

R&D SUPRACONDUCTIVITE EN REGIME RF A L'IN2P3

Les activités de R&D à l'IN2P3 sur la supraconductivité en régime RF (SRF) ont commencé dans le cadre du projet MACSE dans les années 1986. Le but était de construire, en collaboration avec le CEA un cryomodule supraconducteur afin de comprendre la physique de la supraconductivité en régime RF et d'acquérir l'ensemble des compétences nécessaires à la construction et l'opération d'un accélérateur supraconducteur. La R&D a continué ensuite dans le cadre du projet TTF (Tesla Test Facility) en collaboration avec DESY avec la prise en charge de l'étude et la construction de l'injecteur supraconducteur. Les progrès effectués en termes de performance des cavités supraconductrices convainquirent rapidement que la SRF ouvrait de nouvelles possibilités d'accélération encore de nos jours inconcevables avec la technologie chaude (structure cuivre). En effet, il est désormais possible d'accélérer des faisceaux en continu (CW) de plusieurs milliampères et ce à des champs accélérateurs de plusieurs MV/m.

Le savoir-faire de l'IN2P3 a permis de prendre en charge exclusivement la conception des modules accélérateurs supraconducteurs haute énergie pour Spiral2. L'IN2P3 est maintenant internationalement reconnue en termes de réalisations de modules supraconducteurs et coupleurs étant investis dans les principaux projets internationaux (XFEL, ESS, MYRRHA).

L'activité de R&D des trois laboratoires investis (IPNO, LAL et LPSC) a toujours été maintenue au maximum afin de répondre aux exigences de plus en plus poussées de ces projets accélérateurs.

Il est cependant à noter que certaines thématiques de R&D sont aujourd'hui dormantes faute de moyen humain. La pression des projets étant telle que le temps imparti à la R&D des personnels a été significativement réduite. Les projets accélérateurs sont pour la R&D un moteur en termes de moyens techniques et financiers, mais un « gouffre » au niveau ressources humaines.

7 programmes de R&D ont été répertoriés et sont actuellement financés par l'IN2P3 :

Laboratoire	Programme	Porteur	Financement IN2P3 2016	Moyen Humain (CR, IR) total 2016
IPNO	CAVSUP	G. Olry (IR)	59 k€	1.3 FTE
	COUPLEUR	J. Lesrel (IR)	25 k€	1.3 FTE
	ECOMI	G. Martinet (CR)	19 k€	1 FTE
	MYRRHA	D. Longuevergne (CR)	42 k€	0.4 FTE
	PICASU	D. Longuevergne (CR)	20 k€	0.2 FTE
LAL	COUPLEUR	W. Kaabi (IR)	X	2.5 FTE
LPSC	MULTIPAC	Y. Gomez Martinez (IR)	7.5 k€	0.5 FTE
TOTAL			172.5 k€	7.2 FTE

La supraconductivité en régime radiofréquence (SRF) englobe essentiellement trois éléments dont le principal est la cavité accélératrice supraconductrice et les deux autres éléments indissociables qui sont le coupleur de puissance (CP) et le système d'accord à

froid (SAF). La R&D SRF, pour être complète, doit donc porter sur ces trois éléments afin de répondre à l'ensemble des exigences des nouveaux projets accélérateurs.

Nous pouvons regrouper l'ensemble des thématiques de R&D de la communauté internationale SRF en trois axes avec pour chacun le détail des moyens déployés à l'IN2P3 :

- Fort Gradient : augmentation du gradient atteignable dans les cavités dans le but de la réduction de la taille et du coût de l'accélérateur. Cet axe concerne uniquement la cavité accélératrice.
 - Optimisation de la conception cavité afin de réduire les rapports des champs de surface maximaux électriques et magnétiques par rapport au champ accélérateur (Epic/Eacc et Bpic/Eacc).
Programme : CAVSUP
 - Amélioration de l'état de surface notamment en développant une technique de polissage alternatif (mécanique) aux traitements chimiques standards (chimie BCP, électro-polissage).
Programme : PICASU
 - Développement de diagnostics pour la caractérisation des dégradations en champ (détection quench, diodes X)
Programme : CAVSUP
 - R&D multi-couche matériaux alternatifs. Développement d'un banc de dépôt et d'une cavité de test pour échantillons.
Programme : ECOMI

- Haut Qo : diminution de la résistance de surface dans le but de réduire le coût de l'accélérateur (usine cryogénique) et par conséquent augmentation du champ accélérateur nominal
 - Optimisation de la conception cavité afin d'augmenter le facteur géométrique (G)
 - Optimisation du blindage magnétique (blindage froid, double couche)
 - Etude et adaptation des traitements thermiques (étuvage 120°C, dégazage 600-800°C, recuit à des températures supérieures à 1100°C, dopage azote)
 - Amélioration des procédures de mise en froid (expulsion Meissner, effet Seebeck, effet 100K)
Programme : CAVSUP, MYRRHA

- Fiabilisation cavité en configuration machine : conservation des performances de la cavité équipée de son coupleur de puissance et de son SAF dans un environnement cryogénique non optimal, augmentation du taux de réussite (diminution des risques d'échec lors de la fabrication et préparation des surfaces pour atteindre les spécifications du projet)
 - Optimisation de la conception cavité et coupleur en intégrant une phase de simulation des barrières de multipacting afin de réduire voire d'annuler les barrières potentiellement gênantes pour le bon fonctionnement de la cavité ou du coupleur.
Programmes : MULTIPAC, COUPLEUR LAL et IPNO, MYRRHA
 - Optimisation de la conception des coupleurs de puissance pour diminuer leur coût de fabrication et leur impact sur les performances des cavités accélératrices
Programmes : COUPLEUR IPNO

- Optimisation de la conception des SAF afin de diminuer la dégradation des performances des cavités accélératrices et améliorer leur capacité de régulation à des régimes cavités intenses

Programme : CAVSUP

- Amélioration des procédures de préparation des surfaces et de montage avec les contraintes configuration machine (cryomodule) pour les cavités et les coupleurs de puissance.

Programme : CAVSUP, COUPLEUR LAL

Tous ces programmes de R&D reposent sur les soutiens technique et humain (savoir faire) indispensables des plateformes dites de conditionnement (SUPRATECH et COUPLEUR LAL) et de caractérisation (PANAMA).

Ceux-ci profitent également du dynamisme apporté par les grands projets accélérateurs ainsi que du financement total ou partiel par ces derniers d'équipements lourds comme par exemple le liquéfacteur d'hélium de l'IPNO (Spiral2), le four pour le traitement thermique des cavités (ESS).

Pour plus de clarté et vue l'étendu et le nombre de programmes de R&D touchant la supraconductivité en régime RF, chaque programme financé en partie ou totalement par l'IN2P3 sera détaillé suivant le modèle demandé (présentation orientation projet).

En annexe, un tableau récapitule synthétiquement l'étendue de la R&D SRF dans le monde. La contribution de l'IN2P3 a été mise en valeur ainsi que la position des différents programmes cités ci-dessus. On pourra constater que malheureusement aucun effort de R&D n'est investi dans le dépôt en couche mince de matériaux supraconducteurs alternatifs (Nb₃Sn, MgB₂, ...)

A. CAVSUP (IPNO)

1. Description du projet R&D en cours

La technologie des cavités RadioFréquence (RF) supraconductrices en Niobium massif, permet l'obtention, pour les cavités à $\beta=v/c=1$ type ILC, d'un gradient accélérateur de 52.3 MV/m, proche de la valeur limite théorique (52.8 MV/m). Cette limite est toutefois loin d'être atteinte pour les cavités dites «medium ou bas β » (i.e. $\beta < 0.5$) telles que les résonateurs quart d'onde (QWR) ou Spoke qui sont utilisés pour SPIRAL2, ESS, MYRRHA ou EURISOL, projets dans lesquels l'IPNO est très fortement impliqué. L'amélioration des performances intrinsèques et fonctionnelles des cavités RF, de la fiabilité, conjointement à la réduction des coûts de fabrication/exploitation des accélérateurs constituent les 3 objectifs majeurs de la R&D CAVSUP. Cette R&D a bénéficié, depuis de nombreuses années, d'importants investissements financiers et humains de la part de l'IN2P3, et comprend 2 axes de recherche:

- 1) R&D et adaptation aux cavités « bas β » des techniques de traitement des matériaux: traitement thermique sous vide, dopage azote, étuvage, et de méthodes de caractérisations ou d'outils de diagnostic (détection de quench, détection de rayons X) permettant de mieux comprendre les phénomènes qui limitent les performances et de qualifier l'effet des traitements sur les propriétés (résistance de surface, propriétés thermo-physiques, électriques,...),
- 2) Etude et optimisation des composants à fort impact sur les performances fonctionnelles des cavités (blindages magnétiques, système d'accord en fréquence).

Le programme scientifique de la R&D CAVSUP associé aux 2 axes mentionnés ci-dessus, se décline en 4 thématiques :

- a) Développement d'outils de diagnostic (capteur et électronique associée) pour la localisation de défauts de surface liés à un problème de matériau (inclusions, défaut cristallin) ou de nettoyage de la surface (pollution, poussière, ...).
 - Détection de quench : localisation par triangulation de la zone de quench grâce à des capteurs sensibles à l'onde de deuxième son dans l'hélium superfluide (onde de chaleur).
 - Détection de rayons X : quantification et mise en place des moyens pour la cartographie du rayonnement X généré par freinage Brehmsstrahlung des électrons extraits de la surface par les champs électriques de surface.
- b) R&D et adaptation aux cavités « bas β » des traitements thermiques sous vide :
 - Etuvage à 120°C : ce traitement permet une amélioration notable de la résistance de surface aux champs nominaux (cf cavités Spiral2 $\beta=0.12$).
 - Dégazage 600°C-800°C : ce traitement permet de dégazer les éléments légers et prioritairement l'hydrogène piégé dans le Niobium qui est responsable de la dégradation de la résistance de surface lors de la mise en froid (effet 100K).
 - Recuit >1000°C : ce traitement n'est pas couramment effectué, contrairement aux deux précédents qui sont utilisés régulièrement dans les procédures de préparation des cavités. Il permet une re-cristallisation et purification du matériau (titanification).
 - Dopage azote: ce traitement permet de diminuer significativement la résistance de surface en polluant de manière contrôlée le matériau afin de tendre vers un optimum de la résistance BCS (réduction du libre parcours moyen des électrons normaux).

- c) Optimisation et caractérisation de l'environnement magnétique des cavités accélératrices.
- Développement de blindages froids en double couche installés au contact de la cavité (cf cavités Spiral2 $\beta=0.12$). Contrairement aux blindages chauds installés sur les enceintes à vide, les blindages froids font corps avec la cavité et permettent ainsi de la protéger non seulement du champ magnétique terrestre mais également de la pollution magnétique de pièces dans son voisinage.
 - Caractérisation et mise en place de moyen pour la cartographie des champs magnétiques de l'ordre de quelques μT lors de la mise en froid et à froid à l'aide de sondes magnétiques « fluxgate ».
- d) Etudes sur les systèmes d'accord: modélisation et simulation numérique, études expérimentales du comportement électro-acoustique des cavités, caractérisation des actionneurs piézoélectriques. Afin d'améliorer la stabilité en fréquence des cavités supraconductrices, plusieurs pistes de R&D ont été choisies afin d'améliorer la performance des SAF (Système d'Accord à Froid) :
- La caractérisation électromécanique à basses températures d'actionneurs piézoélectriques est nécessaire à leur utilisation optimale sur les SAF. Ceux-ci permettent un ajustement de la fréquence de la cavité afin de compenser les perturbations hautes fréquences ($< 1 \text{ kHz}$) causées notamment par les forces de Lorentz en régime RF pulsé et les microphonies (excitation des modes de résonance mécanique de la cavité par les vibrations de son environnement). Une évaluation de leur critère de durée de vie apparaît comme vitale sur certains projets d'ADS. Un banc de test cryogénique a été développé pour mesurer les effets de vieillissement pour des fonctionnements de longue durée.
 - Les SAF par insertion d'un plongeur supraconducteur représentent une alternative intéressante comparée au SAF par déformation sur les cavités de type quart d'onde et Spoke.

Du fait du caractère multi-thématique de ce projet CAVSUP, une description exhaustive est complexe dans le format demandé. Ainsi, pour chaque point suivant (historique, état de l'art, réalisation techniques), la totalité des sous thématiques n'apparaît pas nécessairement afin de mettre en valeur les points les plus pertinents.

2. Historique, calendrier

En ce qui concerne les capteurs dédiés à la détection et localisation de quenches, ceux-ci constituent un puissant outil de diagnostic pour comprendre et analyser ces phénomènes. Les détecteurs de quench capacitifs, appelés OST (Oscillating Superleak Transducer), basés sur la mesure du deuxième son (onde de température) dans l'hélium superfluide (He II), ont été récemment (2008) utilisés avec succès dans différents laboratoires (Cornell, Fermilab, ANL, Desy). L'IPNO, qui historiquement (années 1990) a fait beaucoup de R&D en thermométrie de surface (18 publications dans des revues et conférences, un brevet, réalisations de thermomètres de surface pour différents laboratoires (CEA, CERN, DESY) a un fort potentiel pour le développement de nouveaux outils de diagnostic: un programme de R&D sur les OST a démarré à l'IPNO en 2013. Le soutien récurrent de l'IN2P3 et le travail coordonné des personnels de l'IPNO (DA, D2I) qui ont contribué à la thématique détection de quench, ont permis de réaliser des avancées importantes.

Les productions scientifiques (2013-2016) sur la détection de quench sont: 3 articles (SRF2013, SRF2015, ICEC26), 2 présentations orales à des conférences internationales (EUCAS 2015 et ICEC26).

En ce qui concerne la R&D des traitements thermiques, celle-ci démarre cette année suite à la mise en route du four dédié aux traitements thermiques des cavités supraconductrices en Niobium massif. Ce four a été financé par le projet ESS par la nécessité de procéder au traitement à 600°C pour le dégazage de l'hydrogène pour la série de cavités Spoke. Dans un premier temps, des traitements thermiques seront effectués sur échantillons et cavité mono-cellule 1.3 GHz afin de s'assurer de la qualité du four. Pour ceci, les capacités d'analyses de la plateforme PANAMA seront d'un soutien inestimable (DRX rasant, SIMS) ainsi que les bancs de mesure de pureté de matériau (RRR) et de caractérisation de la résistance de surface sous champ RF (ECOMI) actuellement en opération à l'IPNO. Dans un second temps, des tests de dégazage à 600°C sur des cavités prototypes disponibles à l'IPNO (SPIRAL2, MYRTE, ESS) seront effectués afin de mettre en place une procédure de traitement optimale en vue du traitement des cavités ESS de série en 2017-2018. Il s'en suivra, selon les difficultés rencontrées, des tests préliminaires de recuit à des températures supérieures à 1300°C ainsi que des tests de dopage azote.

Pour ce qui est de la R&D des blindages magnétiques, celle-ci a été initiée durant la phase de prototypage Spiral2. Pour des soucis de compacité des modules accélérateurs, l'installation d'un blindage chaud sur l'enceinte à vide était trop contraignante et complexe. Il a été décidé de prendre cette opportunité pour proposer un blindage à froid directement autour de la cavité. Des industriels proposant déjà des matériaux à forte perméabilité magnétique à des températures cryogéniques (Cryoperm®, Cryophi® ou A4K®), il a fallu optimiser la conception du blindage pour répondre aux nouvelles contraintes de ces matériaux. Le blindage finalement retenu était composé de deux couches de blindage prenant en sandwich le circuit de refroidissement hélium. Il a été montré qu'un pré-refroidissement du blindage améliorerait significativement son efficacité du fait de la dépendance en température de sa perméabilité magnétique. Les très bons résultats sur Spiral2 ont permis de s'orienter vers le même choix technologique pour les cryomodules ESS.

Finalement, concernant les systèmes d'accord, les travaux de R&D sur les actionneurs piézo-électriques ont débuté avec le programme CARE (2005) et se poursuivent depuis deux ans en raison d'une demande accrue de la maîtrise de ce type d'actionneur à basses températures, notamment sur plusieurs projets accélérateurs (XFEL, ESS, Myrrha). L'idée premièrement développée à l'IPN à l'occasion du projet SpiraL2 (2006), a révélé les forces et faiblesses de cette technique (cf. publications ci-dessous). Depuis lors, des études ont été menées pour l'optimisation et la réalisation de tels systèmes mais la nécessité de fabriquer une cavité de test dédiée paraît incontournable afin de continuer la R&D dans cette voie ; cette R&D est de ce fait dormante pour le moment.

3. Etat de l'art

En ce qui concerne les études sur le quench, celles-ci montrent beaucoup d'intérêt pour la communauté scientifique tant sur le plan des études fondamentales (mécanismes de quench, mécanismes de transport de chaleur dans l'hélium superfluide soumis des flux de chaleur pulsés de forte intensités) que sur le plan des applications (amélioration des performances des cavités RF supraconductrices et de la maîtrise des techniques de

fabrication, de préparation de traitement des cavités RF supraconductrices). En témoigne les nombreux articles et communications à des conférences internationales. Au niveau national, les deux principaux laboratoires (IPNO et IRFU/CEA), qui mènent une activité de R&D sur les cavités RF supraconductrices, jouent un rôle moteur sur ce thème et l'IPNO en particulier a été sollicité pour une collaboration sur ce thème par deux grands laboratoires européens à savoir le CERN et DESY. Enfin, outre atlantique de nombreux instituts (Cornell, Fermilab, ANL, KEK par exemple) ont une activité importante sur la thématique.

D'autres applications, peuvent enfin être envisagées avec le résonateur de 2^{ème} son que nous avons développé : 1) en métrologie via une collaboration avec LNE, 2) détections des précurseurs de quench sur les aimants supraconducteurs (sauts de flux, mouvements des conducteurs), 3) études fondamentales sur l'hélium superfluide où l'IPNO est l'un des rares laboratoires français ayant de l'expertise.

Des collaborations avec le CERN sont envisagées dans le cadre de Tesla Technology Collaboration ou de projets européens.

En ce qui concerne les traitements thermiques, cette R&D est loin d'être nouvelle en ce qui concerne les cavités elliptiques à 1.3 GHz et plus récemment les structures « bas β » pour le projet FRIB. En effet, les traitements thermiques types étuvage et dégazage sont effectués de manière routinière étant inclus dans les procédures de traitement de base des surfaces RF.

Bien que ces traitements soient requis pour les cavités elliptiques à 1.3 GHz, leur nécessité pour d'autres types de structures accélératrices (quart d'onde, spoke) n'a pas été prouvée. Pour exemple, les cavités quart d'onde pour Spiral2 non pas été dégazées à 600°C mais ont subies un traitement à 120°C, qui a permis de réduire d'un facteur deux les pertes RF. Les premiers résultats des prototypes ESS montrent qu'un dégazage à 600°C est nécessaire mais le traitement à 120°C n'est pour le moment pas une nécessité étant donné que celles-ci ont déjà des performances bien au-delà des spécifications du projet.

Le traitement par dopage azote est quant à lui bien plus récent car a été découvert en 2012 à Fermilab. Depuis des moyens considérables sont investis dans cette voie aux Etats-Unis (Fermilab, JLab, Cornell) afin de répondre aux exigences du projet LCLS-2.

Ainsi il est à noter que les traitements thermiques type recuit et dopage sur des cavités « bas β » seront des travaux très originaux car encore très peu voir pas du tout explorés.

Concernant les SAF par déformation, de nombreuses améliorations ont déjà été obtenues comme par exemples : réduction de la masse et de l'encombrement du système, traitement de surface spécifique des liaisons mobiles, simplification de la fabrication, diminution des coûts. Il reste encore des axes de développements à explorer, en particulier pour optimiser le transfert de mouvement des actionneurs piézoélectrique à la cavité, et sur l'évaluation de la sureté de fonctionnement du système pour des longues durée d'utilisation continue qui apparait comme étant un critère de première importance sur des projets comme MYRRHA.

Les SAF par plongeur affichent un fort potentiel pour une utilisation sur des cavités quart d'onde et spoke comme a pu le montrer le retour d'expérience du projet Spiral2. Cependant des efforts supplémentaires de R&D doivent être réalisés pour en tirer un réel avantage sur les aspects de fiabilité et de coûts. D'autres laboratoires mènent également des efforts dans ce sens comme par exemple : CEA Saclay, ESS Bilbao, IAP Frankfurt.

Spiral2 est le seul accélérateur équipé de nos jours d'un système à plongeur mobile fonctionnel. IAP Frankfurt sont toujours au stade de prototypage dans le cadre de leur

développement de structures accélératrices supraconductrices type CH pour un accélérateur d'ion lourds à GSI.

4. Ressources

Ressources financières

Nom Projet	2014	2015	2016	2017	2018
Source de financement IN2P3	75 k€	70 k€	59 k€		

Ressources humaines

Nom Projet	Labo	Corps	2014	2015	2016	2017	2018
Guillaume OLRÉ	IPNO	IR	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
David Longuevergne	IPNO	CR	0.5	0.2	0.2	0.1	0.1
Nicolas Gandolfo	IPNO	IR	0.1	0.3	0.4	0.3	0.3
Mohammed Fouaidy	IPNO	IR	0.6	0.2	0.2	0.1	0.1
Hervé Saugnac	IPNO	IR	--	--	0.3	0.2	0.2
Patricia Duchesne	IPNO	IR	0.15	0.1	0.1	--	--

5. Réalisations techniques

Afin d'aller plus loin dans la compréhension des phénomènes de dégradation de la résistance de surface avec le champ accélérateur et de l'optimisation des traitements thermiques et des systèmes annexes (SAF, coupleur de puissance, blindage magnétique), il est envisagé de concevoir une cavité de test multi-mode dont la géométrie ne serait non pas optimisée pour l'accélération mais pour ces études de R&D. Toute la R&D faite aujourd'hui repose sur des cavités prototypes construites dans le cadre de projets accélérateurs et non de R&D qui sont de ce fait complexes à traiter et chers à tester. Cette étude de conception sera menée par un doctorant, une demande de bourse sera faite pour l'année prochaine.

6. Auto-analyse

Forces :

- équipe de recherche reconnue et intégrée dans les collaborations nationales (P2iO) mais surtout internationales (CARE, EUCARD, EUROTRANS, CDT, MYRTE, EURISOL, ENSAR2...),
- les thématiques de recherche ont un champ d'application large avec des programmes scientifiques bien définis.
- les recherches s'appuient en grand partie sur les plateformes technologiques Supratech et Panama pleinement opérationnelles,
- un soutien continu de la part de l'IN2P3 (AP chaque année).

Faiblesses :

- La difficulté de recrutement d'étudiant en thèse et en post-doc,

- Le coût très élevé des composants prototypes nécessaires pour mener à bien les expériences : une cavité=250k€, un SAF=25k€, un blindage=20k€ et donc la nécessité de trouver des sources de financement additionnelles.

Opportunités :

- Le projet Spiral2 a bénéficié directement de deux avancées technologiques majeures et très novatrices issues du programme de R&D CAVSUP : le système d'accord par insertion d'un plongeur et le blindage à froid activement refroidi à double couche.
- L'activité de R&D CAVSUP tire bénéfice de la participation de l'IPN : à la construction d'accélérateurs supraconducteurs (SPIRAL2, ESS) ainsi qu'aux études des futurs accélérateurs (SPL, MYRRHA, FCC, ILC)
- De la même façon la R&D CAVSUP tire bénéfice des plateformes SUPRATECH et PANAMA et des bancs de caractérisation à froid de la résistance bulk (RRR) et de la résistance de surface sous champ RF ECOMI).

Menaces :

- La diminution lente et continue des RH (tous corps confondus) pour la R&D avec un accent principalement sur le corps des techniciens pour le soutien aux expériences.

7. Publications et thèses réalisées

- "An innovative tuning system for superconducting accelerating cavities", D. Longuevergne, N. Gandolfo, G. Olry, H. Sagnac, S. Blivet, et al. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Elsevier, 2014, 749, pp.7-13.
- "Troubleshooting and performances of type-B Spiral2 series cryomodule" D. Longuevergne, F. Chatelet, C. Commeaux, N. Gandolfo, D. Grolet, C. Joly, J. Lesrel, R. Martret, G. Michel, G. Olry, L. Renard, A. Stephen, P. Szott, (2014), Proceedings of the 27th Linear Accelerator Conference, LINAC14, Geneve.
- "Fast tuner performance for a double spoke cavity" , N. Gandolfo, et al., Proceedings of the 27th Linear accelerator conference (LINAC14).
- "Detectors sensing second sound events induced by thermal quenches of srf cavities in He 2" , Proceedings of the 17th International Conference on RF Superconductivity (SRF2015).
- "Surface resistance study on low frequency (low beta) cavities", D. Longuevergne, F. Chatelet, G. Michel, G. Olry, F. Rabehasy, L. Renard, Proceedings of the 17th International Conference on RF Superconductivity (SRF2015).

B. COUPLEUR (IPNO)

1. Description du projet « R&D coupleur »

Dans le cadre d'une thèse (bourse CIFRE) avec comme partenaire la société THALES, nous avons signé un accord de collaboration de R&D sur les coupleurs.

Les projets d'accélérateurs de protons de forte intensité se multiplient en raison de la grande diversité d'applications qu'offre ce type de machine. Ces accélérateurs de nouvelle génération ont en commun d'utiliser des structures supraconductrices, les seules présentant un potentiel d'accélération en continu ou avec un cycle utile élevé.

Un des composants clé de ces machines est le coupleur de puissance, chargé de transmettre la puissance RF produite par la source à la cavité accélératrice supraconductrice. Avec les cavités, les coupleurs de puissance sont particulièrement sollicités et poussés à leurs limites. Objet multi-physique par nature, le coupleur de puissance est non seulement le vecteur de fortes puissances RF, mais également la barrière entre le vide faisceau et la pression atmosphérique des lignes RF, mais aussi l'interface thermique entre le monde extérieur et la cavité refroidie à -269°C .

Au-delà de leur conception, les performances des coupleurs de puissance sont très dépendants des méthodes et procédés de fabrication, eux-mêmes diversifiés et complexes : brasure de céramique, dépôt en couches minces de cuivre, dépôts en couches minces de revêtements anti-multipacting, etc...

La société THALES Electron Devices possède la maîtrise de certains de ces procédés utilisés, et est déjà un référent en matière de coupleurs. L'enjeu industriel est ici d'étendre ce savoir-faire aux spécificités des coupleurs de forte puissance, à la fois par une plus grande maîtrise de ces différents procédés, par l'étude et la compréhension des influences d'un procédé sur l'autre, mais aussi par l'optimisation des coûts en prenant en compte dès la phase de conception les séquences de fabrication.

Nous allons étudier et réaliser deux types de coupleurs, l'un à 704 MHz, l'autre à 352 MHz. Thales prendra en charge les brasures des fenêtres céramiques (4), et l'IPN Orsay aura en charge la fourniture de l'ensemble des pièces de réalisation et des outillages associés, l'IPN prendra également en charge le nettoyage et le conditionnement des coupleurs prototypes réalisés.

Un autre volet de la thèse sera la validation du code de simulation MUSCICC3D (multipactor) développé à l'IPN dans sa version en onde progressive.

2. Historique, calendrier

Le projet a démarré en même temps que la thèse de Florian GESLIN en septembre 2013. Plusieurs études électromagnétiques, mécaniques et thermiques ont été réalisées sur les deux types de coupleurs. Les plans de détails du coupleur 700 MHz ont été réalisés et plusieurs pièces ont été lancées en fabrication. L'optimisation de la fenêtre afin de réduire le nombre de brasures est en cours de finition.

La modification et la validation du code MUSCICC3D en onde progressive ont été réalisées.

La réalisation et les tests en puissance des coupleurs 704 MHz sont prévus pour la fin de l'année 2016.

La réalisation et les tests en puissance des coupleurs 352 MHz sont prévus pour la première moitié de 2017.

3. Etat de l'art

Cette R&D sur les coupleurs somme toute classique permettra non seulement la réalisation de prototypes permettant entre autre de comparer les niveaux de multipactor entre le code MUSCICC3D et les mesures, de valider certain choix technologiques et finalement une optimisation des coûts de production.

4. Ressources

Ressources financières

Lors de la signature de l'accord de collaboration avec THALES le budget total du projet était de 450k€ salaire compris (315 k€ IN2P3 et 135k€ THALES).

La participation de l'IN2P3 étant estimé à 90 k€ hors salaire et infrastructure.

Nom Projet	2014	2015	2016	2017	2018
Source de financement IN2P3	5 k€	28 k€	25 k€		

Ressources humaines

L'IPNO est pour l'instant le seul laboratoire impliqué dans ce projet.

Nom Projet	Labo	Corps	2014	2015	2016	2017	2018
F. Geslin	IPNO	doct	1	1	1	0,25	
J. Lesrel	IPNO	IR	0,2	0,2	0,2	0,3	
M. Chabot	IPNO	DR	0,1	0,1	0,1		

5. Réalisations techniques

Pour la réalisation des deux types de coupleurs, l'un à 704 MHz, l'autre à 352 MHz, Thales prendra en charge les brasures des fenêtres céramiques, et l'IPN Orsay aura en charge la fourniture de l'ensemble des pièces de réalisation et des outillages associés, l'IPN aura en charge le nettoyage et le conditionnement des coupleurs prototypes réalisés. L'IPN possède l'ensemble des infrastructures aussi bien pour le nettoyage (salle blanche) que les sources de puissance nécessaires aux conditionnements. L'IPN étant déjà équipé de cavités de conditionnement, celles-ci seront récupérées et adaptées aux besoins de ce projet.

6. Auto-analyse

Le projet prend du retard à cause de la restructuration de certains services de notre partenaire.

Une demande de prolongation de la thèse de 6 mois est en cours.

C. ECOMI (IPNO)

1. Description du projet R&D en cours

Des efforts majeurs de R&D sont nécessaires afin d'améliorer les performances des matériaux supraconducteurs utilisés en physique des accélérateurs, notamment pour les cavités accélératrices. L'IN2P3 (IPN, CSNSM) et le CEA sont engagés dans l'étude de matériaux nano-composites pouvant remplacer le niobium actuellement utilisé pour les technologies SRF. Des études théoriques ainsi que des résultats préliminaires ont montré que l'utilisation de matériaux supraconducteurs en multicouches pourraient augmenter de manière conséquente les champs accélérateurs accessibles par des cavités accélératrices utilisées sur les accélérateurs linéaires. Mais ce concept n'a pas encore été complètement démontré expérimentalement. Des équipements dédiés sont nécessaires à la fabrication et à l'analyse d'échantillons de ce type afin d'étudier de nouvelles techniques de fabrication et de préparation. La mesure des propriétés magnétiques des échantillons fournit des données essentielles sur leurs propriétés supraconductrices. Le champ magnétique critique, la longueur de cohérence, la profondeur de pénétration de London ainsi que la variation de l'énergie d'appariement des électrons en fonction de la température sont autant de paramètres fondamentaux requis afin de parvenir au développement des technologies dédiées.

Le programme mené à l'IPN a pour but de démontrer et de quantifier l'effet d'assemblage en multicouche de matériaux nano-composites SIS (supra-isolant-supra). Il est ainsi nécessaire de fabriquer des échantillons de bonne qualité permettant une comparaison avec les modèles théoriques. Cette comparaison n'est possible qu'avec un ensemble de caractérisations RF et DC qui sont accessibles soit à l'IN2P3 (IPNO, CSNSM) soit à l'IRFU.

L'objectif principal du projet est de démontrer l'augmentation du champ magnétique critique sur des matériaux supraconducteurs comme le prédit la théorie de A. Gurevich.

Les points clef pour y parvenir sont les suivants :

- Produire des échantillons de bonne qualité de NbN déposé par croissance épitaxiale sur des substrats de MgO et AlN.
- Etudier et développer le procédé afin de fabriquer des échantillons multicouches de NbN/AlN.
- Produire des échantillons multicouches sur des substrats de Niobium et cuivre pour des caractérisations sous champ RF.

La première étape consiste donc à produire des échantillons de référence à l'aide de la technique de croissance épitaxiale. Ceci est possible par l'utilisation et l'amélioration d'un banc de dépôt existant au CSNSM. Financée et soutenue par le Labex P2IO (équipement et personnel) nous sommes en mesure de fabriquer les premières couches. Des matériaux spécifiques doivent être fournis afin de développer le procédé de dépôts de couches de NbN de très bonne qualité. Les effets des conditions de dépôts (température, pression, ...) et du substrat (orientation, rugosité, ...) seront étudiés. Les échantillons seront analysés in situ (RHEED, Auger, ...).

Dans un second temps, le procédé de dépôt de AlN puis de NbN sera étudié afin de déterminer l'impact de dépôts de multicouches sur la qualité des échantillons. Différentes techniques d'analyse seront utilisées (SIMS, RBS, MEB, XPS, ...) afin

d'obtenir une description précise des couches et de leur orientation cristallines. Des mesures magnétiques seront également effectuées à l'aide du système existant au CEA.

Enfin, des caractérisations RF seront réalisées sur les échantillons présentant une structure ainsi que des propriétés supraconductrices correctes. Il faudra ensuite étudier une adaptation du procédé afin d'effectuer des dépôts sur des cavités prototypes. Pour le moment, seuls deux échantillons provenant de l'INAC ont été testés et ont donné des résultats préliminaires encourageant.

Des publications sont prévues sur la réception complète du banc de test RF ainsi que l'analyse complète des tests RF des deux échantillons testés. La mise à niveau du banc de dépôt ayant pris beaucoup plus de temps que prévu initialement, la production des premiers échantillons ne peut débuter que cette année. Enfin, si la thématique est prometteuse quant aux enjeux à moyen et long terme pour la R&D des hauts gradients accélérateurs, nous ne parvenons pas, jusqu'à présent, à trouver des candidats pour une thèse.

2. Historique, calendrier

L'origine de ce projet remonte à la conférence SRF 2007 et la présentation du concept de multicouches par A. Gurevich [1] ainsi que l'utilisation de la technique ALD pour la conception des couches [2]. La rupture potentielle avec les techniques utilisées pour le niobium ouvre des perspectives prometteuses concernant la conception des cavités et des futurs accélérateurs. Il était alors naturel que l'IN2P3 participe à ces avancées notamment avec l'émergence de la physique des accélérateurs en tant que discipline à part entière et les postes de chargé de recherche ouverts. La position de l'IPNO est alors de contribuer à ces avancés en proposant une activité centrée sur notre cœur de métier qui est la caractérisation de cavités supraconductrices. Après une étude préliminaire d'une cavité pour tester des échantillons, une demande de financement pour la réalisation de cet équipement a été formulée avec succès en 2008 à l'IN2P3 mais également au GIS Physique des 2 Infinis (P2I). Ces premières sources de financement ont permis la réalisation d'une cavité de test marquant le point de départ de notre participation à cette activité.

Les premiers tests de réception de la cavité de type pill-box fonctionnant sur les modes TE011 et TE012 ont pu se dérouler en 2010. Soutenu régulièrement par l'IN2P3, le dispositif expérimental a pu atteindre un fonctionnement normal en 2013 après quelques modifications permettant d'améliorer les mesures.

Parallèlement au développement de la cavité de test RF, il a fallu acquérir les compétences sur les matériaux et les techniques de dépôt. Si les évaluations nationales et européennes n'ont pas jugé bon de soutenir pleinement ces activités pour le moment (ANR, Eucard, ...) au regard des projets actuellement proposés dans le domaines des accélérateurs, la création du Labex P2IO nous a permis de fédérer localement l'activité dès 2011 en s'associant avec le CSNSM (fabrication de couches et caractérisation matériaux) et le CEA (magnétométrie et accélérateur).

L'IPNO est porteur de cette thématique et s'appuie sur les compétences locales (CSNSM, IRFU) ainsi que des développements réalisées à l'IN2P3. Nous avons ainsi adapté une source ECR conçues par le LPSC afin de répondre aux conditions UHV nécessaires à la technique MBE pour la nitruration du niobium.

Les 3 verrous majeurs restant à lever sont les suivants :

- la fabrication d'échantillons par la technique MBE. La conception de ce type de dépôts peut être difficile puisque qu'un nombre important de paramètres doivent être fixés afin d'obtenir les couches avec les propriétés recherchées.
- Il faut également parvenir à quantifier l'effet de manière à le comparer avec la théorie. Ceci permettra d'évaluer précisément le gain potentiel de performance pour une cavité.
- Enfin, il faudra trouver une technique de dépôt permettant de recouvrir une cavité entière tout en gardant une qualité le plus proche possible des échantillons modèles obtenus par MBE. La technique de l'ALD et la technique qui semble la plus adaptées pour répondre aux différents critères.

Depuis son lancement, la thématique a été évaluée par le Labex P2IO (dans l'attribution de ressources sous forme d'équipement et d'un contrat post-doctoral). Nous n'avons pas eu de retour à l'issue de la période de financement. Le conseil scientifique du laboratoire a également évalué l'activité en Novembre 2011. Il a classé la thématique comme priorité très importante et a suggéré d'utiliser des dépôts de niobium sur cuivre pour remplacer le niobium massif comme substrat. Ce point est clairement l'objectif pour la fabrication d'une cavité mais nous devons faire des choix quant aux priorités de la thématique en adéquation avec les ressources disponibles.

La réception de la cavité de test RF et les résultats obtenus avec les 2 premiers échantillons ont été publiés [3, 4]. D'autres publications sont parues dans des conférences accélérateurs sans comité de lecture.

[1] A. Gurevich, Enhancement of RF breakdown field of SC by multilayer coating, Appl. Phys.Lett., 88, pp. 012511 (2006).

[2] M. J. Pellin et al., "Initial tests of atomic layer deposition (ALD) coatings for superconducting RF systems," Proceedings of Beijing, China, p. (2007).

[3] C. Z. Antoine et al., Study of nanometric superconducting multilayers for RF field screening applications, Applied Physics Letters, 102, 102603 (2013).

[4] C. Baumier et al., "Multilayers Activities at Saclay / Orsay," Proceedings of Paris, p. 789-793, (2013).

3. Etat de l'art

L'enjeu du remplacement ou de l'amélioration des performances des cavités en niobium massif est très concurrentiel. En effet, l'équipe qui montrera des performances largement améliorées fera référence dans le domaine et les retombées en termes de projets et brevets sont difficilement mesurables. Les principaux laboratoires travaillant sur la thématique des couches minces et des alternatives au niobium massif sont JLab (US), Cornell University (US), INFN Legnaro (IT), le CERN, KEK (JP). Des dispositifs similaires à celui de la cavité RF développée à l'IPN existent à JLab, Cornell et au CERN. Chaque dispositif possède ses spécificités et leurs fréquences différentes d'utilisation offre une complémentarité nécessaire à l'étude des pertes RF sur les matériaux supraconducteurs. Le principal verrou pour ces laboratoires est la conception d'échantillon à tester. Pour cette raison, des matériaux alternatifs au niobium sont étudiés (Nb₃Sn, NbTiN, MgB₂,...) mais pas vraiment d'échantillons de type multicouches SIS. Sur ce point, nous sommes toujours les plus avancés malgré les difficultés rencontrés notamment en terme de ressources humaines (voir partie suivante). L'objectif d'obtenir des échantillons de références testés en régime RF est prévu pour la deuxième moitié de l'année 2017.

4. Ressources

Ressources financières

Au démarrage de l'activité en 2008, le financement du banc de test RF basé sur la cavité pill-box était estimé à 190 keuros. La somme de 100 keuros avait alors été financée par le GIS P2I sur les années 2009-2010. Avec le financement par l'IN2P3 sous forme d'autorisation de programme, l'ensemble du budget a pu être atteint en 2014 hors coûts cryofluides pour effectuer les expériences. Afin de pérenniser l'activité et développer la partie conception des dépôts, la somme de 78 keuros a été attribuée par le Labex P2IO sur la période 2012-2014 (sur 100 keuros demandés). L'argent a été alloué avant la période demandée dans le tableau. Cependant, les reliquats des dépenses y figurent pour la période demandée. Le montant du Labex représente la somme des montants répartis sur les 3 partenaires que sont l'IPNO, le CSNSM et l'IRFU. Environ 75 % du montant a été attribué à l'IN2P3.

Nom Projet	2014	2015	2016	2017	2018
Source de financement IN2P3	15 k€	20 k€	19 k€		
Labex P2IO	18 k€	10 k€	12 k€		

Ressources humaines

Un financement de contrat post doctoral de 2 ans a également été attribué par le P2IO à partir de 2012. Ce dernier a été morcelé en 2 périodes de 12 mois (2012-2013 et 2014-2015). Dans le tableau suivant y figure uniquement le contrat pour la période concernée.

Nom Projet	Labo	Corps	2014	2015	2016	2017	2018
Martinet	IPNO	CR	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9
Fortuna	CSNSM	IR	0.1	0.1	0.1		
Marchand	IPNO	CDD		1			

5. Réalisations techniques

Plusieurs réalisations techniques sont envisagées :

- La première concerne un développement d'une cavité plus adaptées pour les petits échantillons et complémentaire de la première. Toute l'instrumentation étant déjà acquise, il est nécessaire de fabriquer une cavité en niobium massif qui sera réalisée par l'industrie. C'est l'objet de la demande d'autorisation de programme de 2016.
- La deuxième sera la modification d'un banc de dépôt par pulvérisation afin de fabriquer des échantillons plus grands et de quantifier la modification de performance provenant du changement de technique de dépôt s'il y a lieu.
- Enfin, il faudra réaliser une cavité elliptique 1.3 GHz prototype afin de mesurer ses performances. Cette étape sera primordiale dans la validation des réalisations pour un transfert vers les accélérateurs. Des collaborations avec le CERN et l'INFN sont à prévoir pour cette phase. Des pistes locales sont également à l'étude.

Pour toutes ces réalisations et leur mise en œuvre, un fort soutien technique est nécessaire, que ce soit dans la réalisation de plans, les montages de réception et les tests. Sur ce point, il est parfois difficile d'avoir le soutien nécessaire par manque de personnel.

6. Auto-analyse

La thématique des couches minces appliquées aux cavités supraconductrices est un enjeu majeur pour la conception des accélérateurs du futur. C'est ce qui fait la force mais aussi la faiblesse de cette activité. En effet, même si les premiers résultats ont montré une amélioration des performances dans certaines conditions, le gain possible n'est pas encore clairement quantifié expérimentalement. De plus, cette activité est fortement contrainte par les sources de financement ainsi que les compétences techniques et scientifiques nécessaires qui y sont attribuées. Le financement de type ANR n'a toujours pas été obtenu malgré des demandes réitérées. En effet, il est difficile de cibler le bon guichet du fait de l'aspect pluridisciplinaire de l'activité. Même si les matériaux utilisés, les techniques de dépôts ou bien les méthodes de mesure ne sont pas innovantes, c'est bien la mise en commun de ces différents points qui l'est. C'est précisément cet aspect qui présente des difficultés de mise en œuvre au niveau national. Ainsi, nous ne sommes toujours pas parvenus à obtenir des résultats suffisamment visibles qui justifieraient un soutien plus conséquent de l'activité.

7. Publications effectuées

C. Z. Antoine et al., Study of nanometric superconducting multilayers for RF field screening applications, *Applied Physics Letters*, 102, 102603 (2013).

C. Baumier et al., "Multilayers Activities at Saclay / Orsay," *Proceedings of Paris*, p. 789-793, (2013).

D. MYRRHA (IPNO)

1. Description du projet R&D en cours

Le programme R&D SRF MYRRHA s'effectue dans le cadre du projet européen MYRTE (MYRRHA Research and Transmutation Endeavour) du programme. La tâche 10 du « Work-package 2 » est dédiée au test et à l'optimisation des performances de deux prototypes de cavité accélératrices type « Spoke » à 352 MHz. Cette R&D ne se limite pas au simple test à froid des prototypes afin de vérifier que leur performance RF respecte les spécifications du projet MYRRHA, mais vise à atteindre les limites de l'état de l'art en termes de résistance de surface et de champ accélérateur. Pour cela, cette étude s'appuie sur les moyens et les capacités uniques de traitement des surfaces de la plateforme Supratech. En effet, en plus du traitement standard des cavités, qui permettent déjà d'atteindre les spécifications projet, celles-ci seront entre autre traitées thermiquement grâce au four récemment mis en service dédié au traitement sous vide à haute température de cavités accélératrices en Niobium massif.

La publication des résultats sera effectuée à l'occasion de conférences spécialisées comme LINAC2016 fin de cette année et SRF2017 en 2017.

Pour plus de détails sur le projet MYRRHA, se référer au rapport R&D accélérateur pour le projet MYRRHA présenté par Frédéric Bouly (LPSC).

2. Historique, calendrier

Ce projet s'inscrit dans la continuation du projet européen MAX du programme FP7 qui s'est terminé en 2014. Deux prototypes de cavités accélératrices supraconductrices type « Spoke » ont été conçues à l'IPNO et fabriquées. Le programme de R&D actuellement en cours vise à optimiser d'ici fin 2017 les performances de ces cavités à l'aide des installations actuellement en service sur la plateforme Supratech.

3. Etat de l'art

Les traitements thermiques des cavités accélératrices supraconductrices ont été intégrés dans la procédure standard de préparation de celles-ci dans le but de s'affranchir de dégradations importantes. En effet, un traitement thermique entre 600°C et 800 °C sous vide est obligatoire afin d'éviter la dégradation des performances provoquée par la précipitation d'hydruure de Niobium. De plus un traitement à 120°C pendant 48h permet également d'atténuer la chute du facteur de qualité à des champs élevés.

Comme déjà énoncé dans la description du projet CAVSUP, bien que ces traitements soient requis pour les cavités elliptiques à 1.3 GHz, leur nécessité pour d'autres types de structures accélératrices (quart d'onde, spoke) n'a pas été prouvée. Pour exemple, les cavités quart d'onde pour Spiral2 non pas été dégazées à 600°C mais ont subies un traitement à 120°C. Les premiers résultats des prototypes ESS montrent qu'un dégazage à 600°C est nécessaire mais le traitement à 120°C n'est pour le moment pas une nécessité.

Les comportements très différents des différentes structures accélératrices selon leur fréquence de résonance obligent une optimisation et adaptation particulière de chaque traitement thermique.

De plus, plus récemment, il a été découvert qu'en fin d'un traitement thermique à 800°C, si de l'azote gaz est injecté (dopage azote), la résistance de surface peut être

significativement réduite. En contre partie, le champ accélérateur maximal atteignable se voit également abaissé. Ce traitement est notamment très intéressant pour les machines à fort courant (CW) pour lesquelles le champ accélérateur nominal n'est pas très élevé mais les dissipations cryogéniques et donc la résistance de surface doivent être très basses (par exemple : LCLS2 (Linac Coherent Light Source)). L'efficacité de ce traitement a été démontrée pour les cavités à 1.3 GHz, par contre aucune étude n'a été pour l'instant menée pour les structures accélératrices en dessous de 500 MHz.

4. Ressources

Bien que le programme R&D SRF de MYRRHA ait débuté fin 2015 lorsque les 2 prototypes ont été livrés, nous rappellerons dans les ressources financières et humaines les moyens financiers et humains investis pour leur réalisation.

Ressources financières

Nom Projet	2012-2014	2015	2016	2017	2018
Source de financement IN2P3	240 k€	14 k€	42 k€		
MYRTE			7.5 k€	7.5 k€	7.5 k€
MYRRHA (SCK-CEN)	40 k€	X	X	X	X

Ressources humaines

Nom Projet	Labo	Corps	2012-2014	2015	2016	2017	2018
D. Longuevergne (tests)	IPNO	CR	X	X	0.2 FTE	0.2 FTE	0.2 FTE
Y. Gomez Martinez (multipacting)	LPSC	IR	X	0.05 FTE	0.2 FTE		
H. Sagnac (marché +suivi)	IPNO	IR	0.3 FTE	0.1 FTE	0.05 FTE		
G. Olry (conception RF)	IPNO	IR	0.1 FTE	X	X		
P. Duschesne (conception méca)	IPNO	IR	0.2 FTE	X	X		

Ce programme de R&D a un fort besoin en personnel technique pour l'ensemble des préparations des cavités (Chimie BCP, salle blanche, traitement thermique, montage zone de test) soit environ 0.5 homme.mois par expérience.

5. Publications et thèses réalisées

- « The MYRRHA Spoke Cryomodule », H. Sagnac et al., Proceedings of LINAC2014, Geneva, Switzerland, 2014.

E. PICASU (IPNO)

1. Description du projet R&D en cours

Le projet PICASU (Polissage Innovant de CAVités SUPraconductrices) a pour but l'étude d'une technique de polissage mécanique par tribofinition des structures accélératrices supraconductrices.

Les champs électromagnétiques à haute fréquence (de l'ordre de 100 MHz à 1 GHz) en résonance dans de telles structures sont si intenses (de l'ordre de la dizaine de MégaVolts/m) que la moindre imperfection de surface, pollution ou la présence d'une poussière peut potentiellement dégrader significativement les performances de ces cavités voire même les rendre inutilisables. C'est pourquoi il est d'usage d'effectuer après fabrication une abrasion chimique d'une centaine de micromètres puis un rinçage haute pression à l'eau ultra-pure afin d'assurer des performances optimales.

L'abrasion chimique étant la technique dite de « polissage » standard présente de nombreuses limitations. Premièrement, l'utilisation d'acides concentrés est délicate des points de vue sûreté et recyclage et demande donc des installations très onéreuses. Deuxièmement, les rugosités de surface obtenues à l'aide de l'abrasion chimique ne sont que peu voire pas améliorées selon la technique utilisée. En effet, la rugosité de surface d'une cavité après fabrication est de l'ordre d'un micromètre, est du même ordre après traitement chimique BCP (Buffered Chemical Polishing, et est de l'ordre de 100 nanomètres après électro-polissage (non utilisée à l'IPN). Leur principal rôle, à défaut d'améliorer l'état de surface, est donc d'enlever la fine couche de Niobium endommagée lors de la fabrication (environ 150 micromètres) et toute pollution piégée sur la surface. L'intérêt de l'étude et développement d'une technique de polissage mécanique permettrait non seulement de s'affranchir de tous les problèmes de sûreté et recyclage mais également d'améliorer sensiblement l'état de surface (rugosité de l'ordre d'un nanomètre) et donc réduire l'ensemble des dégradations des performances liées à l'état de surface (quench prématurés, émission de champ, ...)

Un financement européen obtenu cette année va permettre de recruter un doctorant spécifiquement sur cette thématique afin de développer le meilleur procédé de polissage adapté aux contraintes particulières des cavités accélératrices supraconductrices. Une production scientifique (publication) sera donc possible dès les premiers tests de caractérisation effectués sous champ RF.

2. Historique, calendrier

Le projet PICASU a débuté en 2013 étant un volet du projet de recherche mis en place à l'IPNO par David Longuevergne, chercheur accélérateur. Ce projet de recherche répond à certaines interrogations de la communauté SRF (supraconductivité en régime RF) à ce moment là, au sujet de l'origine de la dégradation des propriétés supraconductrices du Niobium massif exposé à une onde radiofréquence de très forte amplitude (champs électriques pics de plusieurs dizaines de MV/m et champs magnétiques pics proches du champ magnétique critique du Niobium). La rugosité de la surface était directement mise en cause étant source d'irrégularités provoquant « un effet de pointe » et donc une dégradation prématurée des propriétés supraconductrices. Il était avéré que les cavités supraconductrices traitées par électro-polissage (rugosité de l'ordre de 100 nm) montraient de meilleures performances que celles traitées par BCP, abrasion chimique standard (Rugosité de l'ordre du micron).

Ce projet s'inscrit également dans la volonté de réduire les coûts des préparations des cavités supraconductrices ainsi que d'augmenter les capacités de réparation des cavités

montrant des performances limitées. Il a été en effet démontré que le polissage mécanique a permis la réparation de certains défauts de surface là où les polissages chimiques habituels se montraient inefficaces.

3. Etat de l'art

Cette technique de polissage mécanique est déjà utilisée dans plusieurs laboratoires américains (Fermilab, Jlab, Cornell), allemand (DESY), indien (RRCAT) et japonais (KEK), pour le polissage exclusif de cavités elliptiques. Ces cavités présentant une géométrie de révolution, elles peuvent être aisément polies mécaniquement à l'aide de centrifugeuses à tonneaux. Les résultats obtenus sont très encourageants et montrent que les performances des cavités traitées par ce moyen sont améliorées.

Le but premier du projet PICASU est de développer cette technique de polissage au sein de l'IPNO et de l'IRFU et donc d'améliorer les capacités de conditionnement de surface de la plateforme SUPRATECH dédiée aux cavités accélératrices supraconductrices. Ce projet se veut donc très novateur, car, contrairement aux autres laboratoires étrangers, il s'agira d'appliquer également le polissage mécanique à des cavités de formes plus complexes (cavité de type quart d'onde ou Spoke) ne pouvant être polies par de simples centrifugeuses à tonneaux. Un travail important de développement est nécessaire.

4. Ressources

Le projet PICASU bénéficie d'un soutien non négligeable de la Plateforme Supratech de l'IPNO (chimie de surface BCP) ainsi que depuis 2014 des capacités d'analyses offertes par la plateforme PANAMA (microscope confocal).

Au niveau humain, entre 2013 et 2015, seul un chargé de recherche était impliqué sur le projet avec en soutien un ingénieur d'étude pour certains traitements de surface.

Depuis mars 2015, un stagiaire M2 a été recruté pour 5 mois et se consacre intégralement au projet. Celui-ci continuera à travailler sur le projet en tant que doctorant dédié au projet.

En dehors de l'IN2P3, le projet bénéficie de l'expertise d'un spécialiste matériau de l'IRFU (CEA) ayant une expérience en polissage mécanique d'échantillons.

Ressources financières

Nom Projet	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
AP IN2P3	12.5 k€	30 k€	38 k€	20 k€			
H2020 : ENSAR2	X	X	X	20 k€	52 k€	52 k€	52 k€

Ressources humaines

Nom Projet	Labo	Corps	2013	2014	2015	2016	2017	2018
D. Longuevergne	IPNO	CR		0.2 FTE	0.2 FTE	0.2 FTE		
Etudiant M2	IPNO			X	X	0.4 FTE		
Doctorant	IPNO			X	X	0.25 FTE	1 FTE	1 FTE
C. Antoine	IRFU	Ingénieur						

5. Réalisations techniques

Dans le cadre du projet H2020-ENSAR2, il est prévu l'étude d'un banc de polissage adapté aux géométries complexes qui relèvera de la fabrication interne ou de la sous-traitance en fonction de la technologie choisie ainsi que du financement obtenu.

Si la technique de polissage fournie des résultats au moins aussi bon que les traitements chimiques effectués actuellement à l'IPNO, ce procédé pourra être intégré dans la procédure de préparation des cavités accélératrices supraconductrices.

6. Publications et thèses réalisées

Aucune publication n'a été faite jusqu'à maintenant car le but était de maîtriser la technique de polissage mécanique (essentiellement empirique) sur une machine déjà existante (centrifugeuse satellitaire à axe oblique) et d'arriver à l'état de l'art actuellement obtenu sur échantillon dans les autres laboratoires accélérateurs utilisant cette technique (quelques dizaines de nm). Ceci a permis de comprendre au mieux les différents paramètres impactant significativement la qualité du polissage en termes de rugosité et pollution et de débiter efficacement un programme de R&D visant un procédé de polissage adapté.

7. Auto-analyse

Le polissage mécanique des cavités accélératrices a été une activité en pleine essor ces dernières années spécialement à Fermilab et DESY. Le programme de R&D à Fermilab a été arrêté et est en phase de ralentissement à DESY. Ceci provient de la complexité du développement, de problèmes mécaniques liés aux grandes forces centrifuges auxquelles les structures sont soumises ainsi qu'aux bénéfices finalement relativement limités en termes de coûts et ressources humaines que présente cette technique. De ce fait, le polissage mécanique est très peu soutenu par les projets de construction d'accélérateurs.

F. COUPLEUR (LAL)

1. Description du projet R&D en cours

Les coupleurs de puissance pour cavités supraconductrices sont des objets technologiques relativement complexes de part les différentes fonctions qu'ils doivent assurer. La fonction principale étant la transmission de la puissance électromagnétique d'une source RF à la section accélératrice supraconductrice avec le minimum de perte. A celle-ci s'ajoute le fait qu'un coupleur doit constituer une barrière séparant un milieu sous pression atmosphérique (coté source) d'un milieu sous ultra vide (celui des cavités), ainsi que d'assurer une transition thermique efficace entre un milieu à température cryogénique (coté cavité) et un autre à température ambiante (coté source) en minimisant le transfert thermique vers les cavités lors du fonctionnement. Ces contraintes fonctionnelles engendrent une complexité dans la conception : utilisation de divers matériaux (acier inox, céramique, cuivre, Aluminium, revêtement cuivre, couche mince TiN...); diverses géométries de pièce unitaire à assembler (soufflet, tubes cylindriques/coniques, brides de différentes tailles, céramiques disques/cylindriques...); recourt à différents procédés de fabrication (Brasage, soudure, électro-dépôt, dépôt par évaporation chimique ou pulvérisation cathodique...). Tout cela étant dit, la fabrication d'un coupleur de puissance nécessite, au préalable, une étude globale où la conception mécanique, l'étude thermique et les simulations RF se coordonnent et se complètent. Au LAL nous avons les compétences nécessaires pour réaliser un tel travail. Ceci a été fait dans le cadre de la collaboration TESLA sur divers modèles de coupleurs pour cavités elliptiques (TW60, TTF5 et TTF3) pour enfin développer le design XFEL dont 800 unités seront montées sur les modules de cette machine d'ici fin Juin 2016.

Une autre activité R&D liée aux coupleurs est celle de l'optimisation des procédures de préparation en salle blanche (lavage, assemblage et étuvage), ainsi que d'automatisation de la procédure de conditionnement pour les rendre compatible avec une production de masse. Ce travail a donné lieu à une thèse de doctorat, des publications et des communications dans différentes conférences accélérateurs. De plus, un transfert de connaissance à l'industriel a été effectué avec succès pour les procédures de nettoyage et assemblage en salle blanche dans le cadre de la production à grand échelle de coupleurs pour le projet XFEL, ainsi que pour la procédure de conditionnement ou le LAL a pu réussir le conditionnement de manière constante de 8 à 12 coupleurs chaque semaine dans le cadre du même projet.

Cette expérience unique ainsi que les infrastructures mises en place pour la réaliser ont valu au LAL une reconnaissance internationale, faisant de plus un acteur incontournable pour la participation aux futures machines.

2. Historique, calendrier

Le programme R&D coupleurs au LAL avait commencé il y a une quinzaine d'année dans le cadre de la collaboration TESLA. Des simulations RF, des études thermiques, des adaptations mécaniques ont été effectuées sur différents modèles de coupleurs pour cavités elliptiques. Vient par la suite l'optimisation de la procédure de conditionnement RF sur coupleurs TTF3 pour la machine FLASH (DESY). Tous ces efforts ont été couronnés par le fait d'accorder au LAL la responsabilité de produire et de conditionner les coupleurs XFEL (2010-2016). Fort de cette expérience, le LAL a été contacté par Soleil pour la conception, la production et le conditionnement de coupleurs pour le projet LUCRECE, prototypes pour l'accélérateur LUNEX5 plus tard.

Le LAL est aussi impliqué dans le projet LCLS2 pour le suivi de la production et le contrôle qualité des coupleurs produits en Europe (150 unités).

Autre les coupleurs pour cavités elliptiques, le LAL sera impliqué dans le projet MYRRHA pour le conditionnement de ces coupleurs pour cavité SPOKE.

3. Etat de l'art

Le LAL dispose de la seule infrastructure permettant le conditionnement simultané de 8 coupleurs. Cette infrastructure représente un pilote pouvant être dupliquée pour répondre au besoin de future grande machine tel que le ILC. D'un autre coté, le savoir faire acquis lors du projet XFEL, en terme de suivi industriel et de contrôle de la qualité des coupleurs, notamment le procédé cuivrage, ainsi que l'expérience acquise lors du conditionnement des 800 coupleurs fait du LAL un acteur incontournable pour la construction de futur machine. Dans ce sens, Le LAL a été sollicité par le SLAC pour faire le suivi industriel et le contrôle qualité des coupleurs LCLS2 produits en Europe.

4. Ressources

Le LAL dispose aujourd'hui d'une plateforme technologique dédiée à la préparation et au conditionnement des coupleurs. Elle a été construite en deux temps :

- Depuis une quinzaine d'année environ, le LAL s'est équipée de:

- Une salle blanche dédiée à la fois au lavage des coupleurs dans des bains ultrason (classe ISO6 de 20m²) et à l'assemblage des parties froides de coupleur (classe ISO4 de 8m²).
- Une station RF (modulateur + klystron) délivrant une puissance RF allant jusqu'à 2MW à 1.3 GHz. Le conditionnement RF des paires de coupleurs est piloté automatiquement pouvant permettre le traiter un ou deux paires de coupleur simultanément. Cette station a été délivrée par DESY dans le cadre d'une collaboration entre les deux laboratoires.

Pour les besoins du projet XFEL, le LAL s'est équipé de :

- Une salle blanche de 70m², classe ISO5, dédiée à la préparation et au conditionnement des paires de coupleurs jusqu'à 4 paires (8 coupleurs) simultanément.
- Une station RF (modulateur+ klystron) délivrant une puissance RF allant jusqu'à 5MW à 1.3 GHz. Un logiciel spécialement conçu permet le pilotage de la station et du conditionnement.

Pour les besoins futurs, le LAL aura à s'équiper de source RF en fonctionnement CW à 1.3GHz et 352 MHz.

Ressources financières

Nom Projet	2014	2015	2016	2017	2018
Source de financement IN2P3					

Ressources humaines

Nom Projet	Labo	Corps	2014	2015	2016	2017	2018
XFEL	LAL	6 IR	4 FTE	4 FTE	2 FTE	-	-
LUCRECE	LAL	2-3 IR	-	-	0.5 FTE	0.5 FTE	1 FTE
MYRRHA	LAL IPNO LPSC	2-3 IR	-	-	-	A définir	A définir

5. Réalisations techniques

Pour le projet XFEL, les coupleurs sont fabriqués par deux industriels différents :

- le consortium Thales-RI (France-Allemagne) : 670 unités
- CPI (USA) : 150 unités.

Le LAL a en charge le suivi industriel et le contrôle qualité des coupleurs produits en Europe. Le conditionnement RF de tous les coupleurs est effectué au LAL.

Pour le projet LUCRECE, le LAL se chargera de l'étude et de la conception de deux coupleurs (1.3 GHz, 15 à 20 kW CW). Il est prévu que cette étude serait faite dans le cadre d'une thèse. La fabrication sera assurée par Thales, puis le conditionnement sera assuré par le LAL.

G. MULTIPAC (LPSC)

1. Description du projet R&D en cours

Le projet R&D RF a pour enjeux la compréhension du phénomène dit de multipactor. Le multipactor est un processus résonnant de multiplication d'électrons pouvant apparaître dans une structure autant supraconductrice comme chaud sous vide soumise à un champ électromagnétique. Il s'agit d'une problématique générique et récurrente pour les accélérateurs, qui peut avoir des conséquences graves (quench de cavités, destruction des isolants des coupleurs...). Ce phénomène est encore mal analysé.

Ce projet consiste en la réalisation d'un banc de test, qui comporte une structure coaxiale ajustable qui permettra de travailler à divers niveaux de champ E et sur une gamme de fréquence variable (80 MHz-1 GHz). Des simulations dans le code MUSICC3D (développé par l'IPNO) de cette structure pour chaque configuration (fréquence et champ) seront réalisées.

Des présentations en conférences accélérateurs (PAC, LINAC,...) sont prévues et une publication scientifique est envisagée.

Une fois les premières mesures réalisées et validées, une thèse CIFRE en collaboration avec l'industriel THALES est envisageable.

2. Historique, calendrier

Pendant les essais en puissance des coupleurs et des cryomodules de SPIRAL2, nous avons été confrontés au phénomène de multipactor. Pour mieux comprendre ce phénomène, nous nous sommes engagés, en 2013 au sein du projet européen de R&D accélérateurs MAX (FP6), à en établir un état de l'art. En continuation de MAX, dans le cadre du projet MYRTE, nous sommes en train de réaliser des études du multipactor sur les ensembles coupleur cavités Spoke (352 MHz) du projet MYRRHA. En parallèle, les études de la structure ajustable et résonante ont été réalisées. Les dernières pièces de notre banc de test sont en cours de réalisation et les premières mesures sont attendues mi 2016.

Dans un premier temps, le but est de comparer les valeurs expérimentales, les modèles théoriques et les simulations. Ensuite, nous nous attacherons à comparer les mesures (courant pick up d'électrons) et les résultats des codes (charge/MUSICC3D) et à déterminer les valeurs limites avant dommage. Ces études seront menées pour différents états de surface, niveaux du vide et géométries afin d'en étudier l'influence.

La détermination d'un modèle théorique, plus généraliste que les modèles existants, est aussi envisagée.

3. Etat de l'art

Pour ce travail, le LPSC collabore avec l'IPNO qui a développé le code MUSICC3D utilisé pour nos simulations. Pour cela, l'IPNO a mené une thèse CIFRE avec Thales sur le sujet de la validation d'un nouveau logiciel de simulations tridimensionnelles du Multipactor par le calcul et l'expérimentation (T. Hamelin). Les études étaient effectuées à fréquence fixe.

Le LAL, le CERN et le CEA, ont manifesté leur intérêt pour collaborer à cette thématique. Tous ces laboratoires ont de l'expérience sur ce phénomène multipactor. Le LAL s'intéresse à ce phénomène depuis des années et il a construit une plateforme pour l'étude et la réalisation de dépôts anti - multipactor.

Au niveau international, certaines études existent, par exemple, à Cornell (V. Shemelin) [IPAC2013 : Conditions for existence of 1-and 2-point multipactor in SRF cavities]. Ces études sont complémentaires aux nôtres.

4. Ressources

Les ressources humaines attendront un maximum entre mi 2015 à mi 2016 de : 1 professeur (25%), 1 IR (50%) et un AI (40%).

Au niveau technique, il est envisageable l'utilisation de la salle propre ISO 7 du LPSC (salle de conditionnement de coupleurs de Spiral2 jusqu' 2015) pour le traitement de surface.

Ressources financières

Nom Projet	2014	2015	2016	2017	2018
Source de financement	37	9	7.5	7	7
IN2P3				(besoins)	(besoins)

Ressources humaines (se limiter aux physiciens et ingénieurs).

Nom Projet	Labo	Corps	2014	2015	2016	2017	2018
GOMEZ MARTINEZ	LPSC	IR	0.2	0.4	0.3	tbd	tbd
DE CONTO	LPSC	P	0.1	0.25	0.2	tbd	tbd

5. Réalisations techniques

Le banc de test est en cours de finalisation. Une partie a été sous-traitée (enceinte sous vide, tube multipactor) et une autre partie (pièces d'adaptation et brides de fermeture avec passage 1'5/8EIA) a été réalisée en interne. (Atelier LPSC)

6. Publications et thèses réalisées

- "Design of a RF Device to Study the Multipactor Phenomenon", D. Amorim et al., Proceedings of IPAC2016.
- Présentations aux workshops RFTech (Y. Gómez Martínez) en 2013 et EUCARD/MAX (Y. Gómez Martínez, J.-M. De Conto, F. Bouly) en 2014, financés par l'UE.

ANNEXE 1 : Etendue de la R&D SRF dans le monde

		Fort Gradient	Haut Qo	Fiabilisation Cavité en configuration machine (Coupleur, SAF, ...)
Niobium massif @ 2K @ 1.3 GHz	Limite théorique	229 mT	~9E10	Performance en CV
	Performance maximale	~206 mT (CORNELL) ~166 mT (ANL 72MHz) ~156 mT (IPNO 352 MHz)	~7E10 (dopage N2)	~3E10 (dopage N2) ~160 mT
	Valeur couramment obtenue	~100 mT	~2E10	>110 mT
Matériaux alternatifs en couche mince (MgB2, Nb3Sn) @ 4.2K @ 1.3 GHz	Limite théorique	Nb3Sn : 511 mT MgB2 : 425 mT	Nb3Sn : ~1E11 MgB2 : ~1E15	Dépôt anti-multipacting (TiN) Dépôt anti-émission de champ (AIN)
	Performance maximale	Nb3Sn : < 70 mT MgB2 : pas de cavité	Nb3Sn : 2E10	
	Valeur couramment obtenue	X	X	
Multi-couches (SIS)	Limite théorique	?? > 1 T	Au minimum Qo à 4.2K équivalent au Qo du Nb massif à 2K	X
	Performance maximale	X	X	X
	Valeur couramment obtenue	X	X	X

 R&D soutenue par IN2P3	 R&D soutenue par Projets (Spiral2, ESS, MYRRHA, XFEL)	 R&D non soutenue	 IPNO
			 LPSC
			 LAL