne du système (observateur de Luenberg dans notre cas). Cet observateur est ensuite utilisé pour le réglage automatique des pondérations des régulateurs. On voit déjà la raison

pour laquelle nous essayons de garder la charge thermique constante. On entre-aperçoit aussi certainement les possibilités qu'offre la connaissance de l'état interne du système (voir section 3.5.1).

3.3.2.3.2 Méthode d'analyse Pour l'analyse un jeu de données a été sélectionné comportant 21657427 mesures de pression de bain PT_{001} , 2970880 mesures de niveau d'hélium liquide LT_{200} , 9470130 mesures de positions de vanne d'entrée FCV^{002} et enfin 9873427 mesures de positions de vanne de sortie FCV^{005} . Ces données sont extraites de la mise en froid de 2019. Elles sont initialement échantillonnées à 300 ms puis ré-échantillonnées en fonction des précisions requises ou des corrélations recherchées. Pour les corrélations croisées, les données de pression ont été considérées comme base de synchronisation. Les corrélations multi-variables ont été calculées par l'extraction du coefficient de corrélation de Pearson (PPMCC) :

$$\Gamma_{x,y} = \frac{cov(x,y)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (3.8)$$

où cov est la covariance, σ_x et σ_y les déviations standards de x et y . x et y sont les deux variables dont les corrélations sont étudiées.

3.3.2.3.3 Couplages externes Comme la cryodistribution est commune à tous les cryomodules, des corrélations croisées naturelles existent nécessairement. Nous considérons ici les corrélations croisées inter-cryomodules de pression et de niveau marquées LQ et PID, de sorte que les corrélations naturelles de pression et de niveau soient soustraites avec :

$$\begin{aligned} \Gamma_{PID}^{P*} &= \Gamma_{PID}^P - \Gamma^P \\ \Gamma_{LQ}^{P*} &= \Gamma_{LQ}^P - \Gamma^P \end{aligned} \quad (3.9)$$

et

$$\begin{aligned} \Gamma_{PID}^{LT*} &= \Gamma_{PID}^{LT} - \Gamma^{LT} \\ \Gamma_{LQ}^{LT*} &= \Gamma_{LQ}^{LT} - \Gamma^{LT} \end{aligned} \quad (3.10)$$

où $\Gamma_{PID}^{P/LT*}$ est la corrélation croisée de pression/niveau marquée PID, $\Gamma_{LQ}^{P/LT*}$ la corrélation croisée de pression/niveau marquée LQ et $\Gamma^{P/LT}$ la corrélation naturelle de pression/niveau. La figure 3.21 montre ces résultats. Γ est normalisé entre -1 et 1. Les masques des triangles inférieurs des corrélations montrent les corrélations positives. Les masques des triangles supérieurs des corrélations expriment les anti-corrélations. La couleur rouge montre la dominance des corrélations dues à la régulation PID. La couleur bleue montre celles dues à la régulation LQ. Pour le niveau, on voit que l'effet est inversé entre le PID et le LQ. Ce comportement semble normal. Lorsque le débit augmente vers un cryomodule grâce à une ouverture de [Flow Control Valve \(FCV\)](#)⁰⁰², à ouverture de vanne égale, le débit des voisins augmente également mais à une moindre mesure. Pour le LQ, les régulations de la pression et du niveau sont simultanées. Comme l'observateur d'état anticipe l'effet de l'action du niveau sur la pression, il agit à l'inverse, pour minimiser l'effet d'une variation de niveau sur la pression. Il s'agit là du réglage qui a été imposé car les contraintes sur la régulation de pression sont beaucoup plus drastiques. Néanmoins, dans l'absolu, le LQ ne diminue pas nécessairement les corrélations de variations de niveau entre les cryomodules. En revanche, pour les corrélations de pression, on voit clairement une dominance de la couleur rouge (PID). La régulation apporte donc une diminution nette des corrélations de pression entre les cryomodules.

3.3.2.3.4 Couplages internes La régulation de pression et de niveau agissant sur le même volume de séparateur de phase, la deuxième corrélation naturelle est interne aux cryomodules. Le régulateur [PI](#) ne prend pas en compte ces effets de couplages et essaye donc de maintenir les consignes avec deux régulateurs distincts. La régulation [LQ](#) essaie de gérer les effets de couplage de manière prédictive en se basant sur la connaissance de l'état interne du système. La figure 3.22 montre la supériorité globale du régulateur [LQ](#) par rapport au [PI](#) en ce qui concerne les couplages internes. Elle montre également les endroits où les pondérations du régulateur [LQ](#) peuvent encore être améliorées. Pour [CMA](#)₁₁, on voit aussi que le [PI](#) est incapable de gérer correctement les régulations à cause de l'anomalie de charge qui y a été constatée (voir section 3.4).

3.3.2.3.5 Dépassement de consignes La véritable contrainte, qui est souvent une conséquence des précédentes, est le désaccord de la cavité induit par des variations de pression trop importantes. Dans la figure 3.22 droite sont comparés les compteurs de déviation pour un régulateur [PI](#) et [LQ](#), en faveur de ce dernier. Ces résultats concernent les données de 2019 pendant la première mise en place du régulateur [LQ](#) et sans optimisation dans les

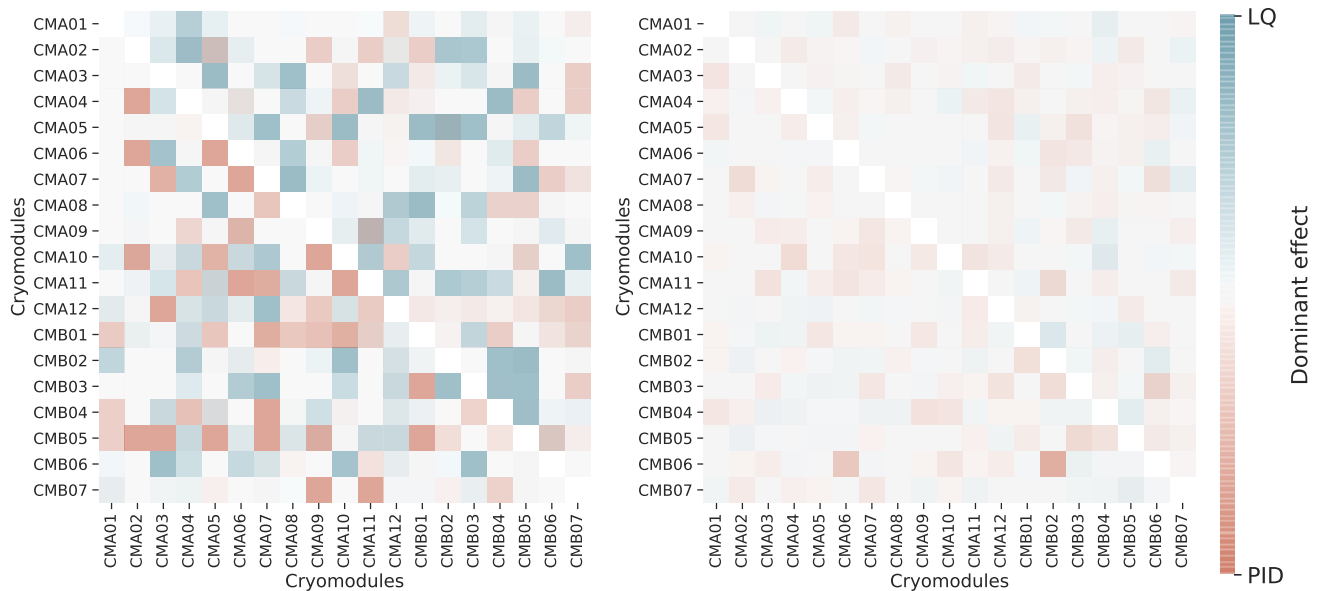


Figure 3.21 – A gauche : corrélation croisée LINAC des variations de niveau d'hélium liquide. A droite : corrélation croisée LINAC des variations de pression de bain LHe. Pour les deux figures, le triangle supérieur représente les anti-corrélations tandis que le triangle inférieur représente les corrélations.

conditions réelles d'opération. Nous avons donc continué à nous pencher sur les optimisations des pondérations des régulations LQ notamment dans le cadre d'un stage de fin d'étude co-encadré par le GANIL et le CEA DSBT toujours dans le contexte de GRAAL. Nous arrivons donc à un stade où les déviations de ± 5 mbars sont rares et regardons maintenant des critères différents. Nous regardons d'abord les déviations à ± 2 mbars. La figure 3.23 montre une surveillance de déviation de pression classique. Nous faisons donc cette surveillance de manière semi-automatique toutes les nuits. L'autre critère que nous surveillons est la distribution des mesures de pression, de niveaux et de positions de vannes. La figure 3.24 en montre également un exemple classique avec une optimisation de réglage de FCV^{002} avec le changement d'un jeu de paramètres.

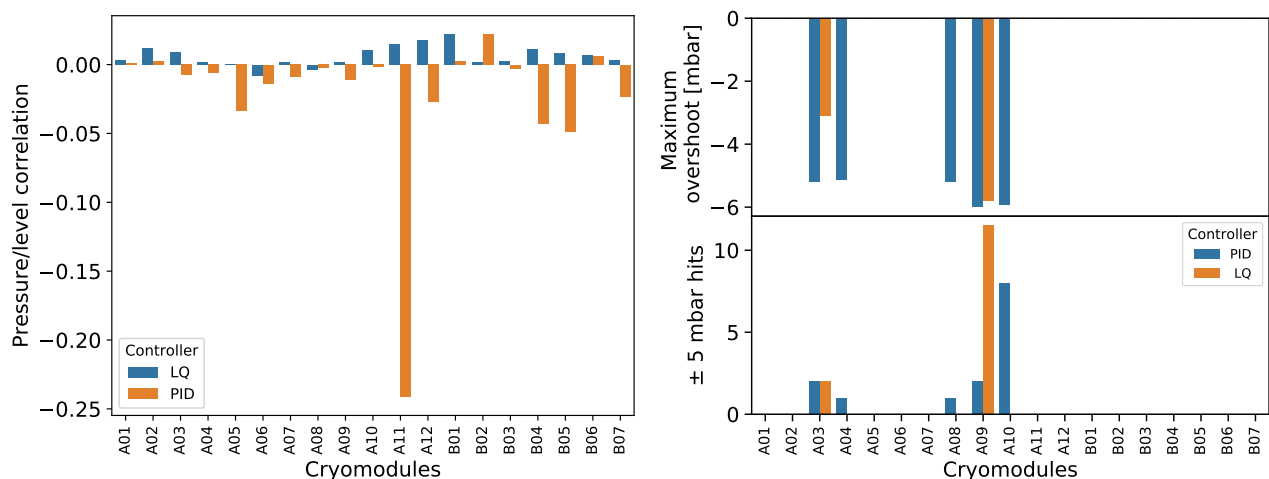


Figure 3.22 – A gauche : corrélations internes entre les variations de niveau et de pression de bain LHe. A droite : Compteur de déviation montrant le nombre de dépassements et leurs amplitudes pour une consigne de $\Delta P = \pm 5 \text{ mbar}$.

3.4 Investigation de la problématique de CMA_{11}^A

CMA_{11}^A est un cryomodule supposé avoir des caractéristiques proches des autres CMA^A . Les seules caractéristiques qui le distinguent sont : 1. la présence d'un joint hélicoflex entre le haut de la cavité en Nb et le bas de la cavité en Cu. 2. Le coupleur non traité. Ce cryomodule a présenté un comportement thermique atypique par rapport aux autres cryomodules de type A et a nécessité un processing helium [ref]. Après réception et installation au GANIL, la cavité

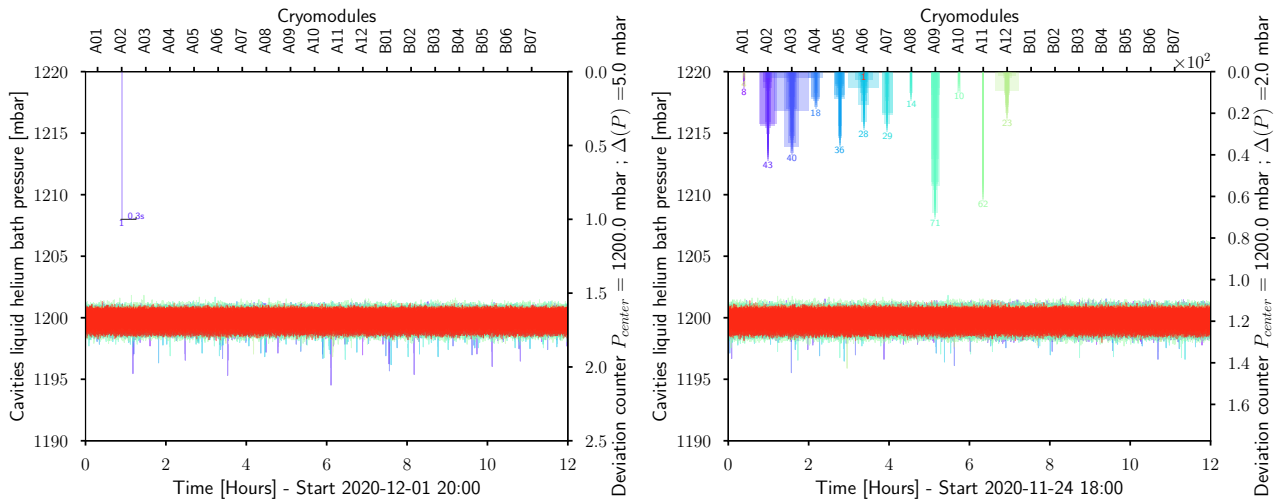


Figure 3.23 – A gauche : compteur de déviation de pression avec $\Delta(P) = \pm 5$ mbars. A droite : compteur de déviation de pression avec $\Delta(P) = \pm 2$ mbars.

a montré un comportement thermique dynamique très différent de ce qui avait été observé précédemment. Les différences entre les variations des températures de bas de cavité avec le champ accélérateur au GANIL et à l'IRFU (voir figure 3.25) témoignent du caractère nouveau de ce symptôme. On y voit un comportement thermique du bas de la cavité inchangé avant et après He processing. On y voit aussi que le comportement naturellement quadratique montre des effets typiquement conductifs. C'est aussi la conclusion à laquelle nous avons été amenés lors des premières campagnes de mesures au GANIL qui s'étaient limitées à 6 MV/m. La différence nette dans la partie $0 \rightarrow 6$ MV/m indique une amplification des effets conductifs en jeu. Cette même amplification est naturellement présente dans les mesures de charges thermiques (voir figure 3.25). Les campagnes de mesures de 2020 combinées aux campagnes de mesures de 2019 ont permis d'avoir une plus grande statistique et de pointer deux changements de comportements thermiques. Nous observons :

- une première tranche $0 \rightarrow 5,5$ MV/m avec un comportement quadratique de la charge thermique ;
- une deuxième tranche entre 5,5 MV/m et 6.5 MV/m qui montre un quasi-applatissement de la charge thermique ;
- enfin, une expansion exponentielle de la charge thermique corrélée avec les mesures d'émission des BLM²⁵, elle aussi exponentielle . Nous avons donc ici bien une charge thermique déposée par de l'émission X.

Ces trois phases sont visibles aussi sur les mesures de charges thermiques observées que sur les températures de la cavité (figures 3.25 et 3.26).

Tous ces effets thermiques peuvent se résumer en :

$$P_{th} = \sum_I P_d^i(E_{cav}) + P_0 \quad (3.11)$$

où P_{th} est la puissance thermique dissipée dans le bain LHe, P_0 la puissance statique dissipée et $P_d^i(E_{cav})$ la puissance dissipée dépendante du champ E_{cav} et due à un effet physique i . Dans notre cas, $\sum_I P_d^i(E_{cav})$ est bien dominé par un effet quadratique important. Les campagnes d'études machines étaient des campagnes RF cryo. Ceci nous a permis de faire des mesures simultanées de la puissance incidente P_i . Nous avons également mesuré le temps de décharge τ de CM^A_{11} à l'aide d'un analyseur de spectre. Nous avons observé une décharge de 6 dB en 2,72 ms. Ceci nous a permis de remonter au facteur de qualité qui s'est avéré quasiment constant (voir figure) et a donc confirmé le caractère quadratique de P_{th} .

Les effets décrits sont apparus en plus de problèmes de multi-actor [] et de crispation de la cavité qui ont empêché son démarrage de manière fiable et répétitive. Il n'est cependant pas clair si les deux problèmes sont liés.

Du côté de l'opération cryogénique, le fait que ce cryomodule consomme autant nous empêche de l'opérer convenablement. Ceci est notamment dû au fait que, pour de telles puissances, les vannes d'alimentation d'hélium et de dégazage sont très ouvertes. Ces ouvertures augmentent la sensibilité de CM^A_{11} à son environnement immédiat et rend très difficile sa régulation. Pour notre cas et dans le cas de ce cryomodule, le PI s'est avéré bien peu efficace. L'utilisation de la régulation LQ s'est avérée plus efficace. Ceci a été l'occasion de travailler sur la limite des points d'opération des modèles des cryomodules. Pour CM^A_{11} , les chauffeuses ne peuvent pas compenser une charge

25. Beam Loss Monitors (BLM)

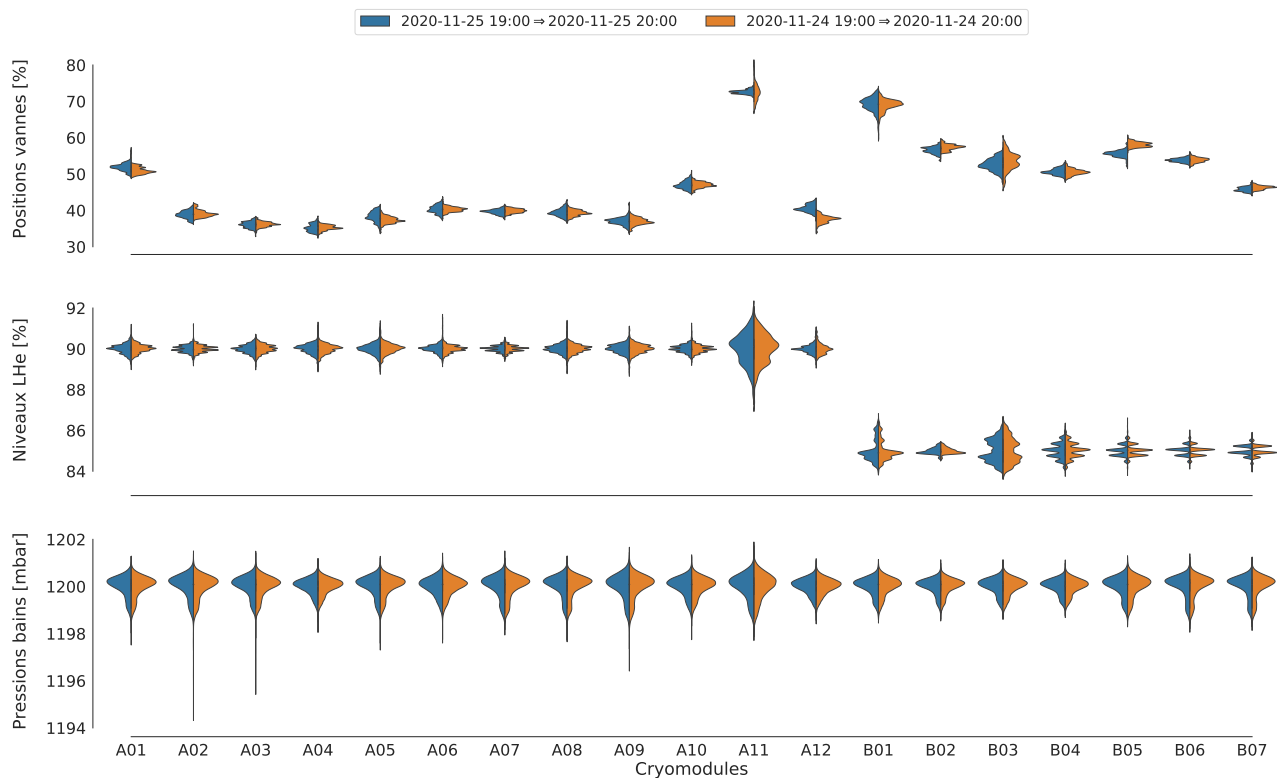


Figure 3.24 – Distributions statistiques de différentes mesures de vannes, pressions, niveaux LHe pendant une procédure de réglage.

aussi importante. La configuration des régulateurs risque donc d'être différente pour différentes valeurs de champ. Dans notre cas précis, nous avons chargé un modèle de cryomodule de type A avec un apport de puissance thermique de 20 W. Nous avons ensuite modélisé et chargé un modèle prenant en compte un apport théorique de 40 W et avons appliqué le réglage résultant aux vannes d'abord sans puissance dynamique, puis avec un puissance de compensation maximale (20 W) et enfin en augmentation de champ accélérateur jusqu'au champ nominal (≈ 70 W à 6,5 MV/m). Le régulateur configuré différemment a très bien rempli son rôle. Nous opérons donc maintenant ce cryomodule comme tous les autres cryomodules sans difficulté apparente ni dépassement de consigne. En revanche, notre marge de manoeuvre en cas de dégradation de la charge thermique est encore réduite. Nous avons alors adopté des solutions compensatoires plus ou moins lourdes de préparations :

1. Changement du clapet de la vanne FCV^{005} pour augmenter le CV de 1,5 à 3,2 en égal pourcentage. Cette partie a été faite avant le démarrage 2021 mais n'a pas encore testée.
2. Déplacement de CM^A_{11} en début du LINAC pour opérer CM^A_{11} à un champ accélérateur moindre. Cette étape est prévue dès 2022 mais nécessite une planification et une préparation conséquente. Elle comporte également des risques.
3. Démontage et diagnostic visuel de CM^A_{11} puis changement du joint helicoflex. Cette intervention invasive comporte des risques non encore maîtrisés car nous ne disposons pas encore de cryostat vertical de test. Elle est en revanche un argument de plus en faveur de la fabrication d'au moins un cryomodule de spare de type CM^A .

3.5 Evolutions futures du système

3.5.1 Mise en place d'un observateur de charge virtuel dynamique

Le travail sur l'observateur de charge a commencé dans le cadre de la thèse d'Adrien Vassal. Le principe est d'exploiter la connaissance de l'état du système pour retrouver un ou plusieurs paramètres qui peuvent s'avérer importants pour l'opération. Un de ces paramètres est la charge thermique dissipée dans le bain. Il s'agit donc essentiellement de l'inversion d'une matrice de transfert représentant l'état du système à partir de plusieurs paramètres d'entrées. Dans le cas du contrôle prédictif, ces paramètres sont : les états des vannes d'entrée/sortie, les pressions d'entrée/sortie, le niveau d'hélium liquide dans le bain et enfin la charge thermique. Dans le cas de l'observateur de charge, la charge thermique devient une sortie. Ce calcul ne pose pas de défis particulier sur

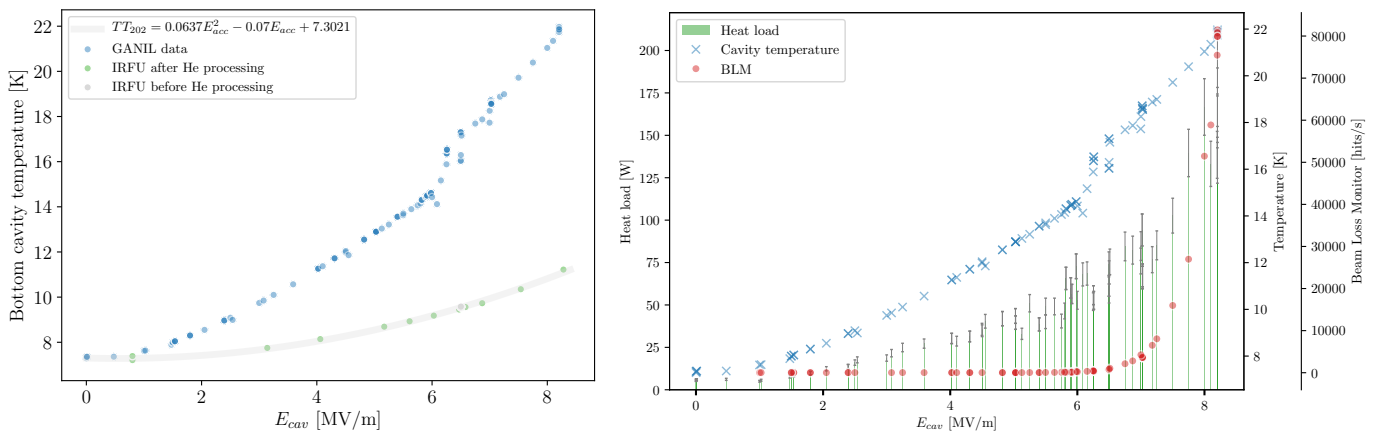


Figure 3.25 – A gauche : mesures des températures du fond de la cavité CM^A_{11} à l'IRFU et au GANIL. A droite : Mesures de charges thermiques, de BLM et de température de fond de cavité.

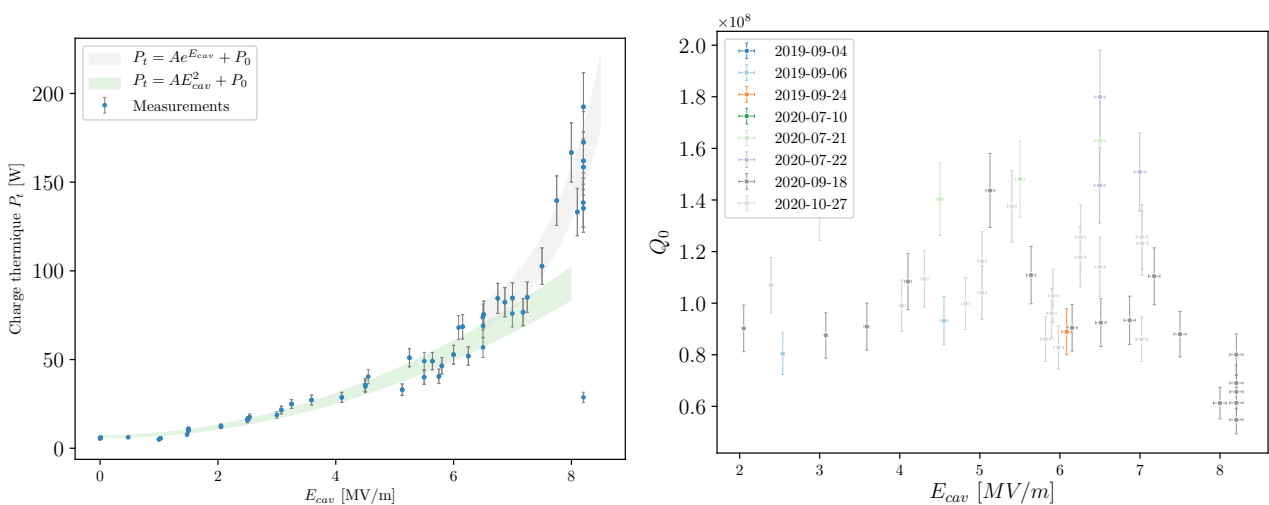


Figure 3.26 – A gauche : fit à deux régions des mesures de charge thermique de CM^A_{11} . A droite : Calcul de Q_0 à partir des mesures de charge thermique de CM^A_{11} .

un solveur comme celui de Matlab. En revanche, lorsqu'il s'agit de mettre en place cet observateur sur un automate programmable, la problématique est différente. En réalité, le problème est commun à tous les algorithmes qui essaient de connaître en temps réel l'état d'un système à partir d'un ou de plusieurs modèles non linéaires. La problématique est par exemple commune à l'estimation des effets systématiques introduits par un instrument spatial préalablement caractérisé sur terre (ex. LISA). Notre choix s'est porté sur l'utilisation du filtre de Kalman étendu [Lju79]. Ce dernier nécessite deux choses. La première est que le système soit linéarisé autour d'un point de fonctionnement donné. La deuxième est le réglage des paramètres du filtre qui permettent de réduire l'erreur entre l'état estimé et l'état réel du système. Pour ce réglage, nous avons utilisé la méthode décrite dans [SG13]. Le filtre de Kalman étendu appliqué à l'estimation de la charge thermique du bain a pleinement donné satisfaction lors des essais utilisant les chaufferettes du bain comme simulation de la variation de charge thermique (voir figure 3.27). Nous avons donc commencé en mai 2021 l'étape de mise en place de l'observateur dans les automates. Ce travail, toujours en cours, inclue une investigation des limites de l'observateur en terme de vitesse de réaction ou de temps d'intégration en lien avec la précision de la mesure souhaitée. Elle inclue aussi la mise en place d'un étalonnage de l'observateur utilisant les chaufferettes des bains.

3.5.2 Extension vers un observateur de facteur de qualité des cavités

Une évaluation de la puissance dissipée dans une cavité sur-couplée par bilan de puissance donnerait des erreurs pouvant aller jusqu'à 2500% [ref Thèse D. Longuevergne]. Cette méthode de mesure n'est donc pas utilisable en configuration machine. Il est en revanche possible d'estimer Q_0 en mesurant directement la dissipation thermique

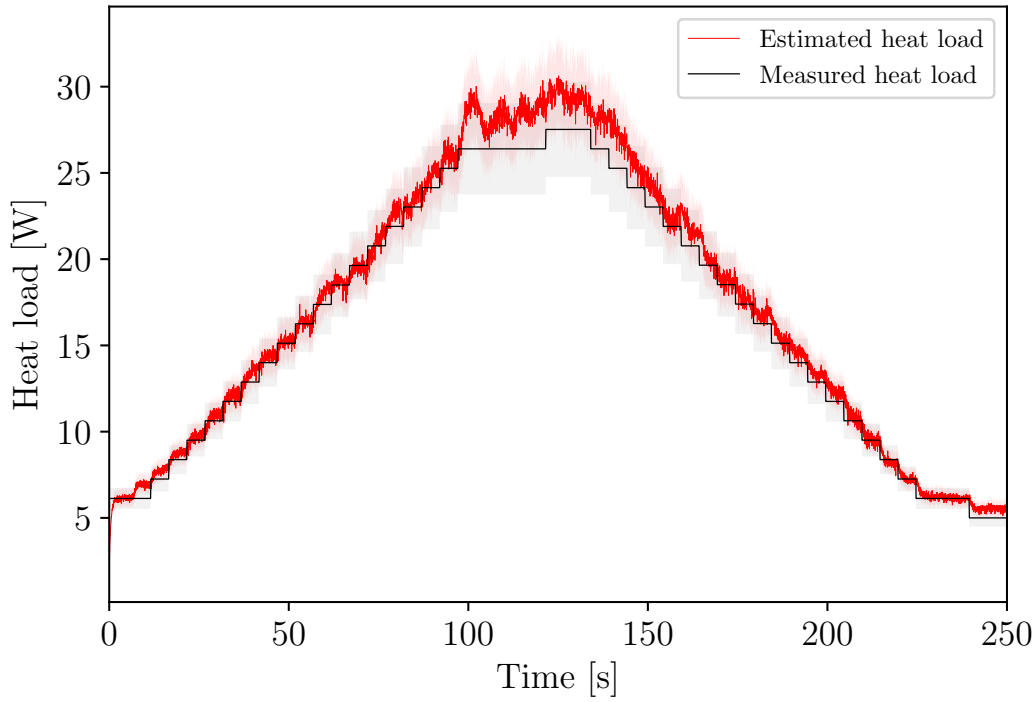


Figure 3.27 – Mesure et estimation de la charge thermique en utilisant le filtre de Kalman étendu et le modèle thermodynamique des cryomodules.

sur le bain hélium sans présence de RF et avec RF. Dans ce cas, en considérant $Q_i \ll Q_0$, nous obtenons :

$$\frac{1}{Q_L} = \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{Q_i} \simeq \frac{1}{Q_i} \quad (3.12)$$

ce qui donne :

$$Q_i \simeq Q_L = 2\pi f_0 \tau \quad (3.13)$$

et donc :

$$Q_0 = \frac{4Q_i P_i}{P_c} = \frac{8\pi f_0 \tau P_i}{P_c - P_{co}} \quad (3.14)$$

avec f_0 la fréquence de la cavité, τ le temps de décharge, P_i la puissance incidente et P_c et P_{co} la puissance dissipée dans le bain LHe avec et sans RF. Nous voyons donc que si nous disposons de mesures de charges thermiques dynamiques continues et de mesures ponctuelles de τ et de P_0 , il est possible de déterminer une valeur de Q_0 en fonctionnement.

La connaissance des phénomènes physiques en jeu et qui influencent la mesure de Q_0 peut nous permettre d'aller encore plus loin. Q_0 peut par exemple subir une chute à cause de différents phénomènes comme :

- Présence de défauts de différentes tailles
- Réduction de l'énergie d'appariement avec le champ magnétique
- Emission de champ

Nous pouvons alors exprimer Q_0 en fonction de :

- La résistance résiduelle de surface $R_{res}(E_{acc})$ exprimée par :

$$R_{res}(E_{acc}) = R_{res} + R_{E_{acc}} \cdot E_{acc} \quad (3.15)$$

où R_{res} est l'énergie d'appariement à champs nul exprimée $n\Omega$ et fixée à $2 n\Omega$ et $R_{E_{acc}}$ est la sensibilité en champ exprimée en $n\Omega/MV/m$ et fixée à $1 n\Omega/MV/m$.

- La réduction de l'énergie d'appariement avec le champ magnétique :

$$R_{BCS}(E_{acc}) = \frac{9 \cdot 10^{-5} f^2}{T} \exp \left\{ \frac{1.83 T_c}{T} \left[1 - \left(\frac{E_{acc} \frac{B_{pk}}{E_{acc}} \beta_{mag}}{B_c(T)} \right)^2 \right] \right\} \quad (3.16)$$

- La puissance dissipée par émission de champ :

$$P_{em} = \alpha J_{em} \quad (3.17)$$

avec

$$J_{em}(E_{acc}) = \frac{M \left(\beta_{em} E_{acc} \frac{E_{pk}}{E_{acc}} \right)^{5/2}}{\Phi^{7/4}} \exp \left(- \frac{N \Phi^{3/2}}{\beta_{em} E_{acc} \frac{E_{pk}}{E_{acc}}} \right) \quad (3.18)$$

Nous avons donc finalement :

$$Q_{0,calc} = \frac{1}{\frac{R_{res}(E_{acc}) + R_{BCS}(E_{acc})}{G} + \left(\frac{K}{E_{acc}} \right)^2} \alpha J_{em}(E_{acc}) \quad (3.19)$$

Ces modèles peuvent également être augmentés d'autres effets. La classification et l'identification basées sur les algorithmes d'apprentissage profond peuvent alors permettre un diagnostic rapide d'éventuelles anomalies, dégradations ou déviations lentes des comportements des cavités. Un travail préparatoire hors ligne sur l'extraction des Q_0 de l'ensemble des cavités [SPIRAL2](#) et l'identification des différentes composantes est en cours avec l'IJCLab (David Longuevergne).

3.5.3 Pérennisation de l'observation et de la détection de TAO

A la suite de la première investigation de la thermo-acoustique du LINAC, une instrumentation dédiée a été mise en place. Elle permettait de faire l'acquisition de toutes les pressions relatives des bains d'hélium des cavités. Celle-ci utilise un compact DAQ National Instrument avec de multiples entrées et un traitement/archivage dédié. Récemment, il a aussi été mis en place une détection temps réel de l'amplitude du taconis. Cependant, tout ceci est, pour l'instant, découplé de l'archivage [EPICS](#) et des systèmes d'alarmes de l'accélérateur. Afin de remédier à cela, nous avons effectué avec succès le test d'un module d'acquisition ARM DAQ (MSX-E3601) compatible avec le protocole de communication modbus TCP utilisé dans l'accélérateur [SPIRAL2](#). Les prochaines étapes sont la mise en place d'un archivage pour un ou plusieurs canaux d'acquisition, mise en place d'un pipeline de pré-traitement, d'analyse et de détection d'anomalies basé sur la reconnaissance des formes des signaux et s'appuyant sur les précédents développements [[Ghr+21](#)].

3.5.4 Système de reporting et d'analyse semi-automatique

Un nombre d'outils de préa-analyse a été mis en place dans le cadre de la cryogénie [SPIRAL2](#). Cependant, le nombre de personnes ayant accès à ces outils est restreint. La mise en place d'un jupyter hub au GANIL permettrait dans un premier temps de donner accès à un plus grand nombre de personnes. Dans un deuxième temps, un développement dédié à l'opération sera nécessaire pour mettre en place une visualisation temps réel de l'état du système. Un exemple de type de visualisation souvent utilisé par l'analyse graphique multi-paramétrique est celui de la figure [3.20](#). Un autre exemple qui a été proposé au groupe contrôle/commande est représenté sur la figure [3.28](#).

3.5.5 Diagnostic intelligent multi-métier et synchronisation d'horloge

Un système multi-physique couplé comme celui de [SPIRAL2](#) nécessite nécessairement un diagnostic multiphysique. Comme c'est le cas dans tous les accélérateurs, les disciplines et les activités sont divisées par métier ou sous-projet. Une des conséquences de cette organisation est la mise en place de plusieurs systèmes très différents mais adaptés aux besoins spécifiques d'un métier donné (comme par exemple le diagnostic faisceau ou la RF). Or, un système hétérogène est très peu adapté aux contraintes imposées pour la mise en place d'un diagnostic commun, qu'il soit basé sur des algorithmes avancés d'intelligence artificielle ou pas. La synchronisation d'horloge et l'uniformisation des protocoles de communication vers une plateforme de pré-analyse commune apparaît donc ici comme une nécessité pour ne pas saturer le système d'archivage existant et remonter/archiver seulement les informations utiles à l'opération.

3.5.6 Maintien en froid du LINAC SPIRAL2

Suite à la revue du projet [SPIRAL2](#) qui a eu lieu en février 2021, une des recommandations d'évolution pour la cryogénie était la possibilité de maintenir le [LINAC](#) en froid sans aucune limite de temps. Pour l'instant une maintenance annuelle de toute l'installation contraint le réchauffage du LINAC. Il y a cependant ici plusieurs contraintes dont certaines ne sont pas liées à la cryogénie. Il s'agit ici de la maintenance annuelle de l'installation électrique et du système de réfrigération (eau/air comprimé). Ces deux aspects devront donc être adressés séparément. Concernant la cryogénie, il y a plusieurs contraintes :

1. Maintenance de la boîte froide : La maintenance de la boîte froide est liée aux vannes et à la régénération des adsorbants. Ces derniers permettent de piéger des impuretés et doivent donc être régénérés

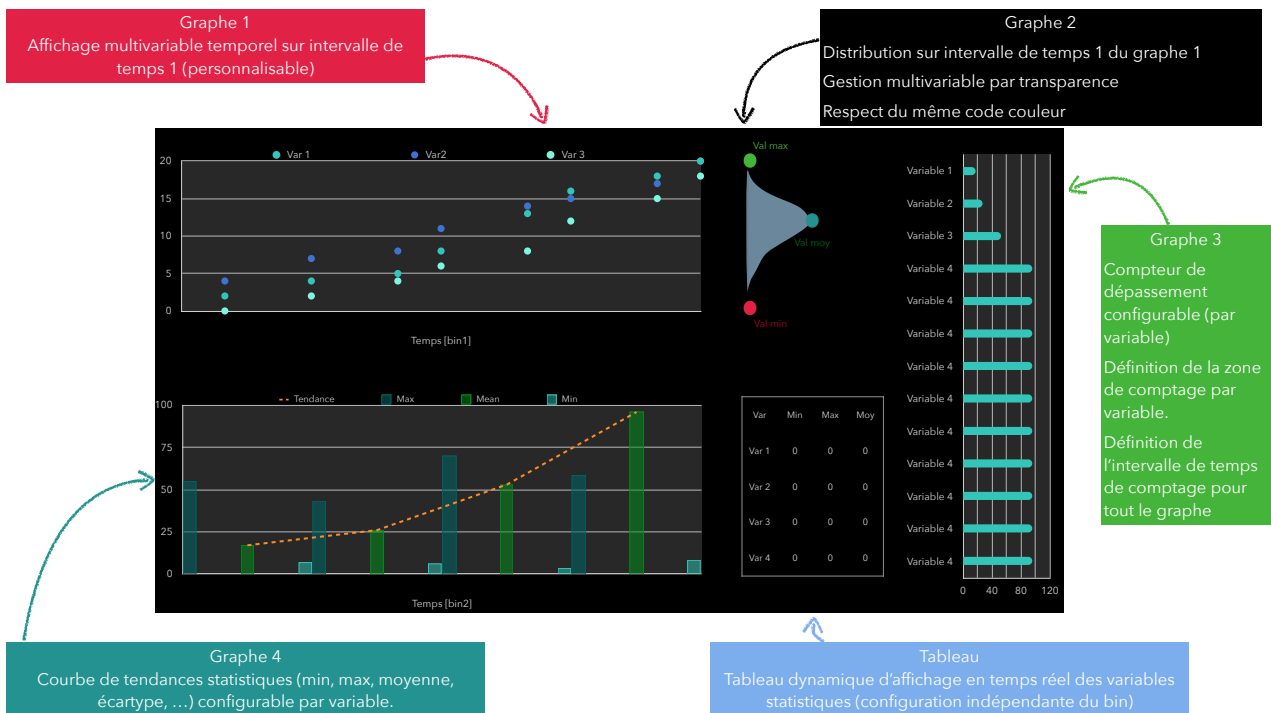


Figure 3.28 – Proposition d'interface de diagnostic et de suivi de paramètres.

par circulation de gaz. Le plus critique ici est l'adsorbeur 20 K qui permet de piéger le tritium, produit de l'activation de l'hélium dans le LINAC. Ce dernier adsorbeur n'a pas été prévu pour être régénéré en fonctionnement. C'est pourtant ce que font beaucoup d'autres installations soit en by-passant temporairement l'adsorbeur en question. La meilleure stratégie devra donc être trouvée en explorant les différentes possibilités offertes. L'absorbeur 80 K (azote) a lui été prévu pour être régénéré en fonctionnement. La dernière problématique de la boîte froide est l'étalonnage et la vérification des vannes. En effet, ces dernières ne bénéficient pas de la remontée de leur retour d'état vers le système de contrôle commande. Une solution pourrait être de mettre en place un tel retour d'état pour remplacer cette maintenance par une maintenance corrective en cas d'anomalie avérée. Pendant une telle intervention, le LINAC peut être placé en mode "standby" à une température avoisinant 20 K grâce à la pressurisation du Dewar central par une chaufferette alimentée indépendamment. Ce système de veille est déjà en place mais la charge thermique du LINAC à 20 K n'a pas encore été estimée. Elle permettrait de connaître le temps d'intervention possible en cas d'anomalie sur la boîte froide.

- Maintenance de la station de compression et des déshuileurs : Cette partie peut être effectuée sans problème avec une modification minimale du tuyautage en place. En effet, nous disposons de deux systèmes de compression pour le LINAC SPIRAL2 pouvant assurer chacun à minima 30 g/s de débit d'hélium. Ces deux systèmes sont montés en parallèle. Isoler chacun de ces systèmes à l'aide d'un système de vanne permettrait d'effectuer une maintenance dédiée en opération.

3.6 La thermo-acoustique cryogénique de SPIRAL2

La thermo-acoustique cryogénique du LINAC a fait l'objet de nombreuses campagnes de mesures qui ont permis de mieux la comprendre et la corriger. Un résumé de ces travaux est présenté en section dans l'article [Ghr+21] également joint ici (section 3.6). Il reste encore beaucoup à faire avant que sa détection ne soit partie intégrante du système de contrôle/commande de SPIRAL2. Il reste aussi encore beaucoup à faire pour comprendre ces phénomènes qui peuvent s'avérer complexes dans le cas d'un système non fermé et fortement couplé. Des travaux de modélisation ont été initiés en mai 2021 dans le cadre NGTACryo (voir section 2.6).

4 Publications choisies

4.1 Publication 1

arXiv:2101.10768v1 [physics.acc-ph] 26 Jan 2021

Cryogenic thermo-acoustic oscillations highlight and study in the SPIRAL2 superconducting LINAC

Adnan Ghribi,^{1,2,*} Muhammad Aburas,^{1,3} Yoann Baumont,^{1,3} Pierre-Emmanuel Bernaudin,^{1,3} Stéphane Bonneau,^{1,2} Jean-François Leyge,^{1,3} Guillaume Lescalié,^{1,3} Jean-Pierre Thermeau,^{4,2} Yann Thivel,^{1,3} Laurent Valentin,^{1,2} and Adrien Vassal^{1,5,6,7}

¹Grand Accélérateur National d'Ions Lourds (GANIL)

²Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS - IN2P3)

³Commissariat à l'Energie Atomique (CEA - IRFU)

⁴Laboratoire AstroParticule et Cosmologie

⁵Commissariat à l'Energie Atomique (CEA/INAC-SBT)

⁶Univ. Grenoble Alpes

⁷Univ. Caen Basse Normandie

(Dated: January 27, 2021)

Cryogenic thermoacoustic oscillations is an area of interest of several studies. For superconducting accelerators, it is an unwanted phenomena that we usually want to get rid off. The SPIRAL2 superconducting accelerator had distributed Taconis all over its cryostats. This paper spans the different steps from their first detection to their damping with a highlight on the methods and the instrumentation that has been used. The presented study also sets the ground for a real life experimental investigation of thermo-acoustics in complex geometries such as superconducting LINACs. With modern Big data analysis and simulation tools, it also sets the ground for the developments of new data linked codes that fit these complex situations.

I. INTRODUCTION

SPIRAL2 is a new generation heavy ions accelerator. Its heart is a superconducting linear accelerator (LINAC). 19 cryostats (called cryomodules) are spread along the beam line and encompass the accelerating structures (superconducting quarter wave resonating cavities) [1–3]. They are connected with a cryodistribution line and fed with near atmospheric pressure liquid helium (4 K) for the main cavities and 14 bars 60 K helium gas for the thermal screens. The SPIRAL2 cryoplant centred around an Air Liquide Helial LF cold box manages to furnish the necessary cooling power. It can manage 120 g/s and 1100 W at 4 K [4, 5]. It is worth mentioning here that the cryomodules are of two kinds/families. 12 of them enclose a single cavity and are called type A. The other 7 enclose two cavities and are called type B. The valves boxes that manage the fluids of these cryomodules also have some geometrical differences. One of the main roles of the cryogenic system is to maintain stable conditions compatible with the operation constraints. That is to maintain all the cavities at a stable and uniform temperature (plunged in liquid helium) and the pressure variation within ± 5 mbars. If the liquid helium level drops in a cryomodule liquid helium phase separator, there is a risk that the corresponding cavity quenches, ie. loses its superconducting state. If the pressure in the phase separators varies too much and too quickly, the efforts applied on the cavities surface result in an elastic deformation of its shape. That would change its impedance in a way that

the cavity wouldn't be matched anymore to its frequency of operation. There are of course a number of corrections to impedance or RF phase changes. For instance, the Low Level Radio Frequency (LLRF) system feeding the RF power to the cavity can manage a certain bandwidth at the cost of some power margin. This correction is fast and limited to small variations. The frequency tuning system can manage another correction, this time slow (more than one second) and adapted to large variations within its range of operation. The third and final way to limit the impedance variations of the cavities is simply by controlling the pressure in the phase separators. This stringent requirement for a biphasic cryogenic operation has led to several model based developments of the way input and output valves can be controlled [6, 7].

When we first fed RF power to the cavities, we noticed a strange behaviour in the amplitude and phase of both transmitted and reflected RF power. After deep investigations, it turned out that what we were measuring was due to cryogenic thermo-acoustic oscillations (TAO) spread all over the LINAC.

This phenomenon named after K. W. Taconis who first encountered it in 1945 [8] is known to occur in a cryogenic system for specific geometry, temperature and pressure conditions [9]. They have been thoroughly studied [10–14] but remain difficult to predict and to deal with.

This paper relates the investigation, discovery and suppression of these oscillations with a highlight on the methods and instrumentation used. In the first section, we introduce the first discovery of the TAO on the SPIRAL2 cryogenic system. We then describe the experimental methods used to determine its frequency, amplitude and conditions of occurrence. Finally we describe the trials and experimental solutions tested, the final chosen correction, the surveillance system that we put in place

*Electronic address: ghribi@in2p3.fr

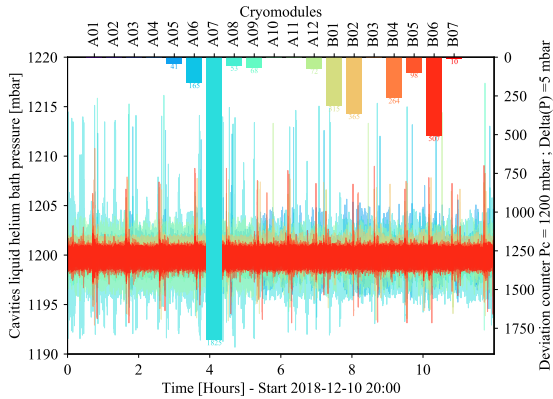


FIG. 1: Top : pressure deviation counter with a threshold set to ± 5 mbars. Bottom : absolute pressure measurements of the liquid helium phase separators of the LINAC superconducting cavities. The different colors are a signature of the cavities/cryomodules positions in the LINAC.

with its future evolution and numerical and theoretical considerations on the subject.

II. FIRST ENCOUNTERS

The first TAO that we discovered was in the main 5000 L liquid helium dewar of the cryoplat in 2016. These oscillations were hard to miss : high thermal load, ice on the dewar neck, sometimes hearable continuous noise and the fast displacement of the pointer needle of the pressure gauge. To better estimate and quantify the phenomenon, we had to bypass the cold box Programmable Logic Controller (PLC) acquisition system that was too slow to measure the occurring phenomenon. We tried several approaches to suppress the dewar TAO : investigation of all the room temperature output ports with sometimes long lines used for filling or supplying liquid helium (LHe) from or to small mobile dewars, short circuit between the vapour sky and the room temperature lines and buffer capacities of several dimensions. Finally the approach that worked the best was the use of a 5 L buffer capacity in parallel with a micrometric valve [15]. This TAO was at 100 Hz and could not be seen with regular slow absolute pressure transmitters. However, its effect could be seen also on cavities pressure. Even after correction of this TAO, some behaviour in the LINAC remained unexplained. This took the form of pressure glitches and pressure instabilities that propagated to all cavities with no prior notice. This behaviour made the pressure regulation very difficult, as if the absolute pressure sensors used by the valves to control the pressure was not giving a reliable information. Figure 1 shows an example of such behaviour.

In July 2017, we began the first injection of RF low power in the cavities for their cold characterisation [16]. We then noticed an amplitude modulation of the RF signal. Frequencies ranged between 4 to 6 Hz. The measurements were consistent and repeatable. However, resonance frequencies seemed to depend on the cavities positions. Figure 2 shows an example of such a spectrum. Figure 3 shows the diagram of the measurement test setup. A low power RF frequency generator was used to inject a signal locked at the resonance frequency of the measured cavity (found by a self-oscillating closed loop circuit). All measurements were done directly in the LINAC tunnel, bypassing the LLRF system to avoid the high losses that would have blinded us from seeing the signal we seek. The phase and the amplitude difference between the input and the output signal were extracted and measured thanks to a Yokogawa network analyser.

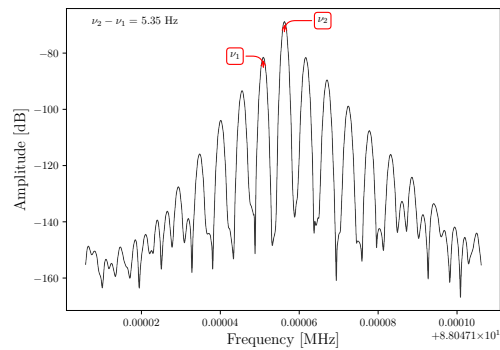


FIG. 2: Amplitude modulation of the input/output signal difference for cryomodule CMB07 as reported in [16].

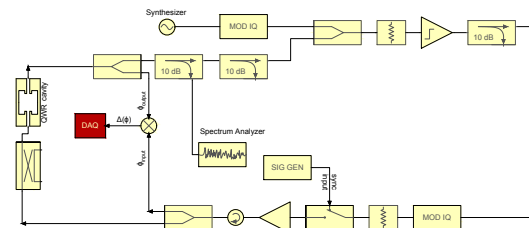


FIG. 3: Block diagram of the RF measurement setup for the low power characterization the SPIRAL2 LINAC cavities.

The first procedure that has been applied was external vibration measurements with a triple axis piezoelectric accelerometer. Different locations have been measured and monitored including : dewar pipes, valves boxes pipes, pumps and cryomodules. Figure 4 shows a summary of these measurements. It has been shown that there is no correlation between the frequency of the

roughing pumps and the measured peaks. It has also been found no peak below 10 Hz. However, peaks have been measured at 30 Hz and several of its harmonics only in the fluid direction (x direction in Fig. 4).

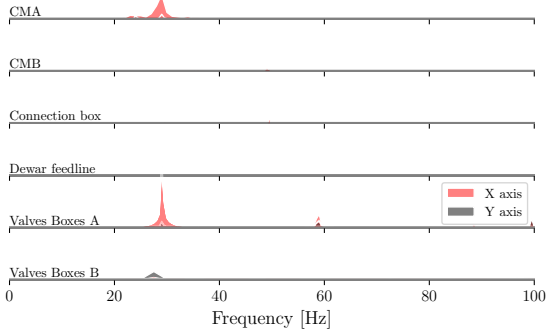


FIG. 4: Accelerometer vibration measurements at different locations of the LINAC. A and B valves boxes are the valves boxes of cryomodules types A (CMA) and B (CMB). The X direction is the direction of the pipes. The Y direction is a horizontal orthogonal direction. The Z direction is not shown here but has not exhibit any peak. The peaks are normalized to an amplitude of $G = 0.1$ are shown with the same scale.

III. FURTHER EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS

A. Single cryomodule experiment

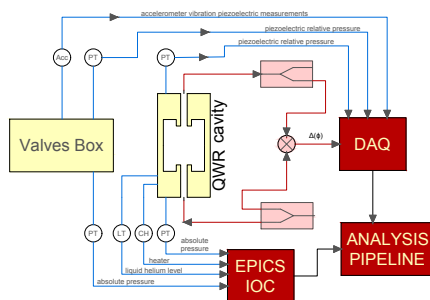


FIG. 5: Block diagram of the 2018 measurement setup.

In 2018, a different measurement setup has been installed. It included simultaneous measurements of absolute pressures, relative pressures, RF phase shifts, liquid helium level, heaters and accelerometers at different locations of a target cryomodule. A block diagram of such setup is shown in Figure 5. We measured both the absolute and the fast relative pressure directly in the cry-

omodule phase separator and in the corresponding valves box return line. We used piezoelectric sensors (PCB 113B28) for relative measurements and metallic process isolating diaphragm sensors (Cerabar PMP71) for absolute pressure measurements. We also measured vibrations with a tri-axis piezoelectric accelerometer. The same setup shown in Figure 3 has been used to extract the phase shift between the RF input and output signals. A National Instrument Compact DAQ centralised the fast acquisition with a 3 channels 2.8 kS/s/ch 24-Bit analog modules for the IEPE signals (Integrated Electronics Piezo-Electric) and a universal analog module for the RF signal. The NI DAQ was driven by an external laptop running Labview. Other data such as absolute pressures, heater power, liquid helium level and temperatures were measured through our regular PLC and archived with an Experimental Physics and Industrial Control System (EPICS) Input/Output Controller (IOC). A Python analysis pipeline assembled fast and slow acquisitions together with other correlation factors and a common clock. The results showed (see Figure 6) a direct correlation between the pressure measurements and the RF measurements. As a reminder, the purpose of this experiment is not only to understand but to attenuate this phenomena down to an acceptable level. The RF amplitude and phase variation were used as a proxy to determine the acceptable damping amplitude of the pressure oscillations. Given the margin on the RF amplifiers, the limit has been set to 20 dB in RF amplitude modulation which corresponds to roughly 10 mbars fast pressure variation.

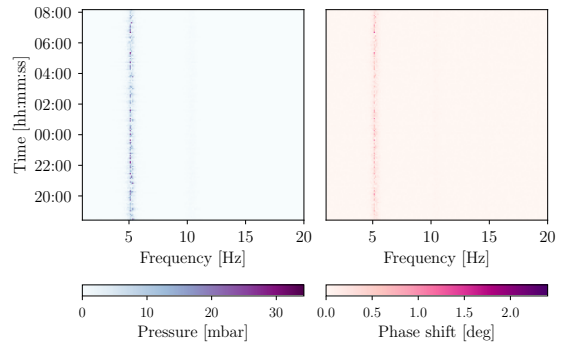


FIG. 6: Overnight simultaneous measurements of pressure oscillations and RF phase shift modulations for cryomodule CMA04 (2018-11-24).

To better understand these measurements, a piping and instrumentation diagram of a type B cryomodule with its valves box is shown in Figure 7. The magenta coloured circles show the position of the two main process valves. The latters control the liquid helium level and the pressure in the cavity phase separator. Knowing that thermoacoustic oscillations usually appear for

certain conditions with high temperature gradients, we investigated all room temperature ports with a cold end. We identified the red line (see Figure 7) that links the liquid helium bath to the security and purge ports of the valves box as a possible candidate. In order to investigate the possible start conditions of the oscillations (pressure, valves positions, thermal load, liquid helium level), we installed a couple of pressure sensors (absolute and relative) directly at the outlet of the security port of the liquid helium phase separator of the cryomodule (port $X1$). We installed another one at the outlet of the candidate room temperature port (port $X2$). We found that the pressure oscillations start for a combination of pressure, liquid helium level and thermal load when the absolute pressure difference between $X1$ and $X2$ is around 1 mbar. We also noticed that when the TAO is present, the temperature of the return line increases. Thermodynamic modelling of the cryomodule and its valves box using the Simcryogenics library [7] confirmed the consistency of the measurements with an increase of the thermal load in the return line that fitted the temperature difference of the return line before and after a TAO [6].

We then tried several methods documented in the literature [17–20] to suppress or damp the TAO :

1. Short circuit between the phase separator vapor sky and the return line (see Fig. 8) : Here we linked the two ports $X1$ and $X2$ with several pipes of several length and cross-sections.
2. Buffer (see Fig 9) : Here we connected several buffers of different volumes to the port $X2$.
3. Piston (see Fig. 10) : Here we inserted a piston in the port $X2$ and we monitored the behaviour of the system for several insertion depths.

For every solution tried, we spanned all operating conditions to determine the most suitable solution for our case. In order to compare the results, we used an efficiency criteria defined as :

$$\zeta = \frac{P_{bath}^{off}}{P_{bath}^{on}} \quad (1)$$

where P_{bath}^{off} is the amplitude of the pressure oscillations with no TAO correction and P_{bath}^{on} is the amplitude of the pressure oscillations with the considered TAO correction.

For every applied correction, we did see an effect on TAO damping but no total suppression has been achieved. An example of efficiency of every correction is shown in Figure 11 for different pressures and liquid helium operating conditions. It appeared that the most efficient solution for every case is the line short circuit correction. This solution was efficient enough to be deployed in all LINAC. The TAO correction efficiency reached 1000 for some cases, damping the oscillations from [10-100] mbars to less than 0.1 mbar. The short circuit line was sufficient to recover the pressure balance

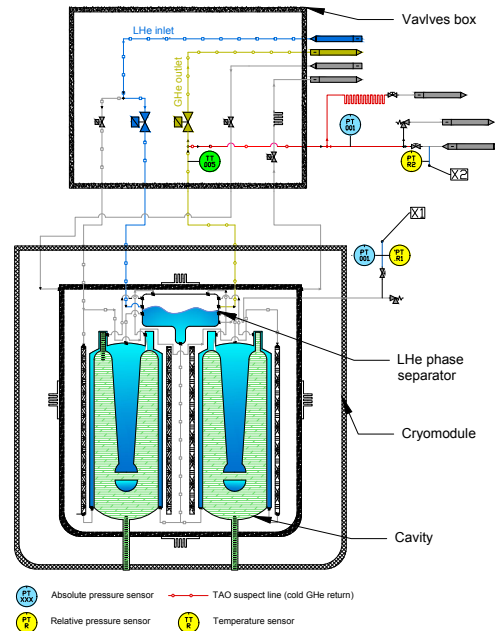


FIG. 7: P&ID of a type B cryomodule and its valves box. The red line is the low pressure return line from the LHe bath to the room temperature passive heater. Magenta circles are the main process valves. Yellow circles are the rapid piezoelectric pressure sensors. Blue circles are the absolute process pressure sensors. The green circle is the position of the temperature sensor on the return line.

between port $X1$ and port $X2$, therefore avoiding the appearance of high amplitude TAO oscillations. However, the flow rate was so important sometimes that it froze part of the line and the upper neck of the cryomodule or resulted in condensation in the same locations. We then deployed it to all cryomodules with permanent lines terminated by a on/off hand valve for one end, a micro-metric hand control valve for the other hand and pressure security valve in between. The micro-metric valve allowed us to control the flow in the correction line in order to avoid water condensation or ice. The on/off valve allowed us to suppress any flow through the correction line. This was useful especially when cooling down the LINAC. This on/off valve allowed us also to de-activate or activate the TAO correction for a more thorough investigation of TAO amplitudes and frequencies cross-couplings.

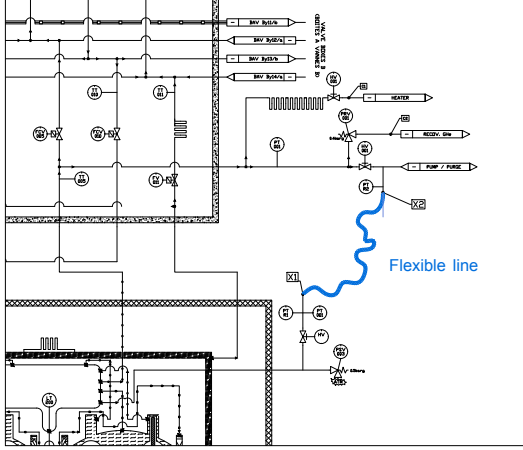


FIG. 8: Vapor sky short circuit line solution setup - zoom in Fig. 7.

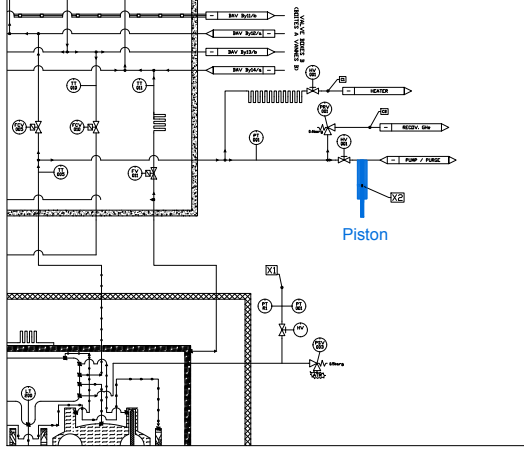


FIG. 10: Piston solution setup - zoom in Fig. 7.

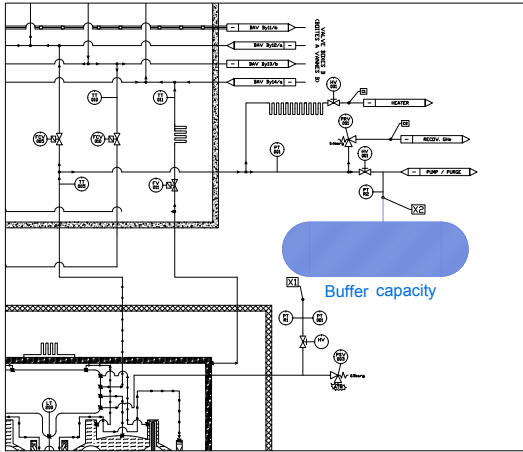


FIG. 9: Buffer volume solution setup - zoom in Fig. 7.

B. Multiple cryomodules investigation

While it might seem obvious, for an isolated system, that thermoacoustic oscillations occur because of local conditions, the answer is not clear for coupled or connected systems. For the LINAC, we are in the complex case of interconnected cryogenic clients with several room temperature ports with cold ends. It is therefore unclear whether the amplitude and frequency dependence of the oscillation is dominated by local effects or global effects. Observed transient pressure fluctuations with sudden changes in frequency of the TAO could be due to

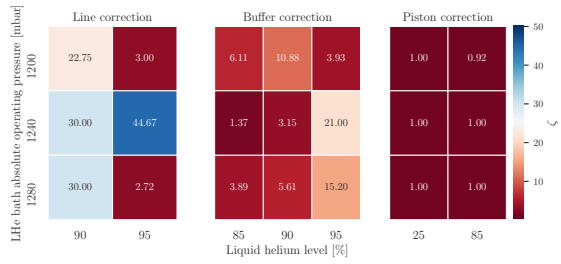


FIG. 11: TAO correction efficiency ζ as a function of the pressure (PT001) and the liquid helium level (LT200) for the three considered experimental corrections : line (vapor sky short circuit), buffer and piston for cryomodules CMA05 and CMB03.

such connections.

1. Experiment description

To have a better picture, we repeated the experiment described in subsection III A and deployed the setup described in Figure 5 in all the LINAC. We deployed 19 piezoelectric relative pressure sensors (one for every cryomodule) in the LINAC and one at the central cold box return line. Acquisition was made by the same DAQ previously described with seven 24-Bit analog modules controlled with a Labview program. As previously, all fast acquisition data were treated with a python pipeline analysis that combined PLC slow sensors and NI DAQ fast sensors. This time, the pipeline allowed automatic peak extraction and TAO detection. This allowed to have a much better view on what was going on in the LINAC.

Several configurations have been tested :

Configuration 1 Full LINAC OFF

In this configuration, no TAO correction has been applied. This configuration was meant to see the distribution of amplitudes and frequencies of the TAO in the LINAC with mixing individual cryomodule contributions as well as crosstalks.

Configuration 2 Full LINAC OFF-1

In this configuration, TAO correction has been applied to only one cryomodule at a time. That means that we closed all short circuit lines valves in all the LINAC, disabling the TAO correction but in one cryomodule. We then spanned this configuration over all cryomodules. This setup was meant to see the effect of other cryomodules that had an activated TAO on a cryomodule with an activated correction.

Configuration 3 Full LINAC ON

In this configuration, we activated the TAO correction in all cryomodules at the same time. This was meant to observe if we had other fast transient pressure fluctuations.

Configuration 4 Full LINAC ON-1

In this configuration, TAO correction was activated in all LINAC but in one cryomodule at a time. We then spanned this configuration to all cryomodules. This was meant to observe the frequency and amplitude of a local TAO correction and if it had an effect on other cryomodules.

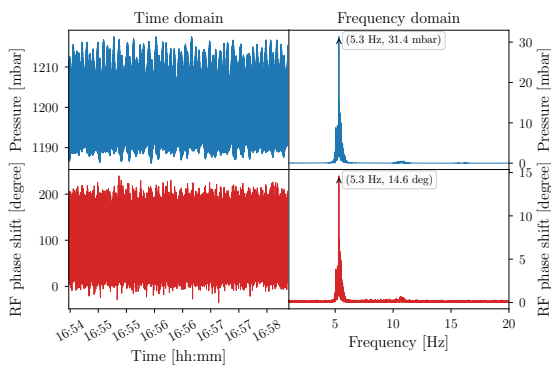


FIG. 12: Example of time and frequency domain data extracted and calculated with the pipeline analysis for CMA11 [2018-11-11].

2. Results

As described previously the pipeline allowed automatic extraction of both frequency and amplitudes of the TAO

oscillations. All data were gathered in time domain. The reference of a relative pressure sensor is always zero which means that the correct amplitude is found by offsetting the relative data by the absolute pressures measured with the CERABAR pressure sensors. The amplitude of the oscillations was found by envelope calculations within the considered time window using its Hilbert transform. For the frequency peak detection, we first applied a Fourier transform on the data in a time window of 4 minutes in order to have a high resolution. We then applied a high pass filter to avoid the $1/f$ noise below 1 Hz and a low pass filter to avoid high order harmonics. We finally computed the centroid of the resulting spectrogram to extract the frequency peak. An example of a time and frequency domain extracted data is shown in Figure 12. Thanks to the extracted data, Parzen-Rozenblatt kernel density estimations have been computed for both frequencies and amplitudes of TAO oscillations for every considered configuration. The analysis of 10,787 datasets allowed the comparison of the different configurations :

Full LINAC OFF VS FULL LINAC OFF-1 Fig. 13

Frequency For the configuration 1, with no TAO correction, we see that most cryomodules have a very sharp resonance frequency around 5 Hz. There are several exceptions such as CMA02, CMA04, CMA10 and CMB03 that exhibit multiple peaks. When the single cryomodule TAO correction is applied (configuration 2) we see a frequency shift for most cryomodules.

Amplitude For the configuration 1, we see that the TAO amplitudes are distributed unevenly. The wider distributions concerns most type A cryomodules. We also see that the single cryomodule TAO correction is very efficient as all amplitudes drop to almost 0 mbar. No effect of the remaining TAO oscillations is visible here.

Full LINAC ON VS FULL LINAC ON-1 Fig. 14

Frequency This time, when only one cryomodule at a time has an activated TAO, the oscillation frequencies seem un-correlated. When the correction is applied to all the LINAC, we see many low amplitude oscillation frequencies with a distribution that seem common to the type A cryomodules and a distribution that seem common to the type B cryomodules. This suggests the native presence of multiple low amplitude and geometry dependent oscillations occurring in the LINAC.

Amplitude When only one TAO is activated at a time, pressure amplitudes seem less widely distributed than in the configuration 1. This suggests mixed contributions of distributed TAO

oscillations in the configuration 1. Once again, amplitudes seem to be geometry dependent as more similarities arise among type A cryomodules and among type B cryomodules. The efficiency of the TAO correction (configuration 3) is noticeable as we see no high amplitude TAO occurrence when the correction is activated for all LINAC.

Full LINAC OFF-1 VS FULL LINAC ON Fig. 15
This comparison asks specifically the question of the effect of neighbouring or distant TAO oscillations on a cryomodule that has an activated TAO correction.

Frequency When other TAO oscillations are present, most of the time, we see clear sharp single or double peak frequencies. These are signatures of distributed resonances and do not include a local resonance (damped by the short circuit line). When the remaining TAO are damped, frequencies distributions take a wider shape. The latter conclusion is certainly a generalisation that does not include CMA10 et CMB03 that exhibit double resonance like behaviour. Nor does it include CMA06 and CMA07 and CMA09 that keep a sharp single peak resonance.

Amplitude The observations of the frequency distributions are confirmed by the amplitudes distributions. The latter drastically drop when all TAO corrections are activated. CMA07 and CMA09 are exceptions that remain and show both sharp frequency peaks and noticeable resonance amplitudes (can reach 1 mbar). This is not critical as the phase modulation or rather RF impedance modulation resulting in these oscillations is not significant and can be compensated by the RF amplifiers power margin.

IV. ANALYTICAL INVESTIGATION

Given the known inner dimensions of the cryogenic pipes, the volumes and the temperatures, we tried an analytical investigation of a localised thermoacoustic oscillation in a cryomodule. We used Rott's theory [21] to investigate criteria that drives the appearance of thermoacoustic oscillations. We now know that being able to describe these phenomena heavily depends on our understanding of the viscous actions of the high density helium in the inner tubes surfaces. We also know that these depend on several geometric parameters such as tubes diameters, lengths, thicknesses as well as materials and temperature gradients. To better represent the boundary conditions of appearance of the TAO, Rott has introduced a dimensionless quantity Y_c that represents the ra-

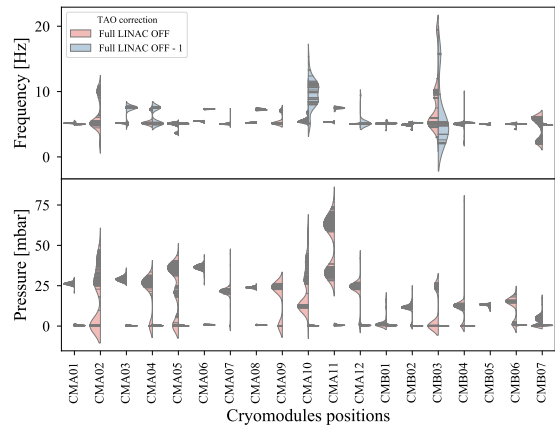


FIG. 13: Full LINAC OFF vs Full LINAC OFF-1 : kernel distributions half violin plots normalized at widths for comparison between configuration 1 and configuration 2.

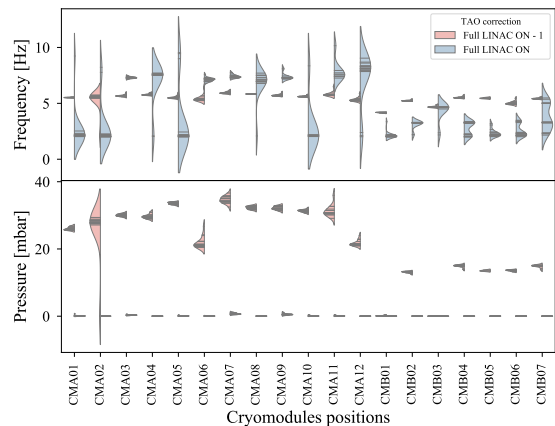


FIG. 14: Full LINAC ON vs Full LINAC ON-1 : kernel distributions half violin plots normalized at widths for comparison between configuration 3 and configuration 4.

tio of the inner tube radius to the Stokes boundary layer thickness. Y_c also drives the amplitudes of the Taconis oscillations. The Rott's approach is a stepped stability analysis with a discontinuity model where a temperature jump happens somewhere in the tube where the oscillation occurs [12]. The position of the temperature jump is described as follows :

$$\xi = \frac{L - l_c}{l_c} \quad (2)$$

with L the length of the tube between the cold end and the warm end and l_c the length at which the temperature

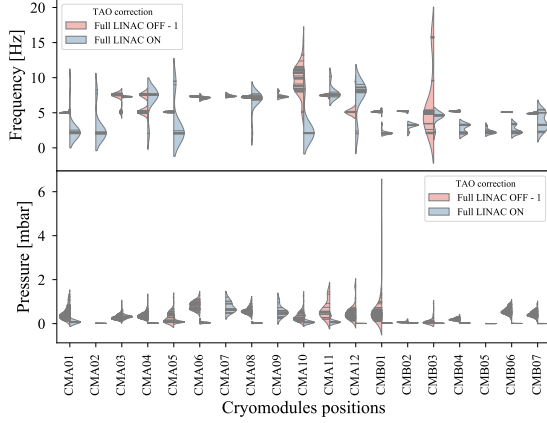


FIG. 15: Full LINAC OFF-1 vs Full LINAC ON : kernel distributions half violin plots normalized at widths for comparison between configuration 2 and configuration 3.

jump occurs (from the cold end). Y_c is then given by :

$$Y_c = \frac{2D\alpha^{1+\beta}}{a + \xi^{-1} + \lambda_c^2\xi} \quad (3)$$

with α being the ratio between the temperature of the warm end T_H and the cold end T_C :

$$\alpha = \frac{T_H}{T_C} \quad (4)$$

Here, additional constraints apply on α depending on ξ . When $0 < \xi < 1$, $\alpha = 0.228 \xi Y_c^{2.214}$. When $\xi > 1$, $\alpha = 0.0264 Y_c^{2.429}$. λ_c is a dimensionless frequency parameter defined by :

$$\lambda = \frac{\omega l}{a_c} \quad (5)$$

where ω is the angular frequency, a_c is the speed of sound in the gas at the cold end, l is the tube cold length. Usually, an assumption is taken that $\xi = 1$ meaning that the temperature jump occurs in the middle. In our case we will consider all the solutions with ξ varying from 0 to 1. To search for a solution for λ_c , we can consider the equation from [22] :

$$Y_c \lambda_c^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{a_c}{\lambda_c} \right)^{\frac{1}{2}} r_0 l^{-\frac{1}{2}} \quad (6)$$

where ν_c is the kinematic viscosity of the fluid. This leads to :

$$Y_c \lambda_c^{\frac{1}{2}} = r_0 \left(\frac{a_c L}{\nu_c (\xi + 1)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

For helium at such temperatures, we consider $a_c = 1.2 \cdot 10^4 \text{ cm.s}^{-1}$. Given Rott's analysis, D and α are

constants with values that depend on the intermolecular force field [22]. For helium between 300 K and 4.5 K they are set to $D = 1.19$ and $\beta = 0.647$. For our case, we consider also the inner radius of the tubes to be $r_0 = 9 \text{ mm}$. These equations lead us to the two branches of the Rott's stability curve shown in Figure 16. This plot spans all cases of ξ from 0 to 1. The outer surface of the trace represents the stability region whereas the inner surface represents the region where a thermoacoustic oscillation can occur. Given the experimental observations, we also consider that $T_C = 5 \text{ K}$ and $T_H = 300 \text{ K}$, which leads to $\alpha = 60$. This makes the SPIRAL2 case fall at the edge of the stability curve implying that the overall length of the line is smaller than one meter. Given the observations (frequencies and geometries), it is safe to say that the estimations of the location of the SPIRAL2 case in the Rott's stability curve is not correct. Several assumptions can lead to this mistake. In fact, the geometry of the cryomodule/valves box ensemble is not as simple as a simple pipe. For example depending on the position, the inner tube has different diameters. The immediate environment also has an effect on the conditions of oscillations kick-off. It is therefore necessary to have more detailed approach that fits the complex situation of inclusive systems where cryogenic thermoacoustic oscillations occur.

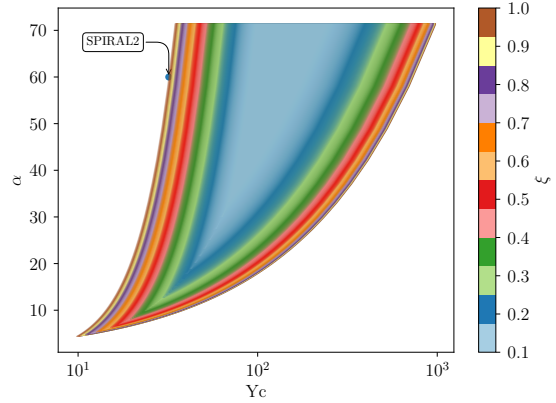


FIG. 16: Rott stability curve and the case of SPIRAL2.

For the moment, let us consider that we don't know anything about the effective geometric parameters that would allow us to make a Rott's analysis. Let us consider, as did Rayleigh in 1877 [23], the system as an oscillator (which in fact it is). In this situation, the gas in the critical volume V is the spring mass and the gas in the tube is the proving mass. The frequency of the oscillation, can be directly derived from eq. 3.48 in [21] as :

$$\omega = \left(\frac{\pi r^2 l_c}{V} \right)^{1/2} \quad (8)$$

If we consider that the oscillating mass is the mass in

the tube, with $V = \pi r^2(L - l_c)$ and $\xi = (L - l_c)/l_c$, then it comes :

$$l_c = \frac{a_c}{2\pi\nu\xi^{-1}} \quad (9)$$

We have observed that when the single oscillators are coupled, we are dominated by a central frequency lying around 5 Hz (see Figure 13). If we consider this as an input and vary the effective cold end length and the temperature of the cold end as a function ξ , we see (Figure 17) that, in order to have small cold ends, we need $\xi \geq 1$. On the other hand we know that the oscillators are all different and exhibit different frequencies ranging between 4 and 10 Hz. If chose $\xi = 1$ (which is usually considered for this kind of analysis), we see from Figure 18 that the effective cold end length should be somewhere between 2m and 15m. If we consider an electromagnetic analogy and given the low frequencies observed (with respect to acoustic frequencies), this fits much better with a long wavelength. The problem that arises again here is that the effective impedance of an interconnected system is not easy to estimate. This is critical in order to be able to design a proper damper or any other solution to this kind of problem. It is worth mentioning here that, in these considerations, the dynamic behaviour of He has been taken into account with respect to its temperature and the pressure of the process (1300 mbars). Calculations have shown that there is very little dependance between the frequency of the oscillations and the pressure of the process. However, experiments have showed a high dependance between the pressure and the start up conditions of the TAO.

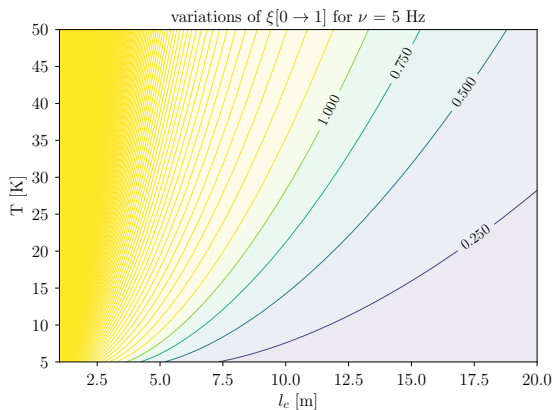


FIG. 17: Contours of the cold effective cold end length as a function of the cold temperature value for different values of ξ and $\nu = 5$ Hz.

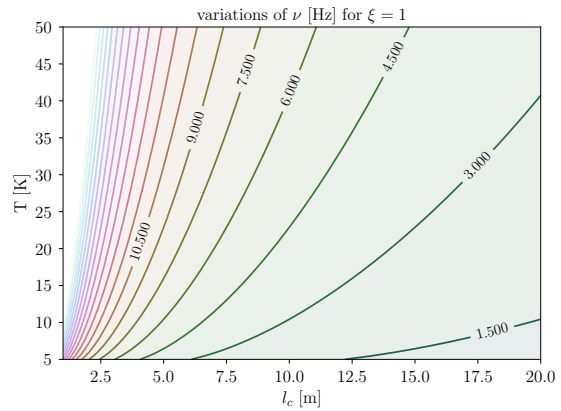


FIG. 18: Contours of the cold effective cold end length as a function of the cold temperature value for different values of ν and $\xi = 1$.

V. DAMPER DESIGN

The correction that proved efficient in subsection IIIB 2 has few drawbacks. It creates a helium flow in the pipe passage where the liquid helium level sensor stands. This modifies the cold helium stratification shape in the liquid helium pipe volume and hence affects its behaviours. It manifests as a plateau in the liquid helium readout. This effect has been observed several times during operation. The plateau's location was different for every cryomodule but it was usually between 89% and 97%. Such plateau is a non linear behaviour that can't be handled by the PID controller in charged of the level control. In the end the global stability of the liquid level is affected by those plateau. One explanation is that, in the upper part of the level probe, the additional helium flow causes a sub-cooling of the level probe superconducting wire, which maintains the wire in the superconducting state independent of the helium level. Tuning the current and the boost current of the liquid helium level sensors proved inefficient to solve the problem. We therefore spanned a range of set-points for liquid helium level control in order to find a suitable set-point compromise. Although this compromise has been found for our current operation conditions, it is suitable to find a different solution that does not affect the behaviour of a critical component of the cryostats. In subsection IIIB 2, we used what we had in hand to solve quickly and efficiently the problem. A proper design of a suitable damper would solve the problem.

In [20], instructions are given on how to design such a damper. Let's explore the buffer reservoir solution. If we consider the incoming wave impedance

$$Z_i = \frac{\rho a}{A} \quad (10)$$

, the reservoir impedance

$$Z_r = \frac{-i\rho a^2}{\omega V} \quad (11)$$

and the orifice impedance (valve) :

$$Z_0 = \frac{\sqrt{8\mu\rho\omega}(1 + h/2r + \Delta) + i\rho\omega(h + 1.7r)}{r^2\pi} \quad (12)$$

the wave is damped when :

$$Z_i = Z_r + Z_0 \quad (13)$$

Obviously, the solution depends on the temperature of the gas and its pressure as well as the wave parameters. Figure 19 shows a design compromise contour for different gas temperatures and pressures for the geometrical parameters of the SPIRAL2 valves boxes and the dimensions of the port considered for the correction.

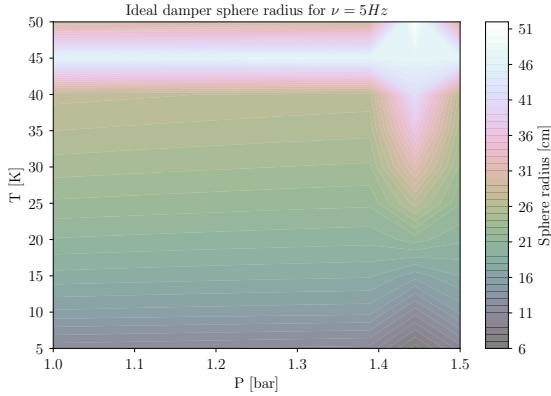


FIG. 19: Damper ideal sphere diameter as a function of the temperature and the pressure of He gas for an oscillation at 5 Hz.

VI. CONCLUSION

Investigating cryogenic thermoacoustic oscillation occurring in a tube in a lab experiment and a real life TAO in a working superconducting LINAC is a completely different thing. Although the two share the same physical principles, in an accelerator, we have to deal with many dependencies and subsystems. This paper is a result of several years investigations ending up in only few months

of dedicated experimentation. In fact, since the discovery of the problem in 2017, the prime purpose was to find a quick, easy and efficient solution, to approve it and deploy it. This has been done with success and allowed the commissioning of the LINAC and its current ramp up. However, we know now that our operation conditions can change (thermal load, pressure, liquid helium level) and that for some operation condition, the TAO wave can appear again and cause pressure instabilities. We also know that the chosen solution is not perfect because of the liquid helium level observed plateau. After deploying the vapour sky short circuit line, our priority was to be able to monitor this phenomena that remained unseen for years, hence the deployment of a simultaneous acquisition of piezo-electric pressure sensors at different locations. The acquisition system is now evolving from the NI-DAQ solution to an integrated programmable ARM DAQ (MSX-E3601) compatible with ModBus TCP communication protocol for a continuous operation compatible with the accelerator data acquisition and archiving system. The analysis pipeline has also to be included in the main data analysis process in order to have alarm kind surveillance of occurring events. A first analysis using Rott's approach and wave approach showed that the system is complex and that a different method has to be considered if we are to understand and find a better solution to the problem. We therefore plan on starting an R&D program for a dedicated code for analysing cryogenic thermo-acoustics in complex geometries. At the same-time, we plan on deploying a tuneable, damper like test setup that mimics variable resistance, inductance and capacitance thermodynamic RLC circuit in order to better characterise the impedance of a TAO loaded cryogenic system.

Acknowledgements

This work has been funded by "Region Normandie" as well as the city of Caen, CNRS and CEA. We would like to thank all contributors from CEA-IRFU, CNRS-JC Lab and GANIL without whom this paper would not have been possible. We also thank F. Bonne and P. Bonnay (DSBT/CEA) for the Simcryogenics library that is being used for the model base control of the cryogenics. We thank F. Millet (DSBT/CEA) for useful discussions on liquid helium level sensors shielding. We finally thank D. Longuevergne and M. Pierens from IJC Lab for kindly borrowing us the first fast sensors and acquisition system for vibrations investigations in 2017 and useful discussions on setting up the first experiment.

-
- [1] M. Lewitowicz, TOURS SYMPOSIUM ON NUCLEAR PHYSICS VI **891**, 91 (2006).
 [2] R. Ferdinand, P. Bernaudin, M. Di Giacomo, P. Bosland,

- G. Olry, and Y. Gomez Martinez, in *16th International Conference on RF Superconductivity (SRF2013)*, Vol. SRF13 (Joint Accelerator Conferences Website, Paris,

- France, 2013) pp. 11–17, mOIOA02.
- [3] P. Dolegiewiez, R. Ferdinand, X. Ledoux, H. Savajols, and F. Varenne, in *10th International Particle Accelerator Conference* (Melbourne, Australia, 2019) p. MOPTS005.
- [4] A. Ghribi, P. E. Bernaudin, A. Vassal, and F. Bonne, *Cryogenics* **85**, 44 (2017).
- [5] A. Ghribi, P.-E. Bernaudin, Y. Bert, C. Commeaux, M. Houeto, and G. Lescalié, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* **171**, 012115 (2017).
- [6] A. Vassal, F. Bonne, A. Ghribi, F. Millet, P. Bonnay, and P.-E. Bernaudin, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* **502**, 012111 (2019).
- [7] F. Bonne, S. Varin, A. Vassal, P. Bonnay, C. Hoa, F. Millet, and J.-M. Poncet, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* **755**, 012076 (2020).
- [8] K. Taconis, J. Beenakker, A. Nier, and L. Aldrich, *Physica* **15**, 733 (1949).
- [9] G. Swift, “Thermoacoustics,” in *Springer Handbook of Acoustics*, edited by T. Rossing (Springer New York, New York, NY, 2007) pp. 239–255.
- [10] K. H. A., *Physica* (Amsterdam) **15**, 971 (1949).
- [11] R. N., *Z. Angew. Math. Phys.* **20**, 230 (1969).
- [12] R. N., *Z. Angew. Math. Phys.* **24**, 54 (1973).
- [13] N. Sugimoto and D. Shimizu, *Physics of Fluids* **20**, 104102 (2008), <https://doi.org/10.1063/1.2990763>.
- [14] D. Sun, K. Wang, Y. Guo, J. Zhang, Y. Xu, J. Zou, and X. Zhang, *Cryogenics* **75**, 38 (2016).
- [15] A. Ghribi, P. Bernaudin, C. Berthe, G. Duteil, R. Ferdinand, G. Lescalié, L. Philippe, Y. Thivel, A. Trudel, A. Vassal, J. Rozé, and D. Touchard, (2017), poster.
- [16] A. Ghribi, M. Aburas, Y. Baumont, P.-E. Bernaudin, S. Bonneau, G. Duteil, R. Ferdinand, M. Lechartier, J.-F. Leyge, G. Lescalié, Y. Thivel, A. Trudel, L. Valentin, and A. Vassal, *Cryogenics* **110**, 103126 (2020).
- [17] Y. Gu and K. Timmerhaus, *Cryogenics* **32**, 194 (1992), space Cryogenics Workshop.
- [18] G. Ditmars, D.A.; Furukawa, *Journal of Research of the National Bureau of Standards* **69C**, 35 (1965).
- [19] G. Chen and T. Jin, *Cryogenics* **39**, 843 (1999).
- [20] H. Luck and C. Trepp, *Cryogenics* **32**, 703 (1992).
- [21] N. Rott, *Thermoacoustics*, edited by C.-S. Yih, *Advances in Applied Mechanics*, Vol. 20 (Elsevier, 1980) pp. 135 – 175.
- [22] P. K. Gupta and R. Rabehl, *Applied Thermal Engineering* **84**, 104 (2015).
- [23] t. B. R. J.W. Strutt, *The Theory of Sound*, edited by Macmillan and co. (Cambridge University Press, 1877).

4.2 Publication 2

Cryogenics 110 (2020) 103126



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Cryogenics

journal homepage: www.elsevier.com/locate/cryogenics



Research paper

First full cool down of the SPIRAL 2 superconducting LINAC

Adnan Ghribi^{a,b,*}, Muhammad Aburas^{a,b}, Yoann Baumont^{a,c}, Pierre-Emmanuel Bernaudin^{a,c}, Stéphane Bonneau^{a,b}, Guillaume Duteil^{a,c}, Robin Ferdinand^{a,c}, Michel Lechartier^{a,c}, Jean-François Leyge^{a,c}, Guillaume Lescalé^{a,c}, Yann Thivel^{a,c}, Arnaud Trudel^{a,c}, Laurent Valentin^{a,b}, Adrien Vassal^{a,d,e,f}

^a Grand Accélérateur National d'Ions Lourds (GANIL), France
^b Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS - IN2P3), France
^c Commissariat à l'Energie Atomique (CEA - IRFU), France
^d Commissariat à l'Energie Atomique (CEA/INAC-SBT), France
^e Univ. Grenoble Alpes, France
^f Univ. Caen Basse Normandie, France



ARTICLE INFO

Keywords:
 Cryogenics
 LHe refrigeration
 Superconducting cavities
 LINAC
 Accelerators

ABSTRACT

SPIRAL 2 is a high intensity heavy ions beams accelerator project that has been going on for more than 10 years now. Countless efforts in different disciplines made it what it is today. One of the most important steps after the set up of the different equipments has been the very first full cool down of the superconducting cavities in an accelerator operation type configuration. While this has been a major achievement for the SPIRAL 2 teams, it also hi-lighted new challenges and constraints that would have to be addressed in order to have a high availability rate of the beam from the cryogenics side. This paper retraces this particular episode.

1. Introduction

The GANIL's (Grand Accélérateur National d'Ions Lourds) SPIRAL2 heavy ions accelerator [1–5] aims at delivering some of the highest intensities of rare isotope beams on earth. The unstable beams will be produced by the ISOL(Isotope Separation On-Line) method via a converter or by direct irradiation of fissile material. The driver is designed to accelerate protons, deuterons and heavy ions at different ranges of intensities and energies. It is composed of high performance ECR sources (Electron Cyclotron Resonance sources), a RFQ(Radio-Frequency Quadrupole), and a superconducting light/heavy ion LINAC(LINear Accelerator). The latter [6–9] is based on 26 bulk Niobium made superconducting, independently phased resonators. These resonators are assembled in two families of cryomodules that integrate passive RF, vacuum and cryogenics components needed for their operation. The first family, called type A cryomodules and developed by CEA/IRFU, is optimised for $\beta_0 = 0.07$ relative velocity and comprises 12 cryomodules (one cavity/cryomodules). The second family, called type B cryomodules and developed by CNRS/IN2P3/IPNO, is optimised for $\beta_0 = 0.12$ and comprises 7 cryomodules (two cavities per cryomodule). All cryomodules are interspaced with room temperature quadrupole magnets and are operated at [88.0525] MHz.

To be operated, the superconducting cavities need to be maintained at a stable temperature lower than their transition temperature with a stringent mechanical stability to avoid detuning. This is achieved thanks to a cryoplant delivering up to [1300] W cooling power at [4] K. The coldbox, at the center of the cryoplant, delivers liquid helium through a phase separator (5000L capacity LHe dewar) and a cryodistribution system to the cryomodules and manages the return gas. For every cryomodule, a valves-box allows maintaining stable LHe and stable pressure at the surface of the cavities. An overall view of the cryogenic facility is visible on Fig. 1. More details on the cryoplant can be found in [10].

More than 10 years after the design phase have been necessary to build and assemble all the systems and subsystems. 37 km of cables link hundreds of sensors and actuators to 37 Siemens S300/S400 programmable logic controllers. Human Machine Interface uses PCVue™ for the cryoplant and WinCC™ for the LINAC. EPICS™ is used for data acquisition in redundant distant servers. In 2015, pre-commissioning of the coldbox confirmed its capability to deliver the required refrigeration power. In 2016, a first partial cool down of two cryomodules allowed the pre-commissioning of mechanical, piping, vacuum and control/command systems. A year later, a second partial cool down of three cryomodules allowed the commissioning of the

* Corresponding author.
 E-mail address: ghribi@ganil.fr (A. Ghribi).

<https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2020.103126>
 Received 10 April 2020; Received in revised form 4 June 2020; Accepted 1 July 2020
 Available online 10 July 2020
 0011-2275/ © 2020 Elsevier Ltd. All rights reserved.

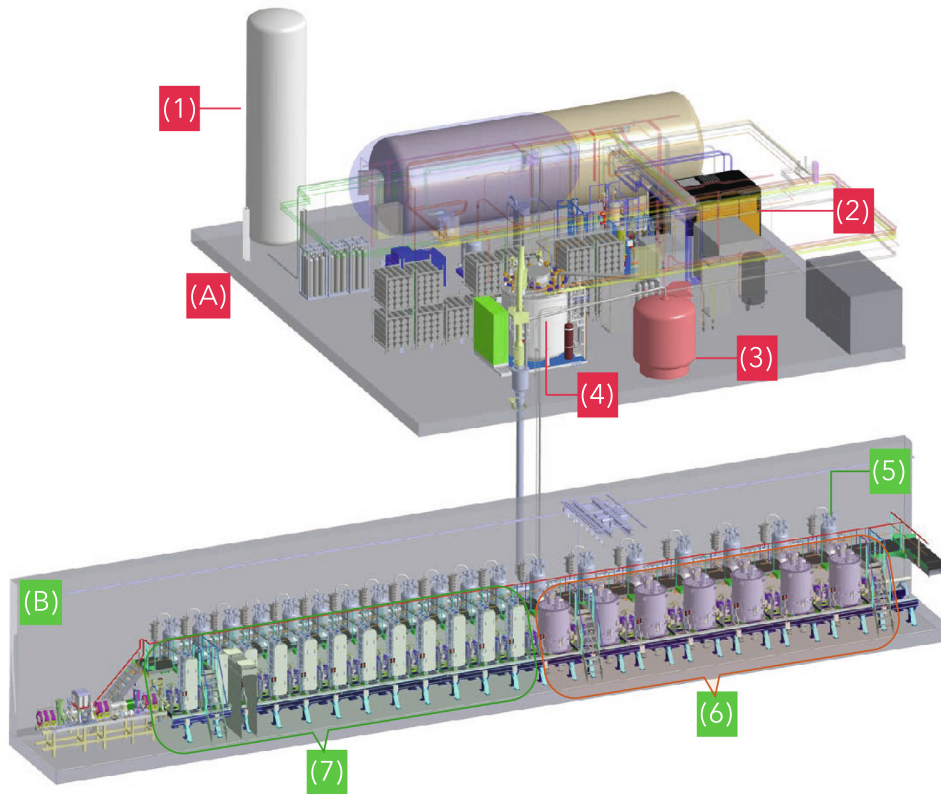


Fig. 1. 3D view of the cryogenic facility of Spiral 2. (A) Cryoplant. (B) LINAC. (1) LN2 tank. (2) Compressor station. (3) LHe dewar. (4) Cold box. (5) Valves-boxes. (6) Type B double cavities cryomodules. (7) Type A single cavity cryomodules.

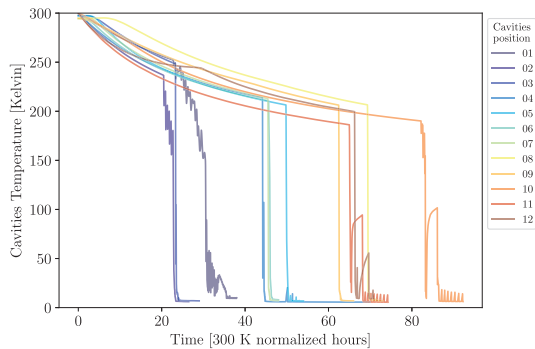


Fig. 2. CMA cavities temperature drop. The time axis is normalised so that all temperature appear begin their slope at the same time.

command, control and acquisition system [11]. The same year, all the building blocks including cryoplant and LINAC have been assembled with success.

The present paper brings the development and commissioning of the cryogenic system of SPIRAL 2 a step forward with a first full cool down of the LINAC. This is also certainly a step further into maturing the system for reliable beam operation conditions. In the first section, challenges and requirements for cool down and normal operation conditions are highlighted. The second section details the cryogenic process logic that has been implemented for the cool down. Next, we

show the results of the cool down phase and the normal operation phase. An opening into RF measurements of the cavities properties is also described with a possible link to cryogenics.

2. Cooling down the LINAC

2.1. Requirements and applied methods

2.1.1. Global cool down strategy

Due to the design of the cryoplant and the cryodistribution, a specific global cool down strategy has to be followed. As the cold box delivers the cooling power to cool down and maintain stable both thermal screens circuits (60 K) and liquid helium circuits, the cold box and the thermal screens are cooled down at the same time. Cool down of liquid helium circuits starts when the cold box reaches stable operation conditions and the main liquid helium dewar (5000 L capacity) has at least 1500 L of liquid helium. As there is no bypass at the edges of the LINAC, the edge cryomodules have to be cooled down in order to cool down the cryodistribution system. Once the cryodistribution is cold, the rest of the cryomodules follows in a specific order. A summary of the global cool down procedure used for 2017 cool down is shown below:

1. Purge of all systems
2. Pump the isolation vacuum and the beam vacuum
3. Helium liquefaction in the main dewar to a minimum of 1500 L.
4. Warm up the cold box
5. Cool down the cold box and at the thermal screens of CMA01 and

- CMB07 at the same time (the two edges of the LINAC).
- Once the cold box is in normal operation mode, cool down the cavities of CMA01 and CMB07. This concludes the cool down of the cryo distribution system. since there is no by pass at the ends of the LINAC, cooling down the two cryomodules at the end of the LINAC is mandatory to finalise the cool down of the cryo distribution system.
 - Cool down cryomodules from the edges to the center beginning by the thermal screens then the cavities for every cryomodule. Since the heat load of one type B cryomodule is approximately twice the heat load of a type A cryomodule, for every type B cryomodule, two type A cryomodules have been cooled down at the same time.

2.1.2. Local cool down strategy

For every cryomodule, thermal screens are cooled down before the cavities. 2 valves ensure the cooling and control of the thermal screens and 3 valves ensure the cooling and control of the superconducting cavities. One of the three cavity valves (largest flow coefficient) is used in the beginning to cool down in a bottom to top way in order to take advantage of the cold vapours. Once, the cavity is cold and the local phase separator has a given level of liquid helium, the cool down valve is closed and the liquid helium level is regulated from the top of the phase separator using another lower flow coefficient valve. Details of the instrumentation of the cryomodules can be found in [10]. It should be noted that there are two outlet valves. The first is a warm one and is located at the outlet of a passive exchanger. When He gas is too warm (> 80 K) to be re-sent to the cold box, it sends the gas back to the inlet of the compressor station. When the gas is sufficiently cold, the warm outlet valve is closed and a second one is opened. The latter is the one that usually controls the pressure of the cavities liquid helium baths. However, during all the phases of the cool down and until the cryomodules are cold and fully thermalised, this valves is kept entirely open. It should also be noted that the passage between the two mentioned valves can be sometimes tricky depending on the programmed speed of the cool down and the heat load of the cryomodules. This means that, when not programmed carefully or during trials, the passage can lead to security interlocks activation due to overpressure. Later on, a second level security has been added with a weight added on the inlet valves opening that depends on the cavities pressure and that overtakes the programmed cool down slope when the pressure reaches a certain value and before the activation of the security interlocks.

It should be noted that, during cool down, the outlet valve that controls the pressure of the cavities liquid helium baths in normal operation modes is kept 100% open at all times.

One of the constraints of SPIRAL 2 cavities is the Q disease. This so called Q disease is a symptom of degradation of the quality factor of a cavity due to Hydrogen trapping on the inner surface [12]. This appears if a cavity spends more than a given time $\Delta(t)$ between two critical temperatures T1 and T2. SPIRAL 2 cavities are not heat treated and suffer from such effects. During test bench qualifications, these values have been found to be: $\Delta(t) = 1$ h; T1 = 50 K and T2 = 150 K. Fortunately, the symptom is reversible as hydrogen is freed during warm up when the temperature of a cavity increases. This means that if, for some reason, a cavity spends more than 1 h in the critical temperature range, it has to be warmed up and cooled down again. Therefore, a specific cool down procedure has been used to avoid this situation. The strategy here is to slow down the cavities temperature drop in order to allow more time for thermalisation of the mass. Previous individual cool downs allowed to determine the temperature transmitter that represents the best the thermal behaviour of the cavity. This temperature has then been set as an observer for automatically controlling the slope of the temperature drop thanks to an active proportional integral (PI) controller. Between 300 K and 250 K, the main cool down valve is opened slowly to 100%. Starting from 250 K, the PI controller on the same valve is activated with a sliding target cavity temperature from 250 K to 150 K. The slope of this variation is chosen by the operator.

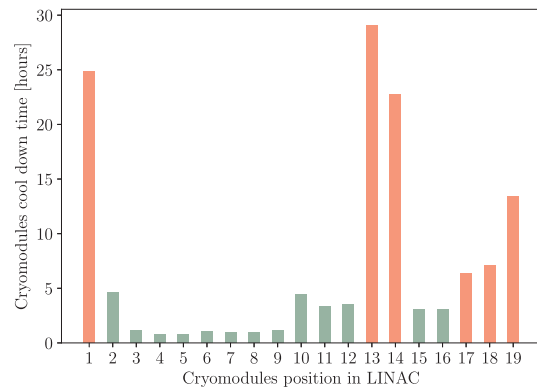


Fig. 3. Cryomodules cool down time. Green bars are for cool down time lower than 5 h. Red bars are for cool down time higher than 5 h. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

2.1.3. Results

The procedure described in 2.1 has been applied to oct. 2017 SPIRAL 2 LINAC cool down. It was the first full cool down of the LINAC and a good opportunity to experiment cool down methods and strategies. The resulting over all cool-down time is shown on Fig. 3. It begins at the start of the user controlled cavities cool down procedure and ends when the first percent of liquid helium is measured in the phase separators. As expected, the first cavities cool down time (cavities 1, 25 and 26) are higher because it matches the cool down of the liquid helium circuits of the cryodistribution. Cavities 13 and 14 (same cryomodule type B) are right in the middle of the LINAC, at the junction between the two main branches of the cryodistribution system. These cavities suffered from unequal control of thermal load distribution during cool down and not adapted cool down parameters. As a result, this deprived them from an adapted cold helium flow in a critical step of their cool down. Cavities 2, 10, 11 and 12 suffered from security mode passage. This is visible on the extended cool down time with respect to other type A cavities (the first 12 cavities) in Fig. 3 as well as in the slope of their temperatures during cool down in Fig. 2.

As described previously cavities temperatures have been monitored in order to optimise cavities temperature slopes parameters. The temperature drops of the first 12 cryomodules can be seen in Figs. 2. In this figure, one can distinguish four main behaviours. The first is a curve visible on all cavities. It starts at 300 K and corresponds to a radiative cool down that occurs thanks to thermal screen cool downs. The second one is a change in the slope of the previous curve. It corresponds to the beginning of the cavity cool down procedure. The third is the step-controlled cavities temperature drop down. Its slope depends on the chosen slope parameters. In Fig. 2, the latter is visible only for cavities 1 and 2. The fourth is an acceleration of the cool down, again visible in Fig. 2 for cavities 1 and 2. For most other cavities, the different parts can not be distinguished due to different reasons (beginning of cool down too fast, controlled cavities cool down too fast). For some cryomodules, the parameters entered were not adapted to the intrinsic heat load of the cryostats. This caused an increase in the outlet pressure, which caused in its turn a reduction of the cold helium flow and therefore an increase and stagnation of the cavities temperature in the critical temperature range.

The success or failure of a given cool down procedure or a parameter set is summarised in Fig. 4. It represents an automatic counter Qd_{count} that starts when the cavities temperature reach 150 K and stops when it is below 50 K. For cryomodules 1 and 7 (cavities 1, 25 and 26), that have been cooled down at the same time as the cryodistribution, the cool down has been slowed down because of the very high thermal

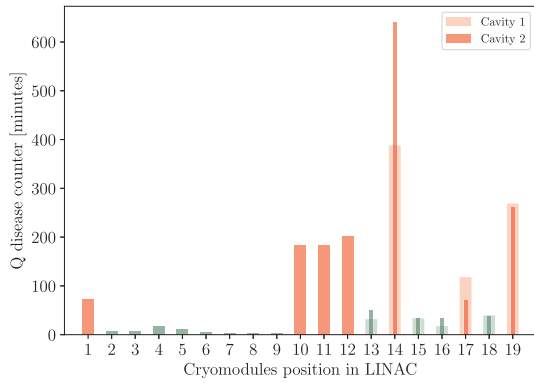


Fig. 4. Q disease counter for all cryomodules. Green bars correspond to counters within the requirements. Red bars are for counters above requirements. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

load of the cryodistribution compared to the cryomodules. In addition, when the temperature of the helium return is lower than 80 K, it is redirected to the cold box cold return line. For the first cryomodules, the overall return temperature is too high for the higher cold stage of the cold box. Valves at the input of the cold box, therefore, significantly reduce the return flow while the temperature is too high. The other cases for cryomodules 10, 11, 12 and 14 (cavities 15 and 16) have been explained in the previous paragraph by accidental stop of the cool down. As for cryomodule 17 (cavities 21 and 22), it suffered from an input temperature slope too high for its thermal load.

3. The way to operation

3.1. Thermalisation

When the liquid helium level in the phase separators of the cavities is stable and regulated around a 90%, the cool down procedure is finished. However, we have to wait until all systems and subsystems are thermalised before authorising cryogenic operation in the beam configuration. To know when this can happen, we regularly measured the heat load for every cryomodule by measuring the liquid helium level decrease during a given time when outlet valve is open and inlet valve is closed. The heat load is then given by:

$$Q = \frac{dV}{dt} \rho C_l \quad (1)$$

where Q is the thermal load, V the LHe volume, t the time, ρ the liquid helium density at the cryomodule measured pressure and C_l the latent heat of liquid helium. For increased precision, the exact 3D volume of the phase separator have been modelled.

What can be noticed from Figs. 5 and 6 is that the time that we are looking for strongly depends on the considered cryostat geometry, construction and constraints. For example, type A cryomodules are fast to cool down but slow to thermalise (4–5 days) due to the presence of a specific frequency tuning system thermally decoupled from the cold mass (see Fig. 5). The cryomodules are then thermalised when their frequency tuning systems temperatures reach a stable plateau (around 35 K). The type B cryomodules (see Fig. 6) have a much higher thermal load but are much faster to thermalise (around 1 day).

3.2. Cavities liquid helium bath pressures and levels control

Once the cryomodules are thermalised, there are two main constraints to authorise RF and beam operation.

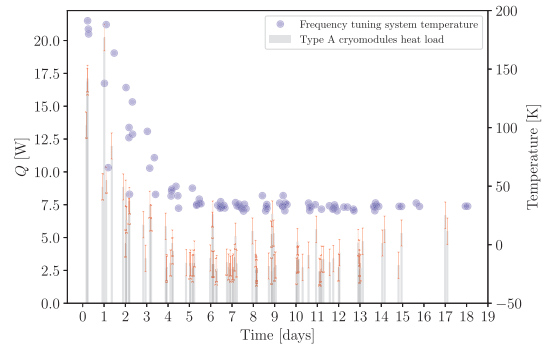


Fig. 5. Bars: evolution of the measured thermal load Q of the type A cryomodules (first 12 cavities) as a function of the elapsed time since the end of the cool down procedure. Circles: Evolution of the temperature of the frequency tuning system.

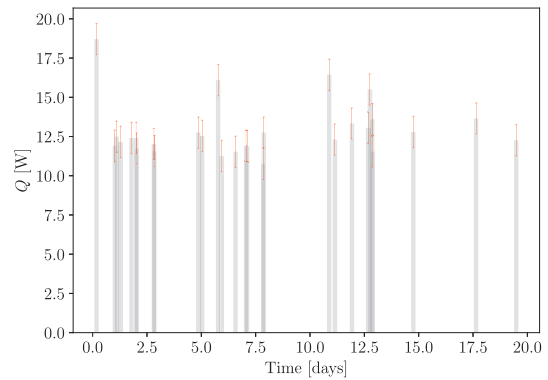


Fig. 6. Evolution of the measured thermal load Q of the type B cryomodules (last 14 cavities) as a function of the elapsed time since the end of the cool down procedure.

The first is to make sure that all cavities are submerged by liquid helium at all times. When the LHe bath pressure is stable, all cavities have a very stable temperature and therefore very stable RF properties. In order, to achieve this target, a dedicated valve is used to control liquid helium level. This valve uses a proportional-integral (PI) controller with an integral tuned to match the corresponding cavity static heat load and a proportional term chosen to make the valve slow enough in order not to have an instantaneous effect on the pressure. The pressure and liquid helium level of a same volume are obviously coupled. The matching valves that use independent PI controllers for liquid helium and pressure regulations therefore introduce correlations. As can be seen on Fig. 7, when not tuned properly, these correlations can be critical with regard to the stringent pressure stability requirements. The difficulty is enhanced here by the asymmetric behaviour of the liquid helium regulation (fast to fill and slow to empty). One of the actions that has been done while keeping a simple PI controller was to limit the range of action of the liquid helium flow control valve. This proved efficient as it stabilised the pressure of the cavities with regard to correlated instabilities with liquid helium control valves positions. However, this approach is not adapted to a high variability of the thermal load.

The second is to make sure that pressure variations of the liquid helium bath do not exceed a given $\Delta(P)$. In fact, the forces that liquid helium apply on the surface of a cavity slightly changes its shape, which changes its geometric factor. As a result, its unloaded quality factor

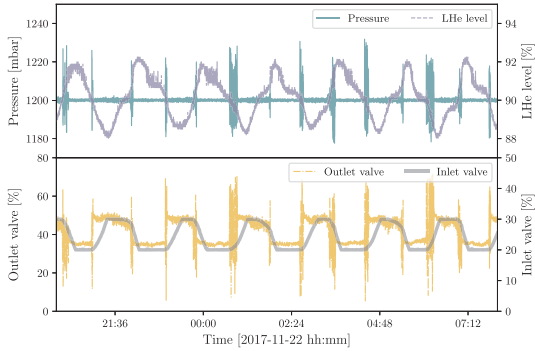


Fig. 7. Pressure and liquid helium level regulations (top plot) with matching valves (bottom plot) for CMA05. Data of 2017-11-20.

(that we can denote Q_{f_0} here) also changes as can be seen in this equation:

$$Q_{f_0} = \frac{G}{R_s} \quad (2)$$

where G is the geometric factor and R_s is the surface resistance. Depending on the bandwidth of the cavity and the margin on the amplifiers side, this can be critical as it drastically reduces the capability to accelerate particles with the required acceleration gradients. For SPIRAL 2, the limit of $\Delta(P)$ has been set to ± 5 mbar.

We then monitored every night the pressure fluctuations and counted the number of deviations from the accepted pressure range (± 5 mbar). While stabilised most of the time, the pressure showed periodic or pseudo-periodic instabilities that seemed to move from one LINAC position to another. This behaviour seemed to be more frequent for the 12 first type A cryomodules. Fig. 8 shows such behaviour for CMA05 and CMA10 and Fig. 9 for CMA06. Other periods were more stable and did not show any instability over ± 5 mbar (see Fig. 10 for example).

When looking in more details for the action of the pressure control valve during instabilities, we could see that instabilities seemed uncorrelated to the actions of the valves (see Fig. 11). Moreover, the maximum sampling rate of pressure data acquisition (300 ms) couldn't allow us to distinguish any reproducible behaviour with a fixed periodicity. All this pointed to the presence of hidden fast phenomena distributed all over the LINAC.

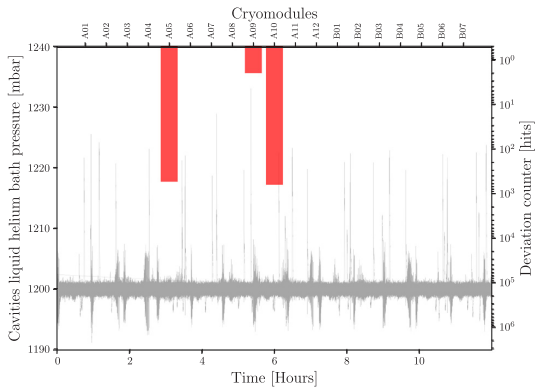


Fig. 8. Pressure fluctuations (red) and ± 5 mbar deviation counter (gray). Data of: 2017-11-27 — start 20:00. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

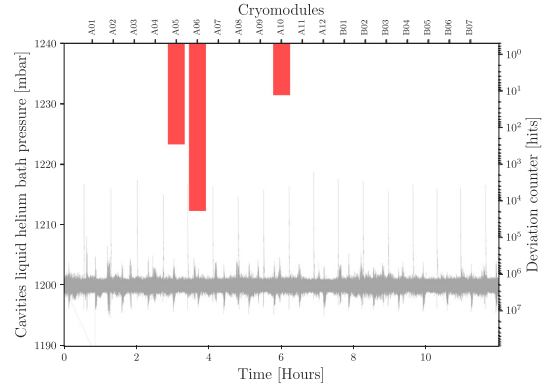


Fig. 9. Pressure fluctuations (red) and ± 5 mbar deviation counter (gray). Data of: 2017-11-28 — start 20:00. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

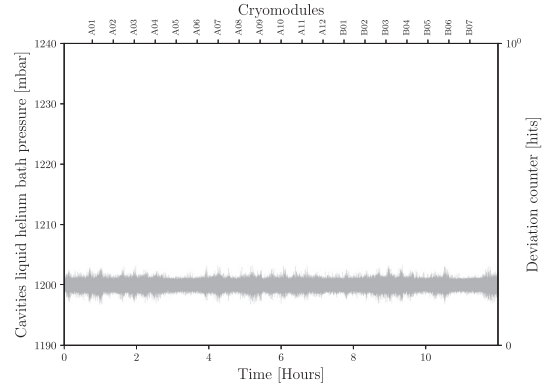


Fig. 10. 2017-12-05 — start 20:00.

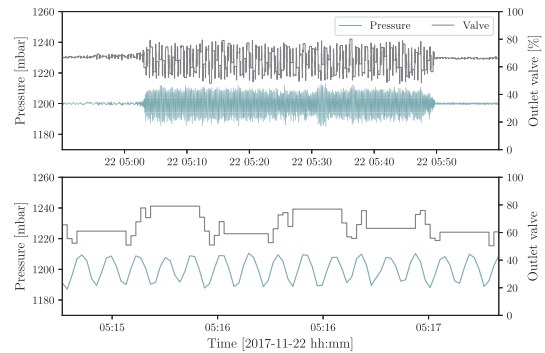


Fig. 11. 2017-11-22 — CMA01.

3.3. Other measurements

During this 2017 run, first RF measurements of the cavities have been performed. This was a first cold measurement of some RF properties of the cavities in the LINAC. Due to the distance between the LINAC and the generators (power loss) and the limitations on the injected RF power in the LINAC (nuclear safety authorisation was pending), we used an external RF synthesizer to measure and characterise the transmitted power response. First, a self-oscillating closed

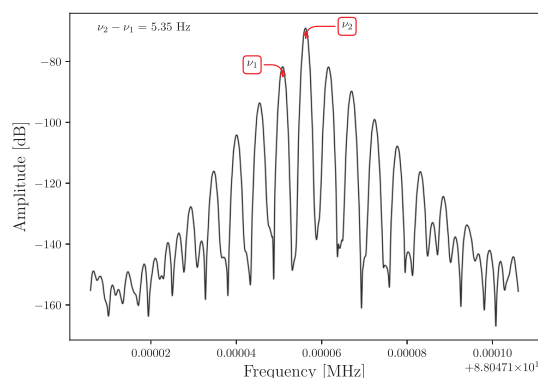


Fig. 12. Transmitted power modulation measurement of cavity number 25 (CMB07 cavity 1). Cryomodule was cold, thermalised and regulated both in liquid helium level and pressure. Pressure of liquid helium bath, as measured, was stable within ± 5 mbar. Modulation frequency was measured to be 5.35 Hz.

loop circuit was used to find the resonance of the cavities. Then a low power frequency generator was used to inject the RF signal and a Yokogawa network analyser was used to analyse the output. Surprisingly, both an amplitude and a frequency modulation was noticed. These measurements have been performed on CMA07, CMA11 and CMB07. Fig. 12 shows an amplitude modulation spectrum with peak to peak distance of 5.35 Hz. Other measurements consistently showed a modulation between 4 and 6 Hz. Frequencies of modulation seemed specific to the measured cryomodules as repeated measurements on the same cryomodules showed the exact same modulation frequencies. These modulations were not noticed during vertical cryostat measurements. This might mean that these fluctuations could be due to the final setup of the cryomodules in the LINAC. In a final beam configuration, the modulations would be compensated by the amplifiers power margin. However, the amplitude of these modulations are high enough to cause the system to hit its limits. Therefore, the origin of these microphonics will have to be investigated further and their effect mitigated.

The measured frequencies were too low to be a consequence of the RF test bench and seemed to be more consistent with vibrations of a mechanical nature. Several accelerometer measurements of vibrations have then been performed in the LINAC at different locations and nothing unusual has been noticed. Although few Hz seemed usually low also to be acoustic like oscillations, this could explain the fast fluctuations of the pressures in the LINAC.

4. Conclusion

After countless developments and installation efforts, the SPIRAL 2 superconducting LINAC was finally cooled down for the first time in

October 2017. It was also the first time that all cryogenic systems were tested in a configuration as close as possible to the operation configuration. Cooling down such a system with diphasic helium and with no by-pass at the end of the LINAC proved to be a challenge. However, trials showed that it is possible to find an optimised cool down strategy with minimal effects on the performances of the cavities. Pressure and level regulations with simple yet optimised PI controllers were successful for time laps as long as 12 h. Pseudo-periodic instabilities on all cavities as well as possible hidden fast fluctuations will have to be investigated further. Another limitation of this run was that all cavities were characterised in a so called static configuration. It means that no real nor simulated RF heat load could be taken into account. Low power RF measurements of the cavities showed resonances at their design values. However, amplitude and frequency modulations of the transmitted power were detected and measured. They indicated important microphonics that could be linked to the cryogenic system and explain some of the unexplained pressure fluctuations that have been observed. Investigations of the measured microphonics were continued with a dedicated bench that allows the synchronous measurements of RF and pressure modulations. This cool down was also important to gather precious data for precise thermodynamic modelling of the SPIRAL 2 LINAC [13]. The next cool down will hopefully benefit of a model based pressure and liquid helium level control as well as optimised input cool down parameters. It will also benefit of a dedicated bench for synchronous measurements of RF and piezoelectrically measured pressure fluctuations.

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

References

- [1] Gales S. *J Phys: Conf Ser* 2011;267: 012009.
- [2] Lewitowicz M. *Tours Symp Nucl Phys VI* 2006;891:91.
- [3] Bertrand P, Moscatello M. In: 18th international conference on cyclotrons and their applications-cyclotrons 2007; 2007. p. 39–41.
- [4] Petit E. *IPAC2011*; 2011.
- [5] Ferdinand R, Bertrand P. *LINAC2010*; 2010.
- [6] Junquera T, Bertrand P, Ferdinand R. *Proc LINAC 2006*;2006.
- [7] Ferdinand R, Junquera T, Bosland P, Bernaudin P, Saugnac H, Olry G et al. In: *Proceedings of LINAC08*, Victoria, BC, Canada ; 2008.
- [8] Bernaudin P-E, Ferdinand R, Bosland P, Olry G, Martínez YG. In: *IPAC 13-the 4th international particle accelerator conference (joint accelerator conferences website)*; 2013. p. 3752–4.
- [9] Ferdinand R, Bernaudin PE, Di Giacomo M. *MOIA02*; 2013.
- [10] Ghribi A, Bernaudin PE, Vassal A, Bonne F. *Cryogenics* 2017;85:44.
- [11] Ghribi A, Bernaudin P, Berthe C, Duteil G, Ferdinand R, Lescalié G, et al. *Poster*; 2017b.
- [12] Knobloch J. *AIP Conf Proc* 2003;671:133.
- [13] Vassal A, Bonne F, Ghribi A, Millet F, Bonnay P, Bernaudin P-E. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng* 2019;502:012111. doi: 10.1088/1757-899x/502/1/012111.

Chapitre 4

Perspectives

Résumé

Cette partie n'est pas une conclusion. Il s'agit plutôt d'une mise en perspective de plusieurs activités de recherche sur lesquelles mon intérêt se porte. Certaines sont une suite logique de celles commencées. D'autres peuvent sembler en rupture. Ce n'est pourtant là qu'une apparence car les méthodes et les approches restent similaires.

1 QUBIC, l'aventure continue

Le chapitre QUBIC (voir chapitre 1, section 3.1) n'est pas tout à fait clos. La partie la plus intéressante commence même maintenant. Le déploiement de l'instrument en Argentine est une vraie avancée pour toute la communauté française et européenne. Il reste cependant plusieurs défis. L'organisation des équipes pour la mise en opération et les premières observations souffriront sans doute des complications que le contexte sanitaire mondial actuel implique. Cela aura des conséquences sur les échanges internationaux notamment ceux des jeunes chercheurs. Il faudra pourtant maintenir les forces vives à leur niveau optimal pour réussir ce défi. La gestion au jour le jour des problèmes qui apparaissent toujours au moment de la mise en service ne sera pas non plus chose aisée. L'autre problématique est de réussir à fournir, à qualifier et à installer dans les temps et avec les performances attendues les 3 autres quarts de plan focal. J'espère donc continuer de faire partie, même à temps réduit, de cette équipe qui permettra la première lumière de QUBIC.

2 Micro-composants pour la cosmologie

Les efforts enclenchés par les collaborations BSD, DCMB et autres (voir chapitre 2, section 6) ont porté leurs fruits. Il reste néanmoins beaucoup à faire, notamment concernant le couplage optique et le couplage au détecteur. Le paysage des détecteurs technologiquement mûres est cependant quelque peu différent aujourd'hui d'il y a à peine une dizaine d'années. Les KIDs viennent par exemple ajouter leur pierre à l'édifice. Ils amènent naturellement avec eux leurs lots de questionnements et de développements possibles, comme ceux qui concernent les effets de proximité. Lorsque nous nous approchons de la température critique (comme c'est le cas des TES) ou de l'énergie de gap (comme c'est le cas pour les KIDs), nous venons chatouiller les limites de la théorie BCS et peut-être même questionner ce qui sépare les supraconducteurs de type 1 et de type 2. Les composants supraconducteurs agiles et les utilisations des incrustations de type CRLH ne sont pas en reste. La proposition de spectromètre à inductance cinétique, décrite dans la section 5.0.3 du chapitre 2, a récemment vu le jour (dans sa version simplifiée) à Caltech [Far+20]. La maturité de ce genre de spectromètre est pourtant bien loin d'une utilisation sur le terrain. L'institut Néel et le laboratoire APC semblent tous deux très bien équipés et adaptés pour initier ce développement en France et le mener jusqu'à sa maturité. Celle-ci pourra alors s'exprimer dans un instrument d'observation comme CONCERTO [Ade+20] ou en laboratoire pour la caractérisation spectrale de composants.

3 SPIRAL2

3.1 Vers une meilleure compréhension de la thermo-acoustique cryogénique

Comme vu précédemment (chapitre 3, section 3.6), la thermo-acoustique cryogénique n'est pas nouvelle. [SPIRAL2](#) n'est pas non plus le premier accélérateur supraconducteur à y faire face. Il est cependant l'un des rares à avoir mis aussi peu de temps et de ressources à résoudre le problème. Pour autant, l'affaire n'est pas derrière nous. La dynamique de ces phénomènes demeure incomprise dans nos conditions d'opération dans lesquelles les différents éléments cryogéniques sont fortement couplés. Mieux la comprendre permettrait non seulement de venir plus efficacement à bout de ces oscillations mais aussi de les prévoir et d'optimiser l'opération en conséquence. Ceci aurait pour effet un impact minimal sur la machine et un temps d'arrêt ou d'indisponibilité du faisceau fortement réduit. La compréhension de l'ensemble des phénomènes qui agissent sur le système est aussi importante pour avoir une opération intelligente alimentée par des modèles physiques. Si la pré-étude de modélisation en cours dans le cadre de [NGTACryo](#) donne de bons résultats, ces efforts devraient être poursuivis dans le cadre d'une thèse de doctorat.

3.2 Développements pour un contrôle et un diagnostic intelligent

Ces développements s'inscrivent dans le cadre de ceux décrits dans la section 3.5 du chapitre 3. Que l'on ait un instrument astrophysique, une expérience de laboratoire ou un accélérateur, on cherche souvent à construire un modèle de notre instrument. Le comprendre permet de mieux se jouer de tous les phénomènes qui se propagent dans l'instrument. Pour un instrument astrophysique, il s'agit de mitiger et de mieux se jouer des effets systématiques. Pour un accélérateur, ce n'est pas bien différent. Il y a malgré tout une nuance de taille : la dimension du système. De ce fait résulte la séparation des différentes disciplines et sous-systèmes. Le premier frein qui se dresse est donc de réussir à réunir autour d'une même table et d'un même projet trans-disciplinaire des spécialités qui se voient souvent comme indépendantes. La division accélérateur du [GANIL](#) a fait le premier pas et m'a confié la gestion de cette réflexion commune. Le projet EuroLabs (voir chapitre 3, section 2.7) tombe à point nommé et fournit un contexte idéal pour ouvrir cette réflexion à l'extérieur des murs du [GANIL](#). Nous avons certes beaucoup à apprendre de ceux qui ont déjà parcouru ce chemin, autant dirais-je qu'à transmettre ce sur quoi nous pourrions être plus avancés.

3.3 Expériences en accélérateur pour l'astrophysique nucléaire et la physique des particules

La présence d'un petit groupe d'astrophysiciens nucléaires au [GANIL](#) et ma participation régulière à leurs discussions ont permis de nourrir cette volonté de participer à des expériences auxquelles je n'avais pas nécessairement été confronté jusqu'à présent. L'une d'elles, proposée par Beyhan Bastin ([NEWJEDI](#)), s'attaque à un des nouveaux défis expérimentaux. Elle pourrait permettre d'étudier expérimentalement l'hypothétique boson noir dans des expériences nucléaires, donc de basse énergie. Le boson recherché, produit d'une première réaction nucléaire, émettrait à son tour une paire d'électron-positron présentant une anomalie de distribution angulaire. Cette anomalie avait déjà été observée pour des noyaux de ${}^8\text{Be}$. L'expérience proposée réduit la complexité en utilisant des noyaux à la structure plus simple. Elle prend également avantage des faisceaux intenses et pulsés qui seront produits par l'accélérateur [SPIRAL2](#). Un des problèmes qui apparaît ici est la nécessité d'avoir une maîtrise parfaite des effets systématiques. De la manière avec laquelle nous modulons le signal pour la détection bolométrique, le faisceau d'ions, lorsqu'il est pulsé, peut permettre de significativement réduire le bruit de fond. Le problème qui se pose dans ce cas est le même que celui qui se pose dans l'utilisation d'algorithmes d'apprentissage profond pour le diagnostic et le contrôle avancé. Il concerne plus spécifiquement la synchronisation d'horloge. Evidemment, l'exploitation de la synchronisation d'horloge pour la réduction des effets systématiques doit être couplée à un modèle physique de l'expérience. L'intensité des faisceaux de protons et de deutons qui devraient être produits par [SPIRAL2](#) dès l'automne 2021 devrait permettre de réaliser les premières expériences de [NEWJEDI](#) dans [NFS](#). Il s'agit là d'une opportunité sans pareil de mettre en application les développements dont [SPIRAL2](#) pourrait bénéficier dans le cadre de projets comme EuroLabs.

Une autre expérience, proposée cette fois-ci par François De Oliveira, utiliserait des micro-calorimètres X pour la mesure de l'effet de l'écrantage des électrons sur la durée de vie de noyaux radio-actifs [[Loi+09](#)]. Il s'agit d'une potentielle connexion entre les développements instrumentaux effectués dans le cadre d'expériences de physique nucléaire et ceux pour l'observation spatiale de phénomènes de haute énergie. Il y a ici un possible lien entre le [GANIL](#) et l'[APC](#) dans le cadre des développements effectués pour la mission Athena.

Troisième partie

Annexes

1 PolarBear Process Sheet

PolarBear Focal Plane Fabrication Process

Device name :

Date	Steps	Layer	Process	Machine	Recipe	Notes
sub						
<input type="checkbox"/>	1	sub			check out primegrade wafers from microlab office. Log everything before opening.	
<input type="checkbox"/>	2	sub	pre furnace cleaning	msink6	1. 0:10:00 Piranha - 2. QDR - 3. 0:01:00 HF - 4. QDR - SRD	
snr						
<input type="checkbox"/>	3	snr	wet oxydation	tystar3	300nm SiO2 0:32:00 at 850°C	
<input type="checkbox"/>	4	snr	LPCVD	tystar17	750nm LSN	
<input type="checkbox"/>	5	snr	thickness meas.	nanospec	standard 10 points measurement check uniformity and thickness	
<input type="checkbox"/>	6	snr	inspection	eye	check particules with bright inspection light	
<input type="checkbox"/>	7	snr	Stress meas.	flexus	LSN film stress	destructive process - to be done on a dummy of the same process wafer bench
ant						
<input type="checkbox"/>	8	ant	cleaning	msink8	1. 0:10:00 Piranha - 2. QDR - 3. 0:01:00 4. QDR - 5. SRD	
<input type="checkbox"/>	9	ant	sputtering	gartek	300nm Nb deposition	
soc						
<input type="checkbox"/>	10	soc	cleaning	msink1	1. 0:30:00 SVC-14 2. QDR 3. SRD	
<input type="checkbox"/>	11	soc	PECVD	oxford2	1. [Kam's raise T-350] raise T to 350°C 2. [Kam's 200nm 350C oxide w/predep purge] run 200nm predeposition to coat the chuck [Kam's 300nm 350°C oxide w/o predep purge] Run dummy before process wafer and adjust the deposition time after	
<input type="checkbox"/>	12	soc	thickness meas.	nanospec	standard 10 points measurement check uniformity and thickness use program [SiO2 on Al]	
imc						
<input type="checkbox"/>	13	imc	cleaning	msink1	1. 0:30:00 SVC-14 2. QDR 3. SRD	
<input type="checkbox"/>	14	imc	sputtering	gartek	300nm Nb deposition	add recipe
<input type="checkbox"/>	15	imc	HMDS	primeoven	prog#0 If it fails in the middle before HMDS, do program #2.	
<input type="checkbox"/>	16	imc	coating	svgcoat2	program (1,1) 1um i-line and 60s softbake at 90°C	
<input type="checkbox"/>	17	imc	lithography	gcaws2	EXEC DU2:HEX9VALIMCC[ALiv1-1] 0.6s	
<input type="checkbox"/>	18	imc	development	svgdev2	Then half-time i-line dev without PEB: program (3,7)	
<input type="checkbox"/>	19	imc	lithography	gcaws2	EXEC DU2:HEX9IROT[IMC9-0].UNROT [IMC9-0].DCT [IMC9-0].MWT [IMC9-0] 0.6s with shutters to BR, FL, BL, FR EXEC DU2:HEX9ALLP[HEX_LCR].QBDC [QB].QBDC[QB].CB[CB] 0.8s	
<input type="checkbox"/>	20	imc	development	svgdev2		add recipe
<input type="checkbox"/>	21	imc	inspection	y2scope	Check that the pattern is 4um wide at narrowest	
<input type="checkbox"/>	22	imc	descum	technic-c	1. load wafer and pump for 0:10:00 2. 50sccm O2 - 50W - 0:01:00	
<input type="checkbox"/>	23	imc	RIE	semi	Nb etch with end point detection (EPD)	add recipe
<input type="checkbox"/>	24	imc	inspection	eye	should see oxide color	
<input type="checkbox"/>	25	imc	inspection	iv	dc test	
<input type="checkbox"/>	26	imc	thickness meas.	nanospec	standard 10 points measurement check uniformity and thickness	
<input type="checkbox"/>	27	imc	cleaning	msink1	1. 0:30:00 PRS3000 - 2. QDR - 3. SRD	
<input type="checkbox"/>	28	imc	inspection	y2scope	inspect to see if there is any photoresist left	
soc						

1/5

PolarBear Focal Plane Fabrication Process

Device name :

	Date	Steps	Layer	Process	Machine	Recipe	Notes
<input type="checkbox"/>		29	soc	HMDS	primeoven	prog#0 If it fails in the middle before HMDS, do program #2.	
		30	soc	coating	svgcoat2	2um g-line prog(4,3)	
<input type="checkbox"/>		31	soc	lithography	gcaws2	1. EXEC DU2:HEX9\LNSSOC[ALCLEAR] --- 0.6s 2. EXEC DU2:BORDER8\FLAT[B0-SOV-4],B60 [B60-SOV-4],B120[B120-SOV5-4] --- 0.8s 3. EXEC DU2:HEX9\ROT[SOC9-0,(shutter)] [SOC9-0,(shutter)],UNROT [SOC9-0,(shutter)],DARK [SOC9-0,(shutter)],DCT [SOC9-0,(shutter)],MWT [SOC9-0,(shutter)] --- 0.5s	
<input type="checkbox"/>		32	soc	development	svgdev2	PEB (9,1) ; DEV (2,9)	
		33	soc	descum	technic-c	1. load wafer and pump for 0:10:00 2. 50sccm O2 - 50W - 0:01:00	
<input type="checkbox"/>		34	soc	RIE	semi	SiO2 etch	add recipe
<input type="checkbox"/>		35	soc	inspection	eye	check color of Nb	
<input type="checkbox"/>		36	soc	inspection	iv	electrical inspection of the etched area	
<input type="checkbox"/>		37	soc	cleaning	msink1	1. 0:30:00 PRS3000 - 2. QDR - 3. SRD	
<input type="checkbox"/>		38	soc	inspection	eye	inspect to see if there is any photoresist left	
ant							
<input type="checkbox"/>		39	ant	HMDS	primeoven	prog#0 If it fails in the middle before HMDS, do program #2.	
<input type="checkbox"/>		40	ant	coating	svgcoat2	program (1,1) 1um i-line and 60s softbake at 90°C	
<input type="checkbox"/>		41	ant	lithography	gcaws2	1. EXEC DU2:HEX9\ROT[ANTv9-0,(Shutter)],UNROT,DARK.DCT.MWT Change reticle between passes : yes 0.6s exposure 2. EXEC DU2:HEX9\FLAT[B0ANTv5-4],B60[B60ANTv5-4],B120[B12-ANTv5-4]	add details
<input type="checkbox"/>		42	ant	development	svgdev2	prog (1,1)	
<input type="checkbox"/>		43	ant	descum	technic-c	1. load wafer and pump for 0:10:00 2. 50sccm O2 - 50W - 0:01:00	
<input type="checkbox"/>		44	ant	RIE	semi	300nm etch of the slot antenna and the hex borders	
<input type="checkbox"/>		45	ant	inspection	nanospec	check that the nitride is the thickness it was before deposition of Nb. It should not be less than 300Å thinner.	
<input type="checkbox"/>		46	ant	photoresist cleaning	msink1	1. 0:30:00 PRS3000 - 2. QDR - 3. SRD	
<input type="checkbox"/>		47	ant	inspection	y2scope	inspect to see if there is any photoresist left	
sov							
<input type="checkbox"/>		45	sov	PECVD	oxford2	530nm SiO2 deposition Extra thickness because some will be etched Recipe :	
<input type="checkbox"/>		46	sov	thickness meas.	nanospec	standard 10 points measurement check uniformity and thickness	
<input type="checkbox"/>		47	sov	HMDS	primeoven	prog#0 If it fails in the middle before HMDS, do program #2.	
<input type="checkbox"/>		48	sov	coating	svgcoat2	4um g-line prog (4,3)x2	
<input type="checkbox"/>		49	sov	lithography	gcaws2	1. EXEC DU2:BORDER8\FLAT[B0-SOVv5-4],B60 [B60-SOVv5-4],B120 [B120-SOVv5-4] 1.0s expos 2. 3. EXEC DU2:HEX9\ROT[SOV9-0,BR],UNROT[SOV9-0,FL],DARK[SOV9-0,FL F25+8.2], DCT[SOV9-0,BL],FR[SOV9-0,FR] 0.8s expos	

2/5

PolarBear Focal Plane Fabrication Process

Device name :

	Date	Steps	Layer	Process	Machine	Recipe	Notes
<input type="checkbox"/>		50	sov	development	svgdev2		add recipe
<input type="checkbox"/>		51	sov	descum	technic-c	1. load wafer and pump for 0:10:00 2. 50sccm O2 - 50W - 0:01:00	
<input type="checkbox"/>		52	sov	RIE	semi		add recipe
<input type="checkbox"/>		53	sov	inspection	iv	check conductivity of Nb	
<input type="checkbox"/>		54	sov	cleaning	msink1	1. 0:30:00 PRS3000 - 2. QDR - 3. SRD	
<input type="checkbox"/>		55	sov	inspection	y2scope	inspect to see if there is any photoresist left	
mic							
<input type="checkbox"/>		56	mic	cleaning	msink1	1. 0:30:00 SVC-14 2. QDR 3. SRD	
<input type="checkbox"/>		57	mic	sputtering	gartek	600nm Nb deposition	add recipe
<input type="checkbox"/>		58	mic	HMDS	primeoven	prog#0 If it fails in the middle before HMDS, do program #2.	
<input type="checkbox"/>		59	mic	coating	svgcoat2	program (1,1) 1um i-line and 60s softbake at 90°C	
<input type="checkbox"/>		60	mic	lithography	gcaws2	DU2:HEX9 ROT[MIC9-5,BR],UNROT [MIC9-5,FL],DARK [MIC9-5,FL F25+6],DCT [MIC9-5,BL],MWT [MIC9-5,FR] 0.6s expos.	
<input type="checkbox"/>		61	mic	development	svgdev2	PEB (8,1) ; DEV (2,9)	
<input type="checkbox"/>		62	mic	lithography	ksaligner	wiring 13s exposure in soft contact	
<input type="checkbox"/>		63	mic	development	svgdev2	standard i-line develop with PEB	
<input type="checkbox"/>		64	mic	descum	technic-c	1. load wafer and pump for 0:10:00 2. 50sccm O2 - 50W - 0:01:00	
<input type="checkbox"/>		65	mic	RIE	semi	Nb etch with end point detection (EPD)	
<input type="checkbox"/>		66	mic	inspection	iv	dc check to see if Nb is etched all the way	
<input type="checkbox"/>		67	mic	thickness meas.	nanospec	standard 10 points measurement check uniformity and thickness	
<input type="checkbox"/>		68	mic	cleaning	msink1	1. 0:30:00 PRS3000 - 2. QDR - 3. SRD	
<input type="checkbox"/>		69	mic	inspection	y2scope	inspect to see if there is any photoresist left	
<input type="checkbox"/>		70	mic	profilometry	asiq	check height of microstrip lines	
tts							
<input type="checkbox"/>		71	tts	cleaning	msink1	1. 0:30:00 SVC-14 2. QDR 3. SRD	
<input type="checkbox"/>		72	tts	sputter etch	gartek	Nb oxide removal	add recipe
<input type="checkbox"/>		73	tts	sputtering	cpa	AlTi deposition	add recipe
<input type="checkbox"/>		74	tts	HMDS	primeoven	prog#0 If it fails in the middle before HMDS, do program #2.	
<input type="checkbox"/>		75	tts	coating	svgcoat2	2um g-line prog (4,3)	
<input type="checkbox"/>		76	tts	lithography	gcaws2	1. EXEC DU2:HEX6TTS ROT[HEX_TCLc6-1,L12.5 -0.5,B12.5+9],UNROT[HEX_TCLc6-1,L12. 4+4.5,R12.5+1 2. 0.6Ss exposure 3. 4. EXEC DU2:HEX9 ALLP[HEX_TCLv6-1],QBDC[H EX_QBv6-1],QBMW [HEX_QBv6-1],CB [HEX_CBv6-1],ROT[TTS9-3BR,BR],UNR OT [TTS9-3BR,FL],DARK [TTS9-3BR,FL F25+6],DCT [TTS9-3BR,BL], MWT[TTS9-3BR,FR] 5. 0.8s exposure	
<input type="checkbox"/>		77	tts	development	svgdev2	PEB (8,1) ; DEV (2,7)	
<input type="checkbox"/>		78	tts	descum	technic-c	1. load wafer and pump for 0:10:00 2. 50sccm O2 - 50W - 0:01:00	
<input type="checkbox"/>		79	tts	RIE	ptherm	Ti etch 50sccm SF6, 50sccm O2, 100W, for 0:04:00 diffuse purple plasma	
<input type="checkbox"/>		80	tts	wet etch	msink18	Al wet etchant for 0:02:30 at 50°C Acetone for 0:05:00 to remove resist	
<input type="checkbox"/>		81	tts	inspection	keyence	check patterns	
<input type="checkbox"/>		82	tts	inspection	iv	check one or two electrical connections to the TES	
ats							

3/5

PolarBear Focal Plane Fabrication Process

Device name :

	Date	Steps	Layer	Process	Machine	Recipe	Notes
<input type="checkbox"/>		83	ats	HMDS	primeoven	prog#0 If it fails in the middle before HMDS, do program #2.	
<input type="checkbox"/>		84	ats	coating	svgcoat2	2um g-line prog (4,3)	
<input type="checkbox"/>		85	ats	lithography	gcaws2	EXEC DU2:HEX9\ROT[ATS9-3,BR],UNROT [ATS9-3,FL],DARK [ATS9-3,FL F25+6],DCT [ATS9-3,BL],MWT [ATS9-3,FR] 0.6s exposure	is 06s exposure correct?
<input type="checkbox"/>		86	ats	development	svgdev2	PEB (9,1) ; DEV (2,9)	
<input type="checkbox"/>		87	ats	descum	technic-c	1. load wafer and pump for 0:10:00 2. 50sccm O2 - 50W - 0:01:00	
<input type="checkbox"/>		88	ats	RIE	ptherm	Ti etch 50sccm SF6, 50sccm O2, 100W, for 0:04:00 diffuse purple plasma	
<input type="checkbox"/>		89	ats	inspection	y2scope	check patterns	
<input type="checkbox"/>		90	ats	cleaning	msink1	acetone resist remove for 0:30:00	
gld							
<input type="checkbox"/>		91	gld	HMDS	primeoven	prog#0 If it fails in the middle before HMDS, do program #2.	
<input type="checkbox"/>		92	gld	coating	svgcoat2	2um g-line prog(4,3) + i-line	
<input type="checkbox"/>		93	gld	lithography	gcaws2	EXEC DU2:HEX9\ROT[GLD9-4,BR],UNROT [GLD9-4,FL],DARK [GLD9-4,FL F25+6],DCT [GLD9-4,BL],MWT [GLD9-4,FR] 0.5s exposure	
<input type="checkbox"/>		94	gld	development	svgdev2	no PEB and half time i-line develop	add details
<input type="checkbox"/>		95	gld	inspection	keyence	check patterns to have 2um photoresist undercut	
<input type="checkbox"/>		96	gld	descum	technic-c	1. load wafer and pump for 0:10:00 2. 50sccm O2 - 50W - 0:01:00	
<input type="checkbox"/>		97	gld	E-beam deposition	dw	1.3um Au Ebeam deposition with 25Å Ti adhesion layer	
<input type="checkbox"/>		98	gld	lift off	msink16	1. 12:00:00 acetone 2. rinse 3. blow dry	
<input type="checkbox"/>		99	gld	inspection	keyence	check patterns	
snr							
<input type="checkbox"/>		100	snr2	HMDS	primeoven	prog#0 If it fails in the middle before HMDS, do program #2.	
<input type="checkbox"/>		101	snr2	coating	svgcoat2	4um g-line prog (4,3)x2	
<input type="checkbox"/>		102	snr2	lithography	gcaws2	1. EXEC DU2:BORDER8\FLAT[B0-SNRv5-4],B60 [B60-SNRv5-4],B120 [B120-SNRv5-4] 2. 1s exposure 3. 4. EXEC DU2:HEX9\ROT[SNR9-4,BR],UNROT[SNR9-4,FL],DARK[SNR9-4,FL F25+8.2], DCT[SNR9-4,BL],FR[SNRTS9-3,FR] 5. 1s exposure	is 1s exposure for border also?
<input type="checkbox"/>		103	snr2	development	svgdev2	PEB (9,1) ; DEV (2,9)	
<input type="checkbox"/>		104	snr2	inspection	keyence	check patterns	
<input type="checkbox"/>		105	snr2	RIE	ptherm	LSN etch 50sccm CF4, 100W for 0:05:24 Time etch with measured etch rate to overetch by 10% the thickest nitride	
<input type="checkbox"/>		106	snr2	inspection	keyence	check that nitride etch is finished : center pixel slots gray and smooth while edges (test pixels) show roughness in slots.	
rel							
<input type="checkbox"/>		107	rel	dice	wafersaw	Dice hex wafer aligning cut with edge of ground plane. Use manual mode. After the dice, recover Hex and 6 edge dies containing witness pixels.	

4/5

PolarBear Focal Plane Fabrication Process

Device name :

Date	Steps	Layer	Process	Machine	Recipe	Notes	
<input type="checkbox"/>		107	rel	release	xetch	1. test the paramters doing a quick empty test etch with speical mode 1 2. test etch on dies first : load/unload, pump, maintenance menu, pump 0:05:00, (30-40cycles, 13s, 3.5Torr) 3. etch hex : load/unload, pump, maintenance menu, pump 0:05:00, (80-100cycles, 13s, 3.5Torr)	
<input type="checkbox"/>		108	rel	inspection	keyence	check undercut > 45um. repeat release and inspection untill the right number of cycles is found. When the release is successful, a shadow can be seen around the bolometer island and can be measured	
<input type="checkbox"/>		109	rel	RIE	ptherm	photoresist ash put ring clean for 0:30:00 with 100sccm O2, 100W load wafer and pump ash : 90sccm O2, 100W, for 0:08:00 cool for 0:05:00 ash : 90sccm O2, 100W, for 0:08:00	
<input type="checkbox"/>		110	rel	inspection	iv	check electrical connections to the TES	

2 EuroLabs

Title

Advanced RF and cryogenics control and fault detection for superconducting accelerators exploiting machine learning algorithms

Authors and affiliations

Daniel Berkowitz Zamora⁽⁵⁾ ; Pierre-Emmanuel Bernaudin^(1,3) ; Patrick Bonnay⁽³⁾ ; Julien Branlard⁽⁴⁾ ; Marco Di Giacomo^(1,3) ; Frederic Doucet⁽⁵⁾ ; Patxi Duthil⁽²⁾ ; Annika Eichler⁽⁴⁾ ; Robin Ferdinand^(1,3) ; Adnan Ghribi^(1,2) ; Mário Grosso Xavier⁽⁵⁾ ; Christophe Haquin^(1,3) ; Victor Martínez Illamola⁽⁵⁾ ; François Millet⁽³⁾ ; Franck Pompon⁽⁵⁾ ; Jean-Pierre Thermeau⁽²⁾ ; Dirk Vandeplassche⁽⁵⁾

¹ *Grand Accélérateur National d'Ions Lourds (GANIL)*

² *Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS)*

³ *Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives (CEA)*

⁴ *Deutsches Elektronen-Synchrotron (DESY)*

⁵ *Studiecentrum voor Kernenergie (SCK CEN)*

General description

Superconducting accelerators such as ISOLDE, PIAVE, FAIR, ESS, MYRRHA, SPIRAL2, FLASH or European XFEL face specific challenges ranging from high dynamics of thermal loads, drastic level and pressure control of superconducting cavities, long distribution lines, vacuum pressure degradation, field emissions, cavities quenches and detuning among other ponderomotive effects. All these effects are completely different and might seem uncorrelated at first sight but they can all be linked either to the process-control or to one or several related sub-systems by some elaborated relations. Moreover, these correlations may depend on the beam parameters. When tackling these challenges from the Machine Learning and Artificial Intelligence perspective, the usual approach uses a model of the accelerator that relies on particle tracking codes. While this is a promising approach, it suffers from a high complexity and requires important computing resources. In this project, we propose a different yet complementary approach. It relies on utilities and sub-system level modelling, control and diagnostics. Two main sub-systems are considered: Cryogenics and Radio-Frequency. Cryogenics for superconducting accelerators has been, for some time now, mistakenly considered as a simple process utility. Yet this sub-system proved to be more complex than imagined with control parameters that heavily depend on the RF system control and, to a lower extent, on the beam configuration. Model-based control allowed to optimize the cryogenic operation of SPIRAL2 while opening a new gateway into Machine Learning approaches for dynamic operation and intelligent fault detection through virtual sensors [1]. However, RF and cryogenics are heavily interlaced and the models need to be completed with their RF counterpart. At European XFEL, it has been shown that combining model-based with data-based machine-learning approaches can be exploited for robust and efficient fault detection [2,3]. The resulting algorithms applied to RF signals can cope with the challenging real-time requirements and are highly modular, so that they can be extended including information from further subsystems such as cryogenics. This could become a necessity considering the continuous wave operation upgrade of the European XFEL [4].

From these two examples, it becomes clear that a combined approach making use of cryogenic and RF signals can yield promising results. This work has been initiated for MYRRHA [5]. We propose to continue this effort in the frame of SPIRAL2 and the European XFEL, which offers real life accelerator validation of developed models. The fault detection framework such as the one under development at European XFEL can be further developed for on-line operation, and extended to fault classification (allowing for adequate counter measures) using time series classification techniques.

The second essential part, which determines if such approaches of optimized control and fault detection can be applied both online and offline, is the availability and the quality of the data. In this part, we propose to develop and deploy a data pre-processing pipeline matched to the use of classification learner algorithms such as decision trees, support vector machine (SVM), logistic regression and nearest neighbors. Offline physics-informed supervised learning is also considered for hyper parameter tuning with the use of GPU facilities at the CNRS calculation platform CCIN2P3 Lyon.

The benefits of the proposed developments are many. They span from increasing beam availability and accelerator reliability to cost saving thanks to predictive maintenance and monitoring slow performances deviations such as degradation of cavity quality factors.

Challenges

Several challenges arise in this project. The first is the possibility to use multi-physics modelling to generate models that are simple enough to be integrated in Multiplatform C and python libraries for extensive use in control, optimization and features extraction algorithms. A compromise is therefore to be found here. The second challenge is to adapt existing distributed acquisition system to a single data pre-processing pipeline, using for example clock synchronization and adaptive sampling. In some cases, data from different subsystems is being hosted in two separate control systems. Building bridges across these systems is a necessary step towards combined data usage.

Original aspects

The project considers RF and Cryogenics from a different perspective for optimized control and fault detection. It also uses machine learning, data handling and analysis techniques for fields that remained decoupled for too long. We are also fully aware that this kind of development is still in its infancy in the accelerator community and that open data and open libraries will play a major role in having reliable tools widely used in the community.

Expertise

A joint R&D program between GANIL and CEA has led to the development of a thermodynamic model of the SPIRAL2 LINAC fully applicable to other superconducting accelerators [6]. The resulting models are light enough to be used in the main control systems yet precise enough to significantly optimize the cryogenic control with respect to alternative approaches. On the other hand, other R&D programs using similar modelling approaches allowed to model superconducting cryomodules from the RF side [7]. In the frame of the SPIRAL2 project, several control and data acquisition systems based on FPGA¹ and EPICS² have been developed. The participating groups also have extensive experience in designing, deploying and operating cryogenics and RF systems for accelerators. All this expertise is within the collaboration and allows us to set the ground for machine learning type approaches for accelerators cryogenics and RF.

Synergies with other research/technical groups

- Artificial intelligence for Accelerators and Ion Beam Transport/ Machine Learning techniques for predictive maintenance.
- Theory-experiment interconnections in studies of nuclear moments conducted at European facilities.
- Machine learning and AI for RIB facilities
- ERIBS: European Research Infrastructure – Beam Services
- Artificial intelligence for superconducting and RF control of free electron lasers

Synergies with other communities

Data analysis, main control systems, Radiofrequency, Cryogenics, Beam dynamics, Beam diagnostics, Vacuum.

Main category of contribution

Beams + Targets

Connection with other categories

Data acquisition + Analysis

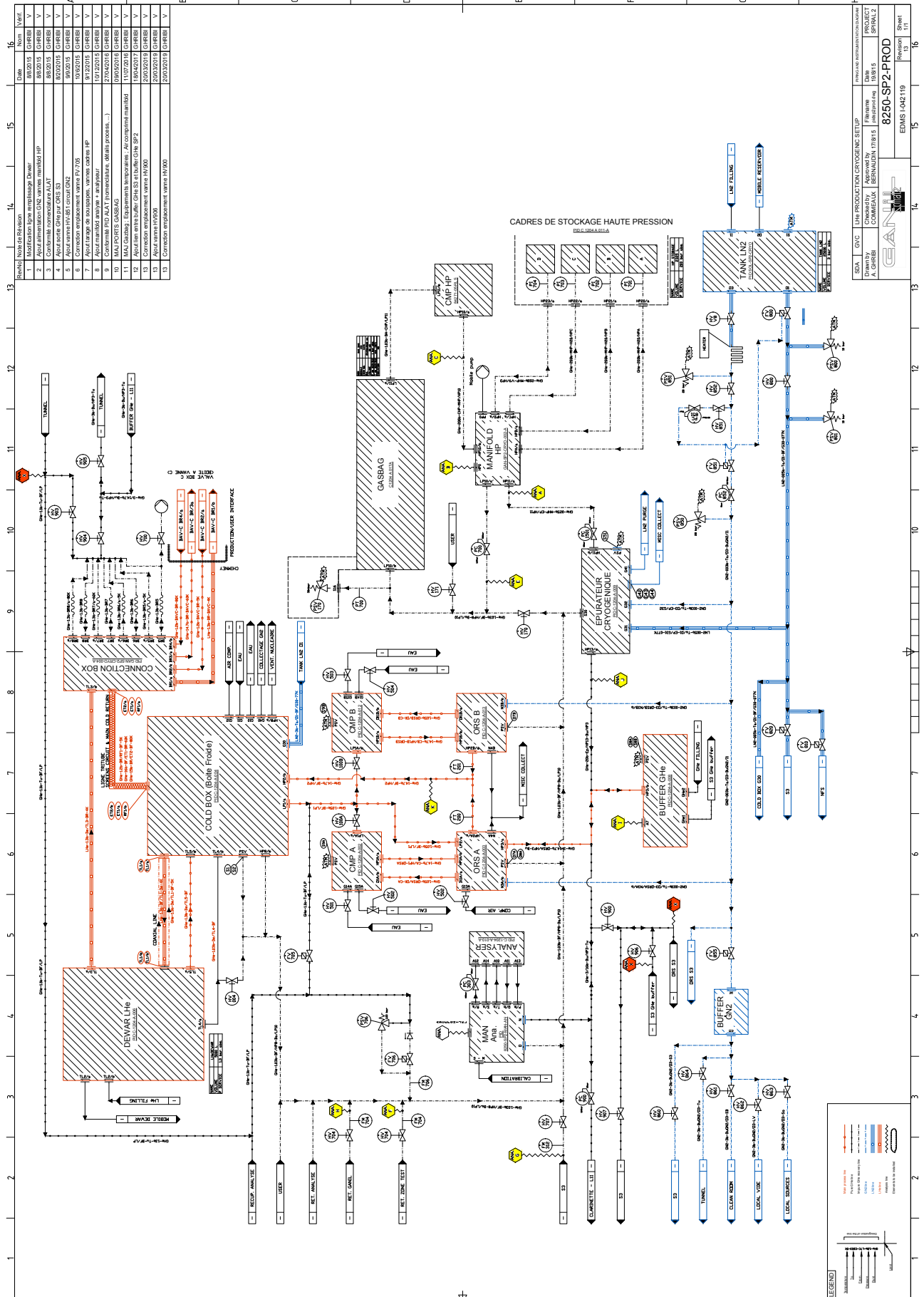
¹ Field Programmable Gate Array

² Experimental Physics and Industrial Control System

References

- [1] Vassal, A., Ghribi, A., Millet, F., Bonne, F., Bonnay, P., and Bernaudin, P.-E., “SPIRAL2 Cryomodules Models: a Gateway to Process Control and Machine Learning”, arXiv:2103.10299 [physics.acc-ph], 2021.
- [2] A. Nawaz, S. Pfeiffer, G. Lichtenberg, and P. Rostalski, “Anomaly Detection for the European XFEL using a Nonlinear Parity Space Method,” Proceedings of SafeProcess, vol. 51, no. 24, pp. 1379–1386, 2018.
- [3] A. S. Nawaz, C. Herzog, J. Grasshoff, S. Pfeiffer, G. Lichtenberg, and P. Rostalski, “Probabilistic Model-Based Fault Diagnosis for the Cavities of the European XFEL,” at — Automatisierungstechnik, 2021.
- [4] A. Bellandi, J. Branlard, A. Eichler, and S. Pfeiffer, “Integral resonance control in continuous wave superconducting particle accelerators,” in Proceedings of the 21st IFAC World Congress, 2020.
- [5] BOULY, Frédéric. MYRRHA Superconducting linac & Fault Tolerance Concept. In : 30th International Linear Accelerator Conference 2020-Virtual Conference. 2020.
- [6] VASSAL, Adrien, BERNAUDIN, Pierre-Emmanuel, BONNAY, Patrick, et al. SPIRAL2 cryogenic system thermodynamic behavior prediction through dynamic modeling. In : Proc. 29th Linear Accelerator Conference (LINAC'18), Beijing, China, 16-21 September 2018. 2018. p. 366-369.
- [7] BOULY, Frédéric. The MYRRHA Superconducting linac-Fault-tolerant design and developments. In : Technology and Components of Accelerator-Driven Systems (TCADS-4). 2019.

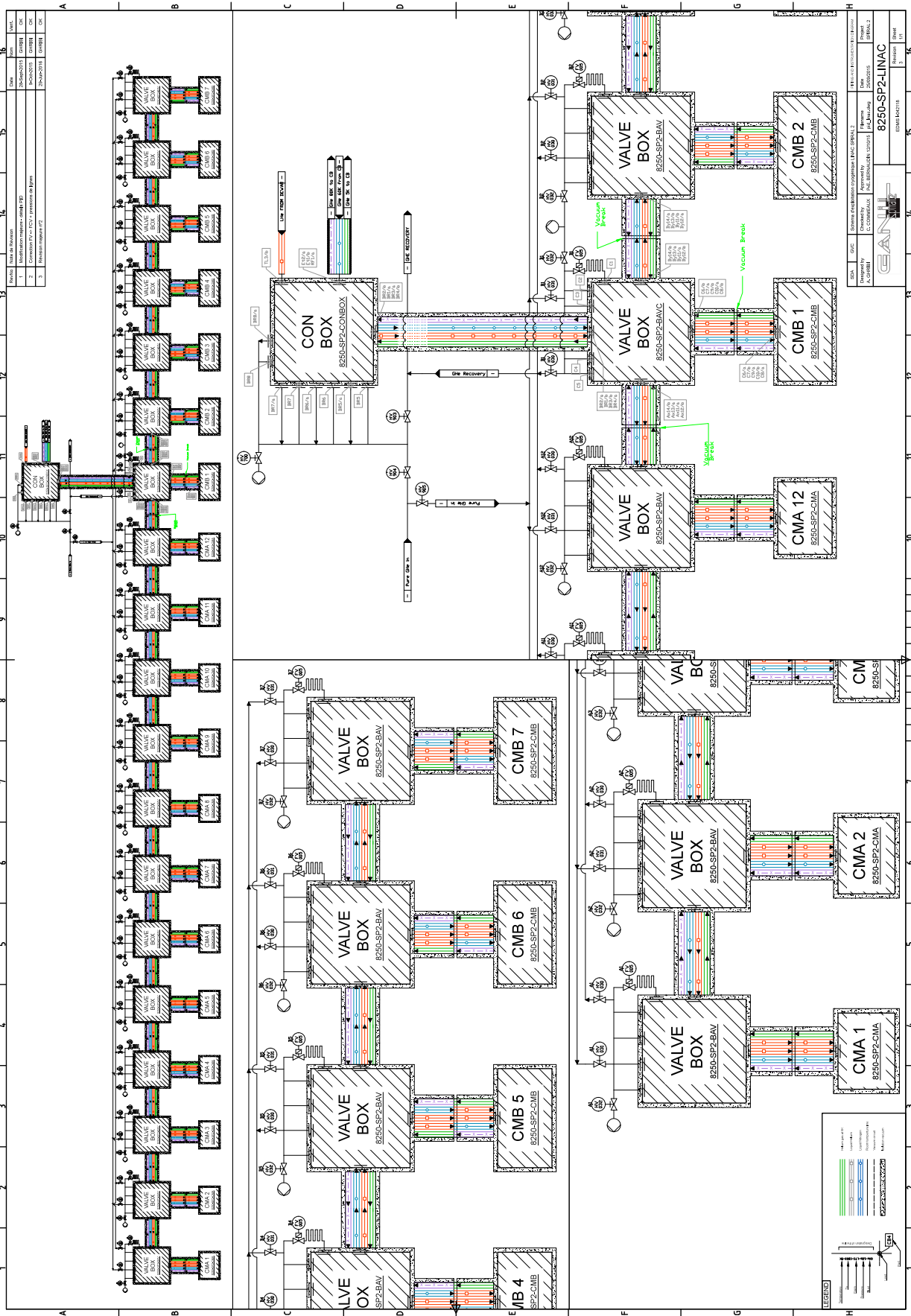
3 P&ID Production



Revisé	Notes en Révision	Date	Non	Level
1	Modification type empilage Dewar	08/2015	CHREB	V
2	Ajout instrumentation ON2, vanne manostat HP	08/2015	CHREB	V
3	Contraintes nomenclature ALAT	08/2015	CHREB	V
4	Ajout vanne 1V-381	08/2015	CHREB	V
5	Ajout vanne 1V-381	08/2015	CHREB	V
6	Ajout vanne 1V-381	08/2015	CHREB	V
7	Ajout vanne 1V-381	08/2015	CHREB	V
8	Ajout vanne 1V-381	08/2015	CHREB	V
9	Contraintes PFD ALAT (Première phase, Affinage process...)	27/02/2016	CHREB	V
10	MAJ PORTES GASBAG	03/06/2016	CHREB	V
11	MAJ Outlets: Equipements temporaires - Ac complim manifold	11/07/2016	CHREB	V
12	Acquisition vanne: ORS S1 et S2	18/02/2017	CHREB	V
13	Acquisition vanne: ORS S1 et S2	20/02/2018	CHREB	V
14	Acquisition vanne: ORS S1 et S2	20/02/2018	CHREB	V
15	Correction empilage vanne 1V300	20/02/2018	CHREB	V

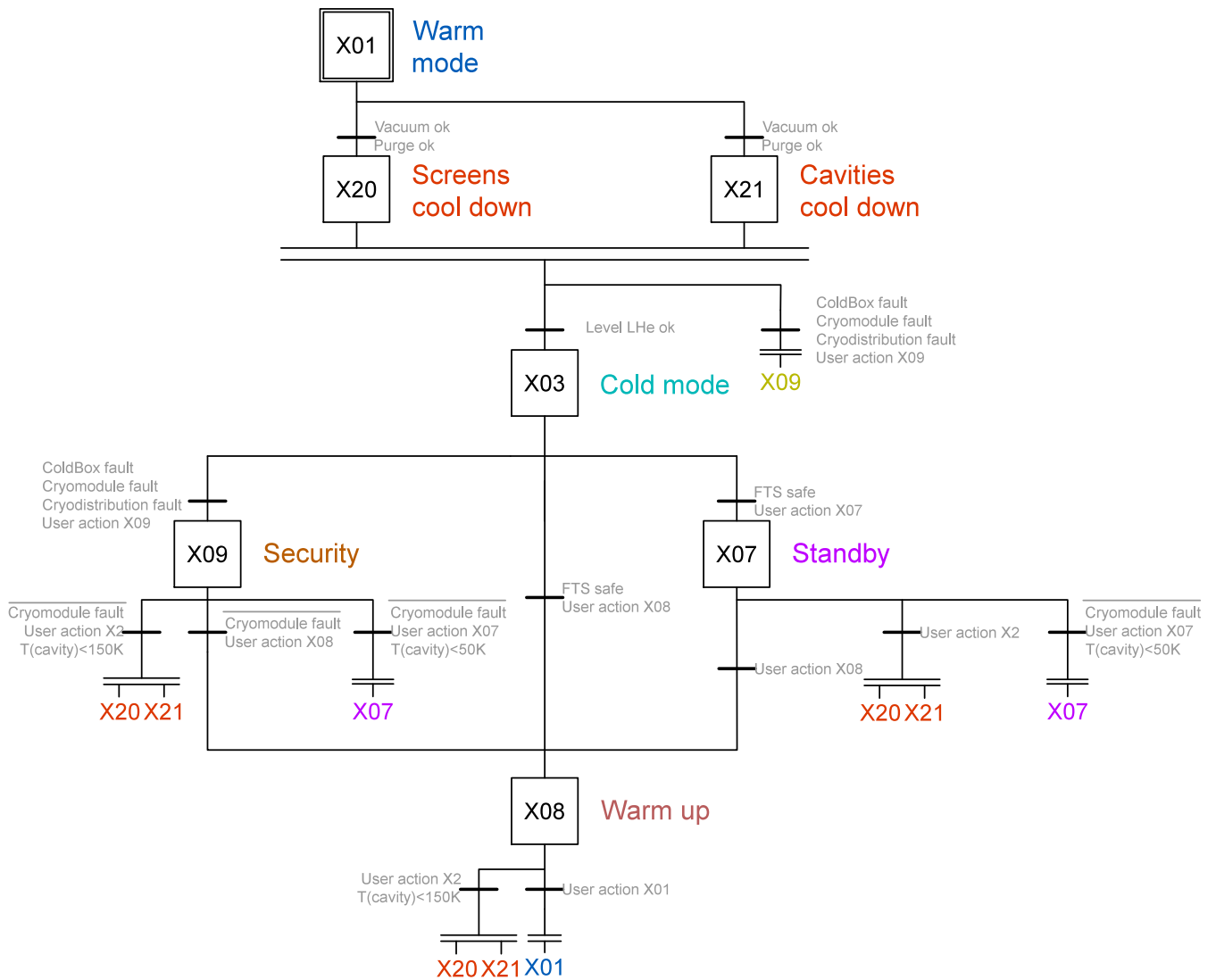
SMA	COV	LIQ PRODUCTION GYVOGENIC SETUP	Revisé par: A. GHREBI
Drawn by	Checked by	Approved by	Revision
A. GHREBI	BERNAUDIN 17/01/15	BERNAUDIN 17/01/15	08/01/15
PROJECT			SPRVAL 2
8250-SP2-PROD			Sheet
EDMS: 1042119			13 / 11

4 P&ID Exploitation



5 Grafcet cryomodule

Grafcet typique d'un cryomodule [SPIRAL2](#) montrant ses différents modes de fonctionnement.



Références

- [KSY12] Brian Keating, Meir Shimon et Amit Yadav. « Self-Calibration of CMB Polarization Experiments ». In : arXiv.org 2 (nov. 2012), p. L23. arXiv : [1211.5734v1](https://arxiv.org/abs/1211.5734v1) [astro-ph.CO].
- [De +18] P. De Bernardis et al. « QUBIC : Measuring CMB polarization from Argentina ». In : Boletín de la Asociación Argentina de Astronomía La Plata Argentina 60 (août 2018), p. 107-114.
- [WMD91] D. F. Williams, R. B. Marks et A. Davidson. « Comparison of On-Wafer Calibrations ». In : 38th ARFTG Conference Digest. T. 20. 1991, p. 68-81. doi : [10.1109/ARFTG.1991.324040](https://doi.org/10.1109/ARFTG.1991.324040).
- [GR08] C. J. Galbraith et G. M. Rebeiz. « Higher Order Cochlea-Like Channelizing Filters ». In : IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques 56.7 (2008), p. 1675-1683. doi : [10.1109/TMTT.2008.925574](https://doi.org/10.1109/TMTT.2008.925574).
- [SY07] J. Stenarson et K. Yhland. « Residual error models for the SOLT and SOLR VNA calibration algorithms ». In : 2007 69th ARFTG Conference. 2007, p. 1-7. doi : [10.1109/ARFTG.2007.5456330](https://doi.org/10.1109/ARFTG.2007.5456330).
- [Ada+20] S Adachi et al. « A measurement of the CMB E-mode angular power spectrum at subdegree scales from 670 square degrees of POLARBEAR data ». In : The Astrophysical Journal 904.1 (2020), p. 65.
- [Ade+14a] P A R Ade et al. « Detection of B-Mode Polarization at Degree Angular Scales by BICEP2 ». In : Physical Review Letters 112.24 (juin 2014), p. 241101-25.
- [Ade+14b] P A R Ade et al. « BICEP2. II. Experiment and three-year Data Set ». In : The Astrophysical Journal 792.1 (sept. 2014), p. 62.
- [Ade+15] P A R Ade et al. « Joint Analysis of BICEP2/ Keck Array and Planck Data ». In : Physical Review Letters 114.10 (mar. 2015), p. 101301-17.
- [Ade+20] P Ade et al. « A wide field-of-view low-resolution spectrometer at APEX : Instrument design and scientific forecast ». In : Astronomy & Astrophysics 642 (2020), A60.
- [AS82] A Albrecht et P J Steinhardt. « Cosmology for grand unified theories with radiatively induced symmetry breaking ». In : Physical Review Letters 48.17 (avr. 1982), p. 1220-1223.
- [Alp48] R A Alpher. « A Neutron-Capture Theory of the Formation and Relative Abundance of the Elements ». In : Physical Review 74.1 (déc. 1948), p. 1577-1589.
- [And+14] Philippe André et al. « PRISM (Polarized Radiation Imaging and Spectroscopy Mission) : an extended white paper ». In : Journal of Cosmology and Astroparticle Physics 2014.02 (fév. 2014), p. 006-006. doi : [10.1088/1475-7516/2014/02/006](https://doi.org/10.1088/1475-7516/2014/02/006). url : <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2014/02/006>.
- [Bab37] Jacques Babinet. Mémoires d'optique météorologique. 1837.
- [BP08] Daniel Baumann et Hiranya V Peiris. « Cosmological Inflation : Theory and Observations ». In : arXiv.org 2 (oct. 2008), p. 3022-120. arXiv : [0810.3022](https://arxiv.org/abs/0810.3022) [astro-ph].
- [Ben+12] J Benitez et al. « Current developments of the VENUS ion source in research and operations ». In : Proc. ECRIS'12 (2012), p. 153.
- [Ben+13] C L Bennett et al. « NINE-YEAR WILKINSON MICROWAVE ANISOTROPY PROBE (WMAP) OBSERVATIONS : FINAL MAPS AND RESULTS ». In : The Astrophysical Journal Supplement Series 208.2 (oct. 2013), p. 20.
- [Ber16] Yoann Bert. « Recherche de la meilleure stratégie de mise en froid pour les cryomodules du LINAC SPIRAL 2 ». Rapport de stage de fin d'étude ST50-P2016. Université de technologie Belfort-Montbéliard, 2016.
- [Bib+03] S Biber et al. « Design of artificial dielectrics for anti-reflection-coatings ». In : 33rd European Microwave Conference Proceedings (IEEE Cat. No. 03EX723C). T. 3. IEEE. 2003, p. 1115-1118.
- [Big+13] M-A Bigot-Sazy et al. « Self-calibration : an efficient method to control systematic effects in bolometric interferometry ». In : Astronomy & Astrophysics 550 (2013), A59.
- [Bon14] François Bonne. « Modélisation et contrôle des grands réfrigérateurs cryogéniques ». Thèse de doct. Université de Grenoble, déc. 2014. url : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01133432>.
- [Bor14] Guillaume Bordier. « Développements de composants millimétriques pour la caractérisation de la polarisation du fond diffus cosmologique ». Thèse de doct. Université Paris Diderot-Paris 7, 2014.
- [Bor+14] G Bordier et al. « Superconducting NbN Coplanar Switch Driven by DC Current for CMB Instruments ». In : Journal of Low Temperature Physics 176.5 (2014), p. 663-669.
- [Bra10] Benjamin Bradu. « Modélisation, simulation et contrôle des installations cryogéniques du CERN ». Thèse de doct. Université Paris Sud - Paris XI, mar. 2010. url : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00445840>.
- [Ghr+18] A Ghribi et al. « Procédés de détermination en temps réel du facteur de qualité d'une cavité accélératrice supraconductrice ». In : Brevet d'invention BD18781 (2018).
- [Cal+10] Martino Calvo et al. « Development of kinetic inductance detectors for cosmic microwave background experiments ». In : Experimental Astronomy 28.2 (2010), p. 185-194.

- [Cam99] Philippe Camus. « Principe des bolomètres ». In : 4ème Ecole d'automne : détection de rayonnements à très basse température. Balaruc les Bains (1999).
- [Cav+20] F. Cavaliere et al. QUBIC VII : The feedhorn-switch system of the technological demonstrator. 2020. arXiv : [2008.12721](https://arxiv.org/abs/2008.12721) [[astro-ph.IM](#)].
- [Cha+09] R Charlassier et al. « An efficient phase-shifting scheme for bolometric additive interferometry ». In : *Astronomy & Astrophysics* 497.3 (2009), p. 963-971.
- [Chi+20] Y Chinone et al. « Results of gravitational lensing and primordial gravitational waves from the POLARBEAR experiment ». In : *Journal of Physics : Conference Series*. T. 1468. 1. IOP Publishing. 2020, p. 012007.
- [Col+15a] Planck Collaboration et al. « Planck 2015 results. I. Overview of products and scientific results ». In : (fév. 2015). arXiv : [1502.01582](https://arxiv.org/abs/1502.01582).
- [Col+15b] Planck Collaboration et al. « Planck 2015 results. I. Overview of products and scientific results ». In : (fév. 2015). arXiv : [1502.01582](https://arxiv.org/abs/1502.01582).
- [dAl+20] G d'Alessandro et al. « QUBIC VI : cryogenic half wave platerotator, design and performances ». In : arXiv preprint arXiv :2008.10667 (2020).
- [De +10] De Bernardis, P. et al. « Cosmic Microwave Background science from Dome C ». In : *EAS Publications Series* 40 (2010), p. 391-398. doi : [10.1051/eas/1040054](https://doi.org/10.1051/eas/1040054). url : <https://doi.org/10.1051/eas/1040054>.
- [DJM02] Donald C DeGroot, Jeffrey A Jargon et Roger B Marks. « Multiline TRL revealed ». In : 60th ARFTG Conference Digest, Fall 2002. IEEE. 2002, p. 131-155.
- [Dic46] R H Dicke. « The Measurement of Thermal Radiation at Microwave Frequencies ». In : *Review of Scientific Instruments* 17.7 (juil. 1946), p. 268-275.
- [Dic+65] R H Dicke et al. « Cosmic Black-Body Radiation. » In : *Astrophysical Journal* 142 (juil. 1965), p. 414-419.
- [Tay+04] C. E. Taylor et al. « An Efficient Cooling Loop for Connecting Cryocooler to a Helium Reservoir ». In : *AIP Conference Proceedings* 710.1 (2004), p. 1818-1825. doi : [10.1063/1.1774883](https://doi.org/10.1063/1.1774883). eprint : <https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.1774883>. url : <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.1774883>.
- [Dro+20] A Drouart et al. « The Super Separator Spectrometer (S3) for the SPIRAL2 facility ». In : *Journal of Physics : Conference Series*. T. 1643. 1. IOP Publishing. 2020, p. 012032.
- [Ein16] A Einstein. « Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie ». In : *Annalen der Physik* 354.7 (1916), p. 769-822.
- [Que12a] Erin Quealy. « The POLARBEAR Cosmic Microwave Background Polarization Experiment and Anti-Reflection Coatings for Millimeter Wave Observations ». Thèse de doct. University of California, Berkeley, 2012. url : <https://escholarship.org/uc/item/2396s4k6>.
- [Far+20] FB Faramarzi et al. « An On-Chip Superconducting Kinetic Inductance Fourier Transform Spectrometer for Millimeter-Wave Astronomy ». In : *Journal of Low Temperature Physics* (2020), p. 1-8.
- [ABG48] R A Alpher, H Bethe et G Gamow. « The Origin of Chemical Elements ». In : *Physical Review* 73.7 (avr. 1948), p. 803-804.
- [GR21] Adnan Ghribi et Philippe Robillard. Pré-rapport cryogénie NewGain. Rapp. tech. Atrium-442108. GANIL, 2021.
- [Ghr09] Adnan Ghribi. « Composants millimétriques supra-conducteurs pour la mesure de la polarisation du fond diffus cosmologique - Application à l'interférométrie bolométrique ». Thèse de doct. Université Paris-Diderot - Paris VII, nov. 2009. url : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00726118>.
- [Ghr+10] Adnan Ghribi et al. « Experimental Study of an Adding Interferometer at Millimeter Waves ». In : *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves* 31.1 (2010), p. 88.
- [Ghr+14] Adnan Ghribi et al. « Latest progress on the QUBIC instrument ». In : *Journal of Low Temperature Physics* 176.5 (2014), p. 698-704.
- [Ghr+17] A Ghribi et al. « Status of the SPIRAL 2 LINAC cryogenic system ». In : *Cryogenics* 85 (2017), p. 44-50.
- [Ghr+20] Adnan Ghribi et al. « First full cool down of the SPIRAL 2 superconducting LINAC ». In : *Cryogenics* 110 (2020), p. 103126.
- [Ghr+21] Adnan Ghribi et al. « Cryogenic thermo-acoustic oscillations highlight and study in the SPIRAL2 superconducting LINAC ». In : arXiv preprint arXiv :2101.10768 (2021).
- [Gut81] Alan H Guth. « Inflationary universe : A possible solution to the horizon and flatness problems ». In : *Physical Review D (Particles and Fields)* 23.2 (jan. 1981), p. 347-356.
- [Ham09] J.-C. Hamilton. « de l'émission du ciel à 0.4 meV et au delà de l'EeV : cosmologie et rayons cosmiques ». Habilitation à diriger des recherches. Université Paris-Diderot - Paris VII, oct. 2009. url : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00706982>.
- [Ham+20] J-Ch Hamilton et al. « QUBIC I : Overview and Science Program ». In : arXiv preprint arXiv :2011.02213 (2020).

- [Haz+12] M Hazumi et al. « LiteBIRD : a small satellite for the study of B-mode polarization and inflation from cosmic background radiation detection ». In : Space Telescopes and Instrumentation 2012 : Optical, Infrared, and Millimeter Wave. T. 8442. International Society for Optics et Photonics. 2012, p. 844219.
- [Haz+20] Masashi Hazumi et al. « LiteBIRD satellite : JAXA's new strategic L-class mission for all-sky surveys of cosmic microwave background polarization ». In : Space Telescopes and Instrumentation 2020 : Optical, Infrared, and Millimeter Wave. T. 11443. International Society for Optics et Photonics. 2020, 114432F.
- [Hub29] Edwin Hubble. « A Relation between Distance and Radial Velocity among Extra-Galactic Nebulae ». In : Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. Mar. 1929, p. 168-173.
- [Ich14] K Ichiki. « CMB foreground : A concise review ». In : Progress of Theoretical and Experimental Physics 2014.6 (juin 2014), 6B109-.
- [IH05] Kent D Irwin et Gene C Hilton. « Transition-edge sensors ». In : Cryogenic particle detection (2005), p. 63-150.
- [KK16] Marc Kamionkowski et Ely D Kovetz. « The quest for B modes from inflationary gravitational waves ». In : Annual Review of Astronomy and Astrophysics 54 (2016), p. 227-269.
- [Kap09] Jean ; The QUBIC collaboration Kaplan. « QUBIC, a bolometric interferometer to measure the B modes of the CMB ». In : arXiv preprint arXiv :0910.0391 (2009).
- [Arn10] Kam Stahly Arnold. « Design and Deployment of the POLARBEAR Cosmic Microwave Background Polarization Experiment ». Thèse de doct. University of California, Berkeley, 2010.
- [Ker12] Zigmund David Kermish. « The POLARBEAR Experiment : Design and Characterization ». Thèse de doct. University of California, Berkeley, 2012.
- [Kno03] J. Knobloch. « The "Q disease" in Superconducting Niobium RF Cavities ». In : AIP Conference Proceedings 671.1 (2003), p. 133-150. doi : [10.1063/1.1597364](https://doi.org/10.1063/1.1597364). eprint : <https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.1597364>. url : <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.1597364>.
- [Kov+02] J Kovac et al. « Detection of Polarization in the Cosmic Microwave Background using DASI ». In : Nature 6 (sept. 2002), p. 772-787.
- [Kra+16] N Krachmalnicoff et al. « Characterization of foreground emission on degree angular scales for CMB B-mode observations-Thermal dust and synchrotron signal from Planck and WMAP data ». In : Astronomy & Astrophysics 588 (2016), A65.
- [Kra+18] N Krachmalnicoff et al. « S-PASS view of polarized Galactic synchrotron at 2.3 GHz as a contaminant to CMB observations ». In : Astronomy & Astrophysics 618 (2018), A166.
- [Lan05] David Langlois. « Inflation, Quantum Fluctuations and Cosmological Perturbations ». In : Particle Physics and Cosmology : the Interface. Edited by D. Kazakov and G. Smadja. NATO science series. Series II 188 (jan. 2005), p. 235.
- [Led+18] X Ledoux et al. « The neutrons for science facility at SPIRAL-2 ». In : Radiation protection dosimetry 180.1-4 (2018), p. 115-119.
- [Lei+01] Matthaeus A Leitner et al. « Construction of the superconducting ECR ion source Venus ». In : Physica Scripta 2001.T92 (2001), p. 171.
- [Lem27] G Lemaître. « Un Univers homogène de masse constante et de rayon croissant rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extra-galactiques ». In : Annales de la Société Scientifique de Bruxelles 47 (1927), p. 49-59.
- [Lin82] A D Linde. « A new inflationary universe scenario : A possible solution of the horizon, flatness, homogeneity, isotropy and primordial monopole problems ». In : Physics Letters B 108.6 (fév. 1982), p. 389-393.
- [Lin17] Andrei Linde. « Gravitational waves and large field inflation ». In : Journal of Cosmology and Astroparticle Physics 2017.02 (2017), p. 006.
- [Lju79] Lennart Ljung. « Asymptotic behavior of the extended Kalman filter as a parameter estimator for linear systems ». In : IEEE Transactions on Automatic Control 24.1 (1979), p. 36-50.
- [Loi+09] Martin Loidl et al. « Metallic magnetic calorimeters for beta spectrometry ». In : AIP Conference Proceedings. The Thirteenth International Workshop on Low Temperature Detectors-LTD13 1185 (déc. 2009). ISBN : 978-0-7354-0751-0 - Conference date : 20-24 July 2009 Location : Stanford (California), USA, p. 587. doi : [10.1063/1.3292410](https://doi.org/10.1063/1.3292410). url : <https://hal-cea.archives-ouvertes.fr/cea-02475291>.
- [Lon09] David Longuevergne. « Etude et test d'un module accélérateur supraconducteur pour le projet Spiral2 ». 2009PA112304. Thèse de doct. 2009, 1 vol. (306 p.) url : <http://www.theses.fr/2009PA112304>.
- [Mar+15] Claude Marchand et al. « Performances of SPIRAL2 low and high beta cryomodules ». In : 17th International Conference on RF Superconductivity (SRF2015). 2015, p. 967-972.
- [Mas+20] S Masi et al. « QUBIC V : Cryogenic system design and performance ». In : arXiv preprint arXiv :2008.10659 (2020).

- [Mat+94] J C Mather et al. « Measurement of the cosmic microwave background spectrum by the COBE FIRAS instrument ». In : The Astrophysical Journal 420 (jan. 1994), p. 439-444.
- [Mat+14] T Matsumura et al. « Mission design of LiteBIRD ». In : Journal of Low Temperature Physics 176.5 (2014), p. 733-740.
- [Ghr16a] Adnan Ghribi. Rapport de la mise en froid LINAC SPIRAL2 de juillet 2016. Rapp. tech. ATRIUM-137548. GANIL, juillet 2016.
- [GVB18] Adnan Ghribi, Adrien Vassal et Pierre-Emmanuel Bernaudin. Rapport de mise en froid du LINAC SPIRAL2 de septembre 2018. Rapp. tech. ATRIUM-316158. GANIL, sept. 2018.
- [GV17] Adnan Ghribi et Adrien Vassal. Rapport de mise en froid du LINAC SPIRAL2 de mars 2017. Rapp. tech. ATRIUM-509170. GANIL, mar. 2017.
- [GB17] Adnan Ghribi et Pierre-Emmanuel Bernaudin. Rapport de mise en froid du LINAC SPIRAL2 d'octobre 2017. Rapp. tech. ATRIUM-282855. GANIL, oct. 2017.
- [Mer+99] William M Merrill et al. « Effective medium theories for artificial materials composed of multiple sizes of spherical inclusions in a host continuum ». In : IEEE Transactions on antennas and propagation 47.1 (1999), p. 142-148.
- [Mye10] Michael James Myers. « Antenna-coupled Superconducting Bolometers for Observations of the Cosmic Microwave Background Polarization ». Thèse de doct. University of California, Berkeley, 2010.
- [OSu+20] C. O'Sullivan et al. QUBIC VIII : Optical design and performance. 2020. arXiv : [2008 . 10119](https://arxiv.org/abs/2008.10119) [astro-ph.IM].
- [Pap+00] Padelis P Papadopoulos et al. « CO (4-3) and dust emission in two powerful high-z radio galaxies, and CO lines at high redshifts ». In : The Astrophysical Journal 528.2 (2000), p. 626.
- [Pen79] A A Penzias. The origin of the elements. Nobel lecture, 8 December 1978. Rev. Mod. Phys, 1979.
- [Per16a] Camille Perbost. « Matrices de bolomètres supraconducteurs pour la mesure de la polarisation du fond diffus cosmologique : application à l'expérience QUBIC ». Thèse de doct. Université de Paris 7 - Denis Diderot, déc. 2016. url : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01483786>.
- [Per16b] Camille Perbost. « Matrices de bolomètres supraconducteurs pour la mesure de la polarisation du fond diffus cosmologique : application à l'expérience QUBIC ». Thèse de doct. Sorbonne Paris Cité, 2016.
- [CMP19] Chien-Yi Chen, David McKeen et Maxim Pospelov. « New physics via pion capture and simple nuclear reactions ». In : Phys. Rev. D 100 (9 nov. 2019), p. 095008. doi : [10.1103/PhysRevD.100.095008](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.100.095008). url : <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.100.095008>.
- [KL97] Marc Kamionkowski et Abraham Loeb. « Getting around cosmic variance ». In : Phys. Rev. D 56 (8 oct. 1997), p. 4511-4513. doi : [10.1103/PhysRevD.56.4511](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.56.4511). url : <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.56.4511>.
- [Pia+21] M Piat et al. « QUBIC IV : Performance of TES Bolometers and Readout Electronics ». In : arXiv preprint arXiv :2101.06787 (2021).
- [Pla+11a] Planck Collaboration et al. « Planck early results. I. The Planck Mission ». In : Astronomy and Astrophysics 536 (déc. 2011), A1-16.
- [Pla+11b] Planck HFI Core Team et al. « Planck early results. IV. First assessment of the High Frequency Instrument in-flight performance ». In : Astronomy and Astrophysics 536 (déc. 2011), A4-20.
- [Pol+07] G Polenta et al. « The BRAIN CMB polarization experiment ». In : New Astronomy Reviews 51.3-4 (2007), p. 256-259.
- [Pol+08] G Polenta et al. « The BRAIN experiment ». In : The Eleventh Marcel Grossmann Meeting : On Recent Developments in Theoretical and Experimental General Relativity, Gravitation and Relativistic Field Theories (In 3 Volumes). World Scientific. 2008, p. 1680-1688.
- [Pou20] Clarisse Poupon-Pourchot. « Fiabilisation d'un système de contrôle avancé à base de modèle pour le système cryogénique d'un accélérateur d'ions lourds supraconducteur ». Rapport de stage. Ecole Nationale Supérieure de l'Energie, l'Eau et l'Environnement, 2020.
- [Poz11] David M Pozar. Microwave engineering. John wiley & sons, 2011.
- [Ber19] Pierre-Emmanuel Bernaudin. Procédure de mise en froid du LINAC SPIRAL2. Rapp. tech. GVC-2019.23v1.2. GANIL, 2019.
- [Ghr16b] Adnan Ghribi. Protocole de test - mise en froid LINAC de décembre 2016. Rapp. tech. ATRIUM-137546. GANIL, décembre 2016.
- [PW65] A A Penzias et R W Wilson. « A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s. » In : Astrophysical Journal 142 (juil. 1965), p. 419-421.
- [Que12b] Erin Quealy. « The POLARBEAR Cosmic Microwave Background Polarization Experiment and Anti-Reflection Coatings for Millimeter Wave Observations ». Thèse de doct. University of California, Berkeley, 2012.
- [May20] Christophe Mayri. Pré-étude cryogénique - option cryocooler. Rapp. tech. CEA - IRFU, nov. 2020.
- [Rog17] A Rogalski. « Next decade in infrared detectors ». In : Electro-Optical and Infrared Systems : Technology and Applications XIV. T. 10433. International Society for Optics et Photonics. 2017, p. 104330L.

- [SH02] Amr ME Safwat et Leonard Hayden. « Sensitivity analysis of calibration standards for fixed probe spacing on-wafer calibration techniques [vector network analyzers] ». In : 2002 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (Cat. No. 02CH37278). T. 3. IEEE. 2002, p. 2257-2260.
- [SG13] René Schneider et Christos Georgakis. « How to not make the extended Kalman filter fail ». In : Industrial & Engineering Chemistry Research 52.9 (2013), p. 3354-3362.
- [Ser19] Franchoo Serge. « Low-energy experiments at the S3 spectrometer ». In : (2019).
- [Sid+14] Alassane Sidibe et al. « Conception of a 90-GHz metamaterial-based coupler for astrophysical applications ». In : Applied Physics A 117.2 (2014), p. 523-526.
- [Smo+94] G F Smoot et al. « Statistics and topology of the COBE differential microwave radiometer first-year sky maps ». In : Astrophysical Journal 437 (déc. 1994), p. 1-11.
- [Ste14] Bryan Steinbach. « Measurement of the B-mode power spectrum with POLARBEAR ». Thèse de doct. University of California, Berkeley, 2014.
- [Suz+12] Aritoki Suzuki et al. « Multi-choic dual-polarization bolometric focal plane for studies of the cosmic microwave background ». In : Journal of Low Temperature Physics 167.5 (2012), p. 852-858.
- [Suz13] Aritoki Suzuki. « Multichroic bolometric detector architecture for cosmic microwave background polarimetry experiments ». Thèse de doct. University of California, Berkeley, 2013. url : <https://escholarship.org/uc/item/00m6b8rn>.
- [Tar+09] A Tartari et al. « BRAIN/MBI : a bolometric interferometer dedicated to the CMB polarization ». In : 5th ESA Workshop on Millimetre Wave Technology and Applications & 31st ESA AntennaWorkshop. 2009.
- [Tor+20] SA Torchinsky et al. « QUBIC III : Laboratory Characterization ». In : arXiv preprint arXiv :2008.10056 (2020).
- [Tre+12] P Tremblin et al. « Worldwide site comparison for submillimetre astronomy ». In : Astronomy & Astrophysics 548 (2012), A65.
- [Tri+21] M Tristram et al. « Planck constraints on the tensor-to-scalar ratio ». In : Astronomy & Astrophysics 647 (2021), A128.
- [Tuc+08] Gregory S Tucker et al. « The millimeter-wave bolometric interferometer (MBI) ». In : Millimeter and Submillimeter Detectors and Instrumentation for Astronomy IV. T. 7020. International Society for Optics et Photonics. 2008, p. 70201M.
- [Urr+08] J Urrestilla et al. « Degeneracy between primordial tensor modes and cosmic strings in future CMB data from the Planck satellite ». In : Physical Review D 77.12 (2008), p. 123005.
- [Vas19] Adrien Vassal. « Etude d'un réseau cryogénique multi-clients pour SPIRAL2 ». Thèse de doct. Normandie Université, nov. 2019. url : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02390264>.
- [Vas+18] Adrien Vassal et al. « SPIRAL2 cryogenic system thermodynamic behavior prediction through dynamic modeling ». In : Proc. 29th Linear Accelerator Conference (LINAC'18), Beijing, China, 16-21 September 2018. T. 29. 2018, p. 366-369.
- [Vas+19] A Vassal et al. « Dynamic modeling and control of the SPIRAL2 cryomodules ». In : IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. T. 502. 1. IOP Publishing. 2019, p. 012111.
- [Vas+21] Adrien Vassal et al. « SPIRAL2 Cryomodules Models : a Gateway to Process Control and Machine Learning ». In : arXiv preprint arXiv :2103.10299 (2021).
- [Wei+14] J Wei et al. « Accelerator challenges of high intensity linacs and the facility for rare isotope beams ». In : Proceedings of HB2014, East Lansing. 2014, p. 12.
- [Wei08] S. Weinberg. Cosmology. OUP Oxford, 2008. isbn : 9780198526827. url : <https://books.google.fr/books?id=rswTDAAQBAJ>.
- [Wei19] J Wei. « RARE ISOTOPE BEAMS AND HIGH-POWER ACCELERATORS ». In : NAPAC2019, Lansing, MI, USA. 2019.
- [Zal01] M Zaldarriaga. « The nature of the E-B decomposition of CMB polarization ». In : Physical Review D 64.astro-ph/0106174 (juin 2001), 103001. 8 p.
- [Zhu+21] Ningfeng Zhu et al. « The Simons Observatory Large Aperture Telescope Receiver ». In : arXiv preprint arXiv :2103.02747 (2021).

Glossaire

- Al/Ti* Aluminium Titane. 60
- Al* Aluminium. 60, 61
- Au* Or. 60
- B_{pk} Champ magnétique pic. 95
- C_ℓ^{BB} Spectre de puissance angulaire des anisotropies de polarisation correspondant au champ B, signature des ondes gravitationnelles primordiales. xi, 21, 22, 25
- C_ℓ^{EE} Spectre de puissance angulaire des anisotropies de polarisation correspondant au champ E. xi, 21, 22, 24
- C_ℓ^{TT} Spectre de puissance angulaire des anisotropies de température. 19, 22, 24
- E_{acc} Champ accélérateur exprimé en MV/m. 94, 95
- E_{pk} Champ électrique pic. 95
- G Constante de gravitation. 17
- $H(z)$ Paramètre de Hubble. 17
- I Paramètre de Stockes, exprime l'intensité du champ électrique. 21
- L_g Inductance géométrique. 68
- L_k Inductance cinétique. 68
- NbN* Nitrure de Niobium. 68, 69
- NbSi* Niobium Silicium. 32, 61
- Nb* Niobium. xii, 58–61
- Q_0 Facteur de qualité d'une cavité $Q_0 = G/R_s$, avec G le facteur géométrique et R_s la résistance de surface. 95
- Q_i Facteur de couplage. 95
- Q Paramètre de Stockes, exprime la polarisation linéaire du champ électrique. 21
- SiO₂* Dioxyde de Silicium. xii, 59
- SiO* Oxyde de Silicium. 61, 63
- Si₃N₄* Nitrure de Silicium. 59–61, 63
- Si* Silicium. 59, 61, 63
- Ti* Titane. 60
- U Paramètre de Stockes, exprime la polarisation linéaire du champ électrique. 21
- V Paramètre de Stockes, exprime la polarisation circulaire du champ électrique. 21
- XeF₂* Difluorure de Xénon. 60, 61, 63
- Λ Energie sombre. 17
- Ω_M Paramètre cosmologique correspondant à la matière. 17
- Ω_Λ Paramètre cosmologique correspondant à la matière. 18
- Ω_k Paramètre cosmologique correspondant à la courbure. 18
- Ω_r Paramètre cosmologique correspondant au rayonnement. 18
- β Facteur d'accélération relative $\beta = v/c$ avec v la vitesse de la particule et c la vitesse de la lumière. 94, 95

ℓ Multipôles. 19, 20
 ν Fréquence. 19
 ω Fréquence angulaire. 68
 ρ_M Densité de matière. 17
 ρ_r Densité de rayonnement. 17
 c Vitesse de la lumière. 19
 k_0 Constante de propagation dans le vide. 66
 k_B Constante de Boltzman. 19
 n_s Indice spectral scalaire. 22
 n_t Indice spectral tensoriel. 22
 r Rapport tenseur sur scalaire. xi, 22, 24, 25, 27
 z Redshift. 17

ACT Instrument sol dédié à la polarimétrie du CMB. 36, 51

APEX Instrument sol dédié à la polarimétrie du CMB. 36

BCS Théorie de la supraconductivité qui fut proposée en 1957 par John Bardeen, Leon Neil Cooper, et John Robert Schrieffer. 133

BICEP Instrument sol dédié à la polarimétrie du CMB. 24, 25

BRAIN Nom du premier projet européen d'instrument d'interférométrie bolométrique initialement prévu en Antarctique. 30

CB Boite froide ou Cold Box : Machine thermodynamique permettant d'atteindre de fortes puissances cryogéniques. Il s'agit d'une machine industrielle complexe. Elle constitue le coeur de toutes les installations cryogéniques qui nécessitent de fortes puissances comme les accélérateurs supraconducteurs. En Europe, les principaux acteurs sont LINDE et Air Liquide Industries. 93

CBI Instrument sol dédié à la polarimétrie du CMB. 29

CDM Modèle standard de la cosmologie [Cold Dark Matter](#). 20

CM^A Cryomodules de type A : cryostats renfermant les cavités bas beta dites de type A ainsi que l'instrumentation permettant leur opération radiofréquence et cryogénique. xiii, 94, 96, 98–112, 157

CM^B Cryomodules de type B : cryostats renfermant les cavités haut beta dites de type B ainsi que l'instrumentation permettant leur opération radiofréquence et cryogénique. xiii, 94, 96, 98–107, 157

COBE Satellite dédié à l'observation du CMB lancé en 1989. 16

CRLH Matériaux mains gauches - mains droites appelés en anglais Complementary Right Left Hand Material. Il s'agit de matériaux artificiels formés par la répétition à des dimensions plus petites que $\lambda/20$ (λ étant la longueur d'onde) afin de créer des propriétés exceptionnelles de la matière (ex. largeur de bande, invisibilité spectrale, miniaturisation, effet doppler inverse, ...). 133

cryomodule Il s'agit du nom donné aux cryostats qui renferment les cavités accélératrices. Ces cryostat renferment tous les éléments liés à l'instrumentation cryogénique comme les capteurs de pression, sondes de niveau LHe et de températures, soupapes de sécurité ... Ils renferment aussi les éléments liés au couplage radiofréquence, à la correction de fréquence de résonance et au vide faisceau entre autres éléments. 94

DASI Instrument sol dédié à la polarimétrie du CMB. 16, 29

Dewar ou Vase Dewar : il s'agit d'un récipient fournissant une très bonne isolation thermique. Il doit son nom au physicien écossais Sir James Dewar. Il s'agit des récipients utilisés pour stocker les cryogènes dans leur phase liquide. Outre le stockage, ils ont alors la fonction de séparation gravitaire de phase. xiii, 92, 93

DMR Instrument du satellite [COBE](#). 16

DRIE Gravure ionique réactive profonde (en anglais [Deep Reactive Ion Etching](#)). Il s'agit d'un procédé de gravure ionique réactive fortement anisotrope utilisé en micro-électronique. Il sert à créer des trous et des tranchées profondes dans des wafers avec un rapport largeur/hauteur de 20/1 ou plus. 59, 63

- EPICS** Il s'agit d'un ensemble d'outils appartenant au domaine public, développés de manière collaborative et très utilisés pour le contrôle, l'acquisition et l'affichage temps réel des données de grands instruments scientifiques comme les télescopes et les accélérateurs de particules. [95](#), [105](#), [114](#)
- FIRAS** Instrument du satellite [COBE](#). [16](#)
- FRWL** Métrique de Friedmann-Robertson-Walker-Lemaître. [17](#)
- Gasbag** Il s'agit d'un volume tampon de stockage de gaz fait d'une toile. Il est utilisé pour des pressions avoisinants la pression atmosphérique. [93](#)
- GHe** Hélium gaz. [101](#), [102](#), [107](#)
- HFI** Instrument haute fréquence du satellite Planck. [xi](#), [17](#), [20](#), [23](#), [24](#), [26](#)
- ICPE** Gravure plasma à couplage inductif (en anglais [Inductively Coupled Plasma Etching](#)) - autre type de gravure réactive (voir [RIE](#)). [63](#)
- LHe** Hélium liquide. [xiii](#), [94](#), [96](#), [102](#), [103](#), [105](#), [107](#), [109](#), [110](#), [113](#)
- LIC** Technique de visualisation de champs vectoriels ([Line Integral Convolution \(LIC\)](#)). [xi](#), [26](#)
- LINA** Ensemble constitué par les 12 premières boîtes à vannes correspondant aux 12 premiers cryomodules de type A ([CM^A](#)). [94](#), [102](#)
- LINB** Ensemble constitué par les 6 dernières boîtes à vannes correspondant aux 6 derniers cryomodules de type B ([CM^B](#)). [94](#), [102](#)
- LINC** Ensemble constitué par la boîte de raccordement et de la boîte à vannes centrale correspondant à [CM^B₀₁](#). [94](#), [101](#), [102](#)
- LiteBird** Satellite de la [JAXA](#) pour l'étude de la polarisation du fond diffus cosmologique. [37](#)
- LPCVD** Dépôt chimique en phase vapeur et à pression atmosphérique (en anglais [Low Pressure Chemical Vapor Deposition](#)) - méthode de dépôt sous vide de films minces, à partir de précurseurs gazeux. Les pressions réduites tendent à réduire les réactions en phase gazeuse non désirées et augmentent l'uniformité des films le long des substrats. [59](#), [61](#)
- MBI** Projet américain d'instrument d'interféromètre bolométrique. [30](#)
- PECVD** Dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma (en anglais [Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition](#)) - Procédé utilisé pour déposer des couches minces sur un substrat à partir d'un état gazeux (vapeur). [59](#)
- PolarBear** Instrument sol dédié à la polarimétrie du CMB. [25](#), [37](#), [52](#), [53](#)
- PRISM** Nom du satellite proposé en réponse à l'appel d'offre ESA COSMIC VISION en 2014. [40](#)
- QUBIC** Instrument sol dédié à la polarimétrie du CMB. [30](#), [51](#), [52](#)
- RGA** Système qui permet de remonter les alarmes critiques vers le poste de contrôle (opération) et le poste de garde (sécurité) et qui permet donc l'appel de l'astreinte pour intervention en cas de problème métier. [95](#)
- RIE** Gravure ionique réactive ou gravure par ions réactifs (en anglais [Reactive Ion Etching](#)) - Technique de gravure sèche des semi-conducteurs. [59–61](#), [157](#)
- SOLT** Procédure d'étalonnage quasi-standardisée utilisée pour des mesures vectorielles à l'aide de kits d'étalonnage dont les propriétés des composants (court-circuit, réflecteur, charge adaptée et ligne de transmission) sont connus. [56](#), [68](#)
- SPT** Instrument sol dédié à la polarimétrie du CMB. [51](#)
- Taconis** Oscillations spontanées dites thermoacoustiques nommées ainsi car observées pour l'hélium liquide pour la première fois par K. W. Taconis en 1949. [100](#)
- TRL** Procédure d'étalonnage utilisée pour des mesures vectorielles. Elle nécessite une ligne de transmission (Thru), une réflexion (Reflect) et une charge adaptée connue (load). [56](#), [68](#)
- WMAP** Satellite dédié à l'observation du CMB lancé en 2001. [xi](#), [24](#), [33](#)
- I_ν Intensité du spectre de corps noir du CMB. [19](#)
- T_{CMB} Température du fond diffus cosmologique. [19](#)
- h constante de Planck. [19](#)

Acronymes

- ACT** Atacama Cosmology Telescope. [36](#)
- ALAT** Air Liquide Advanced Technologies. [86](#), [93](#)
- ALMA** Atacama Large Millimeter/submillimeter Array. [36](#)
- ANR** Agence Nationale de la Recherche. [71](#)
- APC** AstroParticules et Cosmologie. [34](#), [90](#), [133](#)
- APEX** Atacama Pathfinder EXperiment. [36](#)
-
- BAV** Boite A Vanne. [103](#)
- BICEP** Background Imaging of Cosmic Extragalactic Polarization. [24](#), [25](#)
- BLM** Beam Loss Monitors. [xiii](#), [110](#), [112](#)
- BRAIN** B mode Radiation INterferometer. [30](#), [31](#)
- BS** Bolomètre Semi-conducteur. [27](#)
- BSD** B-mode Superconducting Detectors. [xii](#), [63](#), [64](#), [68](#), [71](#), [133](#)
-
- C-M** Clausius–Mossotti. [66](#)
- C2N** Centre de Nanotechnologies et de Nanosciences. [61](#)
- CBI** Cosmic Background Imager. [29](#)
- CDM** Cold Dark Matter. [20](#), [156](#)
- CEA** Commissariat à l’Energie Atomique et aux énergies alternatives. [87](#), [89](#), [91](#)
- CERN** Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire. [87](#), [89](#), [91](#)
- CES** Centre Efficacité Énergétique des Systèmes. [91](#)
- CM** cryomodules. [90](#), [98](#), [103](#)
- CMB** Cosmic Microwave Background ou Fond Diffus Cosmologique. [xi](#), [16–26](#), [40](#), [41](#), [71](#)
- CNRS** Centre National de la Recherche Scientifique. [91](#)
- COBE** COsmic Background Explorer. [xi](#), [16](#), [19](#), [40](#), [156](#), [157](#)
- COS2** Superconducting COmponents for Cosmic microwave background ObservationS. [71](#)
- COSMOS** COmposantS millimétriques Main gauche pour la détection des Ondes gravitationnelles primordiales. [71](#)
- CSA** Crossed Slot Antenna. [41](#)
- CSNSM** Centre de Sciences Nucléaires et de Sciences de la Matière. [61](#)
- CTU** Centrale de Technologie Universitaire. [60](#), [61](#)
-
- DASI** Degree Angular Scale Interferometer. [16](#)
- DCMB** Développement Concerté de Matrices de Bolomètres. [71](#), [133](#)
- DMR** Differential Microwave Radiometer. [xi](#), [16](#)
- DOE** Department Of Energy. [40](#)
- DRIE** Deep Reactive Ion Etching. [59](#), [156](#)
- DSBT** Département Service des Basses Températures. [89](#), [90](#)

ECR Electron Cyclotron Resonance. [84](#), [87](#)

ENSAR European Nuclear Science and Applications Research. [91](#)

EPICS Experimental Physics and Industrial Control System). [95](#)

ERINS European Research Infrastructures for Nuclear Science. [91](#)

ESA European Space Agency. [40](#), [64](#), [65](#), [71](#)

ESO European Organisation for Astronomical Research in the Southern Hemisphere. [36](#)

ESS European Spallation Source. [91](#)

FCV Flow Control Valve. [108](#), [109](#), [111](#)

FIRAS Far Infrared Absolute Spectrophotometer. [xi](#), [16](#), [19](#)

FRWL Friedmann-Robertson-Walker-Lemaître. [17](#)

G2CA Groupe Contrôle Commande et Automatisation. [90](#)

GANIL Grand Accélérateur National d'Ions Lourds. [34](#), [86](#), [88–90](#), [96](#)

GRAAL Grande RéfrigéRation pour les Accélérateurs supraconducteurs Linéaires. [90](#), [104](#)

GSi Gesellschaft für Schwerionenforschung. [87](#), [91](#)

GUT Grand Unification Theory. [25](#)

HA Horn Array. [41](#)

HEB Hot Electron Bolometer. [xii](#), [50](#), [51](#)

HEMT High Electron Mobility Transistors. [28](#), [41](#)

HFI High Frequency Instrument. [xi](#), [24](#), [25](#), [51](#)

HFT High Frequency Telescope. [40](#)

HTT Huan Tran Telescope. [34](#), [36](#), [38](#), [39](#)

HWP Half Wave Plate. [27](#), [36](#)

ICPE Inductively Coupled Plasma Etching. [63](#), [157](#)

IEF Institut d'Electronique Fondamentale. [60](#)

IJC Lab Laboratoire Irène Joliot-Curie. [61](#)

IN2P3 Institut national de physique nucléaire et de physique des particules. [34](#), [90](#), [96](#)

IPEV Institut polaire français Paul-Emile Victor. [33](#)

IRFU Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers. [96](#)

ISW Sachs–Wolfe intégré. [23](#)

JAXA Japan Aerospace Exploration Agency. [40](#), [157](#)

JCMT James Clerk Maxwell Telescope. [38](#)

KID Kinetic Inductance Detectors. [xii](#), [41](#), [50](#), [51](#), [71](#), [90](#), [133](#)

LEA Laboratoire d'Electronique et Automatisation. [89](#), [90](#)

LEBT Low Energy Beam Transport line. [84](#)

LEKID Lumped Element Kinetic Inductance Detector. [27](#), [71](#)

LFT Low Frequency Telescope. [40](#)

LIC Line Integral Convolution. [157](#)

LINAC LINear Accelerator. [xiii](#), [85](#), [86](#), [88](#), [89](#), [91–101](#), [104–107](#), [109](#), [111](#), [114](#), [115](#)

LiteBird Light satellite for the studies of B-mode polarization and Inflation from cosmic background Radiation Detection. [37](#)

LLRF Low Level RF. [100](#), [103](#)

LPCVD Low Pressure Chemical Vapor Deposition. [61](#)

LPCVD Low Pressure Chemical Vapor Deposition. [59](#), [157](#)

LQ Linéaire Quadratique. [107](#), [108](#), [110](#)

MBI Millimeter-wave Bolometric Interferometer. [30](#), [31](#)

MFT Medium Frequency Telescope. [40](#)

MKID Microwave Kinetic Inductance Detector. [27](#)

MPA Multichroic Planar Antenna. [41](#)

MPC Model (Based) Predictive Controller. [107](#)

NASA National Aeronautics and Space Administration. [40](#)

NEP Noise Equivalent Power. [41](#), [50](#)

NFS Neutron For Science. [85](#), [134](#)

NGCryo Next Generation Cryogenic Systems. [90](#)

NGTACryo Next Generation ThermoAcoustic Cryogenics. [91](#), [100](#), [134](#)

P&ID Piping and Instrumentation Diagram. [86](#), [93](#), [94](#)

PECVD Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition. [59](#), [157](#)

PI Project Investigator. [24](#)

PI Proportionnelle Intégrale. [98](#), [102](#), [107](#), [108](#), [110](#)

PLC Programmable Logic Controller. [92](#)

PolarBear Polarization B-Mode Experiment. [25](#)

POMT Planar Ortho-Mode Transducer. [41](#)

ppm parties par million. [93](#)

PRISM Polarized Radiation Imaging and Spectroscopy Mission. [40](#)

PTFE Polytétrafluoroéthylène. [36](#)

QUBIC Q and U Bolometric Interferometer for Cosmology. [xii](#), [30](#), [34](#), [60–63](#)

RFQ Radio Frequency Quadupole. [84](#)

RGA Report Général d'Alarmes). [95](#)

RIE Reactive Ion Etching. [59](#), [157](#)

S3 Super Separator Spectrometer. [85](#), [87](#), [95](#)

SAF Système d'Accord en Fréquence. [103](#), [104](#)

SDD Surface de Dernière Diffusion. [19](#)

S0 Simons Observatory. [39](#)

SPIRAL2 Système de Production d'Ions RAdioactifs en Ligne de 2e génération. [xiii](#), [xv](#), [84–88](#), [90–101](#), [103](#), [104](#), [106](#), [114](#), [115](#), [134](#), [147](#)

SZ Sunyaev-Zel'dovich. [23](#), [33](#)

TAO Thermoacoustic oscillations. [99](#)

TEM Transverse Electrique Magnétique. [51](#), [52](#)

TES Transition Edge Sensor. [xii](#), [27](#), [31](#), [32](#), [41](#), [50](#), [51](#), [60](#), [71](#), [133](#)

TQC Tel Que Construit. [86](#)

VNA Vectorial Network Analyser. [53](#), [56](#)

VPM Variable-delay Polarisation Modulator. [27](#)

WMAP Wilkinson Microwave Anisotropy Probe. [33](#), [40](#)